



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RENATA DE ARAÚJO BRAGA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE NORMAS E CÓDIGOS-MODELOS PARA O  
DIMENSIONAMENTO DE VIGAS-PAREDE POR MEIO DO MÉTODO DE BIELAS  
E TIRANTES**

**FORTALEZA  
2026**

RENATA DE ARAÚJO BRAGA

ANÁLISE COMPARATIVA DE NORMAS E CÓDIGOS-MODELOS PARA O  
DIMENSIONAMENTO DE VIGAS-PAREDE POR MEIO DO MÉTODO DE BIELAS E  
TIRANTES

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque

FORTALEZA  
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B795a Braga, Renata.

Análise comparativa de normas e códigos-modelos para o dimensionamento de vigas-parede por meio do método de bielas e tirantes / Renata Braga. – 2026.

82 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque.

1. Vigas-parede. 2. Método de bielas e tirantes. 3. Referências técnicas. I. Título.

CDD 620

---

RENATA DE ARAÚJO BRAGA

ANÁLISE COMPARATIVA DE NORMAS E CÓDIGOS-MODELOS PARA O  
DIMENSIONAMENTO DE VIGAS-PAREDE POR MEIO DO MÉTODO DE BIELAS E  
TIRANTES

Monografia apresentada ao Curso de Graduação  
em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia  
da Universidade Federal do Ceará, como requi-  
sito parcial à obtenção do título de Engenheira  
Civil.

Aprovado em 13 de Janeiro de 2026.

BANCA AVALIADORA

---

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Elias Saraiva Barroso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Ma. Luana Andreza Moura Brock  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Marisete Dantas de Aquino  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre comigo, me guiando e me dando força em todos os momentos, iluminando meus passos ao longo de toda essa trajetória.

Sou muito grata à minha mãe, Sônia, por ser minha base em todos os momentos, pelo amor, cuidado e dedicação, por apoiar minhas escolhas, incentivar meus estudos e acreditar no meu potencial desde sempre. Obrigada por nunca medir esforços para buscar o melhor para mim e para minha irmã, Rebecca, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, como parceira nos estudos e acima de tudo, como uma grande irmã.

Agradeço também à Joyce e ao Kalil por serem minha família de coração e por todo o apoio, incentivo e confiança ao longo dessa caminhada, sempre acreditando que eu conseguia concluir mais essa etapa tão importante da minha vida.

Às minhas amigas Vitória e Letícia, que desde o início da faculdade caminham comigo e se tornaram muito mais do que colegas de curso. Construímos uma amizade verdadeira, marcada por parceria, apoio, desafios e muitos momentos de estudo. Obrigada por estarem presentes em cada fase dessa trajetória e por tornarem essa jornada mais leve e especial.

Aos meus amigos Gabriel, Igor, Viny e Walli que ao longo dos anos se tornaram pessoas essenciais na minha vida. Sou muito grata por todo apoio, pelas conversas, pelos conselhos e pela presença constante ao longo dessa caminhada. O incentivo e a amizade de vocês foram fundamentais para que eu chegassem até aqui.

Ao Laboratório de Mecânica Computacional e Visualização (LMCV), pela oportunidade e pelo ambiente de aprendizado. Sou muito grata aos professores Evandro, Elias, Marcelo e Macário por todo o conhecimento compartilhado, e também à Luana, Leonardo, Johon e o Luis pela convivência, apoio e troca de experiências.

Ao professor Eduardo, à Thayná e ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), agradeço pela oportunidade de colocar em prática os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação. As orientações e o acompanhamento recebidos no laboratório foram fundamentais para consolidar meu aprendizado e contribuir para minha formação acadêmica.

Agradeço ao meu orientador, Professor Augusto, pela orientação, disponibilidade e contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço aos professores do curso de Engenharia Civil pelos ensinamentos, pela dedicação e pelas contribuições fundamentais para a minha formação acadêmica.

“Se a reta é o caminho mais curto entre dois pontos, a curva é o que faz o concreto buscar o infinito.”

(Oscar Niemeyer)

## RESUMO

Vigas-parede são elementos estruturais amplamente empregados na engenharia civil, integrando as funções de viga e parede para suportar tanto cargas verticais quanto horizontais. Sua aplicação é fundamental em estruturas que demandam alta resistência e rigidez. Além disso, o uso de vigas-parede permite a adoção de vãos maiores e a redução da necessidade de pilares intermediários, otimizando o aproveitamento de espaços e contribuindo para o desempenho global da estrutura. O método de bielas e tirantes (MBT) é amplamente utilizado para modelar o comportamento complexo dessas estruturas, uma vez que possibilita dimensioná-las de forma eficiente e sistemática a partir de um modelo estrutural simplificado. No entanto, as principais referências utilizadas no projeto de estruturas de concreto - a NBR 6118:2023 (Brasil), o ACI 318-19 (Estados Unidos) e o fib Model Code 2010 (fib 2013), referência de caráter internacional - apresentam diferenças significativas na formulação e na aplicação desse método. Diante disso, o presente trabalho conduz uma análise comparativa entre as referências técnicas citadas, visando compreender o impacto de seus critérios. Nessa perspectiva, propõe-se um estudo de caso no qual são apresentados exemplos de dimensionamento de vigas-parede isostáticas e contínuas, realizados segundo as diferentes abordagens normativas. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar as principais diferenças metodológicas entre as prescrições analisadas, bem como compreender de forma mais aprofundada suas vantagens e limitações.

**Palavras-chave:** Vigas-parede; método de bielas e tirantes; referências técnicas.

## ABSTRACT

Deep beams are structural elements widely used in civil engineering, integrating the functions of beams and walls to support both vertical and horizontal loads. Their application is fundamental in structures that require high strength and stiffness. Moreover, the use of deep beams allows the adoption of larger spans and reduces the need for intermediate columns, optimizing space utilization and contributing to the overall structural performance. The Strut-and-Tie Model (STM) is widely employed to represent the complex behavior of these elements, as it enables their design in an efficient and systematic manner based on a simplified structural model. However, the main references used in the design of concrete structures — NBR 6118:2023 (Brazil), ACI 318-19 (United States), and the fib Model Code 2010 (fib, 2013), an internationally recognized reference — present significant differences in both the formulation and the application of this method. In this context, the present study conducts a comparative analysis of the aforementioned technical references, aiming to understand the impact of their criteria. From this perspective, a case study is proposed in which examples of the design of statically determinate and continuous deep beams are presented according to the different normative approaches. Based on the results obtained, it was possible to identify the main methodological differences among the analyzed prescriptions, as well as to gain a deeper understanding of their respective advantages and limitations.

**keywords:** Deep beams; strut and tie model; technical references.

## LISTA DE FIGURAS

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Aplicação de viga-parede em edifício de vários pavimentos . . . . .                    | 12 |
| 2  | Situações típicas de região D . . . . .  | 16 |
| 3  | Exemplo de modelo estrutural de bielas e tirantes . . . . .                            | 17 |
| 4  | Modelo de viga-parede conforme restrições da NBR 6118 . . . . .                        | 18 |
| 5  | Modelo de viga-parede conforme restrições da ACI 318 . . . . .                         | 19 |
| 6  | Modelo de viga-parede conforme restrições da Model Code 2010 . . . . .                 | 19 |
| 7  | Tipos de geometria nodal . . . . .   | 23 |
| 8  | Esforço do nó . . . . .  | 24 |
| 9  | Resultante das forças . . . . .  | 26 |
| 10 | Campo de tensões de compressão . . . . .   | 29 |
| 11 | Distribuição das Armaduras em Vigas Parede . . . . .                                   | 32 |
| 12 | Distribuição recomendada da armadura para vigas-parede contínua . . . . .              | 33 |
| 13 | Zona nodal estendida com ancoragem de duas barras de amarração . . . . .               | 37 |
| 14 | Geometria e modelo de bielas e tirantes para o problema . . . . .                      | 39 |
| 15 | Geometria e modelo de bielas e tirantes para o problema . . . . .                      | 41 |
| 16 | Etapas do dimensionamento de uma viga-parede . . . . .                                 | 42 |
| 17 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (NBR 6118) . . . . .                     | 43 |
| 18 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (ACI) . . . . .                          | 45 |
| 19 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (Model Code) . . . . .                   | 46 |
| 20 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (NBR) . . . . .                          | 47 |
| 21 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (ACI) . . . . .                          | 48 |
| 22 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (Model Code) . . . . .                   | 50 |
| 23 | Detalhamento do modelo de viga-parede isostática (NBR) . . . . .                       | 55 |
| 24 | Detalhamento do modelo de viga-parede isostática (ACI) . . . . .                       | 56 |
| 25 | Detalhamento do modelo de viga parede isostática (Model Code) . . . . .                | 57 |
| 26 | Distribuição das forças no modelo de bielas e tirantes . . . . .                       | 58 |
| 27 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (NBR) . . . . .                          | 58 |
| 28 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (ACI) . . . . .                          | 59 |
| 29 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (Model Code) . . . . .                   | 60 |
| 30 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio esquerdo (NBR) . . . . .        | 61 |
| 31 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio direito (NBR) . . . . .         | 61 |
| 32 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio esquerdo (ACI) . . . . .        | 63 |
| 33 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio direito (ACI) . . . . .         | 64 |
| 34 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio esquerdo (Model Code) . . . . . | 66 |
| 35 | Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio direita (Model Code) . . . . .  | 66 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 36 | Detalhamento do modelo de viga parede continua (NBR) . . . . .        | 75 |
| 37 | Detalhamento do modelo de viga parede continua (ACI) . . . . .        | 76 |
| 38 | Detalhamento do modelo de viga parede contínua (Model Code) . . . . . | 77 |

## LISTA DE TABELAS

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Coeficiente da zona nodal $\beta_n$ . . . . .   | 25 |
| 2  | Fator de modificação de confinamento . . . . .  | 25 |
| 3  | Fatores de redução de resistência $\phi$ . . . . .  | 27 |
| 4  | Parâmetros de resistência para diferentes tipos de bielas . . . . .                                     | 30 |
| 5  | Intervalos de inclinações entre bielas e tirantes recomendados por diferentes normas técnicas . . . . . | 30 |
| 6  | Coeficiente da biela $\beta_s$ . . . . .  | 31 |
| 7  | Comprimento de ancoragem em função do diâmetro . . . . .  | 34 |
| 8  | Coeficientes para os fatores redutores do comprimento de ancoragem . . . . .                            | 35 |
| 9  | Valores do coeficiente $\alpha_0$ . . . . .   | 37 |
| 10 | Resumo comparativo dos parâmetros de projeto para a viga-parede isostática . .                          | 77 |
| 11 | Resumo comparativo dos parâmetros de projeto para a viga-parede contínua . .                            | 78 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**CCC** Compressão-Compressão-Compressão.

**CCT** Compressão-Compressão-Tração.

**CTT** Compressão-Tração-Tração.

**MBT** Método das Bielas e Tirantes.

**SI** Sistema Internacional de Unidades.

**STM** Strut-and-Tie Model.

**TTT** Tração-Tração-Tração.

## SUMÁRIO

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                             | 12 |
| 1.1      | <i>Objetivos</i>                              | 13 |
| 1.1.1    | <i>Objetivo Geral</i>                         | 13 |
| 1.1.2    | <i>Objetivos Específicos</i>                  | 13 |
| 1.1.3    | <i>Estrutura da Monografia</i>                | 14 |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                  | 15 |
| 2.1      | <i>Método de Bielas e Tirantes</i>            | 15 |
| 2.2      | <i>Determinação Geométrica do MBT</i>         | 17 |
| 2.3      | <i>Vigas-Parede</i>                           | 18 |
| 2.4      | <i>Dimensionamento dos Tirantes</i>           | 19 |
| 2.4.1    | <i>Armadura mínima</i>                        | 20 |
| 2.5      | <i>Verificação dos Nós</i>                    | 22 |
| 2.6      | <i>Verificação das Bielas</i>                 | 28 |
| 2.7      | <i>Detalhamento</i>                           | 32 |
| 2.7.1    | <i>Armadura de flexão</i>                     | 32 |
| 2.7.2    | <i>Armadura vertical</i>                      | 33 |
| 2.7.3    | <i>Ancoragem</i>                              | 34 |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b>                            | 39 |
| 3.1      | <i>Exemplo de Viga-Parede Isostática</i>      | 39 |
| 3.2      | <i>Exemplo de Viga-Parede Contínua</i>        | 40 |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS</b>                             | 43 |
| 4.1      | <i>Dimensionamento Viga-Parede Isostática</i> | 43 |
| 4.1.1    | <i>Verificação da zona nodal</i>              | 46 |
| 4.1.2    | <i>Verificação das bielas</i>                 | 50 |
| 4.1.3    | <i>Detalhamento dos tirantes</i>              | 52 |
| 4.1.4    | <i>Armadura mínima</i>                        | 52 |
| 4.1.5    | <i>Detalhamento</i>                           | 53 |
| 4.2      | <i>Dimensionamento Viga-Parede Contínua</i>   | 57 |
| 4.2.1    | <i>Verificação da zona nodal</i>              | 60 |
| 4.2.2    | <i>Verificação das bielas</i>                 | 67 |
| 4.2.3    | <i>Detalhamento dos tirantes</i>              | 69 |
| 4.2.4    | <i>Armadura mínima</i>                        | 71 |
| 4.2.5    | <i>Detalhamento</i>                           | 72 |
| 4.3      | <i>Discussão</i>                              | 77 |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                              | 79 |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                            | 82 |

## 1 INTRODUÇÃO

As vigas-parede são elementos estruturais altos e esbeltos que combinam características de vigas e paredes. São frequentemente empregadas em edifícios de vários pavimentos, estruturas de contenção e reservatórios. Devido à sua grande altura em relação ao comprimento, exercem um papel fundamental na transferência de cargas verticais e horizontais, contribuindo para a rigidez e resistência do sistema estrutural.

Figura 1 – Aplicação de viga-parede em edifício de vários pavimentos



Fonte: adaptado de El-barbary (2015)

O Método das Bielas e Tirantes tem se destacado por sua capacidade de representar de modo eficaz o comportamento estrutural de elementos que fogem das premissas de flexão associadas às regiões B (regiões de Bernoulli), conforme definido por Schlaich et al. (1987).

A partir dessa visão, constata-se que a posição das armaduras está diretamente vinculada à geometria do modelo de bielas e tirantes adotado. Os tirantes, que correspondem às áreas submetidas à tração, devem ser reforçados com armaduras alinhadas às direções principais das tensões de tração, enquanto as bielas, sujeitas à compressão, devem estar localizadas em regiões de concreto comprimido. É essencial que a disposição das armaduras assegure uma ancoragem eficaz nos nós, cuja verificação é crucial, pois falhas nessas áreas podem comprometer a integridade de todo o modelo estrutural (Santos, 2021).

É essencial enfatizar que a verificação dos nós de bielas e tirantes é crucial, uma vez que esses pontos concentram os esforços de transferência entre as regiões submetidas à tração e à compressão. Portanto, a resistência do concreto nos nós, a presença adequada de armaduras transversais e o confinamento eficiente são elementos determinantes para assegurar a segurança

estrutural como um todo (Schlaich et al., 1987).

Diante dos documentos normativos que regulamentam o dimensionamento de estruturas de concreto, a NBR 6118 (ABNT, 2023), o ACI 318 (ACI, 2019) e o Model Code 2010 (FIB, 2013) destacam-se por incluírem diretrizes específicas para a aplicação do MBT. Apesar de partirem de fundamentos teóricos semelhantes, essas normas apresentam distinções quanto aos critérios de resistência adotados, ao detalhamento das armaduras e à forma de verificação dos nós estruturais. Tais divergências refletem não apenas variações no nível de conservadorismo, mas também abordagens particulares sobre o comportamento do concreto em regiões descontínuas. Considerar essas abordagens em paralelo contribui para aprofundar o entendimento sobre o método e seus impactos no desempenho estrutural, oferecendo uma base mais sólida para sua aplicação prática.

Em suma, a proposta central deste trabalho é contribuir para o entendimento e a aplicação do MBT no dimensionamento de elementos estruturais de vigas-parede, especialmente em regiões descontínuas. A proposta inclui a construção de um modelo coerente com os princípios mecânicos do método, buscando equilíbrio entre precisão nos resultados e simplicidade de aplicação. Por fim, será realizada uma comparação entre as principais referências técnicas, NBR 6118:2023, ACI 318:2019, Model Code 2010 (FIB 2013), com o intuito de avaliar como cada uma trata o método e quais são os impactos dessas abordagens nas respostas estruturais.

Parte dos resultados deste trabalho foi previamente apresentada em publicação científica por Braga e Albuquerque (2025), sendo o presente Trabalho de Conclusão de Curso uma versão ampliada, revisada e aprofundada do estudo anteriormente publicado.

## 1.1 Objetivos

Considerando os aspectos discutidos na introdução, apresentam-se a seguir os objetivos que orientam o desenvolvimento deste trabalho, com o propósito de direcionar a análise de forma clara, estruturada e alinhada à proposta adotada.

### 1.1.1 *Objetivo Geral*

Este trabalho tem como objetivo geral realizar o dimensionamento de vigas-parede segundo as normas NBR 6118 (ABNT, 2023), o ACI 318 (ACI, 2019) e o Model Code 2010 (FIB, 2013), comparando os critérios de projeto e avaliando as diferenças entre eles, a fim de compreender os impactos dessas normas no comportamento e desempenho estrutural.

### 1.1.2 *Objetivos Específicos*

a) Realizar o dimensionamento de vigas-parede biapoiadas e de vigas-parede contínuas, conforme os critérios estabelecidos pelas normas NBR 6118 (ABNT, 2023), o ACI 318

(ACI, 2019) e o Model Code 2010 (FIB, 2013).

b) Comparar os resultados obtidos para as vigas-parede biapoiadas e contínuas, destacando as diferenças e semelhanças nos projetos segundo cada norma.

c) Analisar o impacto das diferentes abordagens normativas no comportamento estrutural e na segurança das vigas-parede dimensionadas.

### ***1.1.3 Estrutura da Monografia***

A presente monografia está estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o assunto, define os objetivos gerais e específicos. O segundo capítulo realiza uma revisão bibliográfica, abordando os conceitos fundamentais sobre vigas-parede e os procedimentos das normas NBR 6118 (ABNT, 2023), do ACI 318 (ACI, 2019) e do Model Code 2010 (FIB, 2013), que servem de base para a análise realizada para o dimensionamento. O terceiro capítulo apresenta a metodologia aplicada ao dimensionamento das vigas-parede biapoiadas e contínuas, incluindo os parâmetros e premissas adotados. O quarto capítulo discute os resultados obtidos, enfatizando as diferenças e implicações dos métodos normativos avaliados. Por fim, o quinto capítulo sintetiza as conclusões do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma análise conceitual das vigas-parede fundamentada no Método das Bielas e Tirantes. Serão abordadas suas definições, as regiões especiais de concreto associadas, critérios para a definição da geometria do modelo, o comportamento das bielas, tirantes e nós, além das etapas de verificação e modelagem do comportamento estrutural. A análise seguirá as diretrizes estabelecidas pelas normas NBR 6118 (ABNT, 2023), ACI 318 (ACI, 2019), Model Code 2010 (FIB, 2013). As expressões matemáticas eventualmente apresentadas nesta revisão estão formuladas no Sistema Internacional de Unidades (SI).

### 2.1 Método de Bielas e Tirantes

Ao longo da evolução das análises em estruturas de concreto armado, o Método das Bielas e Tirantes (MBT) teve origem na analogia com treliças proposta por Ritter e Mörsch no início do século XX (Oliveira, 2019).

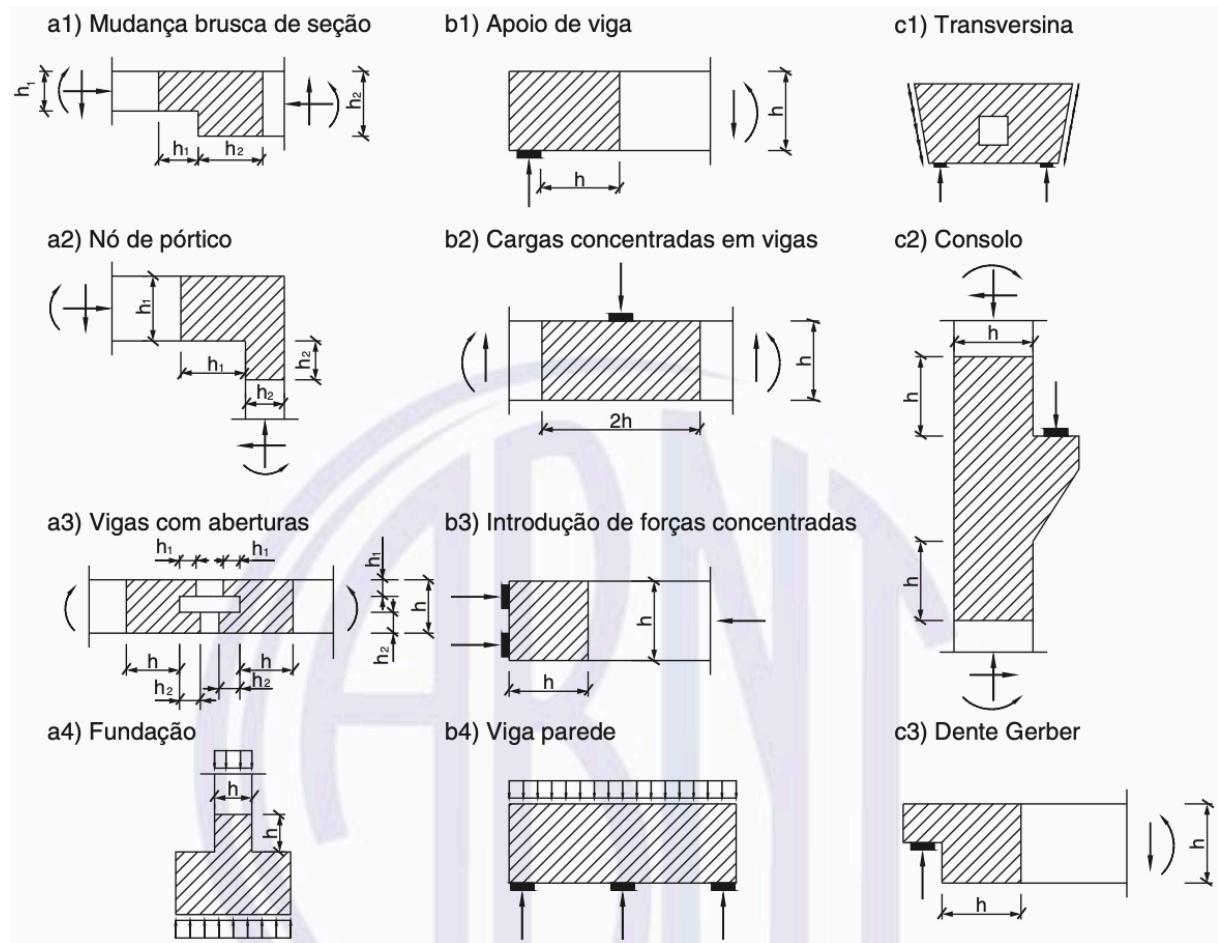
Décadas mais tarde, com o avanço dos estudos sobre o comportamento de regiões de descontinuidade, Schlaich et al (1987) e Schlaich e Schäfer (1991) sistematizaram o método, consolidando-o como uma abordagem eficiente para o dimensionamento de diversos elementos estruturais, o que contribuiu de forma decisiva para sua ampla disseminação. Essa metodologia tem como finalidade representar o caminho dos esforços internos em zonas de descontinuidade estrutural, utilizando modelos equivalentes formados por bielas e tirantes dispostos em forma de treliça (Schlaich et al., 1987).

Do ponto de vista analítico, segundo Schlaich et al (1987), os elementos de concreto armado segundo podem ser agrupados em dois tipos de regiões, com base no comportamento das deformações e tensões nas seções transversais. As regiões denominadas B, associadas à hipótese de Bernoulli, admitem a variação linear das deformações e, por isso, permitem o uso de métodos clássicos de análise seccional. Já nas regiões D, caracterizadas por descontinuidades, essa hipótese não se aplica devido ao comportamento não linear, o que inviabiliza a aplicação direta desses métodos tradicionais no dimensionamento (Santos, 2021).

Desse modo, o Método das Bielas e Tirantes tornou-se uma abordagem consolidada para o dimensionamento das regiões D, possibilitando a determinação dos esforços axiais nos componentes estruturais a partir das cargas aplicadas (Santos, 2021). Essas regiões, marcadas por descontinuidades, estão presentes em diversos elementos estruturais comuns e exigem o mesmo rigor no tratamento dado aos elementos convencionais.

Conforme ilustrado na Figura 2, no item 22.2 da NBR 6118 (ABNT, 2023), as descontinuidades são classificadas em: geométricas, que surgem devido a variações na seção transversal; estáticas, associadas à aplicação de cargas ou à presença de apoios; e uma combinação de ambas, denominadas descontinuidades geométricas e estáticas.

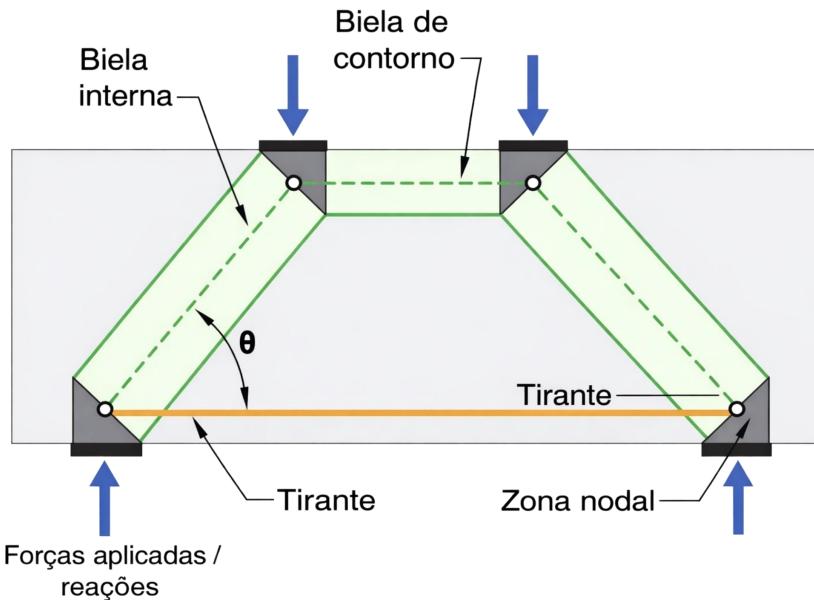
Figura 2 – Situações típicas de região D



Fonte: NBR 6118 (2023), p. 183.

O modelo de campos de tensões, conforme descrito por Santos (2021), representa o comportamento estrutural a partir das ações aplicadas, devendo atender às condições de equilíbrio, contorno e plasticidade. No referido modelo, as forças internas são distribuídas por meio de bielas, que representam elementos submetidos à compressão, tirantes, que correspondem a elementos tracionados, e nós, que funcionam como pontos de equilíbrio, fundamentando a análise no princípio do equilíbrio estático das forças geradas externamente, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Exemplo de modelo estrutural de bielas e tirantes



Fonte: adaptado do ACI 318 (2019), p.437.

Em síntese, a identificação dos esforços axiais nos elementos do modelo permite o dimensionamento das armaduras de tração, bem como a verificação da resistência adequada das bielas comprimidas e das regiões nodais, garantindo o desempenho estrutural em conformidade com os critérios estabelecidos para o projeto.

## 2.2 Determinação Geométrica do MBT

De acordo com Silva (1991), a configuração geométrica do Método das Bielas e Tirantes (MBT) deve considerar diversos fatores relacionados ao comportamento estrutural. Entre os principais estão: o tipo de carregamento aplicado, os ângulos entre bielas e tirantes, a área de aplicação das cargas e reações, a quantidade de camadas de armadura e o cobrimento adotado.

Os ângulos entre os elementos comprimidos (bielas) e os tracionados (tirantes) são definidos com base na distribuição das tensões elásticas provocadas pelas ações atuantes. Já as dimensões das bielas e das regiões nodais variam conforme a extensão das áreas de aplicação das forças, o número de camadas de armadura utilizadas e o cobrimento necessário para proteção da armadura.

Na região próxima aos apoios, a transmissão dos esforços tende a ocorrer de forma direta por meio de uma biela comprimida, o que, em uma análise simplificada, poderia dispensar a utilização de armadura transversal. Entretanto, estudos experimentais evidenciam o surgimento de tensões de tração perpendiculares à direção da biela, resultantes da expansão do campo de compressão para garantir a compatibilidade das deformações. Dessa forma, torna-se necessária a adoção de armaduras secundárias, com o objetivo de controlar a fissuração e evitar falhas prematuras da estrutura.

Por fim, quando a carga está muito próxima ao apoio, o concreto transmite esforços por um campo de compressão com formato de “garrafa”, evidenciando seu comportamento não perfeitamente plástico.

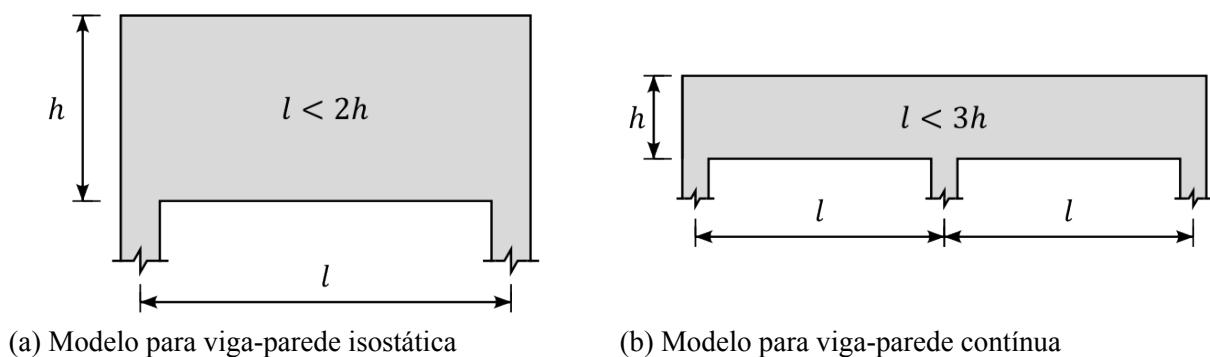
### 2.3 Vigas-Parede

As vigas-parede se evidenciam por combinar características de elementos estruturais lineares e de superfícies, unindo a capacidade de carga das vigas tradicionais com a rigidez e a distribuição de esforços das paredes estruturais.

Além de suportarem esforços consideráveis de compressão e tração, essas vigas são fundamentais para garantir a estabilidade geral da estrutura. Essa flexibilidade faz com que sejam amplamente utilizadas em apoios de pontes, plataformas industriais e em estruturas portuárias e marítimas. No entanto, mesmo com aplicações bem estabelecidas, as normas técnicas analisadas neste estudo apresentam diferenças na definição geométrica dessas vigas.

A princípio, a NBR 6118 (ABNT, 2023) define vigas-parede como aquelas cujo a relação entre o vão e a altura  $\frac{l}{h}$  é inferior a 2 para vigas simplesmente apoiadas e inferior a 3 para vigas contínuas. Essa definição enfatiza a influência da relação geométrica na classificação do elemento estrutural.

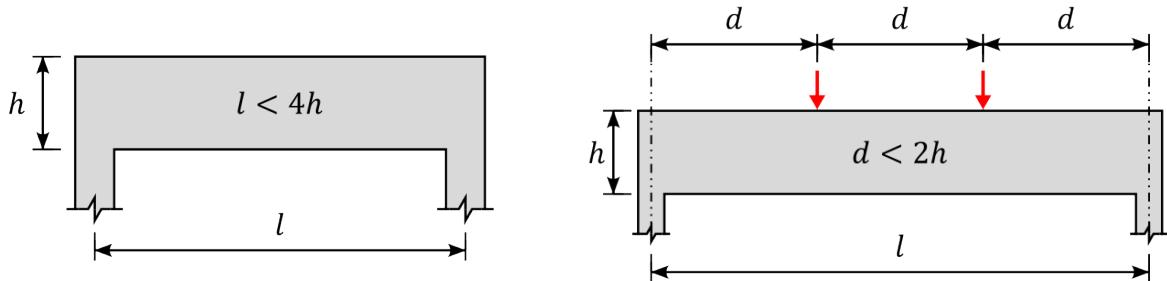
Figura 4 – Modelo de viga-parede conforme restrições da NBR 6118



Fonte: elaborado pelo autor.

Em contrapartida, o código ACI 318 (ACI, 2019) considera vigas-parede os elementos com razão  $\frac{l}{h} \leq 4$ . Além disso, incluem-se nessa categoria vigas que estejam sujeitas a cargas concentradas posicionadas a uma distância não maior que o dobro da altura da seção ou em relação a um apoio, destacando critérios relacionados à distribuição de carregamento.

Figura 5 – Modelo de viga-parede conforme restrições da ACI 318

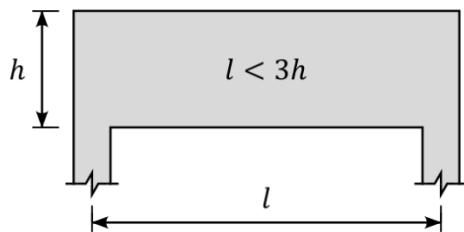


(a) Modelo para viga-parede com carga distribuída (b) Modelo para viga-parede com carga pontual

Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, o Model Code 2010 (FIB, 2013) recomenda que vigas com razão entre vão e altura  $\frac{l}{h} \leq 3$  sejam classificadas como vigas-parede, adotando um critério intermediário entre as outras normas analisadas.

Figura 6 – Modelo de viga-parede conforme restrições da Model Code 2010



Fonte: elaborado pelo autor.

Em determinadas aplicações, como no caso de reservatórios de água, as vigas-parede podem estar submetidas à pressão hidrostática. Essa ação, associada ao empuxo, apresenta distribuição triangular ao longo da altura da parede, alcançando valor máximo na base. Embora nem sempre seja o carregamento principal considerado no dimensionamento, a sua correta avaliação é importante em estruturas que acumulam líquidos, pois pode alterar significativamente os esforços fletores e cortantes atuantes. A NBR 6118 (ABNT, 2023) não aborda explicitamente esse tipo de carregamento; entretanto, recomenda que, ao dimensionar estruturas que retêm líquidos, sejam consideradas todas as ações relevantes e que se consulte normas complementares, como a NBR 8681 (ABNT, 2025), para a aplicação dos coeficientes de ponderação adequados.

## 2.4 Dimensionamento dos Tirantes

Segundo Silva (1991), as forças nos tirantes são normalmente resistidas por armaduras alinhadas ao seu eixo. Entretanto, quando não é possível a disposição adequada dessas

armaduras, o modelo estrutural ainda pode admitir a presença de tirantes, desde que sejam previstas soluções construtivas capazes de garantir o equilíbrio e a transferência dos esforços.

No contexto específico das vigas-parede, a NBR 6118 (ABNT, 2023) determina que os tirantes tracionados não devem se concentrar em poucas camadas de armadura, mas sim em ser distribuídos ao longo de toda a região efetivamente tracionada, conforme o modelo de cálculo adotado.

Nessa abordagem, a área de armadura necessária, quando aplicável, é definida diretamente pela força atuante no tirante em condição de estado limite último, considerando-se a resistência ao escoamento do aço conforme mostrado na equação a seguir:

$$A_s = \frac{F_{td}}{f_{yd}} \quad (2.1)$$

onde:

$F_{td}$  é a força resistente do tirante;

$f_{yd}$  é a resistência de cálculo do aço.

O ACI 318 (ACI, 2019) estabelece o dimensionamento da armadura principal do tirante considerando um coeficiente de redução  $\phi$ , que leva em conta fatores de segurança relacionados à ductilidade e confiabilidade do material. A armadura é calculada pela expressão:

$$A_s = \frac{F_{ut}}{\phi \cdot f_{yd}} \quad (2.2)$$

sendo:

$F_{ut}$  é a força última de tração solicitante no tirante;

$f_{yd}$  é a resistência de cálculo do aço.

O Model Code 2010 (FIB, 2013) define o dimensionamento da armadura principal do tirante com base na resistência de cálculo do aço e na força resistente do tirante, considerando as propriedades do material e as condições de serviço. A área da armadura é determinada pela expressão:

$$A_s = \frac{R_{st}}{f_{yd}} \quad (2.3)$$

onde:

$R_{st}$  representa a força resistente do tirante, calculada a partir das condições de carregamento e da interação com os elementos estruturais;

$f_{yd}$  é a resistência de cálculo do aço, obtida a partir da resistência característica dividida pelo coeficiente de segurança parcial do material.

#### 2.4.1 Armadura mínima

O dimensionamento da armadura mínima é tratado de maneira distinta por cada

norma técnica. A NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece que a quantidade mínima de armadura horizontal e vertical da malha deve obedecer à seguinte expressão:

$$\frac{A_h}{S} = \frac{A_v}{S} = 0,15 \cdot b_w \quad (2.4)$$

onde:

$A_h$  e  $A_v$  representam as áreas das armaduras horizontal e vertical, respectivamente;

$S$  é o espaçamento entre as barras;

$b_w$  é a largura da alma da viga-parede.

Adota-se também uma taxa mínima de armadura em ambas as direções, distribuída por face e por metro, definida como:

$$A_{s,min} = 0,075\% \cdot b_w. \quad (2.5)$$

Além disso, quando houver carga indireta, é necessário prever armadura de suspensão, especialmente em casos como este, em que há atuação de carga uniformemente distribuída sobre a viga-parede. Para essa situação, a armadura vertical de suspensão deve ser dimensionada conforme:

$$\frac{A_{s,sup}}{s} = \frac{q_{d,inf}}{f_{yd}} \quad (2.6)$$

sendo:

$q_{d,inf}$  a carga distribuída de tração na região inferior;

$f_{yd}$  a resistência de cálculo do aço.

Para o dimensionamento com vãos distintos, a norma estabelece o seguinte procedimento:

$$\frac{A_{s,sup}}{s} = \left( \frac{\left( \frac{L}{2 \cdot h} - 0,5 \right) \cdot A_{s3}}{2 \cdot h} \right) \quad (2.7)$$

$$\frac{A_{s,cen}}{s} = \left( \frac{\left( 1,5 - \frac{L}{2 \cdot h} \right) \cdot A_{s3}}{0,6 \cdot h} \right) \quad (2.8)$$

em que:

$A_{s,sup}$  é área superior ao longo da altura da viga-parede;

$A_{s,cen}$  é a área central ao longo da altura da viga-parede;

$A_{s3}$  corresponde à área de armadura negativa da viga-parede;

$h$  representa a altura da viga-parede;

$L$  o seu comprimento.

O ACI 318 (ACI, 2019), por sua vez, define que a armadura mínima vertical e horizontal deve atender ao seguinte critério:

$$A_h = A_v = 0,0025 \cdot b_w \cdot S_v \quad (2.9)$$

em que  $S_v$  é o espaçamento vertical entre armaduras e  $b_w$  a largura da alma.

O Item 9.9.3.2 , do mesmo código, estabelece que o valor de  $A_{s,min}$  deve ser obtido conforme os critérios estabelecidos no Item 9.6.1. Este Item, do Capítulo 9.6, que trata do reforço mínimo à flexão em vigas não protendidas, determina que a área mínima de aço deve ser adotada como o maior entre dois valores previstos, definindo ainda que, em vigas estaticamente determinadas com mesa tracionada a largura efetiva  $b_w$  deve ser tomada como o menor entre  $b_f$  e  $2b_w$ , porém, como se trata de vigas-paredes, foi considerado  $b_w$  como a largura da alma. Além disso, o código limita o escoamento do aço a aproximadamente 550 MPa. A seguir, descreve-se o critério a ser estabelecido:

$$A_{s,min} \geq \begin{cases} \frac{0,25 \cdot \sqrt{f'_c}}{f_y} \cdot b_w \cdot d \\ \frac{1,4}{f_y} \cdot b_w \cdot d \end{cases} \quad (2.10)$$

onde:

$f_y$  é a tensão de escoamento característica do aço em MPa;

$f'_c$  é a resistência a compressão do concreto em MPa.

Já no Model Code 2010 (FIB, 2013), não foi encontrada, no item 7.3.6 referente ao Método das Bielas e Tirantes, uma prescrição específica para a armadura mínima. Assim, adotou-se por analogia o disposto no item 7.13.5.2, aplicável a vigas e vigas-T, o qual estabelece que a armadura longitudinal mínima não deve ser inferior a:

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d \quad (2.11)$$

sendo:

$f_{ctm}$  a resistência média à tração do concreto;

$f_{yk}$  a resistência característica do aço;

$b_t$  a largura da seção tracionada e  $d$  a altura útil da seção.

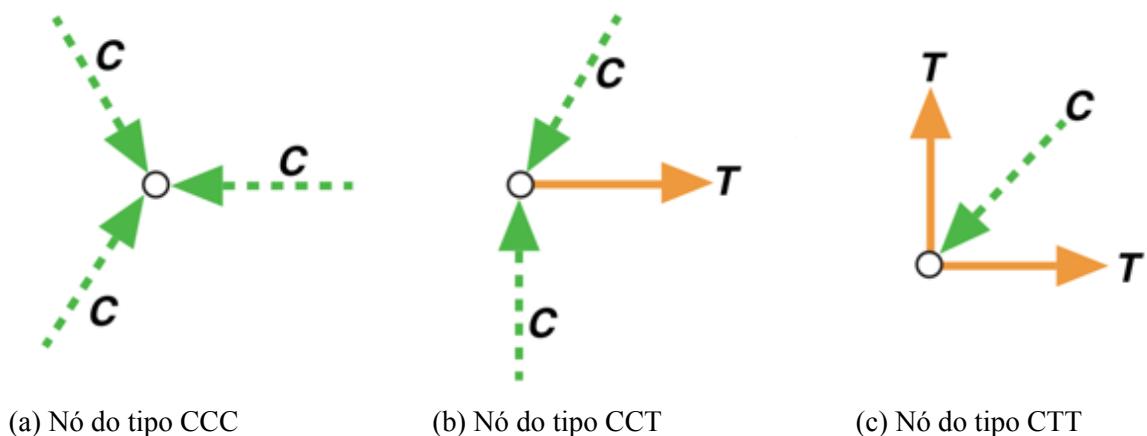
## 2.5 Verificação dos Nós

Os nós podem ser divididos em quatro tipos principais: nós Compressão-Compressão-Compressão (CCC), onde todas as forças são compressivas e o nó é constituído somente por bielas sob compressão; nós Compressão-Compressão-Tração (CCT), que apresentam duas bielas comprimidas e um tirante em tração; nós Compressão-Tração-Tração (CTT), formados por uma biela comprimida e dois tirantes em tração; e, por fim, nós Tração-Tração-Tração (TTT), compostos exclusivamente por tirantes em tração, sem presença de bielas comprimidas (Santos, 2021).

O código ACI 318 (ACI, 2019) utiliza essa mesma classificação, como mostrado na Figura 7. Além disso, o Model Code 2010 (FIB, 2013) também utiliza essa mesma nomenclatura

para classificar os nós.

Figura 7 – Tipos de geometria nodal



Fonte: ACI 318 (2019), p. 441.

Conforme Schlaich e Schäfer (1991), os nós no modelo de bielas e tirantes podem ser classificados em dois tipos distintos. Nós singulares ou concentrados são caracterizados pela aplicação localizada de forças, com desvio pontual dos esforços no interior do nó. Por se tratar de regiões críticas, é necessário verificar as tensões internas para garantir o equilíbrio entre bielas e tirantes, evitando deformações excessivas que possam provocar fissuração. O dimensionamento desses nós requer informações sobre sua geometria, o estado de tensões atuante, a resistência do concreto e as condições de ancoragem das armaduras.

Nós contínuos, por sua vez, permitem que o desvio das forças ocorra ao longo de um comprimento suficiente para possibilitar a ancoragem adequada das armaduras. Desde que atendam aos critérios de ancoragem, esses nós não costumam apresentar comportamento crítico e, portanto, dispensam verificações adicionais.

Considerando os critérios normativos, a determinação da largura do tirante é realizada com base na altura da alma. Para este estudo, será adotada a mesma expressão para as três normas analisadas, conforme apresentado na equação 2.12 e na Figura 8.

$$a_{bie} = a_1 \cdot \sin \theta + u \cdot \cos \theta \quad (2.12)$$

sendo:

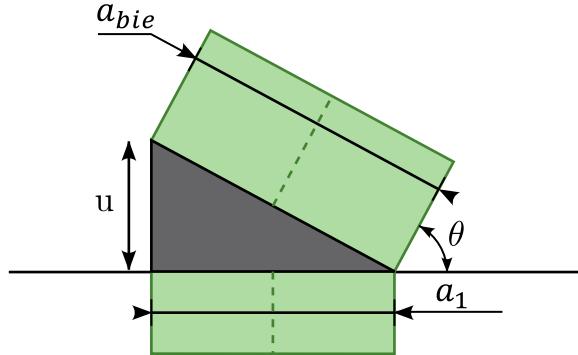
$a_{bie}$  a largura da biela;

$a_1$  a largura do pilar;

$u$  a altura do tirante;

$\theta$  é o ângulo de inclinação entre as bielas e os tirantes.

Figura 8 – Esforço do nó



Fonte: elaborado pelo autor.

A determinação da altura do tirante, representada pela letra  $u$ , conforme ilustrado na Figura 8, é realizada de acordo com os critérios estabelecidos por cada norma de projeto. A NBR 6118 (ABNT, 2023) adota o valor de  $(0,15h)$ , enquanto o Model Code 2010 (FIB, 2013) recomenda  $(0,12h)$ . Já o ACI 318 (ACI, 2019) determina a altura máxima do tirante a partir da expressão:

$$W_{t\max} = \frac{F_{nt}}{f_{ce} \cdot b_s} \quad (2.13)$$

sendo que,

$$F_{nt} = A_s \cdot f_y \quad (2.14)$$

onde,

$F_{nt}$  representa a força no tirante;

$b_s$  corresponde à espessura da biela;

$A_s$  área do tirante;

$f_{ce}$  é determinado conforme descrito a seguir:

$$f_{ce} = 0,85 \cdot \beta_n \cdot f'_c \cdot \beta_c. \quad (2.15)$$

Os parâmetros presentes na expressão para a resistência do concreto,  $f_{ce}$ , são definidos da seguinte forma:

$f'_c$  representa a resistência característica à compressão axial do concreto;

$\beta_n$  é o fator de eficiência do nó, onde leva em consideração as condições específicas da região nodal, que consta na Tabela 1;

$\beta_c$  é o fator de modificação de confinamento de suporte do nó, sendo estabelecido segundo as diretrizes da Tabela 2.

Tabela 1 – Coeficiente da zona nodal  $\beta_n$ 

| Configuração da zona nodal                               | $\beta_n$ |
|--|-----------|
| Zona nodal definida por escoras, áreas de apoio ou ambos | 1,0       |
| Zona nodal ancorando uma amarração                       | 0,8       |
| Zona nodal ancorando duas ou mais amarrações             | 0,6       |

Fonte: traduzido do ACI 318 (2019), p. 449.

Tabela 2 – Fator de modificação de confinamento

| Localização  |          | $\beta_c$   |
|--|----------|---|
| Extremidade de uma escora conectada a um nó que inclui uma superfície de apoio | Menor de | $\sqrt{A_2/A_1}$ , onde $A_1$ é definido pela superfície de apoio |
| Nó que inclui uma superfície de apoio  | Menor de | 2,0   |
| Outros casos   |          | 1,0   |

Fonte: traduzido do ACI 318 (2019), p. 444.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), a verificação da tensão atuante no nó é essencial para garantir que as forças de compressão concentradas estejam dentro da capacidade resistente do concreto. A norma estabelece que essa tensão deve ser calculada considerando a força de compressão aplicada e as dimensões efetivas da seção transversal da biela, conforme indicado na fórmula a seguir:

$$\sigma_{cd} = \frac{F_{cd}}{b_w \cdot a_{bie}} \quad (2.16)$$

onde:

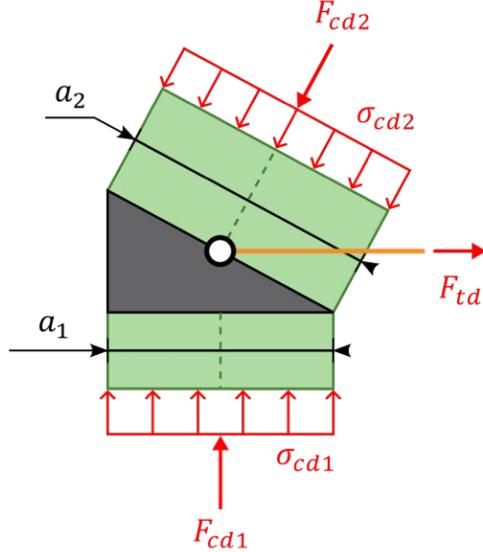
$F_{cd}$  é a força de compressão atuante no nó;

$b_w$  representa a largura efetiva da biela;

$a_{bie}$  é a altura da seção transversal da biela no nó.

Para a verificação do nó, é necessário realizar o cálculo das tensões principais  $\sigma_{cd1}$  e  $\sigma_{cd2}$  em relação a  $f_{cd1}$ , que corresponde a resistência da biela não fissurada sob compressão uniaxial e  $f_{cd2}$  à resistência da biela fissurada sob tração diagonal, conforme ilustrado na Figura 9 a fim de garantir a segurança e a conformidade estrutural.

Figura 9 – Resultante das forças



Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso, obtém-se as seguintes fórmulas, adotando-se  $b = b_w$  e considerando  $a_1$  como a largura do pilar e  $a_2 = a_{bie}$ :

$$\sigma_{cd1} = \frac{F_{cd1}}{b \cdot a_1} \leq f_{cd1} \quad (2.17)$$

$$\sigma_{cd2} = \frac{F_{cd2}}{b \cdot a_2} \leq f_{cd2}. \quad (2.18)$$

O código ACI 318 (ACI, 2019) estabelece uma configuração diferente para a verificação dos nós. Nesse caso, é necessário determinar a resistência nominal à compressão do nó,  $F_{nn}$ , por meio de três checagens fundamentais: reação, biela e tirante. Para garantir a segurança, a resistência deve satisfazer a seguinte condição:

$$\phi \cdot F_{nn} \geq F_{un} \quad (2.19)$$

onde,

$$\phi \cdot F_{nn} = \phi \cdot f_{ce} \cdot A_{nz} \quad (2.20)$$

sendo,

$$f_{ce} = 0,85 \cdot \beta_n \cdot \beta_c \quad (2.21)$$

Para a determinação de  $A_{nz}$ , o código estabelece que se adote o maior valor entre:

- a área da face do nó perpendicular ao eixo da carga externa;
- a área da face do nó perpendicular à força resultante atuante na seção.

Para os demais coeficientes, considera-se:

$\phi$  o fator redutor de capacidade para cisalhamento, de acordo com a Tabela 3 do referido código;

$f_{ce}$  a resistência a compressão esperada do concreto;

$F_{nn}$  a resistência nominal à compressão do nó;

$F_{un}$  à força interna atuante nos elementos do modelo de bielas e tirantes;

$\beta_n$  o coeficiente de zona nodal de acordo com a Tabela 1;

$\beta_c$  o fator de modificação de confinamento de suporte no nó de acordo com a Tabela 2;

Tabela 3 – Fatores de redução de resistência  $\phi$

| Ação ou elemento estrutural   | $\phi$  | Exceções   |
|---|---|--|
| <b>Momento, força axial ou momento e força combinados axiais</b>  | 0,65 a 0,90 de acordo com a Tabela 21.2.2 do ACI 318-19 | Nas extremidades dos membros pré-tensionados onde os cabos ainda não se encontram totalmente desenvolvidos, o fator $\phi$ deve ser adotado conforme a Tabela 21.2.3 do ACI 318-19. Requisitos adicionais são fornecidos na Tabela 21.2.4 do ACI 318-19 para estruturas projetadas para resistir aos efeitos de terremotos |
| <b>Cisalhamento</b>   | 0,75  | –  |
| <b>Torção</b>   | 0,75  | –  |
| <b>Apoio</b>  | 0,65  | –  |
| <b>Zonas de ancoragem pré-tensionadas</b>   | 0,85  | –  |
| <b>Suporte e mísulas</b>  | 0,75  | –  |
| <b>Escoras, tirantes, zonas nodais e áreas de apoio projetadas de acordo com o método de bielas e tirantes do Capítulo 23 do ACI 318-19</b> | 0,75  | –  |
| <b>Componentes de conexões de membros pré-moldados controlados pelo escoamento de aço em tração</b>   | 0,90  | –  |
| <b>Elementos de concreto simples</b>  | 0,60  | –  |
| <b>Ancoragens em elementos de concreto</b>  | 0,45 a 0,75 de acordo com o Capítulo 17 do ACI 318-19   | –  |

Fonte: adaptado do ACI 318 (2019), p. 391.

O item 9.9.2.1, estabelece um limite dimensional para vigas-parede, determinando que suas dimensões devem ser escolhidas de modo que a força cortante última atuante não ultrapasse a resistência mínima prevista para esse tipo de elemento. Essa condição é expressa pela seguinte equação:

$$V_u \leq \phi \cdot 0,83 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.22)$$

sendo,

$V_u$  a força cortante resistente última (kN);

$\phi$  o fator redutor de capacidade para cisalhamento, de acordo com a Tabela 3;

$f'_c$  a resistência a compressão do concreto (MPa);

$b_w$  a largura da alma da viga (mm);

$d$  a altura útil da viga (mm).

Esse critério busca garantir que a geometria da viga-parede seja compatível com o comportamento estrutural esperado, evitando solicitações superiores à capacidade resistente mínima definida pelo código.

De acordo com o Model Code 2010 (FIB, 2013), a tensão máxima admissível no nó de concreto comprimido é determinada por:

$$f_{cd,\text{nó}} = k_n \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}. \quad (2.23)$$

Considera-se o fator de segurança parcial do concreto igual a  $\gamma_c = 1,5$ . A resistência característica do concreto à compressão é representada por  $f_{ck}$ . Também é adotado um fator de redução  $k_n$  considerando as particularidades próprias da região do nó exemplificadas abaixo:

- Para nós de compressão onde não há estribos ancorados no nó, o  $k_n = 1,0 \cdot \eta_{fc}$ ;
- Para regiões onde existe compressão biaxial significativa  $k_n = 1,1 \cdot \eta_{fc}$ ;
- Para nós de compressão-tração com estribos ancorados fornecidos em uma ou duas direções  $k_n = 0,75 \cdot \eta_{fc}$ .

O fator de redução aplicado à resistência do concreto é calculado conforme a seguinte expressão:

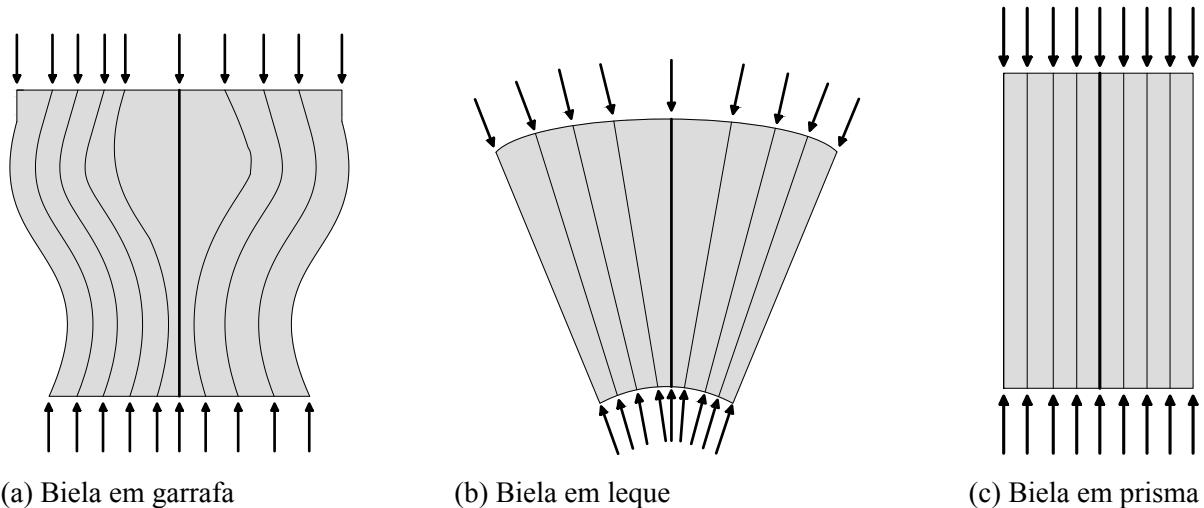
$$\eta_{fc} = \left( \frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} \leq 1. \quad (2.24)$$

## 2.6 Verificação das Bielas

No âmbito do modelo estrutural por bielas e tirantes, as bielas são elementos responsáveis pela transmissão dos esforços de compressão por meio do concreto. A forma geométrica

dessas regiões varia conforme o modo como as tensões se distribuem internamente, permitindo sua classificação em diferentes tipos, os quais são apresentados na Figura 10.

Figura 10 – Campo de tensões de compressão



Fonte: adaptado de Santos (2021), p. 42.

A biela em garrafa apresenta um afunilamento em sua região central, concentrando compressões transversais no gargalo e tração nas extremidades, o que pode ocasionar fissuras longitudinais e exigir reforço transversal. A biela em leque possui distribuição radial de tensões, com curvatura desprezível e ausência de esforços transversais significativos. Por fim, a biela prismática caracteriza-se por uma distribuição uniforme e paralela das tensões, sendo considerada um caso idealizado, sem perturbações internas (Carvalho, 2017).

As distribuições de tensões em forma de leque e garrafa são típicas das regiões do tipo D, caracterizadas por descontinuidades geométricas ou de carregamento. O campo em leque costuma ocorrer quando há propagação de tensões devido a cargas concentradas, enquanto o formato em garrafa está associado à condução dos esforços em direção aos apoios. Por outro lado, o campo de tensões prismático é característico das regiões B, onde as tensões se distribuem de maneira uniforme e o comportamento segue as premissas da flexão simples.

Durante o dimensionamento das bielas em garrafa, é levado em consideração o aumento da resistência do concreto devido ao confinamento gerado pela compressão transversal em uma ou ambas as direções. Entretanto, essa resistência pode ser reduzida quando a biela é intersectada por um ou mais tirantes.

Definir corretamente o tipo de biela é fundamental para avaliar com precisão sua resistência e o comportamento estrutural. A norma NBR 6118 (ABNT, 2023) se diferencia de outras normas ao propor um método de cálculo da resistência da biela baseado em uma classificação específica. Os parâmetros e classificações apresentados na Tabela 4, foram extraídos diretamente da NBR 6118, a qual utiliza um fator de redução  $\alpha_{v2}$  para todas as categorias, que

pode ser determinado por:

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (2.25)$$

onde  $f_{ck}$  corresponde à resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Tabela 4 – Parâmetros de resistência para diferentes tipos de bielas

| <b>Tipo de biela</b>   | <b>Parâmetro de resistência</b>                 |
|--|---|
| Para bielas prismáticas ou nós CCC                                     | $f_{cd1} = 0,85 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd}$ |
| Para bielas interceptadas por mais de um tirante,<br>ou nós TTT ou CTT | $f_{cd2} = 0,60 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd}$ |
| Para bielas interceptadas por um único tirante,<br>ou nós CCT          | $f_{cd3} = 0,72 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd}$ |

Fonte: elaborado pelo autor.

Nesse contexto, um aspecto importante no modelo estrutural é o ângulo formado entre as bielas e os tirantes. Diferentes normas e códigos de projeto definem limites variados para esse ângulo, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Intervalos de inclinações entre bielas e tirantes recomendados por diferentes normas técnicas

| <b>Norma</b>                | <b>Ângulos permitidos</b>              |
|-----------------------------|--|
| NBR 6118 (ABNT, 2023)       | $30^\circ \leq \theta \leq 63,4^\circ$ |
| ACI 318 (ACI, 2019)         | $25^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$   |
| Model Code 2010 (FIB, 2013) | $25^\circ \leq \theta \leq 68,2^\circ$ |

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme o código ACI 318 (ACI, 2019), a verificação da tensão efetiva na biela envolve o uso de um coeficiente da biela  $\beta_s$ , cujo valor está indicado na Tabela 6.

Tabela 6 – Coeficiente da biela  $\beta_s$ 

| Localização da biela                                 | Tipo de biela      | Críterios  | $\beta_s$ |
|--|--------------------|--|-----------|
| Elementos de tração ou zonas de tração dos elementos | Qualquer           | Todos os casos   | 0,4       |
|  | Bielas de Contorno | Todos os casos   | 1,0       |
|  |                    | Armadura que satisfaz (a) ou (b)<br>da tabela 23.5.1 da<br>ACI 318 (2019)  |           |
| Todos os outros casos                                |                    |  | 0,75      |
|  | Bielas internas    | Localizado em regiões que<br>satisfazem o item 23.4.4 da<br>ACI 318 (2019) | 0,75      |
|  |                    | Juntas viga-pilar  | 0,75      |
|  |                    | Todos os outros casos  | 0,4       |

Fonte: traduzido do ACI 318 (2019), p. 444.

Com base nesse parâmetro, procedeu-se ao cálculo da capacidade resistente limite da biela:

$$f_{ce} = 0,85 \cdot \beta_s \cdot f'_c \cdot \beta_c. \quad (2.26)$$

Também é necessário calcular a capacidade da biela em resistir à força de compressão, sendo obtida ao multiplicar a tensão efetiva pela área da sua seção transversal, conforme demonstrado a seguir:

$$F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs} \quad (2.27)$$

para assegurar que a força de compressão permaneça dentro da capacidade resistente da biela, o código determina o seguinte critério:

$$\phi \cdot F_{ns} \geq F_{us}. \quad (2.28)$$

considerando:

$\phi$  o fator redutor de capacidade para cisalhamento, de acordo com a Tabela 3;

$F_{us}$  força interna atuante na biela;

De acordo com a Model Code 2010 (FIB, 2013), a tensão reduzida de compressão do concreto pode ser dimensionada pela seguinte expressão:

$$f_{ceCCT} = \frac{k_c \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.29)$$

deve-se garantir que a tensão solicitante na biela não ultrapasse o valor de:

$$\sigma_{bie} = \frac{F_{bie}}{A_{bie}} \quad (2.30)$$

onde:

$F_{bie}$  é a força interna atuante na biela;

$A_{bie}$  é a área da biela.

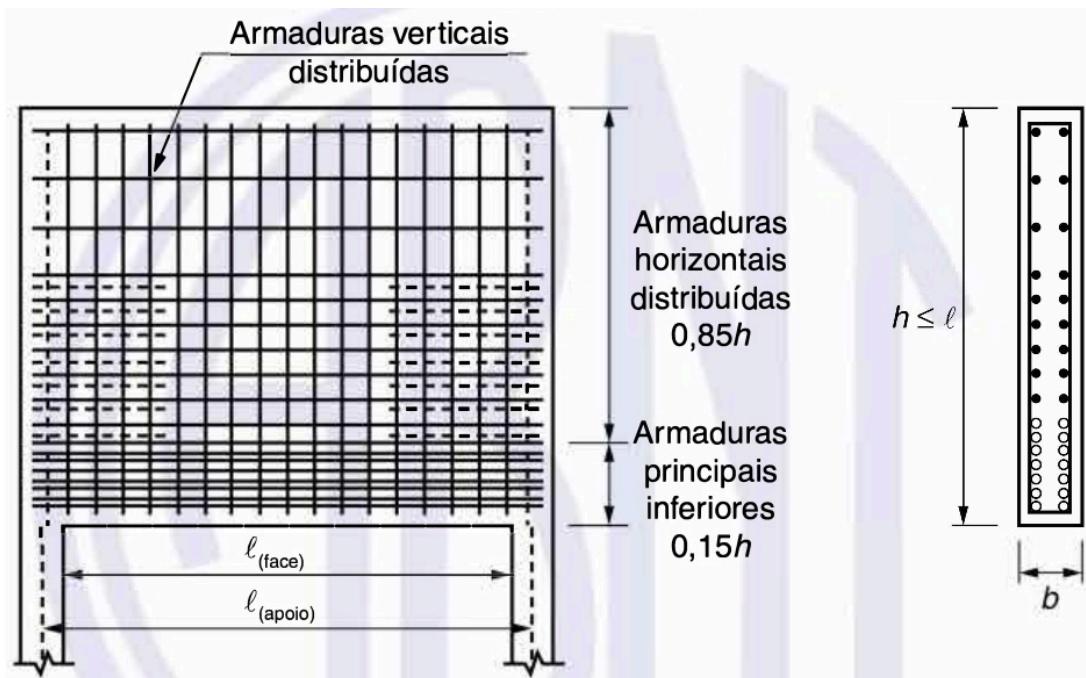
## 2.7 Detalhamento

Considerando as exigências do dimensionamento estrutural, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), o detalhamento das vigas-parede representa uma etapa fundamental no projeto estrutural, pois define tanto a quantidade quanto a disposição das armaduras necessárias para garantir a segurança e a durabilidade da estrutura.

### 2.7.1 Armadura de flexão

As armaduras destinadas a resistir aos esforços de tração não devem ser concentradas unicamente nas fibras inferiores das vigas-parede, devendo ser distribuídas ao longo de toda a região efetivamente tracionada, de acordo com o modelo de cálculo adotado. No caso específico de vigas biapoiadas, a NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece que essa faixa corresponde a uma altura conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Distribuição das Armaduras em Vigas Parede



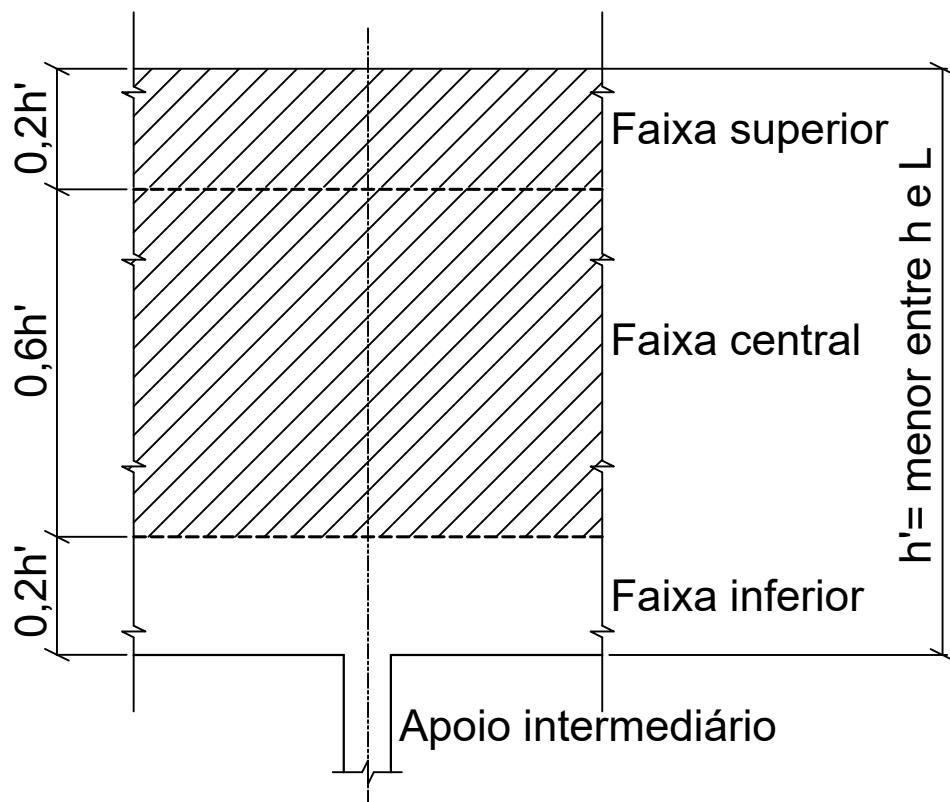
Fonte: NBR 6118 (2023), p. 186.

No caso das vigas-parede contínuas, a distribuição da armadura negativa  $A_s$  deve ser realizada considerando três faixas ao longo da altura  $h$  de acordo com a Figura 12. Para essa verificação, a altura  $h$  não deve assumir valores superiores ao vão teórico  $l$  ( $3 \leq l \leq 1$ ). A distribuição é feita da seguinte forma:

- 20% superiores de  $h$  segue o padrão já apresentado, conforme a Equação 2.7;
- 60% centrais de  $h$  segue o padrão já apresentado, conforme a Equação 2.8;
- 20% inferiores de  $h$ :  $A_s = 0$ .

A armadura mínima na direção horizontal deve ser aplicada de acordo com o que foi estabelecido na Equação 2.5.

Figura 12 – Distribuição recomendada da armadura para vigas-parede contínua



Fonte: adaptado de Santos (2021), p. 77.

### 2.7.2 Armadura vertical

Para garantir o desempenho estrutural da viga, a armadura vertical também deve seguir o critério estabelecido na Equação 2.5. Quando o carregamento incide na parte inferior da viga, ela precisa suportar toda a carga aplicada, ou deve ser prevista uma armadura complementar específica. Além disso, devem envolver as armaduras horizontais, tanto principais quanto secundárias, garantindo que a distribuição de esforços seja eficiente em toda a seção, conforme ilustrado na Figura 11.

### 2.7.3 Ancoragem

Em relação a ancoragem da armadura, esta deve se estender completamente até os apoios, garantindo ancoragem adequada. No plano vertical, não é permitido o uso de ganchos. A NBR 6118 (ABNT, 2023) recomenda utilizar laços ou grampos no plano horizontal, ou ainda recorrer a dispositivos especiais quando necessário.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), o parâmetro que relaciona o comprimento básico de ancoragem ao diâmetro da barra  $\left(\frac{\ell_b}{\phi}\right)$  varia em função da resistência à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) e das condições de aderência. Os valores recomendados são apresentados na Tabela 7. O comprimento básico de ancoragem  $\ell_b$  é determinado pela seguinte equação:

$$\ell_b = \frac{\phi}{4} \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \geq 25 \cdot \phi \quad (2.31)$$

onde  $f_{bd}$  seria a resistência de aderência uniforme.

Tabela 7 – Comprimento de ancoragem em função do diâmetro

| $f_{ck}$ (MPa)       | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| <b>Boa aderência</b> | 38 | 34 | 30 | 28 | 26 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| <b>Má aderência</b>  | 54 | 48 | 43 | 39 | 36 | 34 | 32 | 30 | 29 | 27 |

Fonte: adaptado de Santos (2021), p. 57.

Para o cálculo da ancoragem, determina-se o comprimento  $\ell_b$  da Equação 2.31, o qual é obtida a partir da igualdade entre a força de aderência e a força de escoamento da barra conforme a Equação 2.32.

$$\pi \cdot \phi \cdot \ell_b = A_s \cdot f_{yd} \quad (2.32)$$

sendo o  $A_s$  igual a:

$$A_s = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4}. \quad (2.33)$$

Assim, para assegurar a adequada transferência de esforços entre o concreto e o aço, o comprimento de ancoragem deve ser definido em conformidade com a NBR 6118 (ABNT, 2023), sendo determinado pela seguinte expressão:

$$\ell_{b,nec} = \alpha \cdot \ell_b \cdot \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq \ell_{b,min} \quad (2.34)$$

onde:

$\alpha = 1,0$  para barras sem gancho;

$\alpha = 0,7$  para barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho  $\geq 3\phi$ ;

$\alpha = 0,7$  quando houver barras transversais soldadas conforme o item 9.4.2.2 da NBR 6118 (2023) ;

$\alpha = 0,5$  quando houver barras transversais soldadas conforme o item 9.4.2.2 da NBR 6118 (2023) e gancho com cobrimento no plano normal ao do gancho  $\geq 3\phi$ ;

$\ell_b$  é calculado conforme a Equação 2.31;

$\ell_{b,\min}$  é o maior valor entre  $0,3\ell_b$ ,  $10\phi$  e 100 mm.

A norma admite que, em situações especiais, sejam considerados fatores redutores adicionais no cálculo do comprimento de ancoragem, conforme indicado no trecho: “Permite-se, em casos especiais, considerar outros fatores redutores do comprimento de ancoragem necessários” ((ABNT, 2023) p. 38). Entretanto, a norma não explicita quais seriam esses fatores nem seus respectivos valores.

No Livro de Comentários da NBR 6118 (IBRACON, 2015), elaborado por integrantes da comissão responsável pela norma, esses fatores são devidamente esclarecidos e podem ser obtidos de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 – Coeficientes para os fatores redutores do comprimento de ancoragem

| Fator de influência                                 | Tipo de ancoragem                 | Armadura   |                  |
|---|-----------------------------------|--|------------------|
|   |                                   | Tracionada   | Comprimida       |
| <b>Forma das barras</b>                             | Barras retas, sem gancho          | $\alpha_1 = 1,0$   | $\alpha_1 = 1,0$ |
|   | Barras retas, com gancho ou laços | $\alpha_1 = 0,7$ , se $c_d > 3\phi$<br>Caso contrário, $\alpha_1 = 1,0$        | $\alpha_1 = 1,0$ |
| <b>Barras transversais soldadas</b>                 | Qualquer                          | $\alpha_2 = 0,7$   | $\alpha_2 = 0,7$ |
|   |                                   |  |                  |
| <b>Cobrimento das armaduras</b>                     | Barras retas, sem gancho          | $\alpha_3 = 1 - 0,15 \frac{(c_d - \phi)}{\phi}$<br>$0,7 \leq \alpha_3 \leq 1$  | $\alpha_3 = 1,0$ |
|   | Barras retas, com gancho ou laços | $\alpha_3 = 1 - 0,15 \frac{(c_d - 3\phi)}{\phi}$<br>$0,7 \leq \alpha_3 \leq 1$ |                  |
| <b>Barras transversais não soldadas</b>             | Qualquer                          | $\alpha_4 = 1 - k\lambda$<br>$0,7 \leq \alpha_4 \leq 1$                        | $\alpha_4 = 1,0$ |
|   |                                   |  |                  |
| <b>Pressão transversal <math>\rho</math> em MPa</b> | Qualquer                          | $\alpha_5 = 1 - 0,04\rho$<br>$0,7 \leq \alpha_5 \leq 1$                        | $\alpha_5 = 1,0$ |

Fonte: adaptado de Comentários da NBR 6118 (2015), p. 80.

Dessa forma, o comprimento de ancoragem pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\ell_{b,nec} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \ell_b \cdot \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq \ell_{b,min} \quad (2.35)$$

onde:

- $\alpha_1$  representa o fator associado à eficiência do gancho de ancoragem;
- $\alpha_2$  corresponde a eficiência de armaduras transversais soldadas;
- $\alpha_3$  leva em consideração a influência de um cobrimento adequado;
- $\alpha_4$  refere-se à contribuição da armadura transversal não soldada, em função de sua posição em relação à barra ancorada, sendo avaliada por meio do coeficiente  $k$  indicado na Tabela C.9.2 do Livro de Comentários da NBR 6118 (IBRACON, 2015);
- $\alpha_5$  considera o efeito da pressão transversal atuante na região de ancoragem.

Cabe ainda destacar que:

- a) barras retas com cobrimento superior ao diâmetro da barra ( $\phi$ ) admitem a aplicação de fatores redutores;
- b) o valor do cobrimento  $c_d$  adotado deve atender aos limites estabelecidos na Tabela C.9.2 do Livro de Comentários da NBR 6118 (IBRACON, 2015);
- c) ganchos com cobrimento lateral maior que  $3\phi$  também permitem redução do comprimento de ancoragem, sendo que, nessa situação, os fatores  $\alpha_1$  e  $\alpha_3$  atuam de forma concomitante;
- d) para barras com gancho, o cobrimento deve ser avaliado no plano normal ao eixo do gancho, caracterizando o cobrimento lateral;
- e) no caso de ancoragem de barras comprimidas, apenas os fatores redutores  $\alpha_2$  e  $\alpha_5$  são aplicáveis.

Considerando que a separação entre barras emendadas não exceda  $4\phi$ , o comprimento de transpasso é definido pela seguinte expressão:

$$\ell_0 = \alpha_0 \cdot \ell_{0,nec} \geq \ell_{b,min} \quad (2.36)$$

no caso as barras submetidas à tração:

$$\ell_{0,min} = \max(0,3\alpha\ell_b; 15\phi; 20 \text{ cm});$$

$\alpha_0$  coeficiente depende diretamente da quantidade de barras emendadas na seção, conforme pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores do coeficiente  $\alpha_0$ 

| <b>Barras emendadas (%)</b> | $\leq 20$ | 25  | 33  | 50  | $>50$ |
|-----------------------------|-----------|-----|-----|-----|-------|
| $\alpha_0$                  | 1,2       | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2     |

Fonte: adaptado de NBR 6118 (2023), p. 44.

Quando se trata de barras comprimidas, aplica-se:

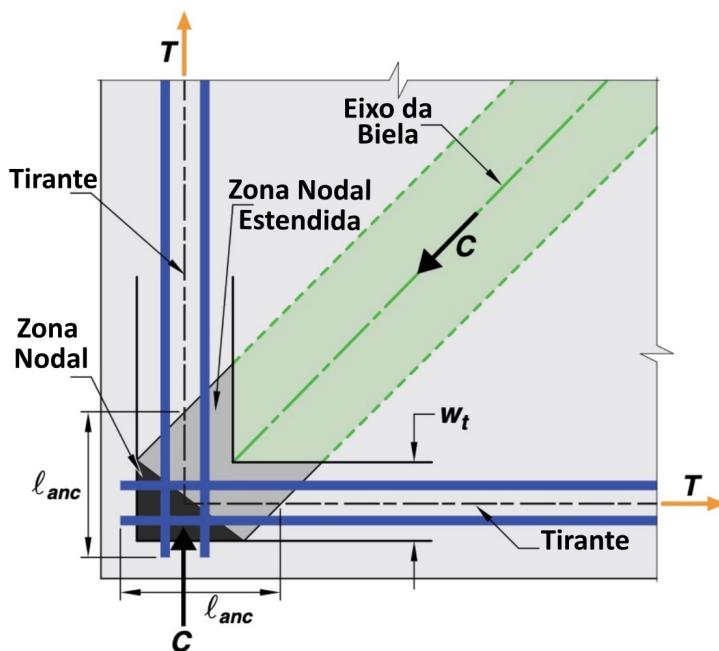
$$\ell_{0,\min} = \max(0,6\ell_b; 15\phi; 20 \text{ cm});$$

$$\alpha_0 = 1.$$

Se a distância entre barras exceder  $4\phi$ , essa medida deve ser adicionada ao comprimento de transpasse.

O ACI 318 (ACI, 2019) no item 23.8, estabelece que as armaduras dos tirantes e os estribos devem estar devidamente ancorados no interior das zonas nodais, de modo a assegurar a transferência adequada das forças entre bielas, tirantes e nós. O código indica, também, que a ancoragem deve ocorrer dentro da zona nodal estendida, podendo ser obtida pela extensão das barras através do nó ou além dele conforme indica a Figura 13.

Figura 13 – Zona nodal estendida com ancoragem de duas barras de amarração



Fonte: adaptado do ACI 318 (2019), p. 448.

Embora o ACI 318 forneça recomendações específicas quanto ao posicionamento e à necessidade de ancoragem das armaduras em zonas nodais o código não apresenta um procedimento explícito para o cálculo dos comprimentos de ancoragem. Diante dessa diferença de

abordagem, e visando maior clareza nos cálculos, opta-se neste trabalho por adotar os critérios da NBR 6118 para o dimensionamento da ancoragem das armaduras, mesmo quando o modelo de cálculo é baseado nas diretrizes do ACI.

O Model Code (FIB, 2013) reconhece a ancoragem das armaduras em zonas nodais como elemento fundamental para o confinamento do concreto e para o adequado funcionamento MBT, recomendando que as barras estejam ancoradas ao longo de todo o comprimento do nó e, sempre que possível, estendidas além dele. Contudo, o código não fornece um procedimento explícito para o cálculo dos comprimentos de ancoragem específicos nessas regiões, remetendo às regras gerais de aderência. Assim, neste trabalho, adotam-se, também, os critérios prescritivos da NBR 6118 para o dimensionamento da ancoragem das armaduras.

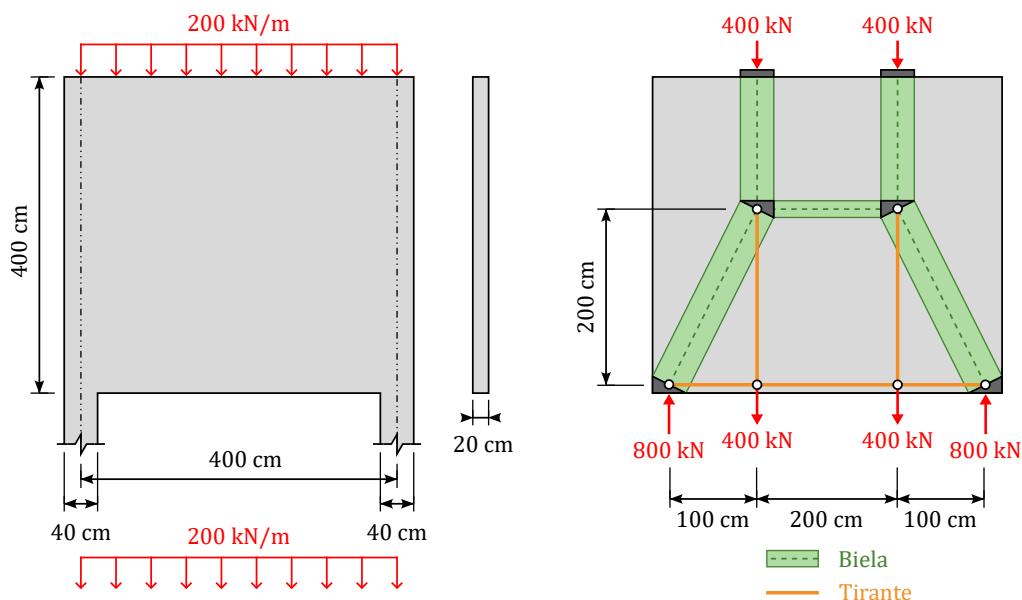
### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para o dimensionamento de vigas-parede utilizando o Método das Bielas e Tirantes. Para isso, dois tipos de vigas foram escolhidos para análise: uma biapoiada e uma contínua. Em seguida, foram determinados os parâmetros que influenciam o comportamento estrutural dessas vigas, com o objetivo de avaliar seu impacto no dimensionamento pelo método proposto. Por fim, procedeu-se à aplicação dos procedimentos necessários para calcular os esforços e verificar a resistência estrutural, garantindo a consistência dos resultados apresentados.

#### 3.1 Exemplo de Viga-Parede Isostática

O presente estudo de caso refere-se a uma viga-parede isostática com razão vão-altura  $\frac{l}{h}$  igual a 1,00. Os parâmetros adotados para o dimensionamento incluem resistência característica do concreto  $f_{ck}=30$  MPa, aço CA-50, cobrimento  $c=3$  cm e inclinação de  $\theta = 63,4^\circ$ . O exemplo foi selecionado para ilustrar a aplicação Método das Bielas e Tirantes (MBT) em vigas-paredes, conforme descrito por Santos (2021).

Figura 14 – Geometria e modelo de bielas e tirantes para o problema



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 14 apresenta as dimensões geométricas da viga-parede analisada neste estudo de caso, em que a razão entre o vão e a altura é igual a 1,00. Esse valor se encontra próximo ao limite inferior estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2023) para a classificação como vigas-parede. De acordo com essa norma, vigas com razão  $\frac{l}{h} \leq 2$  e carregamento aplicado na alma, e

não diretamente nas bielas de apoio, devem ser tratadas como regiões D, exigindo abordagens específicas de dimensionamento, como o Método das Bielas e Tirantes.

De modo semelhante, o ACI 318 (ACI, 2019) define como vigas-parede os elementos estruturais submetidos a cargas concentradas aplicadas a uma distância máxima de duas vezes a altura da seção em relação a um apoio ou entre si. Além disso, quando a relação entre vão e altura for  $\frac{l}{h} \leq 4$ , a distribuição de tensões não segue mais a hipótese de Bernoulli, sendo necessário o uso de métodos alternativos, como o *Strut-and-Tie Model (STM)*, o que está em conformidade com a abordagem adotada neste estudo.

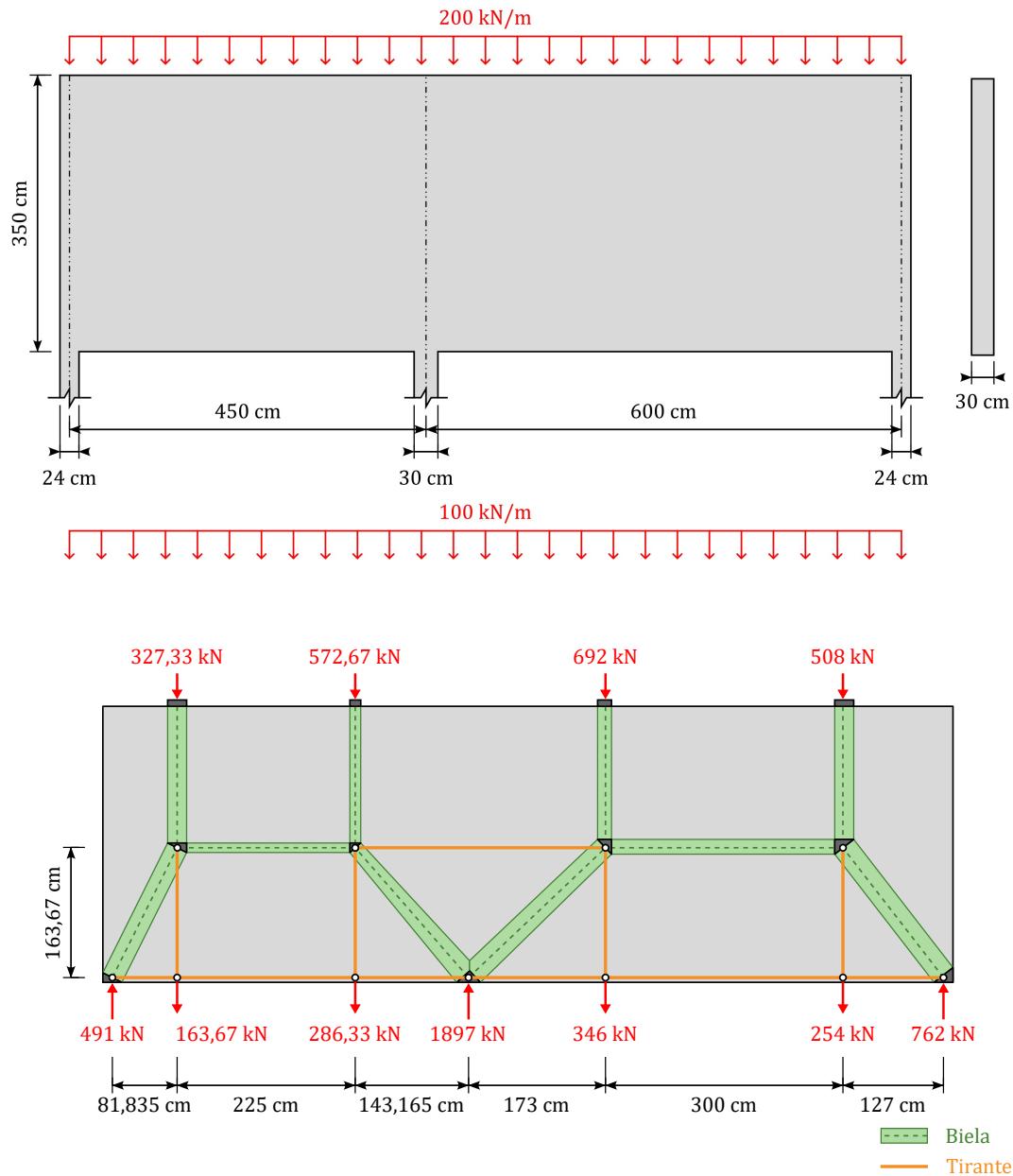
Ainda no que se refere à classificação, o Model Code 2010 (FIB, 2013) também reconhece a existência de regiões de descontinuidade, classificadas como regiões D. Conforme suas diretrizes, vigas com razão  $\frac{l}{h} \leq 3$  devem ser consideradas vigas-parede. Nesse contexto, o modelo de bielas e tirantes é recomendado como ferramenta adequada para representar o fluxo de forças internas e garantir a segurança estrutural.

Percebe-se que tanto a norma brasileira quanto os principais códigos internacionais estabelecem a classificação de vigas-parede para elementos que se afastam das hipóteses da flexão clássica. O exemplo abordado neste estudo está em conformidade com essas definições, apresentando dimensões e condições de carregamento típicas de vigas-parede, o que fundamenta o uso do MBT, para representar a redistribuição dos esforços internos.

### 3.2 Exemplo de Viga-Parede Contínua

O estudo de caso apresentado consiste em uma viga-parede contínua com razão vão e a altura ( $l/h$ ) igual a 2,71. Foram adotados os seguintes critérios para o dimensionamento: resistência característica do concreto  $f_{ck}=30$  MPa, aço CA-50, cobrimento  $c=3$  cm e inclinações de  $\theta = 63,4^\circ$  no lado esquerdo e  $\theta = 52,2^\circ$  no lado direito. Este exemplo foi escolhido para demonstrar a aplicação do MBT, conforme apresentado por Santos (2021).

Figura 15 – Geometria e modelo de bielas e tirantes para o problema



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 15 apresenta as dimensões geométricas da viga-parede contínua analisada neste estudo, que possui razão entre o vão e a altura ( $l/h$ ) igual a 2,71. Diferentemente das normas internacionais, a NBR 6118 (ABNT, 2023) é a única que estabelece uma classificação específica para vigas-parede contínuas, considerando como vigas-parede aquelas com razão  $\frac{l}{h} \leq 3$ . De acordo com essa norma, elementos que atendem a esse critério devem ser tratados como regiões D, exigindo métodos de dimensionamento compatíveis com as particularidades dessas estruturas, como o Método das Bielas e Tirantes.

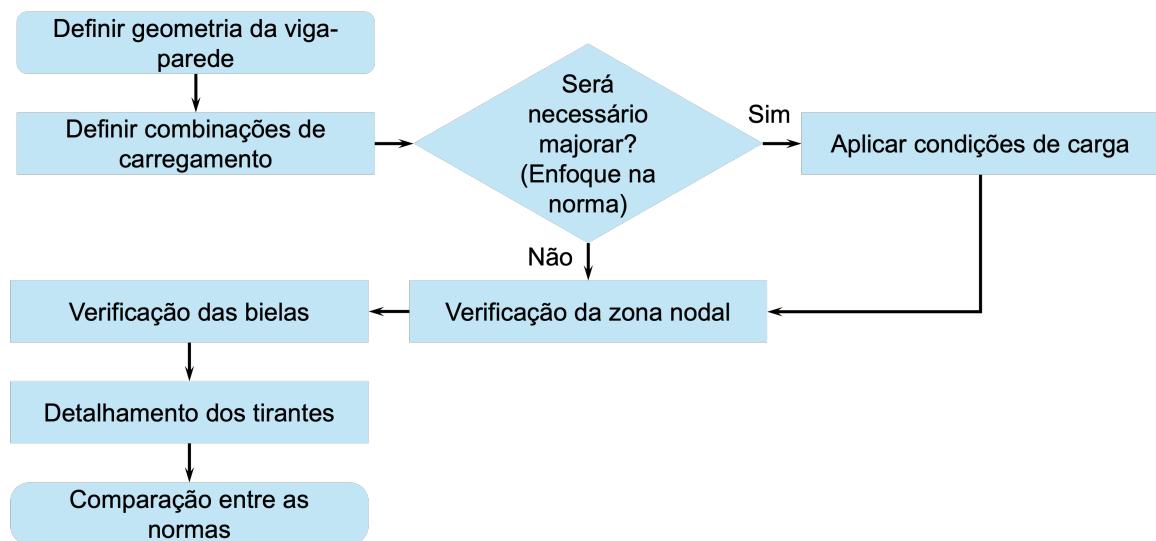
Embora os códigos ACI 318 (ACI, 2019) e Model Code 2010 (FIB, 2013) não façam distinção específica para vigas contínuas quanto à razão ( $l/h$ ), ambas reconhecem a importância

das regiões de descontinuidade (regiões D) e recomendam a aplicação do modelo de bielas e tirantes para o dimensionamento de vigas-parede.

Assim, observa-se que o exemplo da viga-parede contínua estudada está dentro dos parâmetros definidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023), reforçando a adequação do MBT para a análise e dimensionamento desse tipo de elemento estrutural.

Com o objetivo de sistematizar o procedimento adotado neste trabalho, a Figura 16 mostra o fluxograma do processo de dimensionamento da viga-parede, resumindo as etapas essenciais desde a definição da geometria e dos carregamentos até o comparativo dos resultados obtidos.

Figura 16 – Etapas do dimensionamento de uma viga-parede



Fonte: elaborado pelo autor.

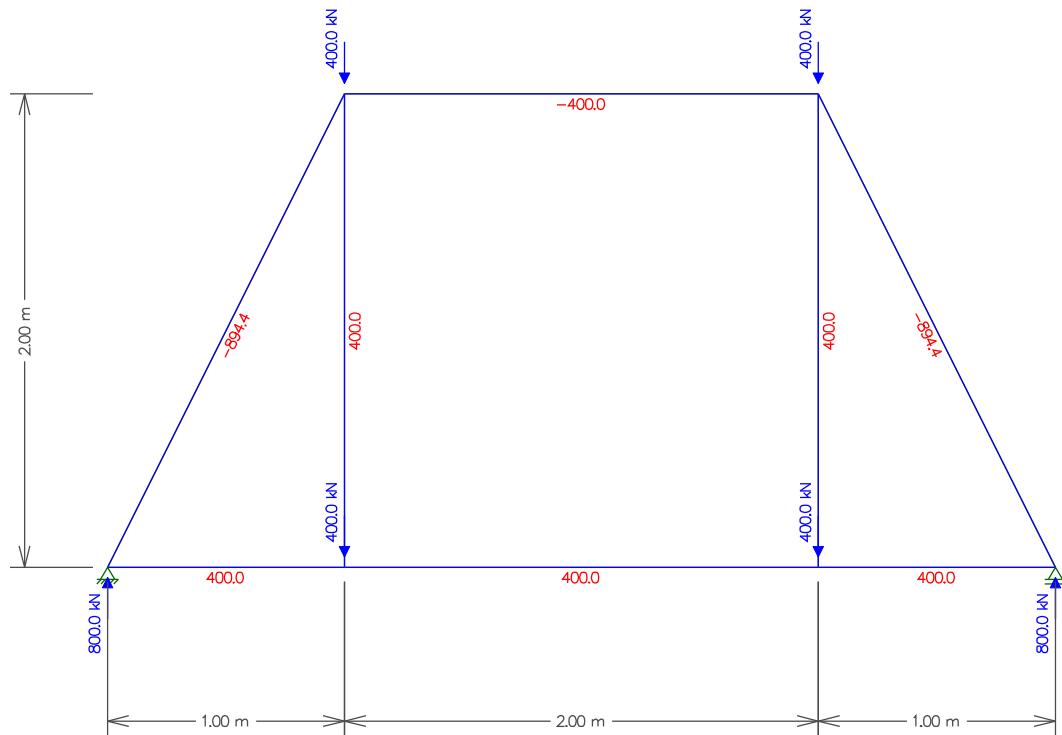
## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir do dimensionamento das vigas-parede isostáticas e contínuas, utilizando o Método das Bielas e Tirantes (MBT). São analisados os esforços atuantes, a configuração dos modelos adotados e as verificações de resistência conforme os critérios estabelecidos pelas normas técnicas.

## 4.1 Dimensionamento Viga-Parede Isostática

De acordo com a NBR 6118, o dimensionamento do modelo de viga foi realizado utilizando o MBT. A Figura 17 ilustra a distribuição das cargas aplicadas na viga-parede, conforme o exemplo apresentado no 3.1. Os valores dessas cargas foram inseridos no *software Ftool*, que possibilitou a determinação dos esforços internos atuantes nos diversos trechos da estrutura.

Figura 17 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (NBR 6118)



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme as diretrizes do ACI 318, foi possível realizar o dimensionamento do modelo de viga utilizando MBT. Inicialmente, foi necessária a majoração dos valores das cargas do exemplo, transformando-as em cargas de cálculo, conforme os coeficientes de ponderação

previstos no código, a fim de garantir a segurança estrutural no dimensionamento.

$$q_k = \frac{q}{1,4} \quad (4.1)$$

$$q_k = 143 \text{ kN/m.}$$

Neste caso, torna-se necessário calcular o peso próprio da viga. Para isso, adota-se o valor do peso específico do concreto armado igual a 25 kN/m<sup>3</sup>, logo:

$$P_p = \gamma \cdot A$$

$$P_p = 25 \cdot 0,20 \cdot 4 \quad (4.2)$$

$$P_p = 20 \text{ kN/m}$$

a carga de uso seria expressa da seguinte forma:

$$L = q_k - P_p \quad (4.3)$$

$$L = 123 \text{ kN/m}$$

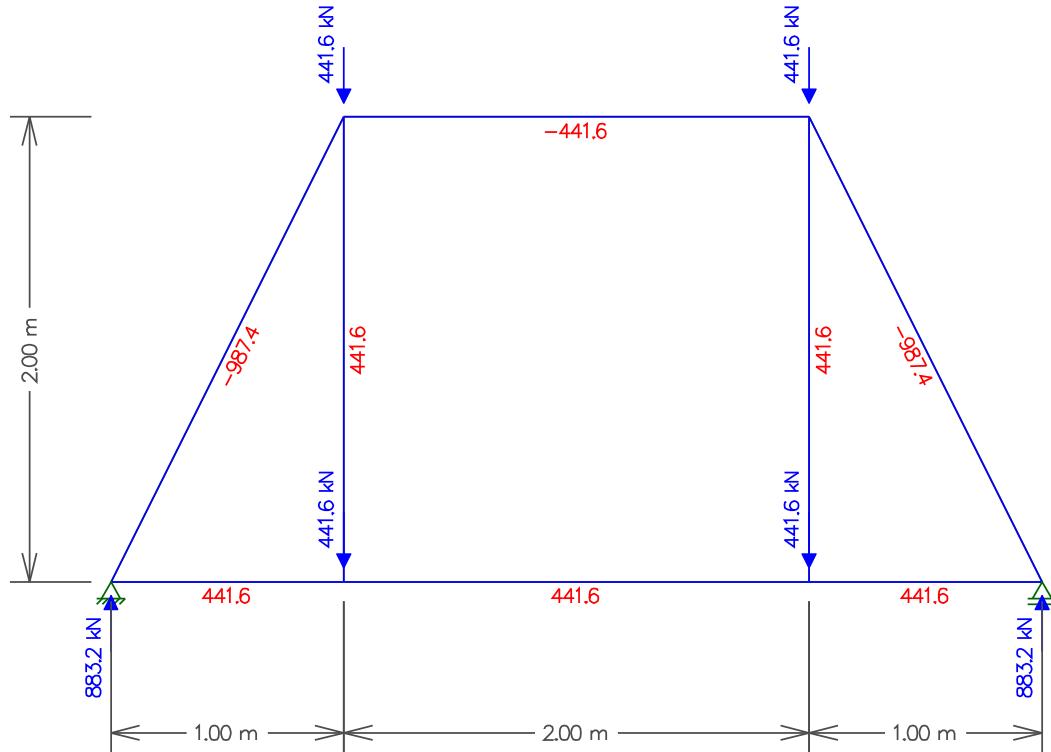
com isso, aplicam-se as combinações de carregamento, sendo D a carga permanente, ou seja, o peso próprio da viga. Assim, tem-se:

$$U = 1,20 \cdot D + 1,60 \cdot L \quad (4.4)$$

$$U = 220,80 \text{ kN/m}$$

a partir disso, obtém-se a seguinte distribuição de carregamentos atuantes na viga-parede:

Figura 18 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (ACI)



Fonte: elaborado pelo autor.

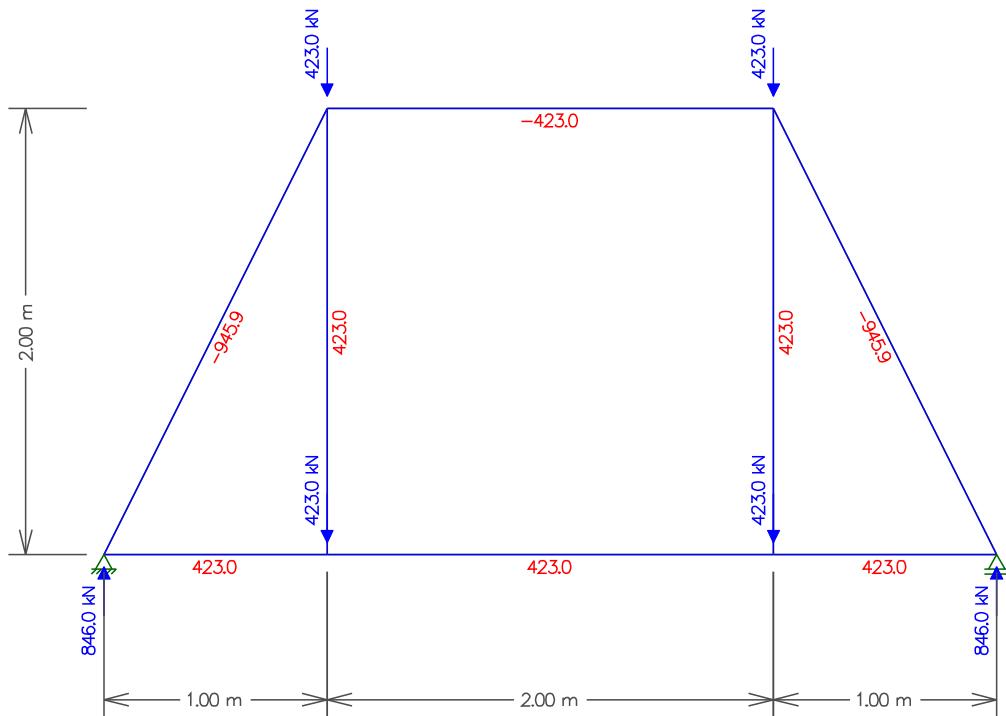
Sob a perspectiva do Model Code 2010, o dimensionamento do modelo de viga foi realizado por meio do MBT. Inicialmente, foi realizada a majoração dos valores das cargas, adotando-se os parâmetros previamente determinados. Dessa forma, torna-se possível aplicar as combinações de carga conforme os critérios normativos.

$$U = 1,35 \cdot D + 1,50 \cdot L \quad (4.5)$$

$$U = 211,50 \text{ kN/m.}$$

Assim, obtém-se a seguinte distribuição de esforços na viga-parede:

Figura 19 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (Model Code)



Fonte: elaborado pelo autor.

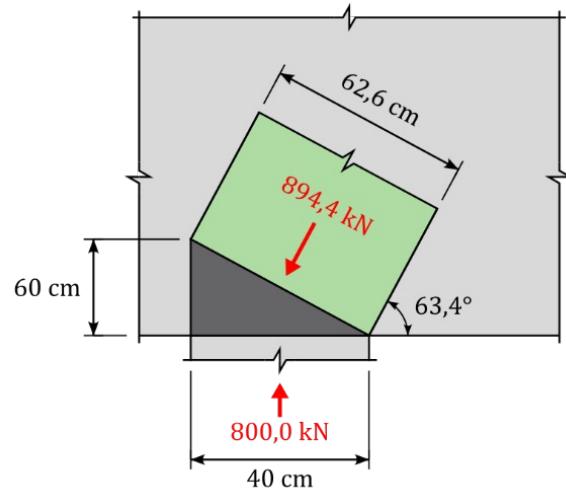
#### 4.1.1 Verificação da zona nodal

Com o intuito de avaliar o nó conforme a NBR 6118, identificou-se que se trata de um nó do tipo CCT, caracterizado por duas bielas comprimidas e um tirante tracionado. A definição da altura do tirante considerou a orientação da norma, que recomenda a distribuição da armadura principal de tração em uma faixa de 0,15h a partir da face inferior da viga. Dessa forma, a altura do tirante adotada foi de 0,60m e a largura da biela é definida como:

$$a_{bie} = 40 \cdot \sin 63,4^\circ + 60 \cdot \cos 63,4^\circ \quad (4.6)$$

$$a_{bie} = 62,60 \text{ cm}$$

Figura 20 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (NBR)



Fonte: elaborado pelo autor.

dessa forma, foi possível calcular a tensão que atua no nó:

$$\sigma_{cd,bie} = \frac{894,4}{20 \cdot 62,6} \quad (4.7)$$

$$\sigma_{cd,bie} = 7,20 \text{ MPa.}$$

Para a análise do nó, conforme ilustrado na Figura 9, deve-se calcular as tensões principais  $\sigma_{cd1}$  e  $\sigma_{cd2}$  em função de  $f_{cd1}$  e  $f_{cd2}$ .

$$\sigma_{cd1} = \frac{800}{20 \cdot 40} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{cd1} = 10 \text{ MPa}$$

tendo em vista que:

$$f_{cd1} = 0,85 \cdot 0,88 \cdot \frac{30}{1,4} \quad (4.9)$$

$$f_{cd1} = 16,03 \text{ MPa}$$

satisfazendo a condição:

$$\sigma_{cd1} = 10 \text{ MPa} \leq 16,03 \text{ MPa}$$

assim como:

$$\sigma_{cd2} = \frac{894,4}{20 \cdot 62,6} \quad (4.10)$$

$$\sigma_{cd2} = 7,14 \text{ MPa}$$

no qual:

$$f_{cd2} = 0,60 \cdot 0,88 \cdot \frac{30}{1,4} \quad (4.11)$$

$$f_{cd2} = 11,31 \text{ MPa}$$

atendendo à condição:

$$\sigma_{cd2} = 7,14 \text{ MPa} \leq 11,31 \text{ MPa}$$

No dimensionamento de acordo com o ACI 318, a classificação dos nós segue o mesmo critério da norma brasileira. A altura do tirante, com base na orientação da norma americana, especifica a armadura principal de tração como sendo:

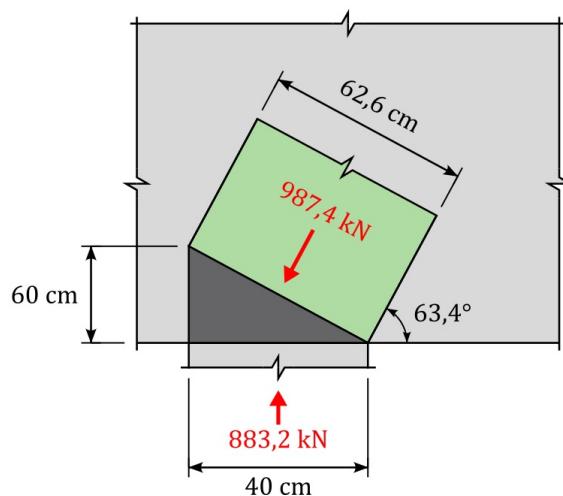
$$W_{tmax} = \frac{1177 \cdot 500}{20,4 \cdot 400} \quad (4.12)$$

$$W_{tmax} = 0,072 \text{ m.}$$

De acordo com o dimensionamento da altura do tirante, observa-se que o valor obtido é significativamente reduzido, não atendendo aos requisitos mínimos de segurança e de desempenho estrutural estabelecidos para o projeto.

Diante dessa limitação, optou-se por adotar o critério estabelecido na norma brasileira NBR 6118, que recomenda uma altura mínima do tirante igual a 0,15 vezes a altura total do elemento estrutural. Dessa forma temos a seguinte configuração:

Figura 21 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (ACI)



Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, para fins de dimensionamento, temos a altura do tirante como 0,60 m e a largura da biela 62,6 cm. Para realizar a verificação, deve-se determinar a resistência nominal à compressão do nó,  $F_{nn}$ , considerando três verificações essenciais: apoio, biela e tirante. Essa resistência precisa atender à condição de verificação:

$$\begin{aligned} f_{ce} &= 0,85 \cdot 0,8 \cdot 30 \cdot 1 \\ f_{ce} &= 20,40 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.13)$$

o coeficiente  $\beta_n = 0,8$  é aplicado a nós do tipo CCT, conforme indicado na Tabela 1. O fator de modificação devido ao confinamento do apoio nodal,  $\beta_c$ , deve ser determinado conforme as orientações da Tabela 2. Como a coluna apresenta a mesma largura da viga-parede, adotou-se  $\beta_c = 1$ . O valor de  $f'_c$  representa a resistência característica à compressão do concreto.

$$\text{Reação: } 0,75 \cdot 2,04 \cdot 40 \cdot 62,6 \geq 883,20$$

$$3.831,12 \text{ kN} \geq 883,20 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{Biela: } 0,75 \cdot 2,04 \cdot 60 \cdot 62,6 &\geq 987,40 \\ 5.746,68 \text{ kN} &\geq 987,40 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\text{Tirante: } 0,75 \cdot 2,04 \cdot 62,6 \cdot 62,6 \geq 441,50$$

$$5.995,70 \text{ kN} \geq 441,50 \text{ kN}$$

cabe destacar que a resistência à compressão do nó foi verificada com sucesso em todas as três checagens. A tensão no nó pode ser determinada por:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{987,4}{20 \cdot 62,6} \\ \sigma_n &= 7,89 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.15)$$

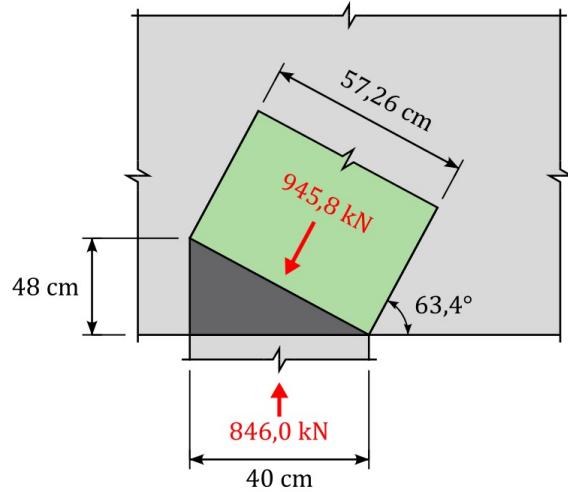
além da verificação da resistência à compressão, o código estabelece um limite dimensional, o qual deve ser conferido de acordo com as diretrizes descritas a seguir:

$$\begin{aligned} 883,20 &\leq 0,75 \cdot 0,83 \cdot \sqrt{30} \cdot 200 \cdot 3800 \\ 883,20 &\leq 2.591,28 \text{ kN.} \end{aligned} \quad (4.16)$$

O dimensionamento realizado conforme o Model Code 2010 adota os mesmos critérios de classificação de nós estabelecidos pela NBR 6118, tratando, assim, o problema como um nó do tipo CCT. A altura do tirante foi definida seguindo as recomendações da norma, que indicam a distribuição da armadura principal de tração em uma faixa de  $(0,12h)$ , medida a partir da face inferior da viga. Dessa forma, a altura do tirante adotada é de 0,48 m. Com isso, a largura da biela é mostrada abaixo.

$$\begin{aligned} a_{bie} &= 40 \cdot \sin 63,4^\circ + 48 \cdot \cos 63,4^\circ \\ a_{bie} &= 57,26 \text{ cm.} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Figura 22 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (Model Code)



Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com o código, o fator parcial de segurança do concreto adotado é  $\gamma_c = 1,5$ . O valor do coeficiente de redução nodal  $k_n = 0,75$  é aplicado devido à existência de tração perpendicular à direção da compressão principal no nó, caracterizando-o como um nó do tipo CCT. Esse tipo de nó demanda uma penalização na resistência admissível à compressão, a fim de garantir segurança estrutural adequada. Assim, o valor reduzido da tensão de compressão no nó é determinado por:

$$\eta_{fc} = \left(\frac{30}{30}\right)^{\frac{1}{3}} \leq 1 \quad (4.18)$$

$$\eta_{fc} = 1 \leq 1$$

com isso, tornou-se possível determinar a tensão máxima do nó.

$$f_{cd,no} = \frac{0,75 \cdot 1 \cdot 30}{1,5} \quad (4.19)$$

$$f_{cd,no} = 15 \text{ MPa.}$$

#### 4.1.2 Verificação das bielas

Conforme a NBR 6118, recomenda-se comparar a capacidade resistente do tirante, representada por  $f_{cd3}$ , com a tensão de compressão atuante no tirante inclinado calculada na Seção 4.1.1

$$f_{cd3} = 0,72 \cdot 0,88 \cdot \frac{30}{1,4} \quad (4.20)$$

$$f_{cd2} = 13,60 \text{ MPa}$$

a condição em questão é atendida, conforme será demonstrado a seguir:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd,biela} &< f_{cd3} \\ 7,20 \text{ MPa} &< 13,60 \text{ MPa.}\end{aligned}\quad (4.21)$$

De acordo com o ACI 318, para bielas com armaduras distribuídas que as atravessam, adota-se  $\beta_s = 0,75$  cujo valor encontra-se na Tabela 6. Com base nisso, determina-se a capacidade resistente limite da biela:

$$\begin{aligned}f_{ce} &= 0,85 \cdot 0,75 \cdot 30 \cdot 1 \\ f_{ce} &= 19,1 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.22)$$

a eficiência da biela em resistir à força de compressão pode ser determinada multiplicando-se a tensão efetiva pela área da sua seção transversal como representado a seguir:

$$\begin{aligned}F_{ns} &= 1,91 \cdot 60 \cdot 62,6 \\ F_{ns} &= 7173,96 \text{ kN}\end{aligned}\quad (4.23)$$

com o objetivo de garantir que a força de compressão na biela não ultrapasse sua resistência à compressão, a norma determina o seguinte critério:

$$\begin{aligned}0,75 \cdot 7173,96 &\geq 987,4 \\ 7013,50 \text{ kN} &\geq 987,4 \text{ kN.}\end{aligned}\quad (4.24)$$

Assim, é possível determinar a tensão atuante:

$$\begin{aligned}\frac{0,75 \cdot 7173,96}{60 \cdot 62,6} &\geq \frac{987,4}{60 \cdot 62,6} \\ 14,32 \text{ MPa} &\geq 2,62 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.25)$$

Segundo o Model Code 2010, a tensão de compressão reduzida do concreto é determinada conforme apresentado a seguir. Ressalta-se que, para escoras ou campos de compressão com armaduras inclinadas formando ângulos inferiores a  $65^\circ$ , o código define o coeficiente de redução  $k_c$  da seguinte forma:

$$\begin{aligned}k_c &= 0,75 \cdot 1 \\ k_c &= 0,75\end{aligned}\quad (4.26)$$

portanto, a biela deve resistir a uma tensão solicitante definida por:

$$\begin{aligned}f_{ceCCT} &= \frac{0,75 \cdot 30}{1,5} \\ f_{ceCCT} &= 15 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.27)$$

sendo necessário que a tensão solicitante na biela seja:

$$\sigma_{bie} = \frac{945,60}{20 \cdot 57,66} \quad (4.28)$$

$$\sigma_{bie} = 8,25 \text{ MPa.}$$

#### 4.1.3 Detalhamento dos tirantes

A NBR 6118 estabelece o cálculo da armadura principal pela expressão:

$$A_s = \frac{400}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.29)$$

$$A_s = 9,20 \text{ cm}^2$$

$$5 \times 2\phi 12,5 \text{ mm.}$$

Em contra partida, o ACI 318 define o cálculo da armadura principal como:

$$A_s = \frac{441,50}{0,77 \cdot 50} \quad (4.30)$$

$$A_s = 11,75 \text{ cm}^2$$

$$5 \times 2\phi 12,5 \text{ mm.}$$

Por sua vez, o Model Code 2010 determina a armadura principal da seguinte forma:

$$A_s = \frac{423}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.31)$$

$$A_s = 9,73 \text{ cm}^2$$

$$5 \times 2\phi 12,5 \text{ mm.}$$

Embora os valores de  $A_s$  obtidos sejam distintos, o detalhamento adotado foi o mesmo, demonstrando que as prescrições normativas analisadas convergem para a mesma solução prática de dimensionamento

#### 4.1.4 Armadura mínima

A NBR 6118 estabelece o cálculo da armadura mínima como sendo:

$$\frac{A_h}{S} = \frac{A_v}{S} = 0,15 \cdot 20 \quad (4.32)$$

$$\frac{A_h}{S} = 3,00 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

Adota-se uma taxa mínima de armadura em ambas as direções, distribuída por face e por metro, calculada como:

$$\begin{aligned} A_{s,\min} &= 0,075 \cdot 20 \\ A_{s,\min} &= 1,50 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Também é necessário prever a armadura de suspensão, visto que no caso a viga-parede tem uma carga indireta uniformemente distribuída. A armadura vertical é dimensionada como:

$$\begin{aligned} \frac{A_{s,\sup}}{s} &= \frac{200}{\frac{50}{1,15}} \\ \frac{A_{s,\sup}}{s} &= 4,60 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}. \end{aligned} \quad (4.34)$$

O ACI 318-19 determina o cálculo da armadura mínima da seguinte forma:

$$\begin{aligned} A_h = A_v &= 0,0025 \cdot 20 \cdot 100 \\ A_h = A_v &= 5,00 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}. \end{aligned} \quad (4.35)$$

O  $A_{s,\min}$  ao longo da altura foi definido conforme o critério de flexão do item 9.6.1, conforme detalhado a seguir:

$$A_{s,\min} \geq \begin{cases} \frac{0,25 \cdot \sqrt{30}}{500} \cdot 20 \cdot 380 = 20,81 \text{cm}^2 \\ \frac{1,4}{500} \cdot 20 \cdot 380 = 21,28 \text{cm}^2 \end{cases} \quad (4.36)$$

conforme as diretrizes do código, deve-se adotar o valor mais restritivo entre as condições analisadas, resultando em uma armadura mínima  $A_s = 21,28 \text{cm}^2$ .

O Model Code 2010 estabelece armadura mínima longitudinal não deve ser menor que:

$$\begin{aligned} A_{s,\min} &= 0,26 \cdot \frac{0,3 \cdot 30^{\frac{2}{3}}}{50} \cdot 20 \cdot 380 \\ A_{s,\min} &= 11,45 \text{cm}^2 \end{aligned} \quad (4.37)$$

podemos obter o valor da altura útil por meio da seguinte equação:

$$\begin{aligned} d &= h - \left( \text{cob} + \phi_t + \phi_l + S_v + \frac{\phi_l}{2} \right) \\ d &= 400 - \left( 3 + 0,5 + 2,5 + 12,5 + \frac{2,5}{2} \right) \\ d &= 380 \text{ cm.} \end{aligned} \quad (4.38)$$

#### 4.1.5 Detalhamento

Na sequência, apresenta-se o detalhamento da viga-parede isostática dimensionada. São analisadas as disposições das armaduras e os critérios de ancoragem adotados, com foco nas diferenças entre as normas consideradas.

De acordo com a Tabela 7, a razão entre o comprimento básico de ancoragem e o diâmetro da barra  $\left(\frac{\ell_b}{\phi}\right)$  é igual a 34, considerando uma boa condição de aderência. Para o diâmetro da barra, foi dimensionado no Capítulo 4.1.3, para as três normas, barras de 12,5 mm. Com isso, o comprimento básico de ancoragem  $\ell_b$  pode ser obtido pela substituição desses valores na Equação 2.31, conforme apresentado a seguir.

$$\begin{aligned}\ell_b &= 34 \cdot 1,25 \\ \ell_b &= 42,5\text{cm.}\end{aligned}\tag{4.39}$$

Para o laço, foi considerado o  $\alpha = 0,7$ :

$$\begin{aligned}\ell_{b,\text{nec}} &= 0,7 \cdot 42,5 \\ \ell_{b,\text{nec}} &\simeq 30\text{cm}\end{aligned}\tag{4.40}$$

o comprimento de ancoragem disponível pode ser determinado pela diferença entre a largura do pilar e o valor do cobrimento adotado, conforme a expressão a seguir:

$$\begin{aligned}\ell_{b,\text{disp}} &= a_p - c \\ \ell_{b,\text{disp}} &= 40 - 3 \\ \ell_{b,\text{disp}} &= 37\text{cm}\end{aligned}\tag{4.41}$$

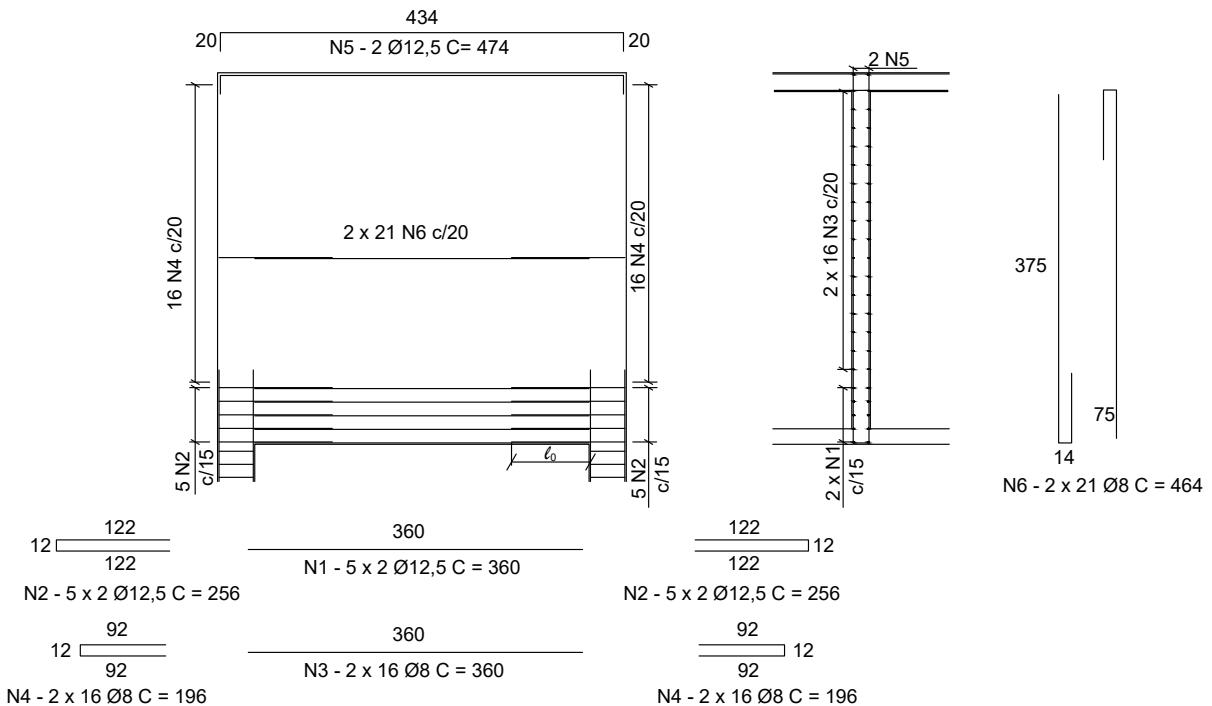
considerando uma emenda de 100% na seção:

$$\begin{aligned}\ell_0 &= 2 \cdot \ell_b \\ \ell_0 &= 2 \cdot 42,5 \\ \ell_0 &= 85\text{cm.}\end{aligned}\tag{4.42}$$

No detalhamento da armadura, a legenda utilizada define a função de cada grupo de barras: N1 e N2 são barras paralelas que se complementam, representando a armadura principal. Os grupos N3 e N4 também se completam e estão dispostos em paralelo, distribuindo o  $A_s$  ao longo da altura da viga. Já N5 representa a armadura mínima, enquanto N6 corresponde à armadura de suspensão, representada horizontalmente, aplicada na faixa superior da viga.

Na Figura 23 podemos observar o detalhamento da viga-parede isostática dimensionada no Capítulo 4.1 referente a norma NBR6118.

Figura 23 – Detalhamento do modelo de viga-parede isostática (NBR)

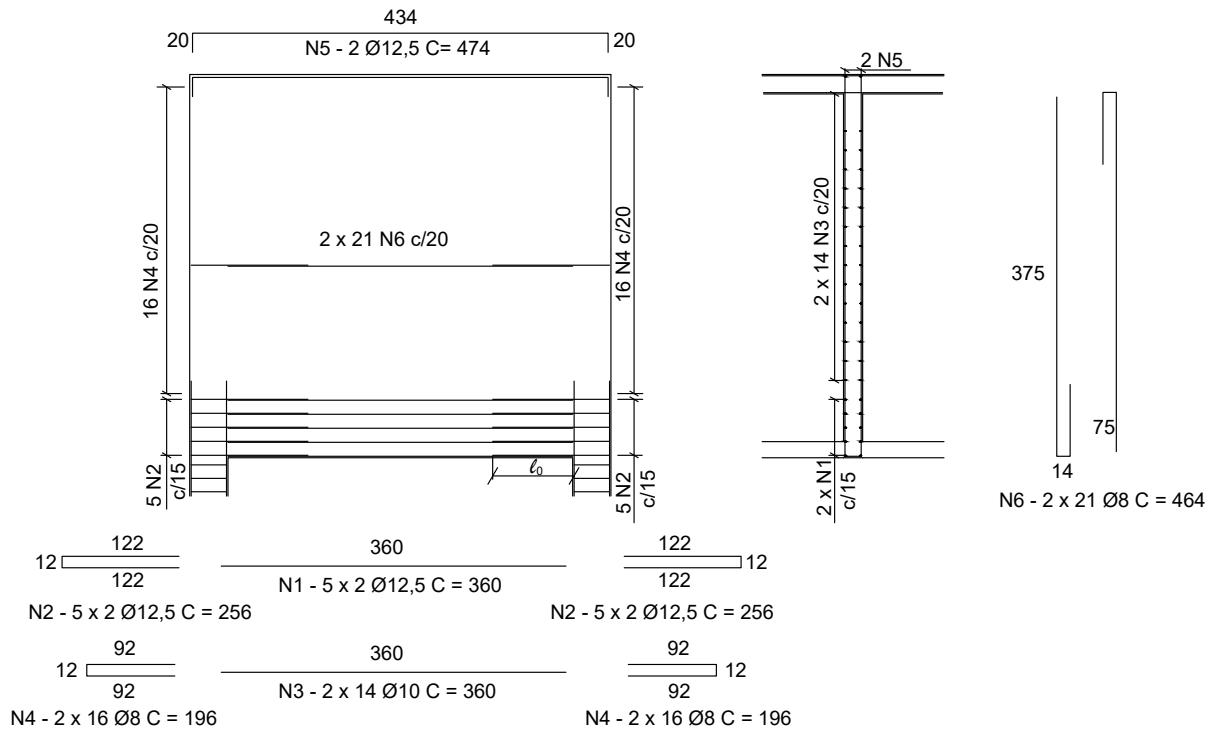


Fonte: elaborado pelo autor.

Ao observar a Figura 23, nota-se que o transpasse executado foi em laço, essa escolha se justifica pelo fato de barras de maior diâmetro apresentarem maior dificuldade de dobra em obra. O comprimento  $\ell_0$  corresponde ao transpasse entre as barras N1 e N2, bem como entre N3 e N4, garantindo a continuidade da armadura nas regiões de emenda. Para bitolas menores, como 12,5 mm e 8 mm, poderia ser adotada também uma única barra com laço lateral, o que simplificaria o detalhamento sem comprometer o desempenho estrutural.

Já na Figura 24 apresenta-se o detalhamento da viga-parede isostática dimensionada no Capítulo 4.1, em conformidade com o ACI 318.

Figura 24 – Detalhamento do modelo de viga-parede isostática (ACI)

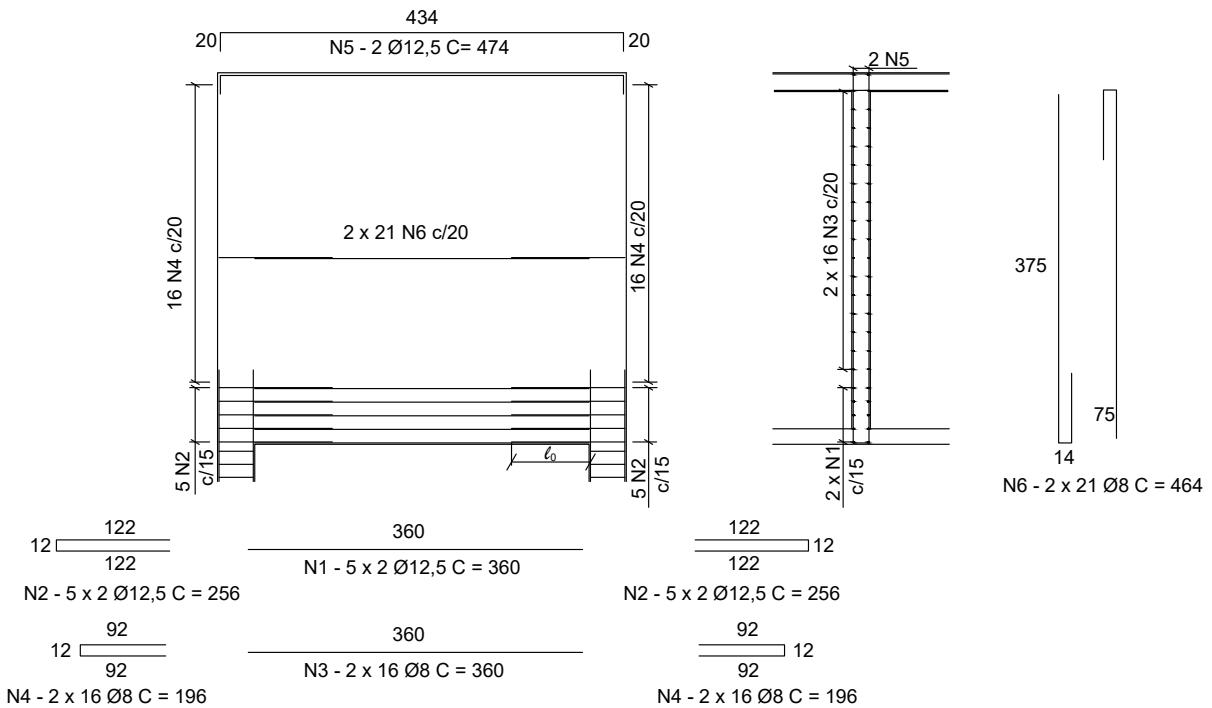


Fonte: elaborado pelo autor.

Na comparação entre o detalhamento conforme a ACI 318 e o obtido segundo a NBR 6118, a barra N3 foi a única modificação. Nesse caso, tornou-se necessário aumentar a bitola da barra, o que permitiu reduzir a quantidade de barras, mantendo a área de aço equivalente e atendendo aos requisitos da norma que está sendo seguida.

Em contrapartida, o detalhamento da viga-parede isostática, dimensionada no Capítulo 4.1 de acordo com o Model Code 2010, é apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Detalhamento do modelo de viga parede isostática (Model Code)



Fonte: elaborado pelo autor.

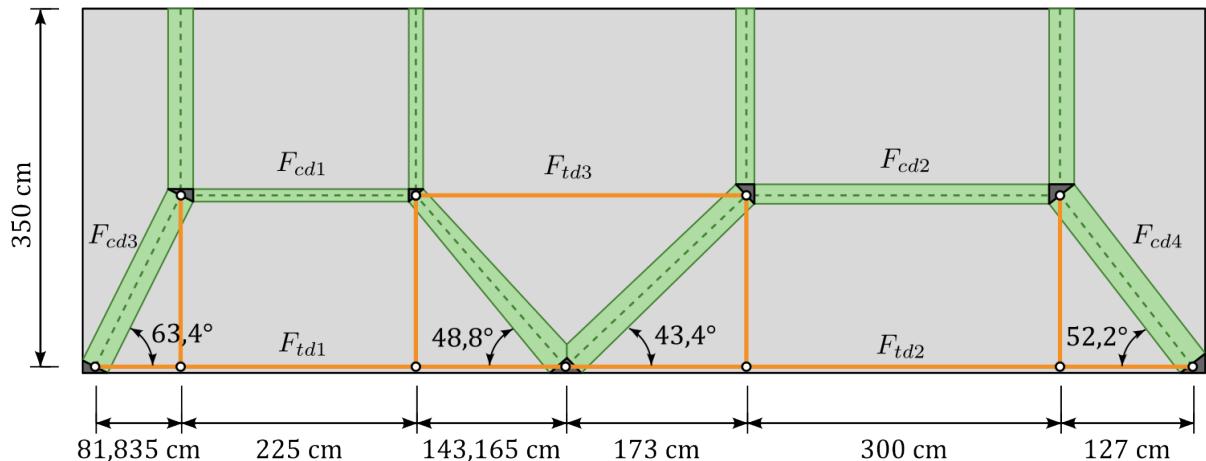
No Model Code 2010, não há critérios específicos para o dimensionamento ao císalhamento de vigas-parede. Dessa forma, no detalhamento, adotou-se a armadura mínima no detalhamento.

Além disso, embora os valores de armadura sejam distintos, o detalhamento adotado fornece área de aço suficiente em todos os casos, permitindo a utilização do mesmo detalhamento da NBR 6118, sem comprometer a segurança estrutural.

#### 4.2 Dimensionamento Viga-Parede Contínua

Conforme a NBR 6118, o dimensionamento do modelo de viga foi realizado utilizando o MBT. Na Figura 26, pode-se observar como as forças atuam na viga-parede contínua, permitindo uma análise detalhada da transmissão de esforços para os apoios.

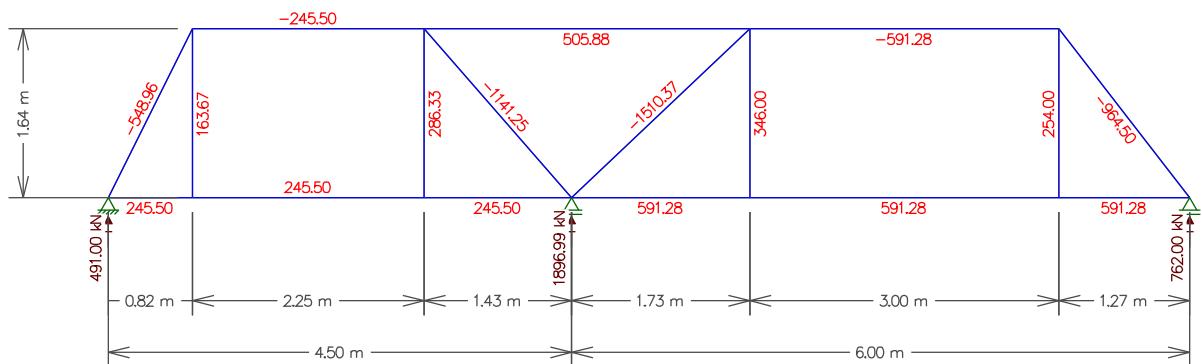
Figura 26 – Distribuição das forças no modelo de bielas e tirantes



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 27 ilustra a distribuição das cargas aplicadas na viga-parede, conforme o exemplo apresentado no 3.2. As cargas desse modelo de viga-parede foram inseridos no *software Ftool*, onde foi possível a determinação dos esforços internos atuantes nos diversos trechos da estrutura.

Figura 27 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (NBR)



Fonte: elaborado pelo autor.

Seguindo as diretrizes do ACI 318, foi possível realizar o dimensionamento do modelo de viga utilizando MBT. A princípio, foi necessário realizar a majoração dos valores das cargas do modelo, convertendo-as em cargas de cálculo, conforme os coeficientes de ponderação previstos no código, visando garantir a segurança estrutural no dimensionamento. Considerando a carga aplicada na parte superior:

$$q_k = \frac{200}{1,4} \quad (4.43)$$

$$q_k = 143 \text{ kN/m}$$

para o cálculo do peso próprio, adota-se o valor do peso específico do concreto armado igual a

25 kN/m<sup>3</sup>, logo:

$$\begin{aligned}
 P_p &= \gamma \cdot A \\
 P_p &= 25 \cdot 0,30 \cdot 3,50 \\
 P_p &= 26,35 \text{ kN/m.}
 \end{aligned} \tag{4.44}$$

A carga de uso pode ser descrita pela seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 L &= q_k - P_p \\
 L &= 116,75 \text{ kN/m}
 \end{aligned} \tag{4.45}$$

assim, aplicam-se as combinações de carregamento:

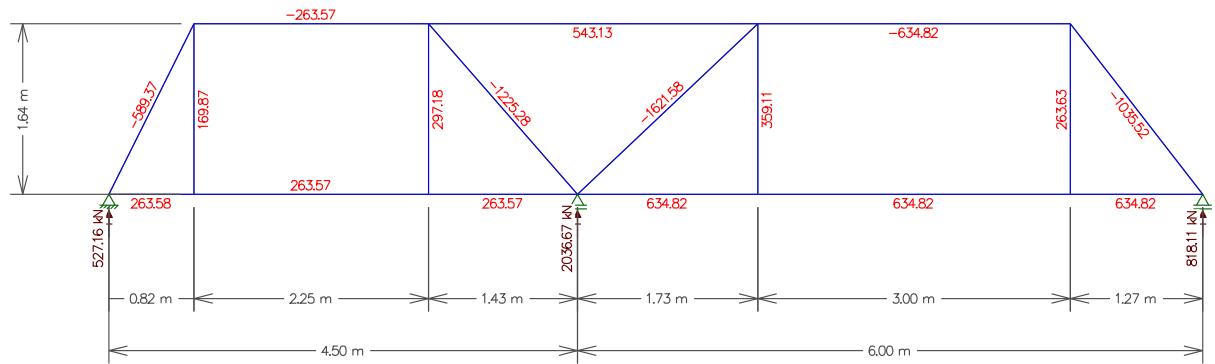
$$\begin{aligned}
 U &= 1,20 \cdot 26,25 + 1,60 \cdot 116,75 \\
 U &= 218,30 \text{ kN/m.}
 \end{aligned} \tag{4.46}$$

Aplicando o mesmo raciocínio à carga inferior, encontram-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 U &= 1,20 \cdot 26,25 + 1,60 \cdot 45,18 \\
 U &= 103,79 \text{ kN/m}
 \end{aligned} \tag{4.47}$$

como resultado, tem-se a seguinte distribuição das ações aplicadas à viga-parede.

Figura 28 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (ACI)



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme os preceitos do Model Code 2010, o dimensionamento do modelo de viga foi conduzido por meio do MBT. Em um primeiro momento, procedeu-se à majoração das cargas, com base nos parâmetros previamente estabelecidos. Com isso, foi possível aplicar as combinações de carregamento conforme os critérios definidos pela norma. Com base na carga aplicada sobre o elemento

$$\begin{aligned}
 U &= 1,35 \cdot 26,25 + 1,50 \cdot 116,75 \\
 U &= 210,56 \text{ kN/m.}
 \end{aligned} \tag{4.48}$$

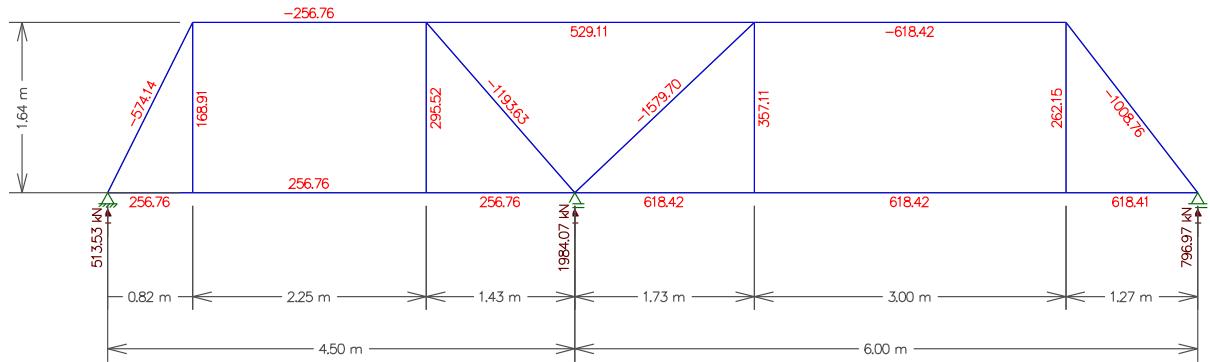
Adotando o mesmo raciocínio para a carga aplicada na parte inferior, obtém-se os seguintes valores:

$$U = 1,35 \cdot 26,25 + 1,50 \cdot 45,18 \quad (4.49)$$

$$U = 103,21 \text{ kN/m}$$

assim, obtém-se a seguinte representação dos carregamentos atuantes na viga-parede.

Figura 29 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais (Model Code)



Fonte: elaborado pelo autor.

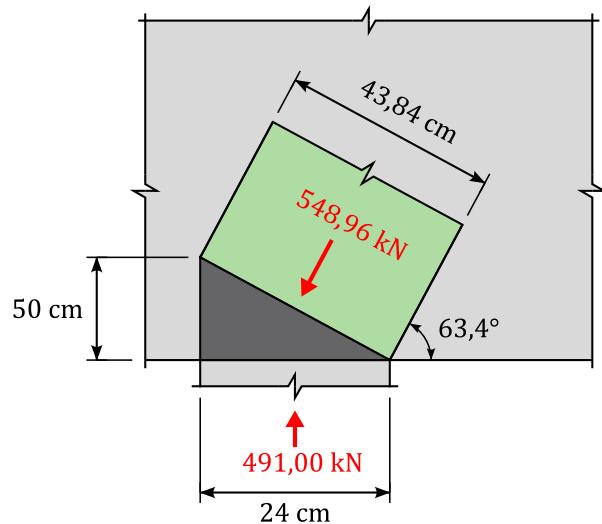
#### 4.2.1 Verificação da zona nodal

Com a avaliação conduzida segundo a NBR 6118, o nó é classificado como do tipo CCT, caracterizado pela presença de duas bielas comprimidas e um tirante tracionado. A altura do tirante foi definida conforme a recomendação normativa de dispor a armadura principal de tração em uma faixa de  $0,15h$  medida a partir da face inferior da viga. Assim, adotou-se a altura de 0,50 m para o tirante e a largura da biela em relação ao apoio à esquerda:

$$a_{bie3} = 24 \cdot \sin 63,4^\circ + 50 \cdot \cos 63,4^\circ \quad (4.50)$$

$$a_{bie} = 43,84 \text{ cm}$$

Figura 30 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio esquerdo (NBR)



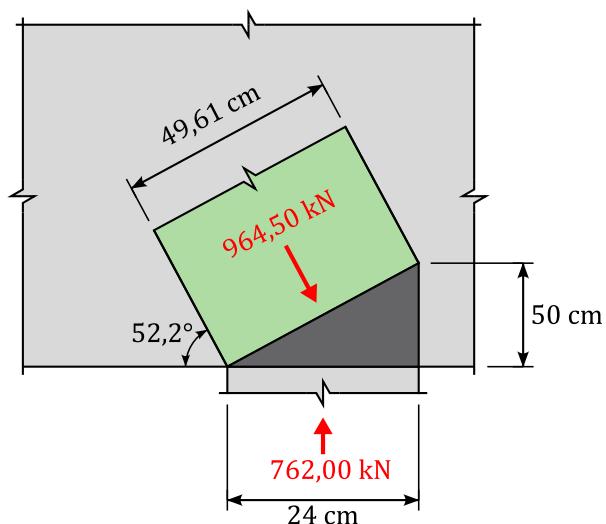
Fonte: elaborado pelo autor.

em relação ao apoio à direita:

$$a_{bie4} = 24 \cdot \sin 52,2^\circ + 50 \cdot \cos 52,2^\circ \quad (4.51)$$

$$a_{bie4} = 49,61 \text{ cm}$$

Figura 31 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio direito (NBR)



Fonte: elaborado pelo autor.

com as larguras determinadas, foi possível calcular a tensão que atua no nó esquerdo:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd3,bie} &= \frac{548,96}{30 \cdot 43,84} \\ \sigma_{cd3,bie} &= 4,17 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.52)$$

a tensão que atua no nó direito:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd4,bie} &= \frac{964,50}{30 \cdot 49,61} \\ \sigma_{cd4,bie} &= 6,48 \text{ MPa.}\end{aligned}\quad (4.53)$$

Para a análise do nó, deve-se calcular as tensões principais  $\sigma_{cd1}$  e  $\sigma_{cd2}$  em função de  $f_{cd1}$  e  $f_{cd2}$ . Considerando inicialmente a verificação do nó esquerdo, temos:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd1} &= \frac{491}{30 \cdot 24} \\ \sigma_{cd1} &= 6,68 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.54)$$

satisfazendo a condição:

$$\sigma_{cd1} = 6,68 \text{ MPa} \leq 16,03 \text{ MPa}$$

assim como:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd2} &= \frac{548,96}{30 \cdot 43,84} \\ \sigma_{cd2} &= 4,17 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.55)$$

atendendo à condição:

$$\sigma_{cd2} = 4,17 \text{ MPa} \leq 11,31 \text{ MPa}$$

de maneira semelhante, verifica-se o nó direito:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd1} &= \frac{762}{30 \cdot 24} \\ \sigma_{cd1} &= 10,58 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.56)$$

atendendo ao critério:

$$\sigma_{cd1} = 10,58 \text{ MPa} \leq 16,03 \text{ MPa}$$

tanto quanto:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd2} &= \frac{964,50}{30 \cdot 49,61} \\ \sigma_{cd2} &= 6,48 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.57)$$

segundo à condição:

$$\sigma_{cd2} = 6,48 \text{ MPa} \leq 11,31 \text{ MPa.}$$

No dimensionamento segundo o ACI 318, a classificação dos nós adota os mesmos

critérios utilizados para a viga-parede isostática. A altura do tirante, conforme orientações da norma, a armadura principal de tração do lado esquerdo:

$$W_{tmax} = \frac{1572 \cdot 500}{20,4 \cdot 240} \quad (4.58)$$

$$W_{tmax} = 0,16 \text{ m}$$

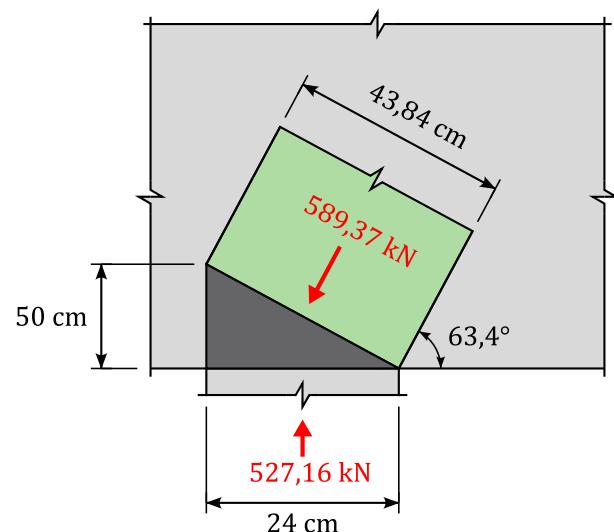
a armadura principal de tração do lado direito:

$$W_{tmax} = \frac{2761 \cdot 500}{20,4 \cdot 240} \quad (4.59)$$

$$W_{tmax} = 0,28 \text{ m.}$$

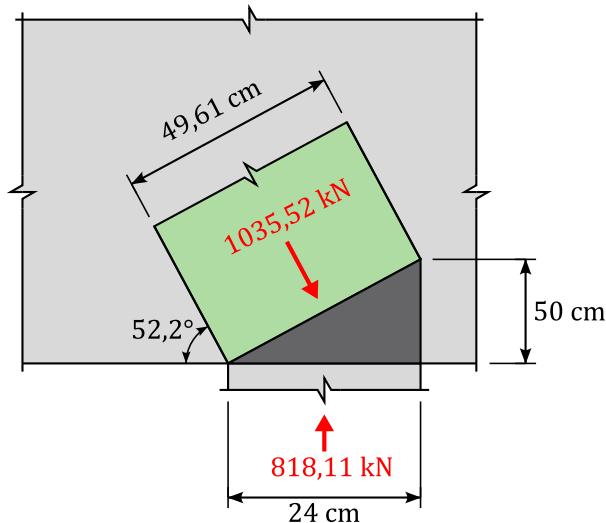
A análise do dimensionamento da altura do tirante revelou um valor significativamente reduzido, insuficiente para garantir a segurança e a eficiência estrutural exigidas pelo projeto. Em função dessa limitação, optou-se pela adoção do critério previsto na norma brasileira NBR 6118, que estabelece uma altura mínima do tirante igual a 0,15 vezes a altura total do elemento estrutural. Dessa forma, para fins de dimensionamento, adotam-se a altura do tirante de 0,50 m e a largura da biela para o lado esquerdo de 43,83 cm e para o lado direito, 49,62 cm.

Figura 32 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio esquerdo (ACI)



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 33 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio direito (ACI)



Fonte: elaborado pelo autor.

No contexto da verificação estrutural, é necessário determinar a resistência nominal à compressão do nó,  $F_{nn}$ , considerando três aspectos fundamentais: apoio, biela e tirante. A resistência obtida deve satisfazer tanto o lado esquerdo quanto para o direito na seguinte condição:

$$f_{ce} = 0,85 \cdot 0,8 \cdot 30 \cdot 1 \quad (4.60)$$

$$f_{ce} = 20,40 \text{ MPa.}$$

Conforme a Tabela 1, aplica-se o coeficiente  $\beta_n = 0,8$  para nós classificados como CCT. O fator  $\beta_c$ , que ajusta a resistência devido ao confinamento do apoio nodal, deve ser determinado segundo a Tabela 2. Considerando que a coluna possui a mesma largura da viga-parede, adotou-se  $\beta_c = 1$ . O valor  $f'_c$  corresponde à resistência característica à compressão do concreto. Verificação para o nó esquerdo:

$$\text{Reação: } 0,75 \cdot 2,04 \cdot 24 \cdot 43,84 \geq 527,16$$

$$1609,80 \text{ kN} \geq 527,16 \text{ kN}$$

$$\text{Bielas: } 0,75 \cdot 2,04 \cdot 50 \cdot 43,84 \geq 589,37 \quad (4.61)$$

$$3353,76 \text{ kN} \geq 589,37 \text{ kN}$$

$$\text{Tirante: } 0,75 \cdot 2,04 \cdot 43,84 \cdot 43,84 \geq 263,58$$

$$2940,58 \text{ kN} \geq 263,58 \text{ kN.}$$

Verificação para o nó direito:

$$\text{Reação: } 0,75 \cdot 2,04 \cdot 24 \cdot 49,61 \geq 818,11$$

$$1821,68 \text{ kN} \geq 818,11 \text{ kN}$$

$$\text{Biela: } 0,75 \cdot 2,04 \cdot 50 \cdot 49,61 \geq 1035,52$$

$$3795,17 \text{ kN} \geq 10035,52 \text{ kN}$$

$$\text{Tirante: } 0,75 \cdot 2,04 \cdot 49,61 \cdot 49,61 \geq 634,82$$

$$3765,56 \text{ kN} \geq 634,82 \text{ kN.}$$

Ressalta-se que a resistência à compressão do nó foi satisfatoriamente verificada nas três condições avaliadas. A respectiva tensão no nó esquerdo pode ser calculada por meio da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \sigma_{cd3,n} &= \frac{589,37}{30 \cdot 43,84} \\ \sigma_{cd3,n} &= 4,48 \text{ MPa.} \end{aligned} \quad (4.63)$$

A tensão atuante no nó do lado direito é determinada abaixo:

$$\begin{aligned} \sigma_{cd4,n} &= \frac{1035,52}{30 \cdot 49,61} \\ \sigma_{cd4,n} &= 6,96 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.64)$$

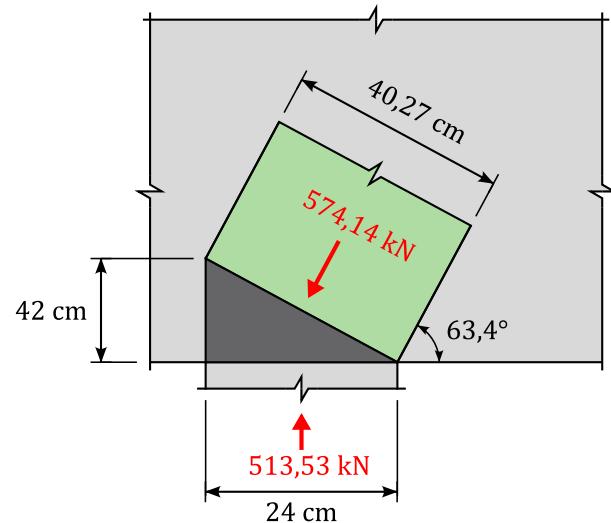
além disso, a verificação da resistência à compressão deve ser complementada pela análise do parâmetro dimensional descrito a seguir:

$$\begin{aligned} 2.036,67 &\leq 0,75 \cdot 0,83 \cdot \sqrt{30} \cdot 300 \cdot 3300 \\ 2.036,67 &\leq 3.375,48 \text{ kN.} \end{aligned} \quad (4.65)$$

Com base nos critérios estabelecidos pelo Model Code 2010, o dimensionamento do modelo de viga segue os mesmos princípios adotados pela viga isostática, sendo este também tratado como um nó do tipo CCT. A altura do tirante é definida para esse exemplo como 0,42 m. As análises são realizadas considerando separadamente os lados direito e esquerdo. Analisando o lado esquerdo, temos:

$$\begin{aligned} a_{bie3} &= 24 \cdot \sin 63,4^\circ + 42 \cdot \cos 63,4^\circ \\ a_{bie} &= 40,27 \text{ cm.} \end{aligned} \quad (4.66)$$

Figura 34 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio esquerdo (Model Code)



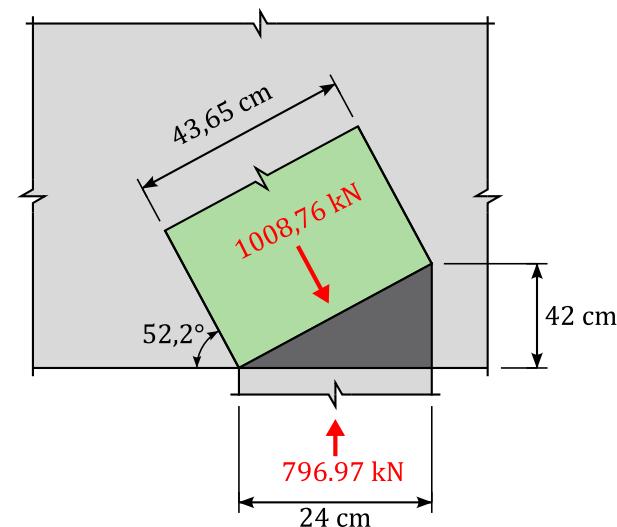
Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação ao lado direito:

$$a_{bie4} = 24 \cdot \sin 52,2^\circ + 42 \cdot \cos 52,2^\circ \quad (4.67)$$

$$a_{bie4} = 43,65 \text{ cm}$$

Figura 35 – Modelo de bielas e tirantes com cargas nodais no apoio direita (Model Code)



Fonte: elaborado pelo autor.

considera-se que a tensão reduzida de compressão seja:

$$f_{cd,no} = \frac{0,75 \cdot 1 \cdot 30}{1,5} \quad (4.68)$$

$$f_{cd,no} = 15 \text{ MPa.}$$

#### 4.2.2 Verificação das bielas

De acordo com a NBR 6118, propõe-se que a capacidade resistente do tirante, definida por  $f_{cd3}$ , seja comparada com a tensão de compressão atuante no tirante inclinado, calculada na Seção 4.2.1.

$$f_{cd3} = 0,72 \cdot 0,88 \cdot \frac{30}{1,4} \quad (4.69)$$

$$f_{cd2} = 13,60 \text{ MPa}$$

a condição é satisfeita conforme demonstrado a seguir:

$$\sigma_{cd,bie}^{3 \text{ ou } 4} \leq f_{cd1} \quad (4.70)$$

$$4,17 \text{ MPa e } 6,48 \text{ MPa} < 13,60 \text{ MPa.}$$

Além disso, é necessário fazer a análise da biela no nó intermediário. Com isso temos para o nó esquerdo:

$$\sigma_{cd3,bie} = \frac{1141,3}{(13,58 \times \sin 48,8^\circ + 30 \times \sin 48,8^\circ) \times 30} \quad (4.71)$$

$$\sigma_{cd3,bie} = 12,7 \text{ MPa}$$

para o nó direito:

$$\sigma_{cd4,bie} = \frac{1510,4}{(16,42 \times \sin 43,4^\circ + 60 \times \sin 43,4^\circ) \times 30} \quad (4.72)$$

$$\sigma_{cd4,bie} = 9,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cd,bie}^{3 \text{ ou } 4} \leq f_{cd1}. \quad (4.73)$$

O ACI 318 recomenda o uso de  $\beta_s = 0,75$ , conforme a Tabela 6 indica para bielas com armaduras transversais distribuídas. A partir desse parâmetro, obtém-se a resistência limite da biela:

$$f_{ce} = 0,85 \cdot 0,75 \cdot 30 \cdot 1 \quad (4.74)$$

$$f_{ce} = 19,1 \text{ MPa.}$$

A eficiência da biela em resistir à força de compressão pode ser determinada para ambos os

lados da viga-parede. Para o lado esquerdo:

$$\begin{aligned} F_{ns} &= 1,91 \cdot 50 \cdot 43,84 \\ F_{ns} &= 4186,72 \text{ kN.} \end{aligned} \quad (4.75)$$

Visando assegurar que a força de compressão atuante na biela permaneça dentro dos limites admissíveis, a norma adota o seguinte critério:

$$\begin{aligned} 0,75 \cdot 4186,72 &\geq 589,37 \\ 3140,04 \text{ kN} &\geq 589,37 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4.76)$$

com isso, a tensão atuante é determinada.

$$\begin{aligned} \frac{3140,04}{50 \cdot 43,84} &\geq \frac{589,37}{50 \cdot 43,84} \\ 14,32 \text{ MPa} &\geq 2,68 \text{ MPa.} \end{aligned} \quad (4.77)$$

Para o lado direito:

$$\begin{aligned} F_{ns} &= 1,91 \cdot 50 \cdot 49,61 \\ F_{ns} &= 4737,75 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4.78)$$

para evitar que a força de compressão ultrapasse a resistência da biela, aplica-se o seguinte critério normativo:

$$\begin{aligned} 0,75 \cdot 4737,75 &\geq 1035,52 \\ 3553,31 \text{ kN} &\geq 1035,52 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4.79)$$

Assim, é possível determinar a tensão atuante:

$$\begin{aligned} \frac{3553,31}{50 \cdot 49,61} &\geq \frac{1035,52}{50 \cdot 49,61} \\ 14,32 \text{ MPa} &\geq 4,17 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.80)$$

Segundo o Model Code 2010, a biela deve resistir a uma tensão solicitante definida por:

$$\begin{aligned} f_{ceCCT} &= \frac{0,75 \cdot 30}{1,5} \\ f_{ceCCT} &= 15 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.81)$$

a verificação da tensão solicitante na biela deve ser realizada tanto no lado direito quanto no esquerdo. Fazendo a verificação do lado esquerdo:

$$\sigma_{bie3} = \frac{574,14}{30 \cdot 40,27} \quad (4.82)$$

$$\sigma_{bie3} = 4,75 \text{ MPa}$$

procedendo à análise do lado direito:

$$\sigma_{bie4} = \frac{1008,75}{30 \cdot 43,65} \quad (4.83)$$

$$\sigma_{bie4} = 8,35 \text{ MPa}$$

#### 4.2.3 Detalhamento dos tirantes

A segurança e o desempenho estrutural são garantidos pelo cálculo de várias áreas de armadura para atender às diferentes solicitações ao longo da estrutura. Esse procedimento garante que cada tirante suporte os esforços adequados, assegurando resistência e segurança ao conjunto. Conforme as diretrizes da NBR 6118 temos que a área da armadura do tirante relacionada a força  $F_{td1}$ :

$$A_{s1} = \frac{245,50}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.84)$$

$$A_{s1} = 5,65 \text{ cm}^2$$

relacionada a força  $F_{td2}$ :

$$A_{s2} = \frac{591,28}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.85)$$

$$A_{s2} = 13,6 \text{ cm}^2$$

relacionada a força  $F_{td3}$ :

$$A_{s3} = \frac{505,88}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.86)$$

$$A_{s3} = 11,64 \text{ cm}^2$$

relacionada a força  $F_{cd3}$  esquerda:

$$A_{scd,3} = \frac{548,96}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.87)$$

$$A_{scd,3} = 12,63 \text{ cm}^2$$

relacionada a força  $F_{cd4}$  direita:

$$A_{scd,4} = \frac{964,50}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.88)$$

$$A_{scd,4} = 22,18 \text{ cm}^2.$$

Nos termos do ACI 318, o dimensionamento da área do tirante considerando a força  $F_{td1}$ :

$$A_{s1} = \frac{263,57}{0,75 \cdot 50} \quad (4.89)$$

$$A_{s1} = 7,03 \text{ cm}^2$$

considerando a força  $F_{td2}$ :

$$A_{s2} = \frac{634,82}{0,75 \cdot 50} \quad (4.90)$$

$$A_{s2} = 16,93 \text{ cm}^2$$

considerando a força  $F_{td3}$ :

$$A_{s3} = \frac{543,13}{0,75 \cdot 50} \quad (4.91)$$

$$A_{s3} = 14,48 \text{ cm}^2$$

considerando a força  $F_{cd3}$  esquerda:

$$A_{scd,3} = \frac{589,37}{0,75 \cdot 50} \quad (4.92)$$

$$A_{scd,3} = 15,72 \text{ cm}^2$$

considerando a força  $F_{cd3}$  direita:

$$A_{scd,4} = \frac{1035,52}{0,75 \cdot 50} \quad (4.93)$$

$$A_{scd,4} = 27,61 \text{ cm}^2.$$

Em conformidade com o Model Code 2010, o cálculo da área do tirante em relação da força  $F_{td1}$ :

$$A_{s1} = \frac{256,76}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.94)$$

$$A_{s1} = 5,91 \text{ cm}^2$$

em relação da força  $F_{td2}$

$$A_{s2} = \frac{618,42}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.95)$$

$$A_{s2} = 14,22 \text{ cm}^2$$

em relação da força  $F_{td3}$ :

$$A_{s3} = \frac{529,11}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.96)$$

$$A_{s3} = 12,17 \text{ cm}^2$$

em relação da força  $F_{cd3}$  esquerda:

$$A_{scd,3} = \frac{574,14}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.97)$$

$$A_{scd,3} = 13,20 \text{ cm}^2$$

em relação da força  $F_{cd4}$  direita:

$$A_{scd,4} = \frac{1008,76}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.98)$$

$$A_{scd,4} = 23,20 \text{ cm}^2.$$

#### 4.2.4 Armadura mínima

A NBR 6118 estabelece o cálculo da armadura mínima negativa sendo utilizada a média da relação entre a altura e os vãos, sendo assim, foi possível obter:

$$\frac{A_{s,sup}}{s} = \frac{0,25 \cdot 11,64}{0,7} \quad (4.99)$$

$$\frac{A_{s,sup}}{s} = 4,16 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\frac{A_{s,cen}}{s} = \frac{0,75 \cdot 11,64}{2,1} \quad (4.100)$$

$$\frac{A_{s,cen}}{s} = 4,16 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}.$$

Conforme as exigências de taxa mínima, o detalhamento do  $A_{s,min}$  ao longo da altura é definido por:

$$A_{s,min} = 0,075 \cdot 30 \quad (4.101)$$

$$A_{s,min} = 2,25 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

também é necessário prever a armadura de suspensão, visto que no caso a viga parede tem uma carga indireta uniformemente distribuída. A armadura vertical é dimensionada como:

$$\frac{A_{s,sup}}{s} = \frac{100}{\frac{50}{1,15}} \quad (4.102)$$

$$\frac{A_{s,sup}}{s} = 2,30 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

além da armadura de suspensão, deve-se prever a armadura mínima vertical, determinada de acordo com as exigências normativas.

$$\begin{aligned}\frac{A_{mn}}{S} &= 0,15 \cdot 30 \\ \frac{A_{mn}}{S} &= 4,50 \frac{\text{cm}^2}{m}.\end{aligned}\quad (4.103)$$

O ACI 318 determina o cálculo da armadura mínima da seguinte forma:

$$\begin{aligned}A_h = A_v &= 0,0025 \cdot 30 \cdot 100 \\ A_h = A_v &= 7,50 \frac{\text{cm}^2}{m}.\end{aligned}\quad (4.104)$$

Definiu-se o  $A_{s,min}$  ao longo da altura com base no critério de flexão do item 9.6.1, conforme descrito abaixo:

$$A_{s,min} \geq \begin{cases} \frac{0,25 \cdot \sqrt{30}}{500} \cdot 30 \cdot 330 = 27,11 \text{cm}^2 \\ \frac{1,4}{500} \cdot 30 \cdot 330 = 27,72 \text{cm}^2 \end{cases}\quad (4.105)$$

adotou-se o valor de  $A_{s,min} = 27,72 \text{cm}^2$  como armadura mínima ao longo da altura, por ser o critério mais restritivo entre as condições estabelecidas.

O Model Code 2010 estabelece armadura mínima longitudinal não deve ser menor que:

$$\begin{aligned}A_{s,min} &= 0,26 \cdot \frac{0,3 \cdot 30^{\frac{2}{3}}}{50} \cdot 30 \cdot 330 \\ A_{s,min} &= 14,91 \text{cm}^2\end{aligned}\quad (4.106)$$

podemos obter o valor da altura útil por meio da seguinte equação:

$$\begin{aligned}d &= h - \left( \text{cob} + \varnothing_t + \varnothing_l + S_v + \frac{\varnothing_l}{2} \right) \\ d &= 350 - \left( 3 + 0,5 + 2,5 + 12,5 + \frac{2,5}{2} \right) \\ d &= 330 \text{ cm.}\end{aligned}\quad (4.107)$$

#### 4.2.5 Detalhamento

De forma análoga ao procedimento de detalhamento das vigas-parede isostáticas apresentado no Capítulo 4.1.5, aplica-se, neste capítulo, a mesma metodologia de dimensionamento, mantendo-se os critérios normativos adotados anteriormente.

Para o comprimento de ancoragem:

$$\begin{aligned}\ell_b &= 34 \cdot 1,25 \\ \ell_b &= 42,5 \text{cm}\end{aligned}\quad (4.108)$$

para o laço:

$$\begin{aligned}\ell_{b,\text{nec}} &= 0,7 \cdot 42,5 \\ \ell_{b,\text{nec}} &\simeq 30\text{cm}\end{aligned}\quad (4.109)$$

o comprimento de ancoragem disponível:

$$\begin{aligned}\ell_{b,\text{disp}} &= 24 - 3 \\ \ell_{b,\text{disp}} &= 21\text{cm.}\end{aligned}\quad (4.110)$$

Com base na explicação apresentada no Capítulo 2.7.3, que trata do efeito da compressão direta, a Equação 2.35 permite considerar a redução do comprimento de ancoragem necessário.

$$\ell_{b,\text{nec}} = \alpha_1 \cdot \alpha_5 \cdot \ell_b \cdot \frac{A_{s,\text{calc}}}{A_{s,\text{ef}}} \geq \ell_{b,\text{min}}. \quad (4.111)$$

Embora as tensões verticais sejam normalmente avaliadas no dimensionamento do pilar, neste estudo elas são calculadas exclusivamente para a determinação do fator redutor  $\alpha_5$ , relacionado à pressão transversal na região de ancoragem. No caso da NBR 6118, as tensões verticais foram obtidas por meio da Equação 2.17, resultando em 6,80 MPa para o lado esquerdo e 10,60 MPa para o lado direito. Ambos os valores são inferiores ao limite  $f_{cd3}$  estabelecido pela norma.

Para o ACI 318, essas tensões são determinadas a seguir:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd3,v} &= \frac{527,16}{30 \cdot 24} \\ \sigma_{cd3,v} &= 7,30 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.112)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{cd4,v} &= \frac{818,11}{30 \cdot 24} \\ \sigma_{cd4,v} &= 11,4 \text{ MPa.}\end{aligned}\quad (4.113)$$

No caso o Model Code 2010, as tensões verticais são calculadas conforme apresentado a seguir:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd3,v} &= \frac{513,53}{30 \cdot 24} \\ \sigma_{cd3,v} &= 7,13 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.114)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{cd4,v} &= \frac{796,97}{30 \cdot 24} \\ \sigma_{cd4,v} &= 11,07 \text{ MPa.}\end{aligned}\quad (4.115)$$

Para o cálculo do fator  $\alpha_5$ , seguem-se as recomendações da Tabela 8, temos que para a NBR 6118 no apoio esquerdo:

$$\alpha_5 = 1 - 0,04 \cdot 6,8 = 0,73 \quad (4.116)$$

apoio direito:

$$\alpha_5 = 1 - 0,04 \cdot 10,60 = 0,58. \quad (4.117)$$

Para o ACI 318 no apoio esquerdo:

$$\alpha_5 = 1 - 0,04 \cdot 7,30 = 0,71 \quad (4.118)$$

apoio direito:

$$\alpha_5 = 1 - 0,04 \cdot 10,14 = 0,59. \quad (4.119)$$

Quanto o Model Code no apoio esquerdo:

$$\alpha_5 = 1 - 0,04 \cdot 7,13 = 0,72 \quad (4.120)$$

apoio direito:

$$\alpha_5 = 1 - 0,04 \cdot 11,07 = 0,56. \quad (4.121)$$

Em relação ao apoio direito, para ambas as normas, o valor calculado foi inferior ao mínimo indicado na Tabela 8. Nesse caso, adota-se  $\alpha_5 = 0,7$ . Com isso, torna-se possível calcular o comprimento de ancoragem necessário nos apoios, assumindo-se  $\alpha_1 = 0,7$ . Para o caso da NBR 6118, obtêm-se os seguintes valores para o apoio esquerdo:

$$\ell_{b,nec} = 0,7 \cdot 0,73 \cdot 42,5 \cdot \frac{5,65}{6 \cdot 1,25} = 16,36 \text{ cm} \geq \ell_{b,min} \quad (4.122)$$

apoio direito:

$$\ell_{b,nec} = 0,7 \cdot 0,7 \cdot 42,5 \cdot \frac{13,6}{12 \cdot 1,25} = 19,5 \text{ cm} \geq \ell_{b,min}. \quad (4.123)$$

A respeito do ACI 318 temos para o apoio esquerdo:

$$\ell_{b,nec} = 0,7 \cdot 0,71 \cdot 42,5 \cdot \frac{7,03}{6 \cdot 1,25} = 19,80 \text{ cm} \geq \ell_{b,min} \quad (4.124)$$

apoio direito:

$$\ell_{b,nec} = 0,7 \cdot 0,7 \cdot 42,5 \cdot \frac{16,93}{12 \cdot 2,0} = 14,7 \text{ cm} \geq \ell_{b,min}. \quad (4.125)$$

Em relação ao model Code temos para o apoio esquerdo:

$$\ell_{b,nec} = 0,7 \cdot 0,72 \cdot 42,5 \cdot \frac{5,91}{6 \cdot 1,25} = 16,88 \text{ cm} \geq \ell_{b,min} \quad (4.126)$$

apoio direito:

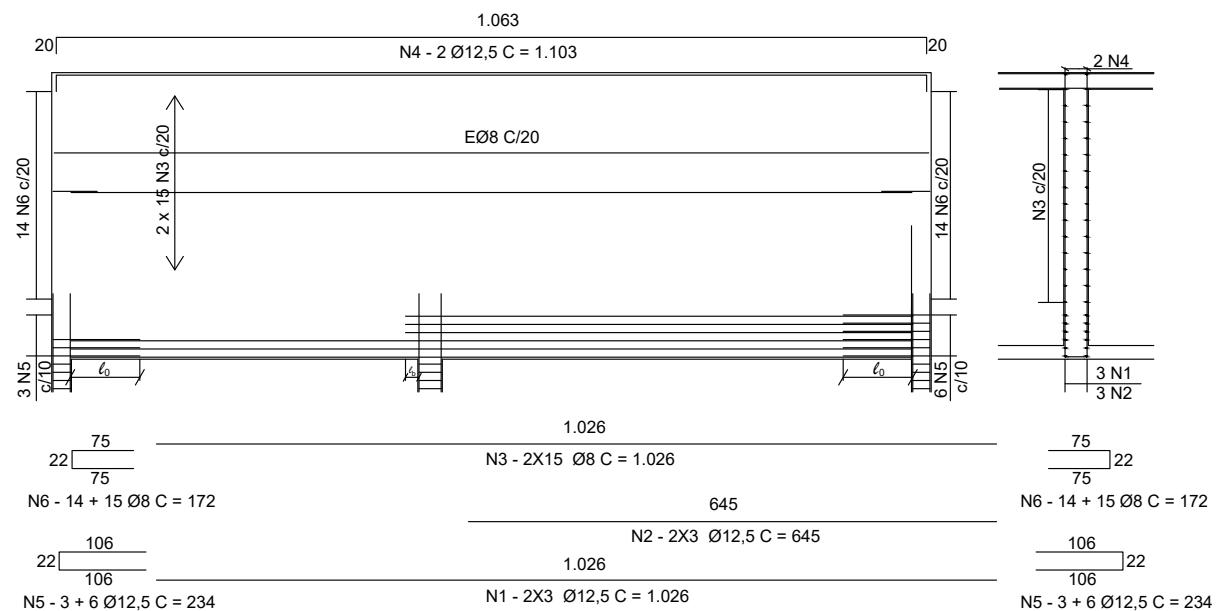
$$\ell_{b,nec} = 0,7 \cdot 0,7 \cdot 42,5 \cdot \frac{14,22}{12 \cdot 1,25} = 19,72 \text{ cm} \geq \ell_{b,min}. \quad (4.127)$$

Todos os casos satisfazem a condição  $\ell_{b,\text{nec}} < \ell_{b,\text{disp}}$ .

No detalhamento deste exemplo, a legenda utilizada apresenta uma função distinta daquela descrita no Item 4.1.5. Para cada grupo de barras temos que: N1, N2 e N5 são dispostas em paralelas e se complementam, compondo a armadura principal. A barra N1 atua como barra de sustentação, enquanto a barra N2 é posicionada sobre as camadas superiores, e cada barra N5 encerra uma camada de armadura, correspondendo à região onde ocorre a emenda por traspasse, definida pelo comprimento  $\ell_0$ . Os grupos N3 e N6 também se completam e estão dispostos em paralelo, distribuindo o  $A_s$  ao longo da altura da viga. Já N4 representa a armadura mínima. A representação do estribo difere do exemplo anterior, sendo ilustrada na própria viga-parede, na posição horizontal, indicada pela letra E.

Na Figura 36 é possível observar o detalhamento da viga-parede contínua dimensionada na Seção 4.2 referente a norma NBR 6118.

Figura 36 – Detalhamento do modelo de viga parede continua (NBR)

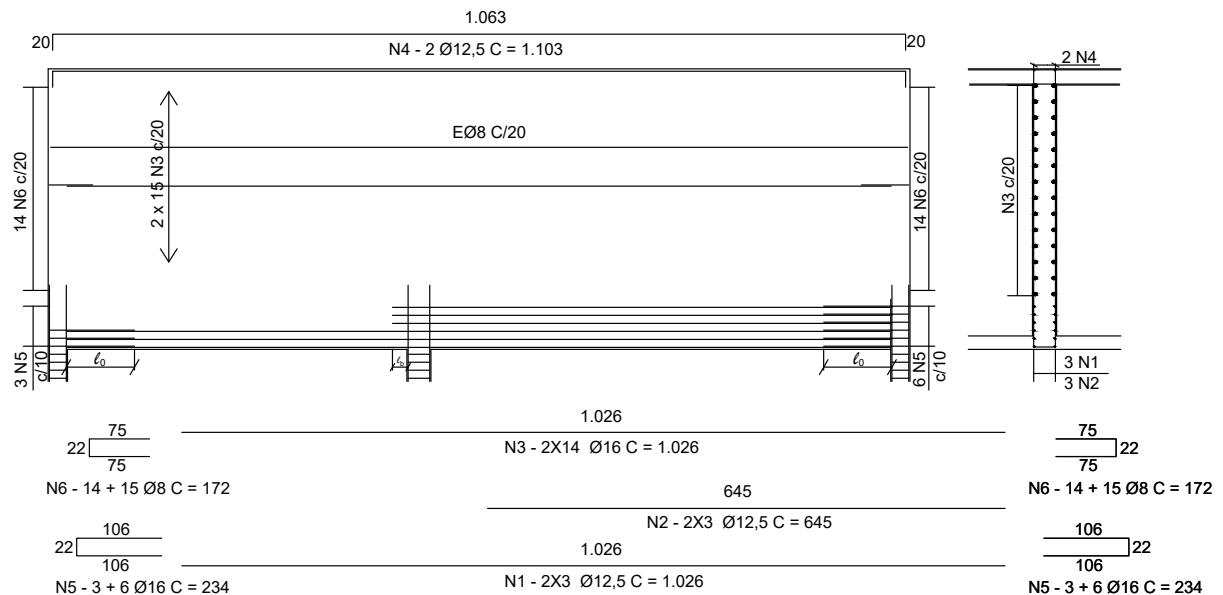


Fonte: elaborado pelo autor.

Ao observar a Figura 36, nota-se, de forma análoga ao detalhamento da viga-parede isostática, que o traspasse adotado foi executado em laço. O comprimento  $\ell_b$  corresponde a ancoragem da armadura entre as barras N1 e N2.

Já na Figura 37, temos o detalhamento da viga-parede contínua dimensionada no Capítulo 4.2, em conformidade com o ACI 318.

Figura 37 – Detalhamento do modelo de viga parede continua (ACI)

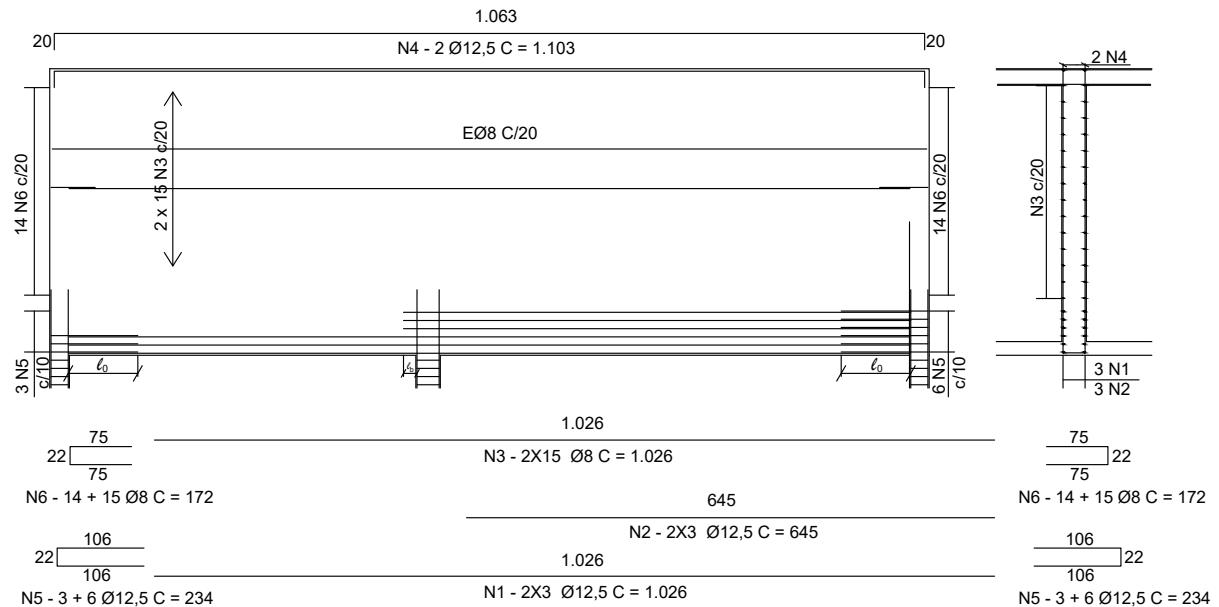


Fonte: elaborado pelo autor.

Em comparação entre o detalhamento conforme o ACI 318 e o obtido segundo a NBR 6118, a barra N3 foi a única distinta. Nesse caso, tornou-se necessário adotar uma barra com área de seção transversal cerca de quatro vezes maior do que a utilizada na NBR 6118, o que, por consequência, permitiu a redução do número de barras. Além disso, o comprimento de ancoragem calculado segundo o código apresentou valores maiores do que os determinados pela norma brasileira.

Por outro lado, o detalhamento da viga-parede contínua, dimensionada na Seção 4.2 de acordo com o Model Code 2010, é apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Detalhamento do modelo de viga parede contínua (Model Code)



Fonte: elaborado pelo autor.

Para o Model Code 2010, adotou-se a armadura mínima no detalhamento, uma vez que a norma não estabelece critérios específicos para o cisalhamento em vigas-parede. Além disso, embora o comprimento de ancoragem  $\ell_b$  obtido não seja idêntico, ele apresentou valor próximo ao determinado pela NBR 6118, o que permitiu a utilização do mesmo detalhamento, sem comprometer à segurança estrutural.

#### 4.3 Discussão

A comparação entre as referências técnicas no dimensionamento evidenciou diferenças consideráveis. A Tabela 10 apresenta uma comparação dos parâmetros de dimensionamento de uma viga-parede isostática, utilizando o Método das Bielas e Tirantes (MBT), conforme cada norma. Nota-se que os valores de resistência podem ser comparados diretamente com a NBR 6118 (ABNT, 2023), que impõe critérios mais conservadores, especialmente ao manter  $\alpha_{v2}$  sempre inferior a 1.

Tabela 10 – Resumo comparativo dos parâmetros de projeto para a viga-parede isostática

| Norma                       | Capacidade resistente limite da biela (MPa) | Dimensionamento do tirante cm <sup>2</sup> | Verificação do nó (MPa) | Força de compressão atuante na biela (MPa) |
|-----------------------------|---|--|-------------------------|--|
| NBR 6118 (ABNT, 2023)       | 13,60                                       | 9,20                                       | 7,20                    | 7,20                                       |
| ACI 318 (ACI, 2019)         | 19,10                                       | 11,77                                      | 7,89                    | 2,62                                       |
| Model Code 2010 (FIB, 2013) | 15,00                                       | 11,45                                      | 15,00                   | 8,25                                       |

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que a capacidade resistente à compressão das bielas apresentou valores distintos para todas as normas analisadas, refletindo as diferenças nos critérios de verificação e nos coeficientes adotados por cada referência normativa. Quanto ao dimensionamento dos tirantes, as normas apresentam variações na área de armadura recomendada, indicando diferentes níveis de conservadorismo e exigências normativas. Vale destacar que, no dimensionamento da armadura do tirante segundo o Model Code 2010 (FIB, 2013), foi adotado o valor mínimo permitido pelo código, em consonância com os critérios de segurança e eficiência do método. Adicionalmente, a verificação do nó do mesmo código apresentou um valor mais elevado.

Observa-se que, segundo o ACI 318 (ACI, 2019), a força de compressão atuante na biela resultou significativamente inferior à obtida pelas demais normas, em função dos critérios adotados para a definição da resistência e das verificações associadas ao modelo. Ressalta-se ainda que todos os valores atendem às verificações de segurança exigidas pelo procedimento adotado.

A Tabela 11 sintetiza os principais parâmetros de projeto para vigas-parede contínuas, dimensionadas segundo o Método das Bielas e Tirantes (MBT), em conformidade com as especificações de cada norma analisada.

Tabela 11 – Resumo comparativo dos parâmetros de projeto para a viga-parede contínua

| Norma                       | Capacidade resistente limite da biela (MPa) | Compressão solicitante da biela (direita) MPa | Compressão solicitante da biela (esquerda) MPa | $\sigma_{cd3,bie}$<br>(esquerda) | $\sigma_{cd4,bie}$<br>(direita) | $As_{cd3}$<br>cm <sup>2</sup> | $As_{cd4}$<br>cm <sup>2</sup> |
|-----------------------------|---|---|--|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NBR 6118 (ABNT, 2023)       | 13,5  | 9,20  | 12,7   | 4,17                             | 6,48                            | 12,6                          | 22,2                          |
| ACI 318 (ACI, 2019)         | 19,1  | 4,17  | 2,68   | 4,48                             | 6,96                            | 15,7                          | 27,6                          |
| Model Code 2010 (FIB, 2013) | 15,0  | 8,35  | 4,75   | 15,0                             | 15,0                            | 14,9                          | 23,2                          |

Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se que a capacidade resistente limite da biela varia entre as normas, refletindo diferentes abordagens quanto à segurança e ao comportamento do concreto comprimido. As tensões solicitantes nas bielas (direita e esquerda), bem como as tensões atuantes nas regiões  $\sigma_{cd3}$  e  $\sigma_{cd4}$ , evidenciam como cada norma trata as distribuições internas de esforços.

Adicionalmente, os valores de área de armadura ( $As_{cd3}$  e  $As_{cd4}$ ) indicam exigências distintas para o dimensionamento dos tirantes inclinados, com destaque para a norma americana, que demanda armaduras mais robustas. Entretanto, ao comparar as bitolas efetivamente detalhadas, não se evidencia diferença significativa entre as soluções adotadas. Já a NBR 6118 (ABNT, 2023) apresenta tensões relativamente mais baixas nas bielas, que está relacionado à adoção de critérios mais conservadores. O Model Code 2010 (FIB, 2013), por sua vez, adota tensões próximas ao limite de capacidade, evidenciando uma abordagem mais otimizada.

## 5 CONCLUSÃO

A análise comparativa entre as normas evidencia diferenças nos critérios de classificação para vigas-parede, especialmente no que se refere à razão entre vão e altura ( $\frac{V}{h}$ ). Ainda assim, foi possível aplicar o Método das Bielas e Tirantes (MBT) na resolução de um exemplo de dimensionamento de viga-parede isostática e de um exemplo de dimensionamento de viga-parede contínua, segundo as três normas analisadas.

Nota-se que a NBR 6118 apresenta uma abordagem distinta das demais normas. Embora também considere diferentes tipos de bielas na definição de coeficientes e fatores redutores, a norma brasileira baseia a resistência à compressão das bielas em uma classificação específica dessas regiões comprimidas, resultando em um critério próprio para a avaliação da capacidade resistente.

Em contrapartida, o dimensionamento segundo o ACI 318, por meio do Método das Bielas e Tirantes, é conduzido a partir de um conjunto abrangente de verificações, com destaque para o controle da resistência dos nós e para a limitação da resistência à compressão das bielas, a qual é verificada por meio da comparação entre a força solicitante e a resistência à compressão reduzida do concreto. Essa verificação assegura que a biela seja capaz de resistir, com segurança, às tensões de compressão presentes no modelo. Para vigas-parede, o código estabelece ainda restrições geométricas específicas, de modo a garantir que a força cortante última não exceda a resistência mínima prevista.

O Model Code 2010, por sua vez, adota um procedimento de dimensionamento mais simplificado, com menor quantidade de restrições, concentrando a verificação da resistência das bielas em formulações mais diretas. Vale destacar que, na resistência à compressão das bielas, o coeficiente de redução  $k_c$  considera, entre outros aspectos, a influência dos ângulos formados entre as bielas e os tirantes.

Dessa forma, independentemente das diferenças nos procedimentos de dimensionamento, todas as referências técnicas analisadas consideram a verificação dos nós do tipo CCT, garantindo a adequada transferência de esforços entre bielas comprimidas e tirantes tracionados nessas regiões.

É importante destacar que, ao aplicar a equação proposta pelo ACI 318 para a estimativa da altura útil do tirante, obtiveram-se valores significativamente inferiores aos usualmente adotados em vigas-parede. Em consequência, esses valores não atendiam às próprias verificações normativas. Diante dessa limitação, optou-se por adotar o critério indicado pela NBR 6118 para a definição da altura útil, por apresentar resultados mais coerentes com a geometria do elemento e compatíveis com as exigências de segurança do modelo adotado.

Ademais, os resultados indicam que o ACI 318 apresenta as exigências mais restritivas em relação à resistência dos nós, seguida pela NBR 6118. Ambas as normas aplicam fatores que reduzem a tensão efetiva admissível, limitando, assim, a capacidade resistente dos nós estruturais.

Em termos de detalhamento das armaduras, a principal diferença observada entre as normas concentrou-se no detalhamento da área de aço ao longo da altura segundo o ACI 318. No caso da viga-parede isostática, optou-se pela aplicação de uma bitola maior com menor número de barras, enquanto, para a viga-parede contínua, foi necessária a utilização de barras de diâmetro 16 mm, correspondendo ao dobro da bitola adotada no dimensionamento segundo a NBR 6118.

No Model Code 2010, a área de armadura adotada correspondeu, em grande parte, a armadura mínima, enquanto nos procedimentos baseados na NBR 6118 e no ACI 318 não foi necessária a utilização da armadura mínima. Ainda que os valores calculados não sejam idênticos, o detalhamento do Model Code mostrou-se compatível com o da NBR 6118.

Apesar dessas diferenças conceituais, o dimensionamento das vigas-parede de acordo com cada norma resultou em taxas de armadura relativamente semelhantes, com destaque para o ACI 318, que exigiu uma taxa de armadura ligeiramente superior nas vigas-parede isostática e contínua.

Os resultados mostram que a diferença entre as taxas de armadura, tomando a NBR 6118 como referência, foi de aproximadamente 28% para a viga-parede isostática e de cerca de 24,5% em ambos os lados da viga-parede contínua em relação o ACI 318. Em comparação com o Model Code 2010, as diferenças observadas foram de aproximadamente 24,5% para a viga-parede isostática e de cerca de 18,0% no lado esquerdo e 4,60% no lado direito da viga-parede contínua.

Conclui-se que esses resultados indicam diferenças relevantes entre os critérios adotados pela norma brasileira e os códigos internacionais de referência. Observa-se que tais diferenças ocorreram mesmo com a adoção de um detalhamento de armaduras semelhante, o que evidencia a influência direta das premissas normativas no dimensionamento. Ainda assim, verifica-se uma convergência razoável nos resultados práticos, mesmo quando se partem de critérios distintos, o que reforça a importância de compreender os critérios adotados por cada norma.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE. **ACI 318:19. Building code requirements for structural concrete and commentary**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

EL-BARBARY, A.; BESHARA, F.; MAHMOUD, A. State of Art—High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete Deep Beams. In: PERFORMANCE of Steel Fibers Reinforced Concrete Deep Beam. Benha, Egypt: Repository of Benha University, 2015. p. 9–96.

BRAGA, Renata de Araújo; ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira de. Análise comparativa de normas técnicas para o dimensionamento de vigas-parede através do método de bielas e tirantes. **Anais do 66º Congresso Brasileiro do Concreto**, Brasil, p. 1–15, 2025.

CARVALHO, Bernardo Lima. **Dimensionamento e detalhamento de vigas-parede utilizando o método de bielas e tirantes**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 71 f.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Model Code for Concrete Structures 2010**. Lausanne: Ernest & Sohn, 2013. p. 402.

IBRACON. **ABNT NBR 6118:2014 – Comentários e Exemplos de Aplicação**. 1. ed. São Paulo, SP: Instituto Brasileiro do Concreto, 2015.

OLIVEIRA, Matheus Henrique do Nascimento. **Vigas-parede: Métodos de análise e critérios de projeto**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 117 f.

SANTOS, D. M. **Projeto estrutural por bielas e tirantes**. 1. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2021.

SCHLAICH, Jörg; SCHÄFER, Kurt. Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie-models. **The Structural Engineer**, Londres, p. 113–125, 1991.

SCHLAICH, Jörg; SCHÄFER, Kurt; JENNEWEIN, Mattias. Toward consistent design of structural concrete. **PCI Journal**, Chicago, p. 74–150, 1987.

SILVA, Reginaldo Carneiro da. **Concreto Armado: Aplicações de Modelos de Bielas e Tirantes.** 1991. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 202 f.