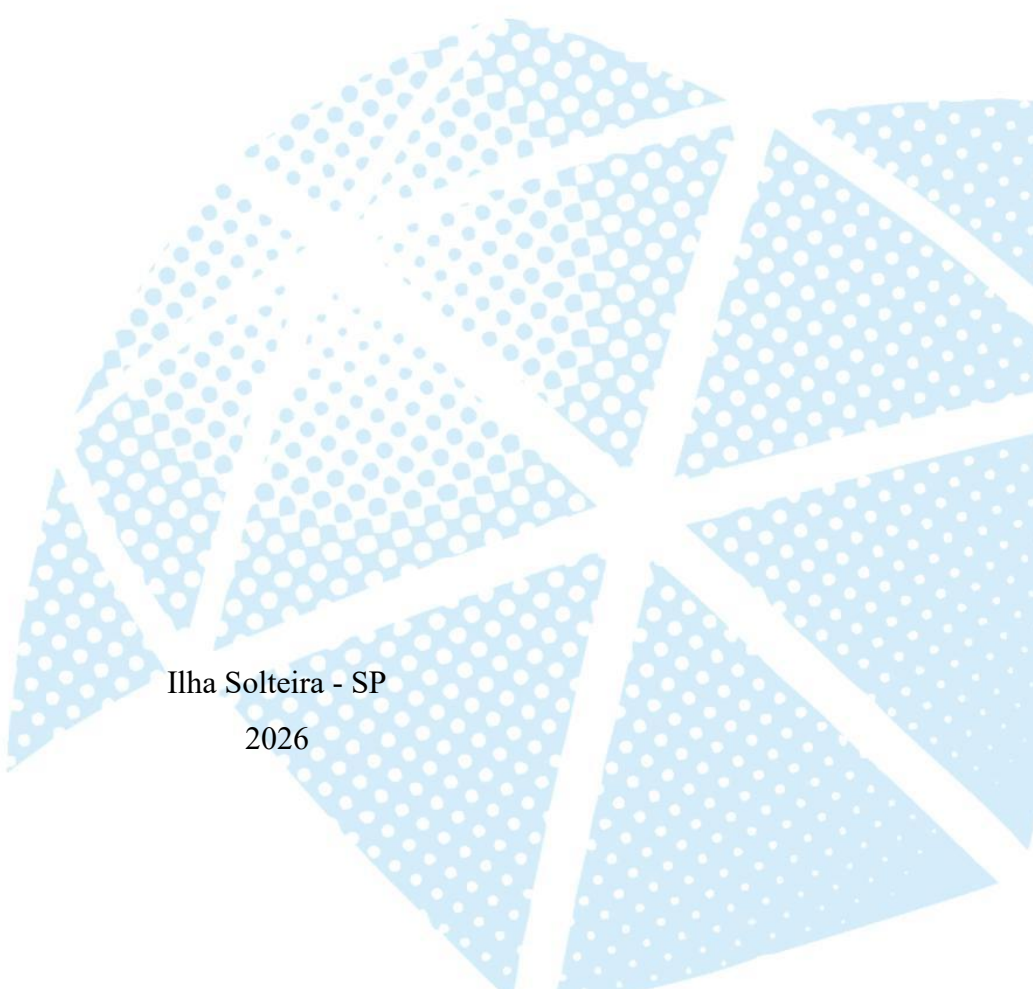


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**LEONARDO PINHEIRO EVANGELISTA**

**ANÁLISE NUMÉRICA SOBRE A INFLUÊNCIA DA ALTURA NA  
CAPACIDADE RESISTENTE À FORÇA CORTANTE DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO SEM ESTRIBOS.**



Ilha Solteira - SP  
2026

**Leonardo Pinheiro Evangelista**

**ANÁLISE NUMÉRICA SOBRE A INFLUÊNCIA DA ALTURA NA  
CAPACIDADE RESISTENTE À FORÇA CORTANTE DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO SEM ESTRIBOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –  
UNESP, para obtenção do título de Grau  
acadêmico Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia e  
Tecnologia.

Orientador(a): Prof. Dr. Alex Micael Dantas de  
Sousa.

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- E92a Evangelista, Leonardo Pinheiro.
- Análise numérica sobre a influência da altura na capacidade resistente à força cortante de vigas de concreto armado sem estribos / Leonardo Pinheiro Evangelista. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026  
40 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026
- Orientador: Alex Micael Dantas de Sousa.
- Inclui bibliografia
1. Concreto armado. 2. Cisalhamento. 3. Vigas sem estribos. 4. Modelagem numérica. 5. Efeito de escala.

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

O impacto potencial desta pesquisa está relacionado ao avanço do conhecimento sobre o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem armadura transversal, com destaque para o efeito de escala. Os resultados contribuem para uma melhor compreensão dos mecanismos resistentes e para o desenvolvimento de projetos estruturais mais seguros e eficientes. Além disso, o estudo pode gerar benefícios econômicos ao permitir a otimização do uso de materiais, evitando superdimensionamentos. No âmbito acadêmico, reforça a importância da modelagem numérica como ferramenta de análise, contribuindo para a formação de profissionais mais qualificados e para o avanço da engenharia estrutural.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

The potential impact of this research is related to advancing the understanding of the shear behavior of reinforced concrete beams without transverse reinforcement, with emphasis on the size effect. The results contribute to a better understanding of the resisting mechanisms and to the development of safer and more efficient structural designs. In addition, the study may provide economic benefits by enabling the optimization of material use, avoiding overdesign. From an academic perspective, it reinforces the importance of numerical modeling as an analysis tool, contributing to the education of more qualified professionals and to the advancement of structural engineering..

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: **LEONARDO PINHEIRO EVANGELISTA**

Título: ANÁLISE NUMÉRICA SOBRE A INFLUÊNCIA DA ALTURA NA CAPACIDADE RESISTENTE À FORÇA CORTANTE DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SEM ESTRIBOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

### COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Alex Micael Dantas de Sousa

UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)



Profª Drª Lisiane Pereira Prado

UNESP – Campus de Ilha Solteira



Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

22/04/2026

Dedico este trabalho à memória do meu tio, Gilmar Duarte, que foi uma presença marcante em minha vida, transmitindo ensinamentos e valores que levarei para sempre, bem como aos meus pais, Roberto Macedo Evangelista e Keite Maria Pinheiro Evangelista, por todo o amor, apoio e incentivo ao longo da minha trajetória, sendo fundamentais para a realização desta conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela vida, pela saúde e pela força para superar os desafios ao longo desta trajetória acadêmica.

Expresso minha profunda gratidão à minha família, em especial ao meu pai, Roberto Macedo Evangelista, à minha mãe, Keite Maria Pinheiro Evangelista, e à minha irmã, Letícia Taína Pinheiro Evangelista, pelo amor, apoio e incentivo incondicional. À minha namorada, Julia Fabaro Tobal, agradeço pelo companheirismo, compreensão e motivação constantes, e ao meu cunhado, Gilberto Braidoti, pelo apoio e parceria ao longo dessa caminhada.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista, pelo apoio durante a graduação, especialmente por meio de bolsas e auxílios que foram fundamentais para minha permanência e formação acadêmica.

Registro meu sincero agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Alex Micael, pela confiança, dedicação, incentivo e paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, pela atenção e valiosas contribuições.

Aos amigos da República ATECUBANOS, Erick, Daniel, Jonathan, Vinicius, Nelson e, em especial, Leonardo, meu amigo de quarto desde o início da graduação, agradeço pelo companheirismo e pelos momentos compartilhados.

Por fim, agradeço aos meus amigos da graduação, Ana, Letícia, Camilly e em especial Daniel e Kaique, pelo apoio, parceria e amizade durante toda essa caminhada, bem como aos meus amigos de Birigui - SP, em especial Rafael, pela parceria e apoio ao longo dessa trajetória.

“Com grandes poderes, vem grandes responsabilidades.”

Stan Lee

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem armadura transversal por meio de modelagem numérica, com base no ensaio experimental de Moehle e Zhai (2021). Inicialmente, foi realizada a calibração do modelo numérico a partir da comparação com os resultados experimentais, considerando o padrão de fissuração e a resposta força–deslocamento. Após a validação, foi conduzida uma análise paramétrica, na qual foram investigadas a influência da altura da viga ( $h$ ), da resistência à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) e da taxa de armadura longitudinal ( $\rho_l$ ) na capacidade resistente ao cisalhamento. Os resultados indicaram que o aumento de  $f_{ck}$  e  $\rho_l$  contribui para o incremento da resistência, enquanto o aumento da altura da viga resulta em redução relativa da capacidade resistente, evidenciando o efeito de escala. Adicionalmente, os resultados numéricos foram comparados com previsões de modelos normativos, incluindo a ABNT NBR 6118:2023, o ACI 318:2014 e 2019, o Eurocode 2 (2005 e 2023) e o fib Model Code 2010. Foram observadas diferenças significativas em termos de precisão e consistência, sendo identificadas tanto abordagens conservadoras quanto não conservadoras, além de limitações na consideração da influência da armadura longitudinal e do efeito de escala. Os resultados obtidos demonstram a importância da modelagem numérica como ferramenta complementar às abordagens normativas, especialmente na análise de elementos estruturais com comportamento complexo, como vigas sem armadura transversal.

**Palavras-chave:** Concreto armado; cisalhamento; vigas sem estribos; modelagem numérica; efeito de escala.

## ABSTRACT

This study aims to evaluate the shear behavior of reinforced concrete beams without transverse reinforcement through numerical modeling, based on the experimental test conducted by Moehle and Zhai (2021). Initially, the numerical model was calibrated by comparing crack patterns and force–displacement responses with experimental results. After validation, a parametric analysis was performed to investigate the influence of beam depth ( $h$ ), concrete compressive strength ( $f_{ck}$ ), and longitudinal reinforcement ratio ( $\rho_l$ ) on shear capacity. The results showed that increasing  $f_{ck}$  and  $\rho_l$  leads to higher shear resistance, while increasing beam depth results in a relative reduction in strength, highlighting the size effect. In addition, the numerical results were compared with predictions from design codes, including ABNT NBR 6118:2023, ACI 318 (2014 and 2019), Eurocode 2 (2005 and 2023), and fib Model Code 2010. Significant differences were observed in terms of accuracy and consistency, with both conservative and non-conservative predictions, as well as limitations in capturing the influence of longitudinal reinforcement and the size effect. The results highlight the importance of numerical modeling as a complementary tool to code-based approaches, especially for structural elements with complex behavior, such as beams without transverse reinforcement.

**Keywords:** Reinforced concrete; shear; beams without stirrups; numerical modeling; size effect.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Descrição do ensaio de referência. ....                                                                              | 17 |
| Figura 2 – Descrição do ensaio de referência após a ruptura. ....                                                               | 18 |
| Figura 3 – Discretização da malha em elementos finitos para o modelo de Moehle e Zhai (2021). ...                               | 19 |
| Figura 4 – Interação de corpo rígido entre a placa de carregamento e o RP-1.....                                                | 22 |
| Figura 5 – Representação dos apoios no modelo numérico. ....                                                                    | 23 |
| Figura 6 – Padrão de Fissuração do Ensaio de Moehle e Zhai (2021). ....                                                         | 24 |
| Figura 7 – Padrão de fissuração do modelo experimental.....                                                                     | 24 |
| Figura 8 - Comparação da curva força $\times$ deslocamento obtidas no experimento e na simulação numérica.<br>.....             | 25 |
| Figura 9 – Parâmetros análise paramétrica.....                                                                                  | 26 |
| Figura 10 - Influência dos parâmetros analisados na resposta força–deslocamento. ....                                           | 32 |
| Figura 11- Influência da altura útil na tensão resistente ao cisalhamento.....                                                  | 34 |
| Figura 12 - Resistência ao cisalhamento em função da taxa de armadura – Modelos que não consideram a armadura longitudinal..... | 35 |
| Figura 13 - Resistência ao cisalhamento em função da taxa de armadura – Modelos que consideram a armadura longitudinal. ....    | 35 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - propriedades geométricas e mecânicas do modelo de Moehle e Zhai (2021).....                                                                    | 18 |
| Tabela 2 - Valores de resistência ao cisalhamento obtidos numericamente e estimados por diferentes modelos, para distintas combinações de parâmetros..... | 33 |
| Tabela 3 - Relação entre as resistências ao cisalhamento numéricas (VR,num) e normativas (VR,norm).<br>.....                                              | 36 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |                                                |
|------|------------------------------------------------|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas       |
| ACI  | American Concrete Institute                    |
| CDP  | Plasticidade com Dano do Concreto              |
| EC   | Eurocode                                       |
| MC   | Model Code                                     |
| MPa  | Megapascal                                     |
| NBR  | Norma Brasileira                               |
| RP   | Ponto de Referência ( <i>Reference Point</i> ) |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                  |                                                             |
|------------------|-------------------------------------------------------------|
| $V$              | força cortante                                              |
| $V_R$            | resistência ao cisalhamento                                 |
| $V_{R,num}$      | resistência ao cisalhamento obtida numericamente            |
| $V_{R,NBR,23}$   | resistência ao cisalhamento segundo a NBR (2023)            |
| $V_{R,EC,05}$    | resistência ao cisalhamento segundo o Eurocode (2005)       |
| $V_{R,EC,23}$    | resistência ao cisalhamento segundo o Eurocode (2023)       |
| $V_{R,ACI,2014}$ | resistência ao cisalhamento segundo o ACI 318 (2014)        |
| $V_{R,ACI,19}$   | resistência ao cisalhamento segundo o ACI 318 (2019)        |
| $V_{R,MC,N1}$    | resistência ao cisalhamento segundo o Model Code (nível N1) |
| $V_{R,MC,N2}$    | resistência ao cisalhamento segundo o Model Code (nível N2) |
| $\tau$           | tensão de cisalhamento                                      |
| $\tau_{Rd}$      | tensão resistente de cálculo do concreto                    |
| $\sigma$         | tensão normal                                               |
| $\sigma_{cp}$    | tensão de compressão                                        |
| $f_{ck}$         | resistência característica à compressão do concreto         |
| $f_{cm}$         | resistência média à compressão do concreto                  |
| $f_{ctm}$        | resistência média à tração do concreto                      |
| $f_{ctk,inf}$    | resistência característica inferior à tração do concreto    |
| $f_{ctd}$        | resistência de cálculo à tração do concreto                 |
| $\rho_l$         | taxa de armadura longitudinal                               |
| $A_s$            | área de armadura longitudinal                               |
| $b_w$            | largura da alma da viga                                     |
| $d$              | altura útil da seção                                        |
| $h$              | altura da viga                                              |
| $k$              | coeficiente relacionado ao efeito de escala                 |
| $\gamma_c$       | coeficiente de segurança do concreto                        |
| $E_c$            | módulo de elasticidade do concreto                          |
| $E_s$            | módulo de elasticidade da armadura                          |
| $\nu$            | coeficiente de Poisson                                      |
| $G_f$            | energia de fratura                                          |
| $d_{ag}$         | dimensão máxima do agregado                                 |
| $\psi$           | ângulo de dilatação                                         |
| $K_c$            | parâmetro do modelo CDP                                     |
| $e$              | excentricidade                                              |
| $\mu$            | parâmetro de viscosidade                                    |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                             |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                     | <b>16</b> |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVO .....</b>                                                                       | <b>16</b> |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA .....</b>                                                                    | <b>17</b> |
| 3.1      | DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE REFERÊNCIA .....                                                     | 17        |
| 3.2      | DESCRIÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA .....                                                       | 18        |
| 3.2.1    | Alinhamento no Software .....                                                               | 18        |
| 3.2.2    | Propriedades Mecânica dos Materiais e Modelagem .....                                       | 19        |
| 3.2.3    | Condições de Contorno .....                                                                 | 22        |
| 3.2.4    | Calibração do modelo numérico .....                                                         | 23        |
| 3.2.5    | Análise Paramétrica .....                                                                   | 25        |
| 3.2.6    | Modelos de previsão da capacidade resistente à força cortante no lado<br>sem estribos ..... | 26        |
| 3.2.6.1  | ABNT NBR 6118:2023 .....                                                                    | 26        |
| 3.2.6.2  | Eurocode: EN 1992-1-1:2023 .....                                                            | 27        |
| 3.2.6.3  | Eurocode: EN 1992-1-1:2005 .....                                                            | 28        |
| 3.2.6.4  | Código Americano do Concreto – ACI 318:2019 .....                                           | 29        |
| 3.2.6.5  | Código Americano do Concreto – ACI 318:2014 .....                                           | 29        |
| 3.2.6.6  | fib Model Code 2020 .....                                                                   | 30        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                                                     | <b>31</b> |
| 4.1      | CURVAS FORÇA – DESLOCAMENTO .....                                                           | 31        |
| 4.2      | COMPARAÇÃO COM OS MODELOS NORMATIVOS .....                                                  | 33        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                                     | <b>37</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                    | <b>39</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A resistência ao esforço cortante em estruturas de concreto armado constitui um dos problemas mais críticos da engenharia estrutural, particularmente em elementos sem armadura transversal e em vigas de grande altura. Nesse contexto, destaca-se o efeito de escala, fenômeno associado à redução da resistência ao cisalhamento com o aumento da altura do elemento estrutural (Collins et al., 2015).

Essa situação é ainda mais relevante em estruturas de grande porte, como blocos de fundação, paredes de barragens, túneis e lajes de pontes. Nesses casos, é comum a ausência de estribos para evitar o congestionamento de armaduras, fazendo com que a resistência ao cisalhamento dependa principalmente do próprio concreto e da armadura longitudinal (GIROTTTO et al., 2026).

Apesar de amplamente reconhecido, o efeito de escala ainda apresenta limitações no seu entendimento, principalmente devido à escassez de ensaios experimentais em vigas de grande altura. A maioria dos estudos disponíveis foi realizada em elementos de pequenas dimensões, o que pode comprometer a aplicação direta dos resultados em estruturas reais.

Essa limitação também afeta os modelos normativos de dimensionamento, que foram, em grande parte, calibrados com base nesses dados experimentais. Como consequência, podem ocorrer diferenças entre as previsões normativas e o comportamento real de vigas de grande escala, indicando a necessidade de avaliações mais detalhadas (TESLENCO MANSANO et al., 2025).

Diante disso, a modelagem numérica baseada no método dos elementos finitos surge como uma alternativa eficiente para a análise do comportamento ao cisalhamento em vigas altas sem estribo. A utilização de modelos constitutivos avançados permite representar de forma mais adequada os mecanismos de fissuração e ruptura do concreto.

Além disso, tem-se poucos trabalhos que estudam tal fenômeno apresentado acima utilizando a modelagem numérica incluindo a plasticidade com dano do concreto na modelagem, tal metodologia é conhecida como CDP, que pode garantir maior precisão nos modelos processados (FERREIRA GIROTTTO et al., 2025).

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo investigar a influência da altura, da taxa de armadura longitudinal e da resistência do concreto na capacidade resistente ao esforço cortante de vigas altas de concreto armado sem armadura transversal. Além disso, busca-se comparar os resultados obtidos por meio de análises numéricas com as previsões de modelos normativos de

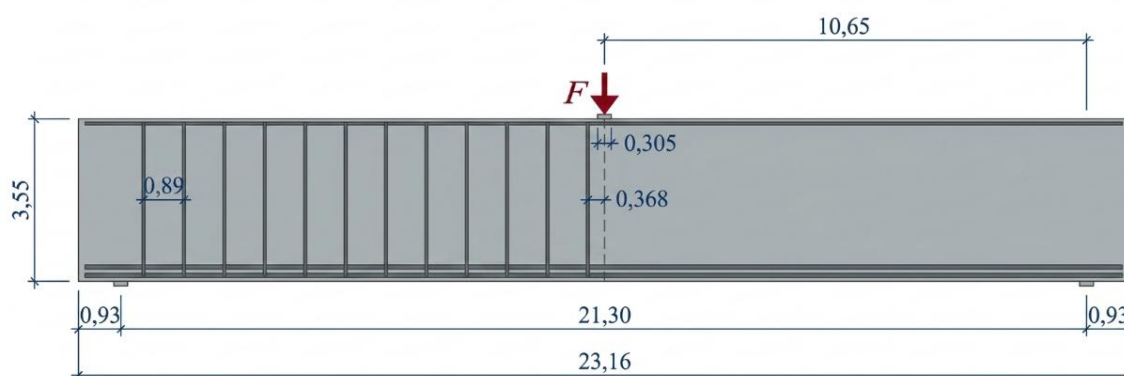
dimensionamento, a fim de avaliar possíveis limitações dessas formulações quando aplicadas a elementos de grande porte.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE REFERÊNCIA

Neste trabalho, o principal modelo experimental utilizado foi o modelo numérico ensaiado por Moeble e Zhai (2021) na universidade da Califórnia, Berkeley, onde a viga analisada era bi - apoiada, com 3,55 m de altura, com um comprimento de 23,16 metros e 0,254 m de largura. A distância entre eixos de apoio era de 21,30 m. No centro da viga, foi aplicada uma força concentrada em uma placa de 0,305 m de comprimento, que ocasionou a ruptura do elemento estrutural, a Figura 1 abaixo, apresenta a geometria da viga descrita anteriormente.

Figura 1 - Descrição do ensaio de referência.



Fonte: Adaptado (Moeble e Zhai et al., 2021). Dimensões em metros.

No modelo experimental proposto por Moeble e Zhai et al (2021) apresentado na Figura 1, foram realizados dois ensaios com configurações distintas quanto à presença de armadura transversal. No lado esquerdo, foram utilizados estribos espaçados ao longo do elemento, enquanto no lado direito o ensaio foi conduzido sem armadura transversal, de modo que a resistência ao cisalhamento passou a depender essencialmente dos mecanismos resistentes do concreto, em especial das bielas comprimidas.

Para o presente trabalho, será analisada a configuração sem armadura transversal, por representar uma condição mais crítica do ponto de vista da resistência ao cisalhamento. Nesse ensaio, a armadura longitudinal foi composta por seis barras de 28,6 mm de diâmetro, com altura útil de 3,29 m e taxa de armadura de 0,46%, apresentando aderência efetiva ao concreto e resistência ao escoamento de 830 MPa.

Embora o foco da análise recaia sobre o comportamento sem estribos, destaca-se que, na configuração original do modelo, a armadura transversal era composta por barras de 15,6



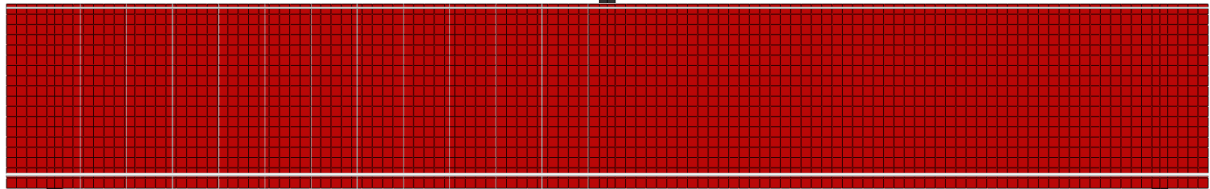
como a viga de concreto, as placas de apoio e carregamento (placas metálicas), e as armaduras longitudinais e transversais.

Após os elementos serem modelados, e realizar a ligação destes elementos para simular a viga experimental, foram aplicadas as malhas de discretização nos elementos citados acima.

Foram utilizados dois tipos de malha, a S4R, para as placas metálicas e as partes de concreto, que é classificada como elemento de casca quadrilateral (bidimensional) com 4 nós, sendo que cada nó possui 6 graus de liberdade (3 de rotação e 3 de translação), estes elementos apresentam uma aproximação linear para deslocamentos e rotações, que são indicados principalmente para superfícies planas, pois, garante precisão e eficiência. Já nas armaduras, a utilizada, foi a T2D2, que são elementos treliça bidimensionais com dois nós, e comportamento linear para os deslocamentos.

O comprimento limitado em ambas as malhas foi de 0,2 m, que garantiu, uma coerente combinação da malha das armaduras com a do concreto. Outro ponto a ser ressaltado, foi que, o modelo adotado foi o de embutimento (embedded) que considera a aderência perfeita entre a armadura e o concreto, garantindo que quando os elementos (concreto e aço) fossem combinados, não teria deslizamento durante a aplicação do carregamento. A Figura 3 abaixo, apresenta a malha dos elementos finitos adotada no modelo numérico.

Figura 3 – Discretização da malha em elementos finitos para o modelo de Moehle e Zhai (2021).



Fonte – Autor 2026.

### 3.2.2 Propriedades Mecânica dos Materiais e Modelagem

Nesta etapa, utilizaram-se diferentes métodos para a modelagem das propriedades do concreto e do aço. No concreto o comportamento tensão-deformação, foi modelado utilizando a Plasticidade com dano, mais conhecido como modelo CDP (Concrete Damaged Plasticity Model – CDP). O modelo CDP, é um modelo contínuo de dano baseado em plasticidade, ele assume que os dois principais mecanismos de falha no concreto estão ligados a fissuração por tração e esmagamento por compressão (LE MINH et al., 2021).

Utilizando o modelo do fib Model Code (2010), foi possível estimar o módulo de elasticidade do concreto:

$$E_c = \alpha_1 \cdot E_{ci} \quad (1)$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 21500 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$\alpha_i = 0.8 + 0.2 \cdot \frac{f_{cm}}{88} \quad (3)$$

Onde:

$E_C$  - Módulo de elasticidade reduzido do concreto para um nível de tensão de cerca de 40% de  $f_{cm}$ ;

$E_{ci}$  – é o módulo de elasticidade tangente (inicial) do concreto na origem do gráfico tensão x deformação;

$\alpha_E$  – Coeficiente que considera o tipo de agregado graúdo utilizado no concreto, adotado igual a 1 para agregados graníticos.

Para o concreto em compressão, foi adotado o comportamento tensão x deformação uniaxial proposto por CARREIRA e CHU (1985).

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = f_{cm} \cdot \frac{\beta \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}{\beta - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^\beta} \quad (4)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_{cm}}{\varepsilon_{c1} \cdot E_c}} \quad (5)$$

$\beta$  – Parâmetro material e ajuda a definir o critério de plastificação no estado plano de tensões;

Onde:

$$\varepsilon_{c1} = 0.7 \cdot \frac{f_{cm}^{0.31}}{1000} \quad (6)$$

O comportamento uniaxial do concreto na tração foi modelado com base nas relações tensão–abertura de fissura ( $\sigma_t \times w$ ), conforme proposto por (HORDIJK, 1992), com o objetivo de reduzir a sensibilidade dos resultados à discretização da malha de elementos finitos adotada.

$$\sigma_t(w) = f_{ct} \cdot \left( \left( 1 + \left( c_1 \cdot \frac{w}{w_c} \right)^3 \right) \cdot \left( e^{-c_2 \cdot \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} \cdot (1 + c_1^3) \right) \right) \quad (7)$$

$$w_c = 5.14 \cdot \frac{G_f}{f_{ctm}} \quad (8)$$

Onde:

$$c_1 = 3;$$

$$c_2 = 6,93.$$

São parâmetros fixos, determinados por análise de regressão de modelos experimentais.

Onde:

$G_f$  - Energia de fratura foi calculada de acordo com o **fib Model Code 2010** (FIB, 2010).

$$G_f = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \quad (9)$$

Onde:

$G_{f0}$  - Depende do tamanho do agregado.

As curvas tensão–abertura de fissura foram transformadas em curvas tensão–deformação inelástica por meio da divisão dos valores da abertura de fissura  $w$  pelo comprimento característico do elemento finito  $l_{eq}$ , conforme proposto por Genikomsou e Polak (2015).

$$\varepsilon_t = \frac{f_{ct}}{E_c} + \frac{w}{l_{eq}} \quad (10)$$

A resistência à tração do concreto, no ensaio de Moehle e Zhai (2021), foi definida conforme a seguinte expressão:

$$f_{ct} = 0.3 \cdot f_{cm}^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

Na modelagem do concreto por meio do modelo CDP, foram considerados os principais parâmetros responsáveis pela representação do comportamento inelástico do material. O ângulo

de dilatação ( $\psi$ ) controla as deformações transversais do concreto em função das tensões de confinamento, sendo essencial para descrever a expansão volumétrica após o início da fissuração. A dilatação ( $\psi$ ), juntamente com o parâmetro de viscosidade ( $\mu$ ), destaca-se como um dos principais parâmetros a serem calibrados em problemas sensíveis ao confinamento do concreto, pois influenciam diretamente a resposta inelástica e a estabilidade numérica do modelo. Os demais parâmetros, como o fator de forma ( $K_c$ ), a excentricidade ( $e$ ) e a razão entre as resistências biaxial e uniaxial ( $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ ), contribuem para a definição da superfície de plastificação do material. Foram adotados os seguintes valores:  $\psi = 36^\circ$ ,  $K_c = 0,66$ ,  $e = 0,1$ ,  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1,16$  e  $\mu = 0$ .

Na modelagem do aço, o comportamento do material foi definido a partir do módulo de elasticidade ( $E_s$ ), do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e da resistência ao escoamento das barras ( $f_y$ ), a qual foi considerada em função do diâmetro das armaduras. Assumiu-se comportamento elasto-plástico perfeito, representado por uma curva tensão-deformação bilinear sem encruamento. Para isso, foi adotado o critério constitutivo de Von Mises. Foram adotados os seguintes valores:  $E_s = 210000$  MPa e  $\nu = 0,3$ , sendo  $f_y$  definido conforme o diâmetro das barras.

### 3.2.3 Condições de Contorno

O carregamento foi aplicado por controle de deslocamento, impondo-se um deslocamento máximo de 25 mm no centro da placa de carregamento, em concordância com o procedimento experimental. Essa estratégia permitiu avaliar a capacidade resistente da viga, associada à força máxima, bem como seu comportamento pós-pico.

O peso próprio da estrutura foi considerado nas simulações por meio da aplicação da aceleração da gravidade ( $g$ ) e da densidade do concreto.

As placas de carregamento e de apoio foram modeladas como corpos rígidos, sendo acopladas a nós mestres localizados em seus centros, denominados pontos de referência (RP) como apresentado na Figura 4. A partir desses pontos, foram aplicadas as condições de contorno e o deslocamento prescrito, garantindo maior controle da simulação e adequada representação das ligações rotuladas.

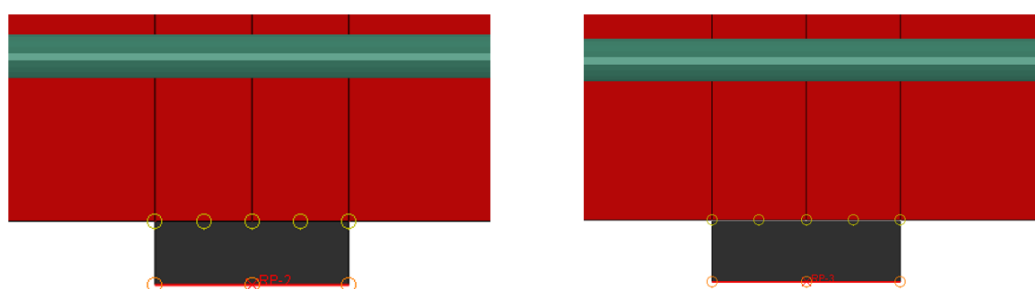
Figura 4 – Interação de corpo rígido entre a placa de carregamento e o RP-1.



Fonte – Autor 2026.

As condições de contorno foram definidas de modo a representar um sistema bi apoiado. Os deslocamentos verticais e horizontais foram restringidos no apoio esquerdo, enquanto, no apoio direito, apenas os deslocamentos verticais foram restringidos. O giro nos apoios foi mantido livre, de forma a reproduzir o comportamento de ligações rotuladas como apresentado na Figura 5, respectivamente.

Figura 5 – Representação dos apoios no modelo numérico.



Fonte – Autor 2026.

A interação entre o concreto e as armaduras foi considerada perfeita, em função da ausência de falhas de ancoragem observadas experimentalmente, sendo representada pela técnica de embutimento (*embedded*).

No contato entre as placas metálicas e o concreto, adotou-se uma formulação com comportamento tangencial por penalização, considerando coeficiente de atrito igual a 0,5, e comportamento normal do tipo *hard contact*, permitindo a separação entre as superfícies.

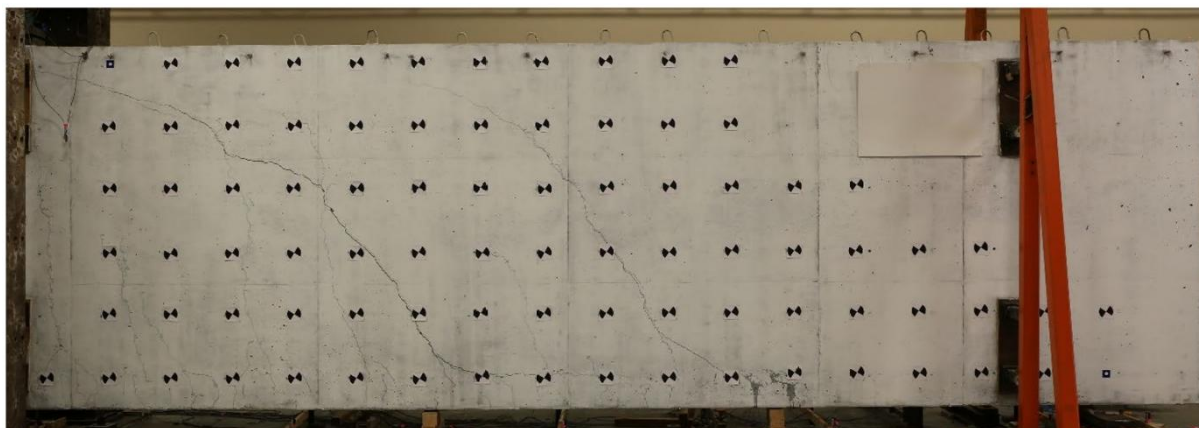
#### 3.2.4 Calibração do modelo numérico

A calibração do modelo numérico foi considerada satisfatória a partir da concordância entre os padrões de fissuração simulados e aqueles observados no modelo experimental descrito por Moehle e Zhai (2021), com resistência média à compressão do concreto ( $f_{cm}$ ) de 31 MPa e taxa de armadura longitudinal de 0,46%, conforme apresentado na Figura 6 e Figura 7. Observa-se que as regiões de concentração de fissuras, bem como sua inclinação e propagação, foram adequadamente reproduzidas pelo modelo numérico.

A Figura 7 apresenta o padrão de fissuração obtido na modelagem numérica no ABAQUS, o qual é comparado com os resultados experimentais mostrados na Figura 6. Observa-se que o modelo numérico foi capaz de reproduzir de forma satisfatória a fissura principal, apresentando boa concordância quanto à sua inclinação, localização e modo de propagação em relação ao observado experimentalmente. Embora o modelo numérico evidencie predominantemente essa fissura dominante, a similaridade com o padrão

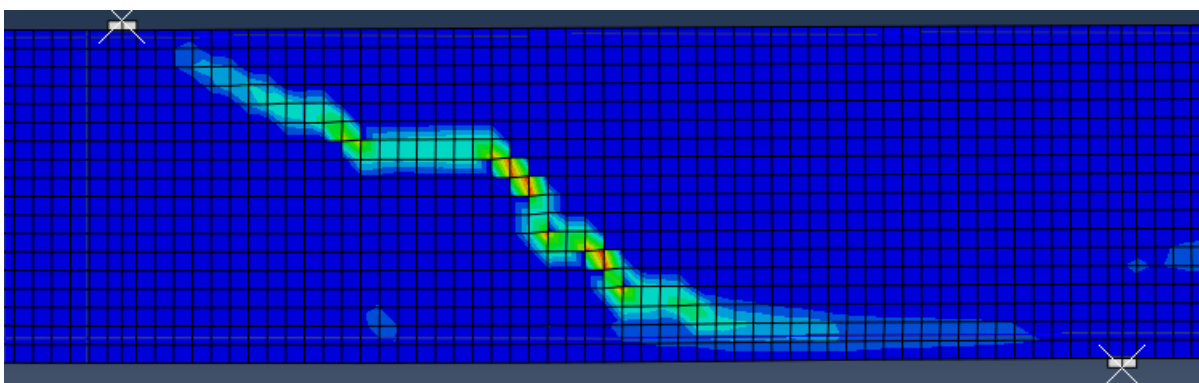
experimental indica que os mecanismos resistentes foram adequadamente representados, reforçando a consistência da calibração adotada.

Figura 6 – Padrão de Fissuração do Ensaio de Moehle e Zhai (2021).



Fonte – (Moehle e Zhai et al., 2021).

Figura 7 – Padrão de fissuração do modelo experimental.

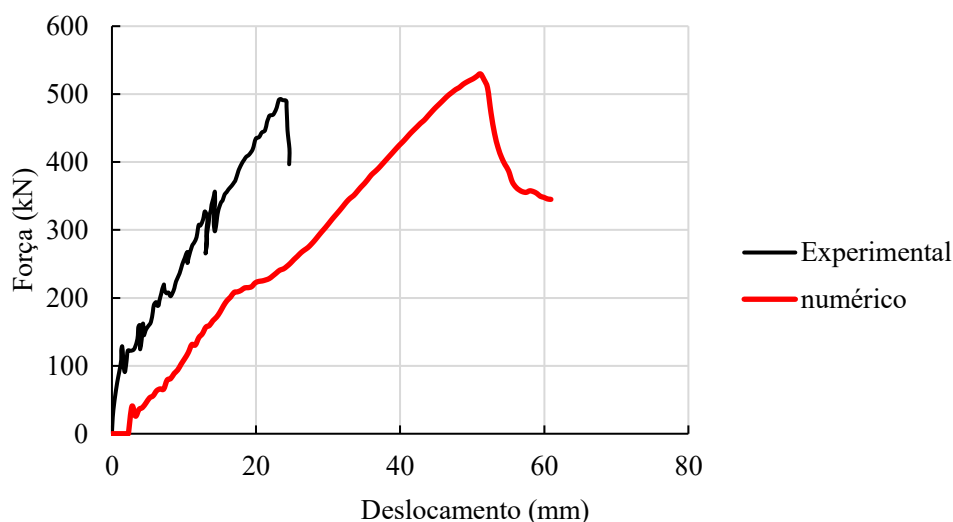


Fonte – Autor 2026.

A Figura 8 apresenta a comparação entre as curvas força–deslocamento obtidas experimentalmente e por meio da modelagem numérica, evidenciando a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento global da viga. Observa-se boa concordância ao longo dos diferentes estágios de carregamento, com adequada representação da rigidez inicial, da evolução da resposta até o pico de resistência e do comportamento pós-pico.

Em termos quantitativos, a relação entre a força máxima experimental e a estimada numericamente foi de  $F_{\text{exp}}/F_{\text{num}} = 0,93$ , resultando em uma diferença aproximada de 7%. Tal discrepância é considerada compatível com as simplificações inerentes à modelagem numérica de materiais heterogêneos como o concreto, além das incertezas associadas aos parâmetros constitutivos e às condições experimentais. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que o modelo numérico apresenta desempenho satisfatório, sendo capaz de representar de forma consistente tanto a capacidade resistente quanto a resposta estrutural da viga.

Figura 8 - Comparação da curva força  $\times$  deslocamento obtidas no experimento e na simulação numérica.

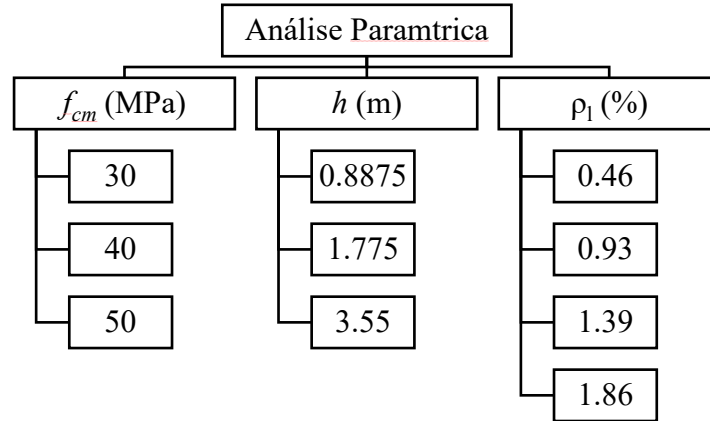


Fonte – Autor 2026.

### 3.2.5 Análise Paramétrica

Com o modelo numérico devidamente validado, procedeu-se à realização de um estudo paramétrico com o intuito de investigar a influência de diferentes variáveis na resistência à força cortante das vigas analisadas. Para isso, foram consideradas variações na taxa de armadura longitudinal, na resistência à compressão do concreto e na altura das vigas, totalizando 36 modelos numéricos. A taxa de armadura foi analisada em quatro níveis (0,46%, 0,93%, 1,39% e 1,86%), com a expectativa de que seu aumento proporcione maior rigidez à estrutura, refletida em uma maior inclinação inicial da curva força–deslocamento, além de contribuir para o aumento da capacidade resistente. A resistência do concreto foi variada entre 30 MPa, 40 MPa e 50 MPa, visando avaliar seu impacto na resistência à compressão das bielas comprimidas e, consequentemente, na capacidade resistente ao cisalhamento. Por fim, foram adotadas três alturas distintas (3,55 m, 1,775 m e 0,8875 m), com o objetivo de investigar o efeito de escala, uma vez que elementos mais altos tendem a apresentar redução relativa da resistência ao cisalhamento. A combinação desses parâmetros deu origem ao conjunto de modelos estudados, os quais são apresentados de forma sistematizada na Figura 9.

Figura 9 – Parâmetros análise paramétrica.



Fonte – Autor 2026.

### 3.2.6 Modelos de previsão da capacidade resistente à força cortante no lado sem estribos.

A estimativa da resistência à força cortante foi realizada com base nas formulações propostas por diferentes códigos normativos, incluindo a ABNT NBR 6118:2023, Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2005), Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2023), ACI 318-14, ACI 318-19 e o fib Model Code 2020, nível 1 e 2. Para a aplicação dessas expressões, adotou-se a resistência média à compressão do concreto como parâmetro de entrada, bem como coeficiente parcial de segurança unitário ( $\gamma_c = 1$ ), de modo a garantir uniformidade nos critérios de cálculo. As equações correspondentes a cada modelo são apresentadas a seguir.

#### 3.2.6.1 ABNT NBR 6118:2023

No caso da ABNT NBR 6118:2023, a capacidade resistente à força cortante foi determinada a partir da seguinte expressão:

$$V_{R,calc,NBR} = (\tau_{Rd} \cdot k_{NBR} \cdot (1.2 + 40 \cdot \rho_1) + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (12)$$

$$\tau_{Rd} = 0.25 \cdot f_{ctd} \quad (13)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \quad (14)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (15)$$

$$f_{ctk,inf} = \frac{0.7}{f_{ctm}} \quad (16)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{SD}}{A_C} \quad (17)$$

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0.3f_{ck}^{2/3} & \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2.12\ln(1 + 0.11f_{ck}) & \text{para } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (18)$$

Onde

$\tau_{Rd}$  - é a tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento. O seu valor deve ser limitado ao correspondente a uma resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) igual a 60 MPa.

$k_{NBR}$  - é um coeficiente que tem os seguintes valores:

— Para elementos onde 50% da armadura inferior não chega até o apoio:  $k = 1,0$ ;

— Para os demais casos:  $k = 1,6 - d$ , não menor que 1,0, com  $d$  em metros.

$A_{SI}$  - é a área da armadura de tração que se estende até não menos que  $d + \ell_{b,nec}$  além da seção considerada, com  $\ell_{b,nec}$ .

$b_w$  - é a largura mínima da seção ao longo da altura útil  $d$ ;

$N_{SD}$  - é a força longitudinal na seção devida à protensão ou carregamento (a compressão é considerada com sinal positivo).

$A_C$  - Área de concreto.

O coeficiente parcial de segurança do concreto foi considerado igual a  $\gamma_c = 1,0$ , pois a análise refere-se à avaliação experimental dos resultados, e não ao dimensionamento normativo.

### 3.2.6.2 Eurocode: EN 1992-1-1:2023

De acordo com a norma europeia EN 1992-1-1:2023, a capacidade resistente ao cisalhamento de elementos de concreto armado sem armadura transversal é determinada pela seguinte expressão:

$$V_{Rd,c} = \frac{0.66}{\gamma_v} \cdot \left( 100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d \geq V_{Rd,min} \quad (19)$$

$$V_{Rd,min} = \frac{11}{\gamma_v} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{f_{yd}}} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \cdot b_w \cdot d \quad (20)$$

Onde:

$\gamma_v$  - é o coeficiente parcial de segurança para o dimensionamento ao cisalhamento,  $\gamma_v = 1$ , pois a análise refere-se à avaliação experimental dos resultados;

$f_{ck}$  - é a resistência característica à compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos,  $f_{ck} = f_{cm}$  ;

$f_{yd}$  - é o valor de cálculo da resistência de escoamento do aço, utilizado no dimensionamento da armadura à flexão;

$d$  - é a altura útil da armadura de flexão.

O parâmetro  $d_{dg}$  corresponde a uma grandeza associada à rugosidade da superfície de ruptura, sendo função do tipo de concreto e das características dos agregados empregados. Para fins de cálculo, seu valor pode ser obtido conforme a Eq. (21) apresentada a seguir.

$$d_{dg} = \begin{cases} 16 \text{ mm} + D_{lower} \leq 40 \text{ mm, Para } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa} \\ 16 \text{ mm} + D_{lower} \cdot \left(\frac{60}{f_{ck}}\right)^2 \leq 40 \text{ mm, Para } f_{ck} > 60 \text{ MPa} \end{cases} \quad (21)$$

Onde,

$D_{lower}$  - Menor valor da abertura superior da peneira  $D$  da fração mais grávida do agregado permitida na especificação do concreto segundo a EN 206.

### 3.2.6.3 Eurocode: EN 1992-1-1:2005

De acordo com a norma europeia EN 1992-1-1:2005, a capacidade resistente ao cisalhamento de elementos de concreto armado sem armadura transversal é determinada pela seguinte expressão:

$$V_{c,EC} = \max \left\{ \left[ C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \right. \\ \left. (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \right. \quad (22)$$

$$v_{min} = 0.035 k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$C_{Rdc} = 0,18$  e  $K_1 = 0,15$  para a NEM EM 1992-1-1:2005

$$k_{\text{cisalhamento}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2, \text{ com } d \text{ em mm} \quad (24)$$

#### 3.2.6.4 Código Americano do Concreto – ACI 318:2019

No atual código americano ACI 318:2019, a capacidade resistente ao cisalhamento é expressa por:

$$V_{c,ACI} = (0.66\lambda_s\lambda(\rho_l)^{\frac{1}{3}}\sqrt{f_c})b_wd \quad (25)$$

$$\lambda = \begin{cases} 1, & \text{para concreto com agregados de peso normal} \\ 0.75, & \text{para concreto com agregados leves} \end{cases} \quad (26)$$

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0.004d}} \leq 1, \text{ com } d \text{ em mm} \quad (27)$$

Onde:

$\lambda_s$  é o fator do efeito de escala;

$\lambda$  considera a densidade do agregado (**agregado de peso normal ou agregado leve**).

#### 3.2.6.5 Código Americano do Concreto – ACI 318:2014

Conforme estabelecido no ACI 318:2014, a resistência ao cisalhamento do concreto pode ser estimada por meio de uma formulação simplificada, válida para elementos não protendidos e na ausência de esforços de compressão axial.

$$V_{R,C} = 0.17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot b_w \cdot d \quad (28)$$

Onde:

$f_{cm}$  - representa a resistência à compressão especificada do concreto, em MPa;

$b_w$  - Largura efetiva da alma (ou faixa da laje), em mm;

$d$  - Altura útil da seção, em mm;

$\lambda$  - Coeficiente de modificação que considera o uso de concreto leve, sendo  $\lambda = 1,0$  para concretos de peso normal.

### 3.2.6.6 fib Model Code 2020

Segundo o fib Model Code 2020, a resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado sem armadura transversal é dada por:

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z_v \quad (29)$$

Onde:

$f_{ck} = f_{cm}$  é dado em MPa;

$z_v$  adota-se um valor igual a 0,9d.

Nível 1 de aproximação:

Para elementos com profundidade útil ao cisalhamento  $z_v \geq 800 \text{ mm}$ , o valor de  $\sqrt{f_{ck}}$  é limitado ao máximo de 8 MPa. Para elementos sem força axial significativa, com resistência característica ao escoamento da armadura  $f_{yk} \leq 700 \text{ MPa}$ , e com dimensão máxima do agregado não inferior a 10 mm, o coeficiente de cisalhamento ( $k_v$ ) pode ser determinado por meio do Nível I de aproximação como:

$$k_v = \frac{0.4}{1 + 750 * f_{yd} / E_s} * \frac{1300}{1000 + 1.25 * z_v} \quad (30)$$

com  $z_v$  expresso em mm e  $f_{yd}$  representando a resistência de cálculo ao escoamento da armadura longitudinal de flexão.

Nível 2 de aproximação:

No Nível II de aproximação, a resistência de cálculo ao cisalhamento pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$k_v = \frac{0.4}{1 + 1500 * \varepsilon_x} * \frac{1300}{1000 + k_{dg} * z_v} \quad (31)$$

Com  $z_v$  expresso em mm. Por sua vez,  $k_{dg}$  representa o efeito da rugosidade da fissura crítica de cisalhamento e é calculado como:

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0.75 \quad (32)$$

Em que  $d_g$  corresponde ao diâmetro máximo do agregado gráudo, expresso em milímetros. Adicionalmente, para elementos com  $z_v \geq 800 \text{ mm}$  associados a concretos com  $f_{ck} \geq 70 \text{ MPa}$ , bem como para concretos leves independentemente da resistência, considera-se  $k_{dg} = 2,0$ .

Já a deformação longitudinal  $\varepsilon_x$  é determinada no ponto situado à meia altura da profundidade útil ao cisalhamento analisada, conforme a expressão a seguir, desconsiderando a atuação de forças normais externas.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2 * E_s * A_s} * \frac{M_{Ed}}{z_v} \quad (33)$$

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CURVAS FORÇA – DESLOCAMENTO

A Figura 10 apresenta as curvas força  $\times$  deslocamento obtidas para os 36 modelos analisados, considerando diferentes alturas de viga, resistências do concreto ( $f_{ck}$ ) e taxas de armadura longitudinal ( $\rho_l$ ). De forma geral, todas as curvas apresentam um trecho inicial aproximadamente linear, seguido por uma mudança de comportamento com o surgimento de fissuras inclinadas, até atingir a força máxima. Após esse ponto, ocorre a redução da capacidade resistente das vigas.

Em relação à altura da viga, nota-se uma diferença clara entre os três níveis analisados ( $h = 0,8875, 1,775$  e  $3,55$ m). As vigas mais baixas apresentam maior rigidez inicial e atingem a força máxima com menores deslocamentos. Já as vigas mais altas apresentam menor inclinação inicial das curvas e maiores deslocamentos para atingir o pico de carga. Além disso, observa-se que o aumento da altura não resulta em crescimento proporcional da força máxima, indicando redução da eficiência resistente ao cisalhamento, o que caracteriza o efeito de escala.

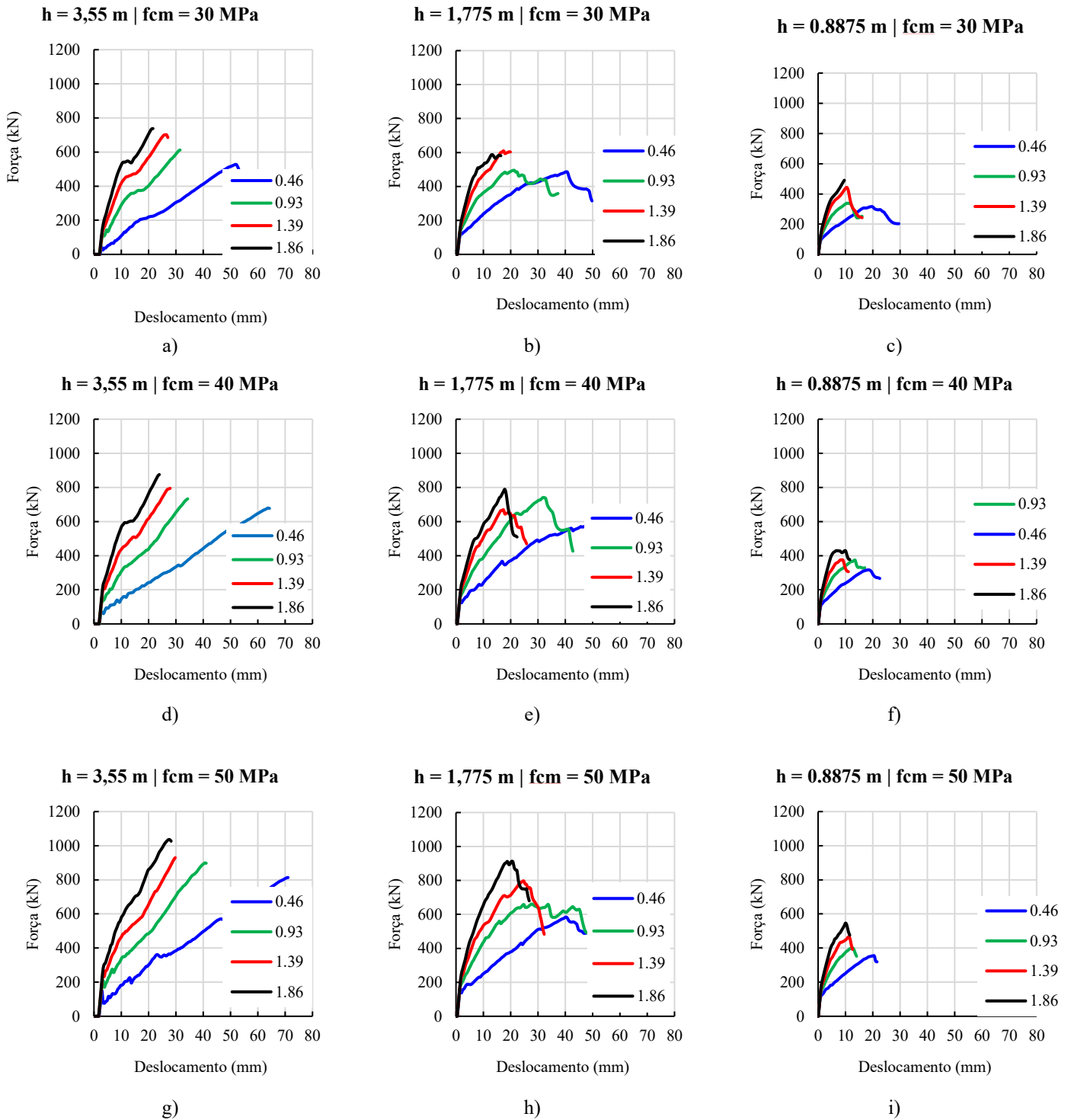
A taxa de armadura longitudinal também apresenta influência significativa. Para todos os casos, o aumento de  $\rho_l$  resulta em elevação da força máxima. Isso é bem visível nas curvas, onde as linhas associadas às maiores taxas (como 1,86%) atingem os maiores valores de força. Além disso, modelos com maior taxa de armadura tendem a apresentar curvas mais “cheias”, com maior capacidade de manter resistência após o pico, enquanto modelos com menor taxa apresentam queda mais rápida.

Quanto à resistência do concreto, observa-se que o aumento de  $f_{cm}$  (de 30 para 50 MPa) leva a um aumento consistente da força máxima em todas as alturas analisadas. No entanto, esse aumento não elimina o efeito da altura da viga. Mesmo para concretos mais resistentes, as vigas mais altas continuam apresentando menor eficiência ao cisalhamento, reforçando que o comportamento não depende apenas da resistência do material, mas também das dimensões do elemento.

Outro ponto importante é o comportamento após o pico de carga. De modo geral, as curvas mostram que vigas com menor altura e maior taxa de armadura apresentam uma redução

mais gradual da força, enquanto vigas mais altas tendem a perder resistência de forma mais rápida. Isso indica que o comportamento é mais estável nos modelos com maior contribuição da armadura longitudinal.

Figura 10 - Influência dos parâmetros analisados na resposta força–deslocamento.



Fonte: Autor 2026.

## 4.2 COMPARAÇÃO COM OS MODELOS NORMATIVOS

A fim de complementar a análise dos resultados, apresenta-se a Tabela 2, na qual são reunidos os valores de resistência ao cisalhamento obtidos por meio da modelagem numérica, bem como aqueles estimados por diferentes modelos teóricos. A inclusão desses dados permite uma avaliação quantitativa direta entre os diferentes métodos, possibilitando a identificação de tendências, discrepâncias e níveis de concordância ao longo das diversas combinações de parâmetros analisadas. Dessa forma, a tabela fornece uma base mais detalhada para a interpretação dos resultados e para a comparação entre as abordagens consideradas.

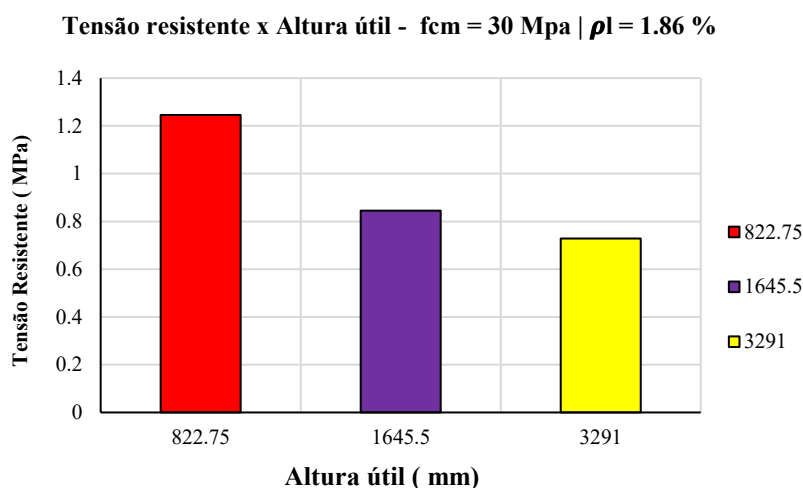
Tabela 2 - Valores de resistência ao cisalhamento obtidos numericamente e estimados por diferentes modelos, para distintas combinações de parâmetros.

| $h$<br>(m) | $\rho_l$<br>(%) | $f_{cm}$<br>(MPa) | $V_{R,num}$<br>(kN) | $\tau_r$<br>(MPa) | $V_{R,NBR.23}$<br>(KN) | $V_{R,EC.05}$<br>(KN) | $V_{R,EC.23}$<br>(KN) | $V_{R,ACI.2014}$<br>(KN) | $V_{R,ACI19}$<br>(KN) | $V_{R,num,d}$<br>(KN) | $V_{R,MC,N1}$<br>(KN) | $V_{R,MC,N2}$<br>(KN) |
|------------|-----------------|-------------------|---------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 3.55       | 0.46            | 30                | 503.49              | 0.60              | 1016.90                | 450.24                | 276.66                | 778.34                   | 189.00                | 337.60                | 115.99                | 160.27                |
| 3.55       | 0.93            | 30                | 546.05              | 0.65              | 1016.90                | 568.38                | 349.26                | 778.34                   | 238.59                | 380.16                | 115.99                | 206.95                |
| 3.55       | 1.39            | 30                | 590.57              | 0.71              | 1016.90                | 650.63                | 399.80                | 778.34                   | 273.12                | 424.68                | 115.99                | 230.27                |
| 3.55       | 1.86            | 30                | 608.83              | 0.73              | 1016.90                | 716.12                | 440.03                | 778.34                   | 300.61                | 442.94                | 115.99                | 244.63                |
| 1.775      | 0.46            | 30                | 303.22              | 0.73              | 508.45                 | 244.04                | 174.63                | 389.17                   | 129.41                | 261.75                | 95.65                 | 121.51                |
| 1.775      | 0.93            | 30                | 307.37              | 0.74              | 508.45                 | 307.47                | 220.02                | 389.17                   | 163.05                | 265.90                | 95.65                 | 161.74                |
| 1.775      | 1.39            | 30                | 364.90              | 0.87              | 508.45                 | 351.97                | 251.86                | 389.17                   | 186.65                | 323.43                | 95.65                 | 183.44                |
| 1.775      | 1.86            | 30                | 353.19              | 0.85              | 508.45                 | 387.39                | 277.20                | 389.17                   | 205.43                | 311.72                | 95.65                 | 197.46                |
| 0.8875     | 0.46            | 30                | 173.12              | 0.83              | 254.23                 | 135.09                | 110.01                | 194.59                   | 86.01                 | 162.75                | 70.81                 | 112.37                |
| 0.8875     | 0.93            | 30                | 184.24              | 0.88              | 254.23                 | 170.20                | 138.60                | 194.59                   | 108.37                | 173.87                | 70.81                 | 155.06                |
| 0.8875     | 1.39            | 30                | 236.23              | 1.13              | 254.23                 | 194.83                | 158.66                | 194.59                   | 124.05                | 225.86                | 70.81                 | 179.71                |
| 0.8875     | 1.86            | 30                | 260.32              | 1.25              | 254.23                 | 214.43                | 174.63                | 194.59                   | 136.54                | 249.96                | 70.81                 | 196.34                |
| 3.55       | 0.46            | 40                | 579.63              | 0.69              | 1231.89                | 495.55                | 304.50                | 898.75                   | 218.24                | 413.74                | 133.93                | 177.31                |
| 3.55       | 0.93            | 40                | 606.72              | 0.73              | 1231.89                | 625.58                | 384.41                | 898.75                   | 275.50                | 440.83                | 133.93                | 231.57                |
| 3.55       | 1.39            | 40                | 637.48              | 0.76              | 1231.89                | 716.12                | 440.03                | 898.75                   | 315.37                | 471.59                | 133.93                | 259.24                |
| 3.55       | 1.86            | 40                | 677.83              | 0.81              | 1231.89                | 788.19                | 484.32                | 898.75                   | 347.11                | 511.94                | 133.93                | 276.50                |
| 1.775      | 0.46            | 40                | 348.68              | 0.83              | 615.95                 | 268.60                | 192.20                | 449.38                   | 149.43                | 307.21                | 110.45                | 120.91                |
| 1.775      | 0.93            | 40                | 430.51              | 1.03              | 615.95                 | 338.42                | 242.16                | 449.38                   | 188.28                | 389.04                | 110.45                | 168.72                |
| 1.775      | 1.39            | 40                | 394.32              | 0.94              | 615.95                 | 387.39                | 277.20                | 449.38                   | 215.52                | 352.85                | 110.45                | 196.17                |
| 1.775      | 1.86            | 40                | 454.43              | 1.09              | 615.95                 | 426.38                | 305.10                | 449.38                   | 237.21                | 412.96                | 110.45                | 214.38                |
| 0.8875     | 0.46            | 40                | 173.15              | 0.83              | 307.97                 | 148.68                | 121.08                | 224.69                   | 99.32                 | 162.79                | 81.77                 | 120.98                |
| 0.8875     | 0.93            | 40                | 201.67              | 0.97              | 307.97                 | 187.33                | 152.55                | 224.69                   | 125.13                | 191.31                | 81.77                 | 169.24                |
| 0.8875     | 1.39            | 40                | 202.67              | 0.97              | 307.97                 | 214.43                | 174.63                | 224.69                   | 143.24                | 192.30                | 81.77                 | 197.76                |
| 0.8875     | 1.86            | 40                | 229.53              | 1.10              | 307.97                 | 236.02                | 192.20                | 224.69                   | 157.66                | 219.16                | 81.77                 | 217.30                |
| 3.55       | 0.46            | 50                | 646.75              | 0.77              | 1429.48                | 533.82                | 328.02                | 1004.84                  | 244.00                | 480.86                | 149.74                | 191.44                |
| 3.55       | 0.93            | 50                | 689.66              | 0.83              | 1429.48                | 673.89                | 414.09                | 1004.84                  | 308.02                | 523.77                | 149.74                | 252.24                |
| 3.55       | 1.39            | 50                | 704.85              | 0.84              | 1429.48                | 771.41                | 474.01                | 1004.84                  | 352.59                | 538.96                | 149.74                | 283.76                |
| 3.55       | 1.86            | 50                | 757.78              | 0.91              | 1429.48                | 849.05                | 521.72                | 1004.84                  | 388.08                | 591.89                | 149.74                | 303.62                |
| 1.775      | 0.46            | 50                | 352.37              | 0.84              | 714.74                 | 289.34                | 207.04                | 502.42                   | 167.07                | 310.90                | 123.48                | 142.08                |
| 1.775      | 0.93            | 50                | 390.75              | 0.93              | 714.74                 | 364.55                | 260.86                | 502.42                   | 210.50                | 349.28                | 123.48                | 193.24                |
| 1.775      | 1.39            | 50                | 458.28              | 1.10              | 714.74                 | 417.30                | 298.61                | 502.42                   | 240.96                | 416.81                | 123.48                | 221.95                |
| 1.775      | 1.86            | 50                | 516.29              | 1.24              | 714.74                 | 459.30                | 328.66                | 502.42                   | 265.21                | 474.82                | 123.48                | 240.93                |
| 0.8875     | 0.46            | 50                | 192.20              | 0.92              | 357.37                 | 160.16                | 130.43                | 251.21                   | 111.04                | 181.84                | 91.42                 | 129.83                |
| 0.8875     | 0.93            | 50                | 215.43              | 1.03              | 357.37                 | 201.79                | 164.33                | 251.21                   | 139.90                | 205.06                | 91.42                 | 182.70                |
| 0.8875     | 1.39            | 50                | 258.07              | 1.23              | 357.37                 | 230.99                | 188.11                | 251.21                   | 160.15                | 247.70                | 91.42                 | 214.30                |
| 0.8875     | 1.86            | 50                | 288.21              | 1.38              | 357.37                 | 254.24                | 207.04                | 251.21                   | 176.27                | 277.85                | 91.42                 | 236.15                |

Fonte – Autor 2026.

A Figura 11 evidencia a relação inversa entre a altura útil do elemento e a tensão resistente ao cisalhamento para concreto com resistência média à compressão de 30 MPa e taxa de armadura longitudinal de 1,86%. Observa-se que, à medida que a altura útil aumenta de 822,75 mm para 3291 mm, a tensão resistente reduz de aproximadamente 1,25 MPa para 0,73 MPa. Esse comportamento demonstra a influência do efeito de escala, no qual elementos estruturais de maiores dimensões apresentam menor capacidade resistente em termos de tensão nominal. Tal redução está associada à distribuição não uniforme das tensões internas e à maior probabilidade de desenvolvimento de fissuras críticas em peças mais espessas, confirmando que o aumento das dimensões do elemento não resulta em incremento proporcional da resistência ao cisalhamento.

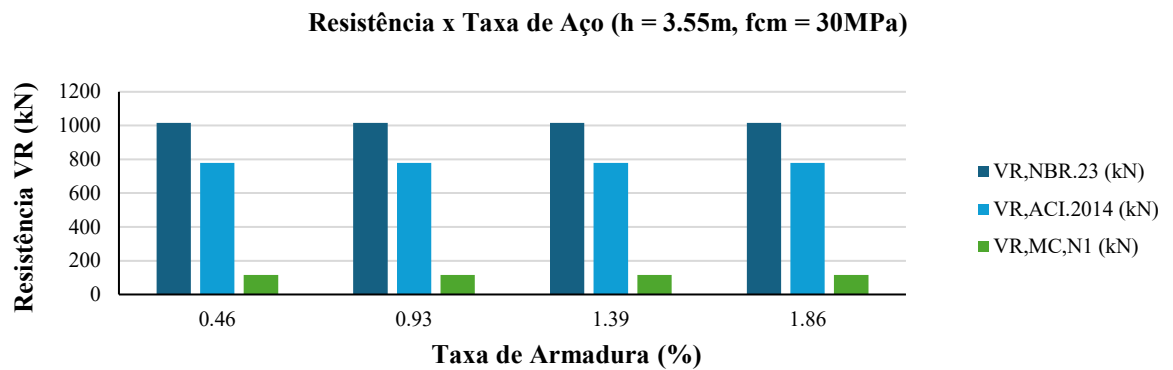
Figura 11- Influência da altura útil na tensão resistente ao cisalhamento



Fonte: Autor 2026.

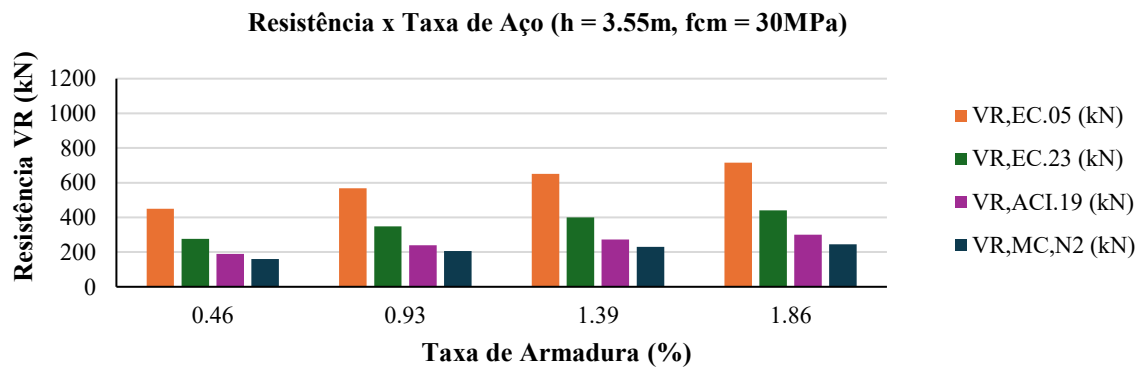
A Figura 12 e Figura 13 apresentam a variação da resistência ao cisalhamento em função da taxa de armadura longitudinal para elementos com altura de 3,55 m e resistência média do concreto de 30 MPa. Na Figura 12 observa-se que os valores obtidos pelos modelos da NBR 6118:2023, do American Concrete Institute 318:2014 e do fib Model Code 2020 Nível 1 permanecem praticamente constantes com o aumento da taxa de armadura, indicando menor sensibilidade desses modelos à variação desse parâmetro. Já na Figura 13, nota-se um aumento progressivo da resistência prevista pelos modelos do Eurocode 2, do ACI 318:2019 e do fib Model Code 2020 Nível 2 à medida que a taxa de armadura cresce de 0,46% para 1,86%, evidenciando maior influência da armadura longitudinal na resistência ao cisalhamento.

Figura 12 - Resistência ao cisalhamento em função da taxa de armadura – Modelos que não consideram a armadura longitudinal.



Fonte: Autor 2026.

Figura 13 - Resistência ao cisalhamento em função da taxa de armadura – Modelos que consideram a armadura longitudinal.



Fonte: Autor 2026.

A Tabela 3 apresenta a relação entre os valores de resistência ao cisalhamento obtidos numericamente e aqueles estimados por diferentes modelos normativos, expressa por meio da razão  $V_{num}/V_{norma}$ . Adicionalmente, são apresentados os valores médios e os coeficientes de variação (COV) para cada modelo, permitindo avaliar tanto a acurácia quanto a dispersão dos resultados.

Tabela 3 - Relação entre as resistências ao cisalhamento numéricas ( $V_{R,num}$ ) e normativas ( $V_{R,NOMR}$ ).

| h (m)                   | $\rho_l$<br>(%) | $f_{cm}$<br>(MPa) | $\frac{V_{R,num}}{V_{R,NBR,23}}$ | $\frac{V_{R,num}}{V_{R,EC,05}}$ | $\frac{V_{R,num}}{V_{R,EC,23}}$ | $\frac{V_{R,num}}{V_{R,ACI,2014}}$ | $\frac{V_{R,num}}{V_{R,ACI,2019}}$ | $\frac{V_{R,num}}{V_{R,MC,N1}}$ | $\frac{V_{R,num}}{V_{R,MC,N2}}$ |
|-------------------------|-----------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                         |                 |                   |                                  |                                 |                                 |                                    |                                    |                                 |                                 |
| 3.55                    | 0.46            | 30                | 0.50                             | 1.12                            | 1.82                            | 0.65                               | 2.66                               | 2.91                            | 2.11                            |
|                         | 0.46            | 40                | 0.47                             | 1.17                            | 1.90                            | 0.64                               | 2.66                               | 3.09                            | 2.33                            |
|                         | 0.46            | 50                | 0.45                             | 1.21                            | 1.97                            | 0.64                               | 2.65                               | 3.21                            | 2.51                            |
|                         | 0.93            | 30                | 0.54                             | 0.96                            | 1.56                            | 0.70                               | 2.29                               | 3.28                            | 1.84                            |
|                         | 0.93            | 40                | 0.49                             | 0.97                            | 1.58                            | 0.68                               | 2.20                               | 3.29                            | 1.90                            |
|                         | 0.93            | 50                | 0.48                             | 1.02                            | 1.67                            | 0.69                               | 2.24                               | 3.50                            | 2.08                            |
|                         | 1.39            | 30                | 0.58                             | 0.91                            | 1.48                            | 0.76                               | 2.16                               | 3.66                            | 1.84                            |
|                         | 1.39            | 40                | 0.52                             | 0.89                            | 1.45                            | 0.71                               | 2.02                               | 3.52                            | 1.82                            |
|                         | 1.39            | 50                | 0.49                             | 0.91                            | 1.49                            | 0.70                               | 2.00                               | 3.60                            | 1.90                            |
|                         | 1.86            | 30                | 0.60                             | 0.85                            | 1.38                            | 0.78                               | 2.03                               | 3.82                            | 1.81                            |
|                         | 1.86            | 40                | 0.55                             | 0.86                            | 1.40                            | 0.75                               | 1.95                               | 3.82                            | 1.85                            |
|                         | 1.86            | 50                | 0.53                             | 0.89                            | 1.45                            | 0.75                               | 1.95                               | 3.95                            | 1.95                            |
| 1.775                   | 0.46            | 30                | 0.60                             | 1.24                            | 1.74                            | 0.78                               | 2.34                               | 2.74                            | 2.15                            |
|                         | 0.46            | 40                | 0.57                             | 1.30                            | 1.81                            | 0.78                               | 2.33                               | 2.78                            | 2.54                            |
|                         | 0.46            | 50                | 0.49                             | 1.22                            | 1.70                            | 0.70                               | 2.11                               | 2.52                            | 2.19                            |
|                         | 0.93            | 30                | 0.60                             | 1.00                            | 1.40                            | 0.79                               | 1.89                               | 2.78                            | 1.64                            |
|                         | 0.93            | 40                | 0.70                             | 1.27                            | 1.78                            | 0.96                               | 2.29                               | 3.52                            | 2.31                            |
|                         | 0.93            | 50                | 0.55                             | 1.07                            | 1.50                            | 0.78                               | 1.86                               | 2.83                            | 1.81                            |
|                         | 1.39            | 30                | 0.72                             | 1.04                            | 1.45                            | 0.94                               | 1.96                               | 3.38                            | 1.76                            |
|                         | 1.39            | 40                | 0.64                             | 1.02                            | 1.42                            | 0.88                               | 1.83                               | 3.19                            | 1.80                            |
|                         | 1.39            | 50                | 0.64                             | 1.10                            | 1.53                            | 0.91                               | 1.90                               | 3.38                            | 1.88                            |
|                         | 1.86            | 30                | 0.69                             | 0.91                            | 1.27                            | 0.91                               | 1.72                               | 3.26                            | 1.58                            |
|                         | 1.86            | 40                | 0.74                             | 1.07                            | 1.49                            | 1.01                               | 1.92                               | 3.74                            | 1.93                            |
|                         | 1.86            | 50                | 0.72                             | 1.12                            | 1.57                            | 1.03                               | 1.95                               | 3.85                            | 1.97                            |
| 0.8875                  | 0.46            | 30                | 0.68                             | 1.28                            | 1.57                            | 0.89                               | 2.01                               | 2.30                            | 1.45                            |
|                         | 0.46            | 40                | 0.56                             | 1.16                            | 1.43                            | 0.77                               | 1.74                               | 1.99                            | 1.35                            |
|                         | 0.46            | 50                | 0.54                             | 1.20                            | 1.47                            | 0.77                               | 1.73                               | 1.99                            | 1.40                            |
|                         | 0.93            | 30                | 0.72                             | 1.08                            | 1.33                            | 0.95                               | 1.70                               | 2.46                            | 1.12                            |
|                         | 0.93            | 40                | 0.65                             | 1.08                            | 1.32                            | 0.90                               | 1.61                               | 2.34                            | 1.13                            |
|                         | 0.93            | 50                | 0.60                             | 1.07                            | 1.31                            | 0.86                               | 1.54                               | 2.24                            | 1.12                            |
|                         | 1.39            | 30                | 0.93                             | 1.21                            | 1.49                            | 1.21                               | 1.90                               | 3.19                            | 1.26                            |
|                         | 1.39            | 40                | 0.66                             | 0.95                            | 1.16                            | 0.90                               | 1.41                               | 2.35                            | 0.97                            |
|                         | 1.39            | 50                | 0.72                             | 1.12                            | 1.37                            | 1.03                               | 1.61                               | 2.71                            | 1.16                            |
|                         | 1.86            | 30                | 1.02                             | 1.21                            | 1.49                            | 1.34                               | 1.91                               | 3.53                            | 1.27                            |
|                         | 1.86            | 40                | 0.75                             | 0.97                            | 1.19                            | 1.02                               | 1.46                               | 2.68                            | 1.01                            |
|                         | 1.86            | 50                | 0.81                             | 1.13                            | 1.39                            | 1.15                               | 1.64                               | 3.04                            | 1.18                            |
| Média                   |                 |                   | 0.63                             | 1.07                            | 1.51                            | 0.85                               | 1.98                               | 3.07                            | 1.72                            |
| Coeficiente de variação |                 |                   | 20.37%                           | 12.1%                           | 12.5%                           | 19.4%                              | 16.0%                              | 18.1%                           | 25.1%                           |

Fonte – Autor 2026.

A análise dos resultados evidencia que os modelos normativos apresentam diferentes níveis de acurácia na estimativa da resistência ao cisalhamento. De modo geral, valores médios da razão  $V_{num}/V_{norma}$  próximos da unidade indicam boa concordância entre os resultados numéricos e as previsões normativas. Valores médios inferiores a 1,0 caracterizam modelos

conservadores, como observado para a NBR 6118:2023 e o ACI 318:2014, uma vez que subestimam a resistência. Por outro lado, valores superiores a 1,0, como os obtidos para o Eurocode 2 (2005 e 2023), o ACI 318:2019 e o fib Model Code 2010, indicam tendência à superestimação da capacidade resistente.

Adicionalmente, verifica-se que a NBR 6118:2023 não considera explicitamente o efeito de escala em sua formulação, o que resulta em previsões pouco sensíveis à variação da altura das vigas. Tal limitação torna-se evidente ao se comparar com os resultados numéricos, nos quais vigas de maior altura apresentam redução relativa da resistência ao cisalhamento.

Observa-se ainda que o aumento da taxa de armadura longitudinal está associado ao incremento da resistência obtida numericamente, em concordância com o comportamento teórico. No entanto, esse efeito não é devidamente capturado pelas expressões da NBR 6118:2023 e do ACI 318, que apresentam variações limitadas da resistência em função da taxa de armadura.

De forma geral, os resultados indicam que, embora os modelos normativos forneçam estimativas úteis para o dimensionamento, apresentam limitações na representação de fenômenos relevantes, como o efeito de escala e a contribuição da armadura longitudinal, especialmente em vigas sem armadura transversal.

É importante destacar que os resultados obtidos dependem diretamente das hipóteses adotadas na modelagem numérica, como as simplificações dos modelos dos materiais, as condições de contorno e a forma de discretização utilizada. Além disso, o estudo considerou apenas um conjunto específico de parâmetros, não incluindo outras variáveis que também podem influenciar o comportamento ao cisalhamento, como diferentes tipos de carregamento, condições de apoio ou a presença de armadura transversal. Dessa forma, os resultados devem ser analisados dentro desse contexto, sendo interessante a realização de estudos complementares para ampliar e confirmar as conclusões obtidas.

## **5 CONCLUSÕES**

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem armadura transversal por meio de modelagem numérica, com ênfase na influência da altura da viga, da resistência à compressão do concreto e da taxa de armadura longitudinal, tomando como base o ensaio experimental de Moehle e Zhai (2021).

Os resultados obtidos demonstraram que o modelo numérico foi capaz de representar de forma satisfatória o comportamento estrutural observado experimentalmente, tanto em

termos de padrão de fissuração quanto na resposta força–deslocamento, evidenciando sua adequação para a análise desse tipo de problema.

A análise paramétrica evidenciou que o aumento da resistência do concreto e da taxa de armadura longitudinal contribui para o aumento da capacidade resistente ao cisalhamento, enquanto o aumento da altura da viga resulta em redução relativa da tensão resistente ao cisalhamento do elemento estrutural, caracterizando o efeito de escala. Esse comportamento está em concordância com o entendimento teórico, especialmente no que se refere ao papel da abertura das fissuras críticas no mecanismo de ruptura.

A comparação entre as normas indicou diferenças significativas em termos de precisão e consistência. De modo geral, observou-se que a NBR 6118:2023 e a ACI 318:2014 apresentam comportamento menos conservador (superestimam a resistência), enquanto a Eurocode 2:2005, a Eurocode 2:2023, a ACI 318:2019 e o Model Code 2020 – nível 1 e 2 apresentam abordagem mais conservadora. Além disso, verificou-se que a NBR 6118:2023, a ACI 318:2014 e o Model Code 2020 – nível 1 não consideram explicitamente a contribuição da armadura longitudinal, ao contrário da ACI 318:2019, da Eurocode 2:2005, da Eurocode 2:2023 e do Model Code 2020 – nível 2, que incorporam esse efeito em suas formulações. Nesse contexto, os resultados reforçam a importância da utilização de ferramentas numéricas como complemento às abordagens normativas, especialmente na análise de elementos estruturais com comportamento mais complexo, como vigas de grande altura sem armadura transversal.

Em síntese, as diferenças observadas evidenciam a forte influência das hipóteses adotadas por cada norma, destacando-se a Eurocode 2:2005 por apresentar maior consistência e menor dispersão nos resultados.

Por fim, estudos futuros podem investigar a influência de outros parâmetros, como diferentes condições de carregamento, variações nas condições de apoio e a inclusão de armadura transversal, contribuindo para uma compreensão mais completa do fenômeno e para o aprimoramento dos modelos de previsão da resistência ao cisalhamento.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6118:2023. (2023). Projeto de estruturas de concreto. In Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) (p.988) and Commentary**. Farmington Hills, MI, 2014.

**Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) (p.988) and Commentary**. Farmington Hills, MI, 2019.

COLLINS, Michael P; BENTZ, Evan; QUACH, Phillip T. **The Challenge of Predicting the Shear Strength of Very Thick Slabs**. 2015. Disponível em: <[www.concreteinternational.com](http://www.concreteinternational.com)>.

CARREIRA, Domingo J; CHU, Kuang-Han. **Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression**, 1985.

**CEB-FIP MODEL CODE 1990**: Emerald Publishing Limited, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules**. Brussels, 2023.

**Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. Brussels, 2004.

FERREIRA GIROTTO, Gabriel et al. Análise numérica da capacidade resistente à força cortante de uma viga com 3.5 m de altura e sem armadura transversal. 66º Congresso Brasileiro do Concreto, 2025.

FIB. **fib Model Code for Concrete Structures 2010**: Wiley, 2010.

GENIKOMSOU, Aikaterini S.; POLAK, Maria Anna. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. **Engineering Structures**, v. 98, p. 38–48, set. 2015.

GIROTTTO, Gabriel Ferreira et al. Size Effect of Slender and Thick Reinforced Concrete Members Without Transverse Reinforcement Failing in Shear: Parameter Analyses and Code Predictions. **Buildings**, v. 16, n. 6, p. 1234, 20 mar. 2026.

HORDIJK, D A. **Tensile and Tensile Fatigue Behaviour of Concrete ; Experiments, Modelling and Analyses**. Delft, The Netherlands: Heron, 1992.

LE MINH, Hoang- et al. A concrete damage plasticity model for predicting the effects of compressive high-strength concrete under static and dynamic loads. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103239, dez. 2021.

MOEHLE, Jack P et al e Zhai, Jerry et al. **Blind Prediction Competition of Shear Strength for Thick Concrete Foundation Elements With and Without Shear Reinforcement**, 2021. Disponível em: <<https://peer.berkeley.edu/news-and-events/2021-thick-foundation-element-blind-prediction-contest>>.

TESLENCO MANSANO, Gabriel; HUGO FRANÇA SILVA, Victor; MICAEL DANTAS DE SOUSA, Alex. **ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO DE ESCALA NA RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE DE VIGAS ALTAS DE CONCRETO ARMADO SEM ESTRIBOS**. 66º Congresso Brasileiro do Concreto, 2025.

YU, Z. Q. et al. SURFACE DAMAGE BEHAVIOR OF GALVANIZED STEEL SHEETS IN FORMING PROCESS UNDER TENSION-BENDING. **International Journal of Modern Physics B**, v. 24, n. 30, p. 5877–5884, 10 dez. 2010.