

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

**VICTOR HUGO FRANÇA SILVA**

**PREVISÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE À FORÇA CORTANTE DE VIGAS  
ESBELTAS DE GRANDE ALTURA COM ESTRIBOS: ANÁLISE NUMÉRICA E  
COMPARAÇÃO COM CÓDIGOS NORMATIVOS**



Ilha Solteira - SP  
2026

**VICTOR HUGO FRANÇA SILVA**

**PREVISÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE À FORÇA CORTANTE DE VIGAS  
ESBELTAS DE GRANDE ALTURA COM ESTRIBOS: ANÁLISE NUMÉRICA E  
COMPARAÇÃO COM CÓDIGOS NORMATIVOS**

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

S586p Silva, Victor Hugo França.  
Previsão da capacidade resistente à força cortante de vigas esbeltas de grande altura com estribos: análise numérica e comparação com códigos normativos / Victor Hugo França Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026  
37 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. Força cortante. 2. Estribo. 3. Cisalhamento. 4. Concreto. 5. Resistência. 6.  
Modelagem numérica.

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

O impacto potencial desta pesquisa está relacionado ao avanço do conhecimento sobre o comportamento ao cisalhamento de vigas de grande altura em concreto armado, com ênfase na avaliação das formulações normativas frente aos resultados obtidos por modelagem numérica. Os resultados contribuem para uma melhor compreensão dos mecanismos resistentes, especialmente quanto à influência da taxa de armadura longitudinal, da resistência do concreto e da armadura transversal, permitindo uma análise mais consistente da segurança estrutural.

Além disso, o estudo apresenta relevância econômica ao contribuir para a otimização do uso de materiais e redução de incertezas no dimensionamento estrutural. No âmbito acadêmico, reforça a importância da modelagem numérica na formação de engenheiros, além de servir como base para estudos futuros e para o aprimoramento de critérios de projeto, com impacto na qualidade e segurança das estruturas de concreto.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

The potential impact of this research is related to advancing the understanding of shear behavior in reinforced concrete deep beams, with emphasis on evaluating code-based formulations in comparison with numerical modeling results. The findings contribute to a better understanding of the resisting mechanisms, particularly regarding the influence of longitudinal reinforcement ratio, concrete strength, and transverse reinforcement, allowing for a more consistent assessment of structural safety.

In addition, the study has economic relevance by contributing to material optimization and reducing uncertainties in structural design. From an academic perspective, it reinforces the importance of numerical modeling in engineering education and can support future studies and improvements in design criteria, with direct implications for the quality and safety of concrete structures.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: **VICTOR HUGO FRANÇA SILVA**

Título: PREVISÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE À FORÇA CORTANTE DE VIGAS ESBELTAS DE GRANDE ALTURA COM ESTRIBOS: ANÁLISE NUMÉRICA E COMPARAÇÃO COM CÓDIGOS NORMATIVOS.”

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. Jose Luiz Pinheiro Melges

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

22/04/2026

À minha família, naturalmente.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e pela oportunidade de concluir uma grande etapa em minha vida.

À toda minha família, em especial aos meus pais, Cristiane e Valdemir, à minha irmã Maria Victoria, ao meu avô Aparecido e à minha avó Antônia, pelo incentivo, amor e cuidado incondicionais em todos os anos da minha vida.

À minha noiva Leticia Jardim Ferreira, por inspirar-me com seu exemplo de pessoa de valores e princípios, pelo incentivo e companheirismo ao longo dessa minha trajetória acadêmica. Tê-la como companheira me faz ser um homem por completo.

À Universidade Estadual Paulista, pelo grande apoio durante a minha graduação em Engenharia Civil, em especial, pelo auxílio e bolsa que foram fundamentais para minha permanência e formação acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alex Micael, pelo exemplo como pesquisador, orientação, paciência e ensinamentos transmitidos ao longo deste trabalho. Foi uma honra.

Aos meus amigos do grupo Engenharilha, agradeço o companheirismo e todos os momentos lendários durante a graduação.

Aos meus professores, pelos conhecimentos compartilhados durante toda a graduação.

Aos membros da banca examinadora, pela valiosa atenção e contribuição com o presente trabalho.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Vencer sem correr riscos é triunfar sem glórias!”

Ayrton Senna

## RESUMO

A avaliação da resistência à força cortante em vigas de concreto armado de grande altura representa um tema de elevada relevância na engenharia estrutural, especialmente em razão da complexidade dos mecanismos resistentes envolvidos e das limitações inerentes às formulações normativas tradicionais. Elementos com relações geométricas não usuais, como vigas esbeltas de grande altura, podem apresentar comportamentos que extrapolam as hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos de dimensionamento correntes. Este trabalho tem como objetivo analisar a capacidade resistente ao cisalhamento de vigas esbeltas de grande altura providas de armadura transversal, por meio de modelagem numérica via método dos elementos finitos e comparar com as previsões fornecidas pelas normas ABNT NBR 6118:2023, Eurocode 2 (CEN, 2004) e ACI 318:2019. A modelagem foi desenvolvida no software Abaqus, adotando-se o modelo constitutivo Concrete Damaged Plasticity (CDP) para representação do comportamento não linear do concreto e modelo elasto-plástico ideal para o aço das armaduras. A calibração do modelo numérico foi realizada com base em resultados experimentais de um ensaio conduzido pelo Grupo de Construção da Universidade da Coruña (Espanha), no qual uma viga de 2,0 m de altura e 12,00 m de comprimento foi submetida à ruptura por cisalhamento. A validação considerou a compatibilidade entre padrões de fissuração, resposta força–deslocamento e carga última, evidenciando elevada concordância entre os resultados experimentais e os obtidos numericamente. Após a etapa de validação, foi conduzida uma análise paramétrica contemplando diferentes resistências à compressão do concreto, variações na taxa de armadura longitudinal e alterações na armadura transversal. Os resultados indicaram discrepâncias significativas entre as resistências estimadas pelas expressões normativas e aquelas obtidas numericamente, com tendência de superestimação por parte de alguns modelos normativos, sobretudo para concretos de maior resistência. Observou-se ainda que a influência de determinados parâmetros mecânicos e geométricos não é plenamente capturada pelas formulações de projeto. Conclui-se que a modelagem numérica constitui ferramenta complementar relevante para a análise da resistência ao cisalhamento em vigas de grande altura, contribuindo para avaliações mais precisas e para o aprimoramento das práticas de dimensionamento estrutural.

**Palavras-chave:** Força cortante, estribo, cisalhamento, concreto, resistência, modelagem numérica.

## ABSTRACT

The evaluation of shear strength in tall reinforced concrete beams represents a highly relevant topic in structural engineering, particularly due to the complexity of the resisting mechanisms involved and the inherent limitations of traditional code-based formulations. Structural elements with non-conventional geometric proportions, such as tall and slender beams, may exhibit behavior that exceeds the simplifying assumptions commonly adopted in current design models.

This study aims to analyze the shear strength capacity of slender tall reinforced concrete beams with transverse reinforcement through numerical modeling using the finite element method and to compare the results with the predictions provided by ABNT NBR 6118:2023, Eurocode 2 (CEN, 2004), and ACI 318:2019. The numerical modeling was developed in the Abaqus software, adopting the Concrete Damaged Plasticity (CDP) constitutive model to represent the nonlinear behavior of concrete and an ideal elastic–plastic model for the reinforcing steel.

The calibration of the numerical model was carried out based on experimental results from a test conducted by the Construction Group of the University of A Coruña (Spain), in which a beam 2.0 m high and 12.0 m long was subjected to shear failure. The validation procedure considered the compatibility of cracking patterns, load–displacement response, and ultimate load, demonstrating strong agreement between experimental and numerical results.

After the validation stage, a parametric analysis was performed considering different concrete compressive strengths, variations in the longitudinal reinforcement ratio, and changes in transverse reinforcement. The results indicated significant discrepancies between the shear strength predicted by design code expressions and the values obtained numerically, with a tendency toward overestimation by some normative models, particularly for higher-strength concrete. It was also observed that the influence of certain mechanical and geometric parameters is not fully captured by current design formulations.

It is concluded that numerical modeling constitutes a relevant complementary tool for analyzing the shear strength of tall beams, contributing to more accurate assessments and to the improvement of structural design practices.

**Keywords:** Shear force, stirrup, shear, concrete, strength, numerical modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria do ensaio utilizado como referência para calibração dos modelos numéricos.....	22
Figura 2 – Padrão de fissuração observado no ensaio desenvolvido pelo Grupo de Construção da Universidade da Coruña. ....	23
Figura 3 – Padrão de fissuração observado no ensaio desenvolvido pelo Grupo de Construção da Universidade da Coruña. ....	23
Figura 4 – Discretização da malha em elementos finitos. ....	25
Figura 5 – Condições de contorno aplicadas no apoio esquerdo.....	25
Figura 6 – Condições de contorno aplicadas no apoio direito.....	26
Figura 7 – Partes selecionadas na definição da interação de corpo rígido entre a placa de carregamento e o ponto de referência RP-3. ....	26
Figura 8 – Características da fissuração do modelo computacional do ensaio experimental através da distribuição do dano na tração (DAMAGET). ....	28
Figura 9 – Comparação da curva força × deslocamento obtidas no experimento e na simulação numérica. ....	29
Figura 10 – Curvas força × deslocamento de acordo com a resistência à compressão do concreto e diâmetro adotado para os estribos. ....	30
Figura 11 – Parâmetros considerados na análise paramétrica das vigas estudadas. ....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do concreto utilizado. Fonte: Adaptado de GCONS (2020). .....	21
Tabela 2 – Propriedades das barras de aço utilizadas. Fonte: Adaptado de GCONS (2020).....	21
Tabela 3 – Comparação entre previsões de resistência à força cortante pelos modelos numéricos e pelas expressões normativas para estribos de 10 mm. ....	32
Tabela 4 – Comparação entre previsões de resistência à força cortante pelos modelos numéricos e pelas expressões normativas para estribos de 8 mm. ....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
CDP	<i>Concrete Damaged Plasticity</i>
Fib	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
gCons-UDC	Grupo de Construção da Universidade da Coruña
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
RP	Ponto de Referência (Reference Point)
S4R	Elemento de casca quadrilateral com quatro nós e integração reduzida (ABAQUS)
T2D2	Elemento de treliça bidimensional com dois nós (ABAQUS)
UDC	Universidade da Coruña

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Vão de cisalhamento
$A_g$	Área bruta da seção de concreto
$A_{sw}$	Área da armadura transversal
$b_w$	Largura da alma da viga
$d$	Altura útil da seção transversal
$h$	Altura total da viga
$f_{ck}$	Resistência característica do concreto
$f_{cm}$	Resistência média à compressão do concreto
$f_{ct}$	Resistência à tração do concreto
$f_{ctm}$	Resistência média à tração do concreto
$f_y$	Resistência ao escoamento do aço
$f_{ywd}$	Resistência de cálculo do aço dos estribos
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_{ci}$	Módulo de elasticidade inicial do concreto
$\alpha_i$	Coefficiente de ajuste do módulo de elasticidade
$\alpha_E$	Coefficiente dependente do tipo de agregado
$G_f$	Energia de fratura do concreto
$K_c$	Fator de forma
$N_u$	Normal atuante
$\rho_l$	Taxa de armadura longitudinal
$s$	Espaçamento dos estribos
$v_1$	Fator redutor da resistência do concreto
$V$	Força cortante atuante
$V_{Rd}$	Resistência ao cisalhamento de cálculo
$V_{co}$	Resistência ao cisalhamento contribuída pelo concreto
$V_{sw}$	Resistência ao cisalhamento contribuída pela armadura transversal
$V_{num}$	Resistência ao cisalhamento obtida numericamente
$V_{exp}$	Resistência ao cisalhamento experimental
$\sigma$	Tensão
$\sigma_c$	Tensão de compressão no concreto
$\sigma_t$	Tensão de tração no concreto
$\varepsilon$	Deformação

$\varepsilon_c$	Deformação de compressão do concreto
$\varepsilon_t$	Deformação de tração do concreto
$\varepsilon_{c1}$	Deformação correspondente à tensão máxima do concreto
$w$	Abertura de fissura
$\mu$	Viscosidade do Concreto
$w_c$	Abertura de fissura crítica
$z$	Braço de alavanca interno
$l_{eq}$	Comprimento característico do elemento finito
$\beta$	Parâmetro da curva tensão - deformação do concreto
$d_c$	Variável de dano à compressão
$d_t$	Variável de dano à tração
$\gamma_c$	Coefficiente de segurança do concreto
$\gamma_s$	Coefficiente de segurança do aço
$\lambda$	Fator do tipo de concreto
$\theta$	Ângulo de inclinação das bielas comprimidas
$\Psi$	Ângulo de dilatação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
3.1	NBR 6118/2023 .....	18
3.2	EUROCODE 2/2004 .....	19
3.3	ACI 318/2019 .....	19
<b>4</b>	<b>DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE REFERÊNCIA.....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>DESCRIÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA.....</b>	<b>24</b>
5.1	DISCRETIZAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS .....	24
5.2	CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	25
5.3	MODELO CONSTITUTIVO PARA OS MATERIAIS .....	26
5.4	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	28
<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>30</b>
6.1	CURVAS FORÇA – DESLOCAMENTO .....	30
6.2	ANÁLISE PARAMÉTRICA .....	31
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>35</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A análise da resistência ao esforço cortante em elementos de concreto armado constitui um dos aspectos mais relevantes no dimensionamento estrutural, especialmente em situações em que o elemento apresenta um comportamento estrutural complexo. Nesse contexto, vigas de grande altura apresentam respostas estruturais mais profundas, caracterizadas por mecanismos resistentes distintos, como a formação de campos de compressão inclinados, a redistribuição de tensões internas e a atuação conjunta de bielas comprimidas e tirantes tracionados (ALBUQUERQUE e colab., 2019).

O comportamento dessas estruturas é fortemente influenciado por parâmetros geométricos, em especial pela relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil da seção ( $a/d$ ). Para valores reduzidos dessa relação, a transferência de esforços ocorre de maneira mais direta entre os pontos de aplicação de carga e os apoios, resultando em uma menor dependência dos mecanismos clássicos de cisalhamento e maior participação do concreto comprimido. Essa característica limita a aplicabilidade de modelos simplificados tradicionalmente utilizados no dimensionamento, evidenciando a necessidade de abordagens mais consistentes para a estimativa da resistência ao cisalhamento.

No âmbito do projeto estrutural, diferentes normas técnicas propõem metodologias distintas para a verificação da resistência ao cisalhamento, baseadas em hipóteses específicas e calibrações experimentais. Entre as principais referências internacionais, destacam-se a ABNT NBR 6118 (ABNT, 2023), o Eurocode 2 (CEN, 2004) e o ACI 318 (ACI COMMITTEE 318, 2019), cujas formulações podem conduzir a resultados significativamente distintos, especialmente em elementos fora do domínio convencional de aplicação (RANGEL e colab., 2020).

Diante dessas diferenças, torna-se fundamental avaliar o desempenho dessas abordagens normativas frente ao comportamento estrutural mais próximo da realidade. Nesse sentido, a modelagem numérica, particularmente por meio do método dos elementos finitos, tem se destacado como uma ferramenta capaz de representar de forma mais detalhada os fenômenos não lineares envolvidos, como fissuração, plastificação e redistribuição de tensões.

Assim, a realização de estudos comparativos entre resultados obtidos por modelagem numérica e as previsões fornecidas por normas de projeto permite avaliar a precisão, as limitações e as tendências de cada abordagem, contribuindo para o aprimoramento das práticas de dimensionamento estrutural.

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a resistência ao cisalhamento de vigas de grande altura com armadura transversal, por meio da comparação entre resultados obtidos em modelagem numérica e as previsões fornecidas pelas normas ABNT NBR 6118 (ABNT, 2023), Eurocode 2 (CEN, 2004) e ACI 318 (ACI COMMITTEE 318, 2019), visando contribuir para uma avaliação mais precisa e segura do comportamento estrutural desses elementos.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A resistência ao esforço cortante em elementos de concreto armado constitui um dos temas mais complexos da engenharia estrutural, uma vez que envolve múltiplos mecanismos resistentes que atuam simultaneamente e de forma interdependente. Diferentemente da flexão simples, cujo comportamento pode ser descrito com base

em hipóteses clássicas bem estabelecidas, o cisalhamento está associado a fenômenos como fissuração diagonal, engrenamento de agregados, ação de pino das armaduras longitudinais e formação de campos de compressão inclinados. Esses mecanismos tornam-se ainda mais relevantes em vigas de grande altura, nas quais o comportamento estrutural se afasta significativamente das premissas adotadas para vigas esbeltas (ALBUQUERQUE et al., 2019).

Em vigas-parede (relação vão/altura < 2 de acordo com o item 18.3.1 da ABNT NBR 6118:2023), a transferência de esforços ocorre predominantemente por meio de trajetórias comprimidas (bielas) entre a carga aplicada e os apoios, reduzindo a importância relativa dos mecanismos tradicionais de cisalhamento. Esse comportamento está diretamente associado à relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil da seção ( $a/d$ ), sendo que valores reduzidos dessa relação implicam maior contribuição do concreto comprimido e menor dependência da armadura transversal. Nesse contexto, modelos clássicos baseados na analogia de treliça passam a apresentar limitações, exigindo abordagens mais refinadas para a estimativa da resistência ao cisalhamento, como os modelos de bielas e tirantes. Portanto, destaca-se que este trabalho aborda o caso de vigas esbeltas (relação vão/altura  $\geq 2$ ) de grande altura, para os quais os modelos clássicos de dimensionamento de vigas baseados na analogia de treliça ainda podem ser aplicados.

### 3.1 NBR 6118/2023

No âmbito normativo, diferentes códigos de projeto propõem metodologias distintas para a avaliação da resistência ao cisalhamento, refletindo diferentes níveis de complexidade e hipóteses de modelagem. A ABNT NBR 6118 (ABNT, 2023), por exemplo, baseia-se em um modelo de treliça generalizada com ângulo variável das bielas comprimidas, permitindo representar de forma mais realista o fluxo de tensões no interior do elemento estrutural.

A verificação da compressão diagonal do concreto, que representa a limitação associada ao esmagamento das bielas comprimidas, é expressa por:

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

Nessa expressão,  $f_{ck}$  corresponde à resistência característica à compressão do concreto, enquanto  $f_{ctd}$  representa a resistência de cálculo do concreto, obtida pela divisão de  $f_{ck}$  em MPa pelo coeficiente de segurança parcial. O termo  $b_w$  refere-se à largura da alma da viga, e  $d$  corresponde à altura útil da seção. O fator  $\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$  introduz uma redução na resistência para concretos de maior resistência, refletindo o comportamento mais frágil desses materiais sob estados de tensão complexos.

A contribuição do concreto para a resistência ao cisalhamento é dada por:

$$V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

em que  $f_{ctd}$  representa a resistência de cálculo à tração do concreto. Essa parcela está associada a mecanismos como o engrenamento dos agregados ao longo das fissuras e a transferência de tensões residuais no concreto fissurado.

Já a contribuição da armadura transversal é expressa por:

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\sin \theta + \cos \theta) \quad (3)$$

onde  $A_{sw}$  é a área da armadura transversal por espaçamento  $s$ ,  $f_{ywd}$  é a resistência de cálculo do aço dos estribos, e  $\theta$  representa o ângulo de inclinação das bielas comprimidas. O termo  $(\sin \theta + \cos \theta)$  reflete a orientação das tensões internas e a eficiência dos estribos na interceptação das fissuras inclinadas.

A resistência total ao cisalhamento, nesse modelo, é dada por:

$$V_{Rd} = V_{c0} + V_{sw} \quad (4)$$

desde que não ultrapasse o limite imposto por  $V_{Rd2}$ , garantindo que não ocorra esmagamento das bielas comprimidas. Essa abordagem evidencia a preocupação da norma brasileira em considerar tanto a contribuição dos diferentes materiais quanto os possíveis modos de ruptura.

### 3.2 EUROCODE 2/2004

O Eurocode 2 (CEN, 2004), por sua vez, adota uma formulação baseada em conceitos da teoria do campo de compressão, incorporando de forma mais explícita a interação entre fissuração e deformações. A resistência ao cisalhamento associada ao concreto é expressa por:

$$V_{Rd,c} = \frac{\alpha \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (5)$$

em que  $\alpha$  é um coeficiente que depende das condições de carregamento,  $z$  é o braço de alavanca interno (aproximadamente  $0,9d$ ), e  $v_1$  é um fator redutor da resistência do concreto, que considera a presença de fissuras e o estado de deformação. A presença dos termos  $\cot \theta$  e  $\tan \theta$  evidencia a influência direta da inclinação das bielas no mecanismo resistente.

A contribuição da armadura transversal é dada por:

$$V_{Rd,s} = \left( \frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (6)$$

Nessa expressão, observa-se que a resistência é diretamente proporcional à quantidade de armadura transversal e à resistência do aço, além de depender da geometria interna do sistema resistente. O termo  $\cot \theta$  indica que ângulos menores das bielas aumentam a contribuição da armadura, refletindo a interação entre os mecanismos de compressão e tração.

Uma característica importante do Eurocode 2 é que ele não simplesmente soma as contribuições do concreto e da armadura, mas impõe verificações independentes e considera o menor valor entre os mecanismos possíveis, o que resulta em uma abordagem mais conservadora em muitos casos.

### 3.3 ACI 318/2019

O ACI 318 (ACI COMMITTEE 318, 2019) adota uma abordagem mais simplificada, baseada na superposição direta das contribuições do concreto e da armadura transversal. A parcela resistente do concreto é dada por:

$$V_c = \left[ 0,17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (7)$$

em que  $f'_c$  é a resistência à compressão do concreto,  $\lambda$  é um fator que considera o tipo de concreto (normal ou leve),  $N_u$  é o esforço normal atuante e  $A_g$  é a área bruta da seção. Essa equação reflete uma abordagem empírica, calibrada com base em resultados experimentais, na qual a resistência ao cisalhamento está fortemente associada à resistência do concreto.

A contribuição da armadura transversal é expressa por:

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (8)$$

onde  $A_v$  é a área dos estribos,  $f_y$  é a tensão de escoamento do aço e  $s$  é o espaçamento entre os estribos. A resistência total ao cisalhamento é então obtida por:

$$V_n = V_c + V_s \quad (9)$$

Essa formulação, embora prática e amplamente utilizada, não considera explicitamente a influência da inclinação das bielas comprimidas nem a relação  $a/d$ , o que pode limitar sua aplicabilidade em vigas profundas (RANGEL e colab., 2020). As diferenças entre essas formulações normativas evidenciam distintas interpretações dos mecanismos resistentes ao cisalhamento. Enquanto a ABNT NBR 6118 e o Eurocode 2 incorporam conceitos mais avançados relacionados à teoria de campos de compressão, o ACI 318 prioriza a simplicidade e a aplicabilidade prática. Essas diferenças podem resultar em variações significativas nas estimativas de resistência, especialmente em elementos fora do domínio convencional (ALBUQUERQUE e colab., 2019).

Nesse cenário, a modelagem numérica baseada no método dos elementos finitos tem se consolidado como uma ferramenta fundamental para a análise do comportamento estrutural. Por meio dessa abordagem, é possível representar de forma mais realista os mecanismos de fissuração, plastificação e redistribuição de tensões, superando as limitações dos modelos simplificados. A utilização de modelos constitutivos avançados permite simular o comportamento não linear do concreto e do aço, possibilitando análises mais precisas da capacidade resistente.

Além disso, análises paramétricas realizadas por meio de modelos numéricos permitem investigar a influência de variáveis como resistência do concreto, taxa de armadura longitudinal e diâmetro dos estribos. Esses estudos são essenciais para compreender os fatores que governam a resistência ao cisalhamento e para validar as formulações normativas existentes.

Dessa forma, a integração entre abordagens normativas, experimentais e numéricas constitui um caminho essencial para o avanço do conhecimento na área. A comparação entre os resultados obtidos por diferentes metodologias permite identificar limitações, avaliar a precisão dos modelos e propor melhorias nas normas de projeto, contribuindo para um dimensionamento estrutural mais seguro e confiável.

#### 4 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE REFERÊNCIA

A calibração do modelo numérico desenvolvido neste trabalho foi realizada com base em resultados experimentais provenientes de ensaios conduzidos pelo Grupo de Construção da Universidade da Coruña (“PREDICTION OF SHEAR FAILURE LOAD OF A 2 m-DEEP BEAM – Grupo de Construcción – gCONS (UDC)”, [S.d.]) no início de 2020, no âmbito de um desafio internacional voltado à previsão da carga de ruptura por esforço cortante em vigas de grande altura. A escolha desse modelo experimental justifica-se pela sua relevância científica, pela qualidade dos dados

disponibilizados e, principalmente, por representar um caso de viga profunda, no qual os efeitos de escala e os mecanismos não lineares associados ao cisalhamento se manifestam de forma significativa.

A viga apresenta 2,00 m de altura, 12,00 m de comprimento e 0,24 m de largura, caracterizando-se como um elemento esbelto no comprimento, porém profundo em relação à sua altura, o que implica uma baixa relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil da seção ( $a/d$ ). Essa configuração favorece a formação de trajetórias comprimidas diretas entre os pontos de aplicação de carga e os apoios, sendo um cenário ideal para análise de mecanismos resistentes ao cisalhamento distintos daqueles observados em vigas convencionais.

O modelo experimental foi construído em ambiente controlado de pré-fabricação, com rigoroso controle tecnológico dos materiais e dos processos executivos, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos. As propriedades mecânicas do concreto utilizado são apresentadas na Tabela 1, incluindo ainda a determinação da resistência à tração indireta e módulo de elasticidade, parâmetros fundamentais para a correta representação do comportamento do concreto em análises numéricas não lineares.

Tabela 1 – Propriedades do concreto utilizado. Fonte: Adaptado de GCONS (2020).

Idade (dias)	Resistência média a compressão (MPa)	Resistência média a tração indireta (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
28	48,92	4,17	31983
120	55,52	4,49	-

As armaduras empregadas no elemento foram devidamente caracterizadas quanto às suas propriedades mecânicas, incluindo tensão de escoamento, tensão de ruptura e deformação última, para diferentes diâmetros de barras. Esses dados são apresentados na Tabela 2, e são essenciais para a definição das leis constitutivas do aço no modelo numérico, permitindo representar adequadamente o comportamento elastoplástico do material sob carregamento crescente. O detalhamento da armadura foi concebido de forma a reproduzir condições típicas de vigas profundas com armadura transversal, possibilitando a avaliação da contribuição dos estribos no mecanismo resistente ao cisalhamento.

Tabela 2 – Propriedades das barras de aço utilizadas. Fonte: Adaptado de GCONS (2020)

Diâmetro nominal (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Tensão de escoamento $f_y$ (MPa)
8	50,26	575,72
16	201,06	550,26
20	314,16	543,84
32	804,25	546,08

O detalhamento da armadura foi concebido de forma a reproduzir condições típicas de vigas profundas com armadura transversal, possibilitando a avaliação da



Figura 2 – Padrão de fissuração observado no ensaio desenvolvido pelo Grupo de Construção da Universidade da Coruña.



Fonte: Adaptado de GCONS (2020).

Figura 3 – Padrão de fissuração observado no ensaio desenvolvido pelo Grupo de Construção da Universidade da Coruña.



Fonte: Adaptado de GCONS (2020).

A utilização desse modelo experimental como base para calibração do modelo numérico é fundamental para garantir a representatividade das simulações realizadas. A calibração consiste no ajuste dos parâmetros constitutivos dos materiais e das condições de modelagem de forma a reproduzir, com a maior fidelidade possível, o comportamento observado experimentalmente. Dessa forma, busca-se assegurar que o modelo numérico seja capaz de detectar não apenas a carga última de ruptura, mas também os mecanismos internos de transferência de esforços, a evolução da fissuração e a redistribuição de tensões ao longo do carregamento.

Além disso, a escolha de um modelo experimental de grande escala contribui para a análise dos efeitos de escala (*size effect*), fenômeno amplamente discutido na literatura e que exerce influência significativa na resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado. Em vigas de grandes dimensões, observa-se uma tendência de redução da resistência relativa, associada à maior probabilidade de desenvolvimento de fissuras críticas e à menor eficiência dos mecanismos de transferência de tensões.

Dessa forma, o modelo experimental do gCons-UDC constitui uma base robusta para a validação e calibração de modelos numéricos aplicados à análise do comportamento ao cisalhamento em vigas de grande altura. A utilização desses dados permite estabelecer uma correlação direta entre os resultados experimentais e numéricos, contribuindo para a avaliação da precisão das simulações e para o aprimoramento das metodologias de análise adotadas neste trabalho.

## **5 DESCRIÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA**

A modelagem numérica desenvolvida neste trabalho foi realizada com o auxílio do software ABAQUS, empregando o método dos elementos finitos com o objetivo de reproduzir, de forma consistente, o comportamento estrutural de vigas de grande altura submetidas à força cortante. A estratégia adotada baseou-se na calibração prévia do modelo a partir do ensaio experimental de referência, garantindo a representatividade dos mecanismos físicos envolvidos, tais como a formação e propagação de fissuras inclinadas, redistribuição de tensões e atuação conjunta entre concreto e armadura.

A discretização do modelo considerou uma abordagem bidimensional, adequada à representação do comportamento global da viga, permitindo reduzir o custo computacional sem comprometer a precisão dos resultados. Foram utilizados elementos de casca para o concreto e elementos de treliça para as armaduras, com a adoção da técnica de embutimento (*embedded*), de modo a garantir aderência perfeita entre os materiais, assumindo que não há deslizamento relativo entre o aço e o concreto durante o carregamento.

Além disso, o modelo incorporou não linearidades físicas relevantes, tanto do ponto de vista do comportamento do concreto quanto do aço, permitindo a simulação do processo de fissuração, plastificação e degradação progressiva da rigidez estrutural. A definição criteriosa da malha, das condições de contorno e dos modelos constitutivos foi fundamental para assegurar a estabilidade numérica e a confiabilidade dos resultados obtidos.

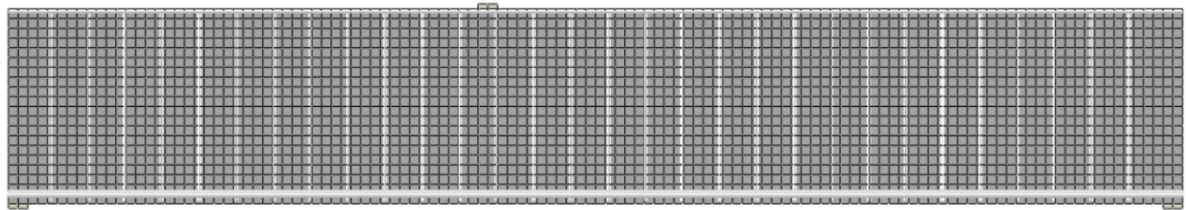
### **5.1 DISCRETIZAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS**

A discretização do domínio estrutural foi realizada por meio de uma malha bidimensional composta por elementos finitos de casca do tipo S4R, caracterizados por quatro nós e integração reduzida. Cada nó possui seis graus de liberdade, sendo

três associados às translações e três às rotações, o que possibilita a adequada representação dos campos de deslocamentos e deformações no elemento estrutural.

A escolha dos elementos S4R para o concreto e placas de apoio, justifica-se pela sua eficiência computacional aliada à capacidade de representar com boa precisão superfícies planas ou levemente curvas, sendo amplamente utilizados em análises não lineares de estruturas de concreto armado. A malha foi gerada com dimensões médias dos elementos da ordem de 0,1 m, mantendo uniformidade ao longo de toda a viga, o que contribui para a estabilidade da solução numérica e reduz a influência de efeitos locais. A malha de elementos finitos utilizada no modelo numérico é apresentada na Figura 4 a seguir:

Figura 4 – Discretização da malha em elementos finitos.



Fonte: Autor (2026).

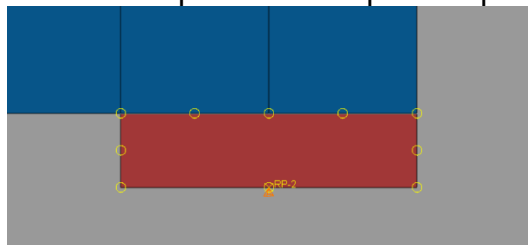
As armaduras longitudinais e transversais foram representadas por elementos de treliça bidimensionais do tipo T2D2, os quais possuem dois nós e comportamento uniaxial. Esses elementos, como já dito anteriormente, foram inseridos na malha do concreto por meio da técnica de embutimento, assumindo compatibilidade total de deformações entre aço e concreto, ou seja, ausência de deslizamento relativo entre os materiais.

## 5.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno adotadas no modelo numérico foram definidas de forma a reproduzir fielmente o esquema estrutural do ensaio experimental utilizado como referência. A viga foi considerada biapoiada, com restrições distintas em cada extremidade.

No apoio esquerdo, apresentado na Figura 5, foram impedidos os deslocamentos nas direções horizontal e vertical, caracterizando um apoio fixo em termos translacionais.

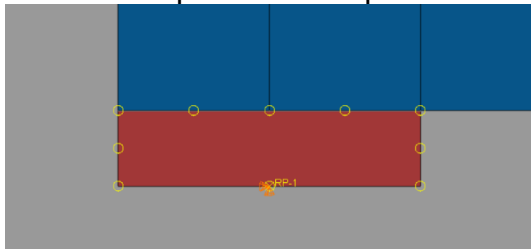
Figura 5 – Condições de contorno aplicadas no apoio esquerdo.



Fonte: Autor (2026).

Já no apoio direito, apresentado na Figura 6 apenas o deslocamento vertical foi restringido, permitindo deslocamento horizontal e garantindo o comportamento típico de um apoio móvel. Em ambos os casos, as rotações foram mantidas livres, possibilitando a simulação de ligações do tipo rotuladas.

Figura 6 – Condições de contorno aplicadas no apoio direito.



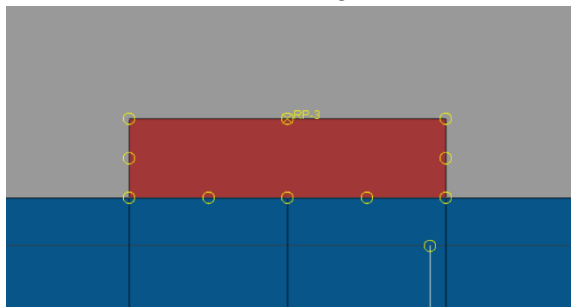
Fonte: Autor (2026).

O carregamento foi aplicado por meio de controle de deslocamento em um ponto representativo da região de aplicação da carga, com deslocamento máximo de 40 mm, permitindo a obtenção da curva força versus deslocamento até o colapso estrutural. Essa estratégia é particularmente adequada para análises não lineares, uma vez que possibilita representar o comportamento pós-pico e a perda de rigidez associada à fissuração progressiva do concreto.

Adicionalmente à força concentrada aplicada, foi considerado o efeito do peso próprio da estrutura, incorporado por meio da aplicação da aceleração da gravidade e da densidade do concreto armado de 2500 kg/m<sup>3</sup>. Essa consideração contribui para uma representação mais realista do estado de tensões atuante na viga.

No que se refere às interações nas regiões de contato entre a viga e as placas de apoio e carregamento, apresentado na Figura 7, foram representadas por modelos de contato com comportamento normal rígido e atrito tangencial, conforme formulações clássicas de contato estrutural.

Figura 7 – Partes selecionadas na definição da interação de corpo rígido entre a placa de carregamento e o ponto de referência RP-3.



Fonte: Autor (2026).

### 5.3 MODELO CONSTITUTIVO PARA OS MATERIAIS

O comportamento mecânico dos materiais foi representado por modelos constitutivos capazes de reproduzir as principais não linearidades envolvidas na resposta estrutural das vigas.

Para o concreto, foi adotado o modelo de Plasticidade com Dano (Concrete Damaged Plasticity – CDP), que permite simular tanto o comportamento em compressão quanto em tração, incluindo os efeitos de degradação da rigidez associados à fissuração e ao esmagamento.

O módulo de elasticidade do concreto foi estimado com base nas expressões do fib Model Code, sendo dado por:

$$E_c = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (10)$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 21500 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3} \quad (11)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{cm}}{88} \quad (12)$$

onde  $f_{cm}$  representa a resistência média à compressão do concreto,  $E_{ci}$  é o módulo de elasticidade reduzido do concreto,  $\alpha_i$  é o coeficiente o qual considera o agregado graúdo utilizado, podendo ser igual a 1 em agregados graníticos.

O comportamento do concreto sob compressão foi descrito pela relação tensão–deformação proposta por Carreira e Chu (CARREIRA e CHU, 1985), expressa por:

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = f_{cm} \cdot \left( \frac{\beta \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})}{\beta - (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})^\beta} \right) \quad (13)$$

sendo o parâmetro  $\beta$  definido por:

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_{cm}}{\varepsilon_{c1} \cdot E_c}} \quad (14)$$

e o parâmetro  $\varepsilon_{c1}$  por:

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 \cdot \frac{f_{cm}^{0,31}}{1000} \quad (15)$$

Para o comportamento em tração, foi adotada a relação tensão–abertura de fissura proposta por Hordijk (HORDIJK, 1992), dada por:

$$\sigma_t(w) = f_{ct} \cdot \left\{ \left[ 1 + \left( c_1 \cdot \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] e^{-c_2 \cdot \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \right\} \quad (16)$$

com:

$$w_c = 5,14 \cdot \frac{G_f}{f_{ctm}} \quad (17)$$

Sendo  $c_1 = 3$ ,  $c_2 = 6,93$ .

Sendo  $G_f$  é a energia de fratura do concreto, estimada conforme os critérios do *fib* Model Code 2010 (FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB), 2010), dado a seguir:

$$G_f = 73 \cdot f_{cm}^{0,18} \quad (18)$$

Cabe destacar que a escolha do tamanho característico da malha exerce influência direta nos resultados obtidos, especialmente em análises envolvendo fissuração. Portanto as curvas foram convertidas para o formato tensão–deformação

inelástica. Essa conversão foi feita dividindo-se a abertura de fissura pelo comprimento característico do elemento finito ( $l_{eq}$ ), como sugerido por Genikomsou e Polak (GENIKOMSOU e POLAK, 2015), por meio da relação:

$$\varepsilon_t = \frac{f_{ct}}{E_c} + \frac{w}{l_{eq}} \quad (19)$$

em que  $\varepsilon_t$  representa a deformação de tração equivalente,  $f_{ct}$  a resistência à tração do concreto,  $E_c$  o módulo de elasticidade e  $l_{eq}$  o comprimento característico do elemento finito.

A evolução do dano foi considerada por meio de variáveis escalares associadas aos regimes de tração e compressão, definidas por:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_{cm}} \quad (20)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{ct}} \quad (21)$$

Os parâmetros do modelo CDP foram calibrados de modo a reproduzir o comportamento experimental, incluindo ângulo de dilatância de  $\psi = 33,06^\circ$ , excentricidade  $e = 0,1$ , razão de resistências biaxial/uniaxial de  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1,16$ , fator de forma  $K_c = 0,66$  e coeficiente de viscosidade  $\mu = 1E-05$ .

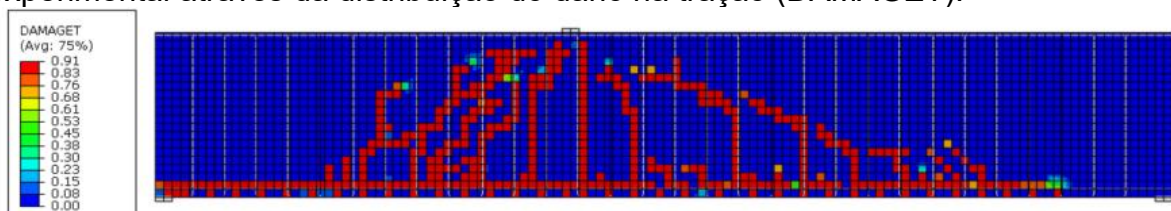
Para o aço, foi adotado um modelo constitutivo elasto-plástico perfeito baseado no critério de escoamento de von Mises, com comportamento bilinear e ausência de encruamento. Esse modelo considera resposta linear até o escoamento, seguido por um regime plástico com tensão constante, sendo adequado para representar o comportamento das armaduras em análises estruturais não lineares

#### 5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A validação da estratégia de modelagem numérica constitui uma etapa fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos nas análises subsequentes. Nesse contexto, o modelo desenvolvido foi calibrado a partir da comparação com o resultado experimental do ensaio conduzido pelo Grupo de Construção da Universidade da Coruña (gCons-UDC), previamente descrito neste trabalho.

O processo de validação baseou-se na análise conjunta de diferentes aspectos do comportamento estrutural da viga, incluindo o padrão de fissuração, a evolução da resposta força versus deslocamento e a capacidade resistente última. Essa abordagem integrada permite avaliar não apenas a precisão global do modelo, mas também sua capacidade de reproduzir os mecanismos físicos envolvidos na ruptura por cisalhamento.

Figura 8 – Características da fissuração do modelo computacional do ensaio experimental através da distribuição do dano na tração (DAMAGET).

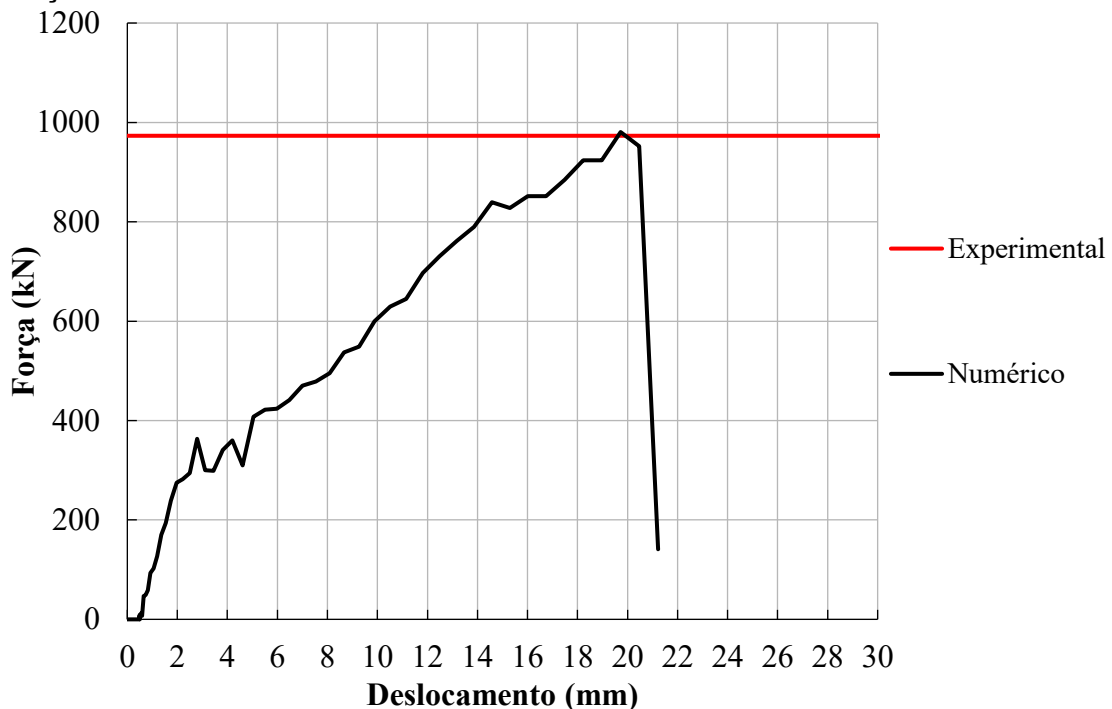


Fonte: Autor (2026).

No que se refere ao padrão de fissuração apresentado na Figura 8, observou-se que o modelo numérico foi capaz de representar de forma consistente a formação e propagação de fissuras inclinadas típicas de falhas por esforço cortante. As fissuras iniciaram-se na região de maior sollicitação cortante e evoluíram progressivamente com o aumento do carregamento, apresentando orientação e distribuição compatíveis com aquelas observadas experimentalmente. Em estágios mais avançados de carregamento, verificou-se a intensificação das fissuras principais, culminando na formação de um mecanismo de ruptura associado à degradação localizada do concreto na região de aplicação da carga.

O gráfico carga–deslocamento presente na Figura 9 evidenciou estágios de carregamento equivalentes no ponto crítico correspondente ao pico de resistência e ao colapso estrutural. Essa correspondência reforça a capacidade do modelo numérico em reproduzir com precisão as diferentes fases de resposta da viga sob carregamento.

Figura 9 – Comparação da curva força × deslocamento obtidas no experimento e na simulação numérica.



Fonte: Autor (2026).

De maneira quantitativa, a razão entre a força máxima experimental e a força máxima numérica foi de  $F_{exp} / F_{num} = 0,992$ , o que representa um erro de apenas 0,8%, indicando erro reduzido e evidenciando a precisão da modelagem. O resultado numérico apresenta uma força máxima resistida de 980,61 kN e um deslocamento máximo de 19,72 mm no ponto de aplicação da força. Dessa forma, os parâmetros adotados, tanto geométricos quanto constitutivos, foram adequadamente calibrados, permitindo a reprodução fiel do comportamento estrutural da viga.

Do ponto de vista qualitativo, o modelo também foi capaz de representar a sequência de eventos que conduzem à ruptura, incluindo a redistribuição de tensões internas, o desenvolvimento das bielas comprimidas e a progressiva perda de rigidez associada à fissuração do concreto. Tais aspectos são particularmente relevantes em

vigas de grande altura, nas quais os mecanismos resistentes diferem significativamente daqueles observados em vigas esbeltas.

Dessa forma, os resultados obtidos na etapa calibração indicam que a estratégia de modelagem numérica adotada é adequada para a análise do comportamento de vigas de grande altura submetidas à força cortante. A boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais confere confiabilidade ao modelo, permitindo sua utilização em análises paramétricas com diferentes configurações de resistência do concreto, taxas de armadura longitudinal e diâmetros de estribos.

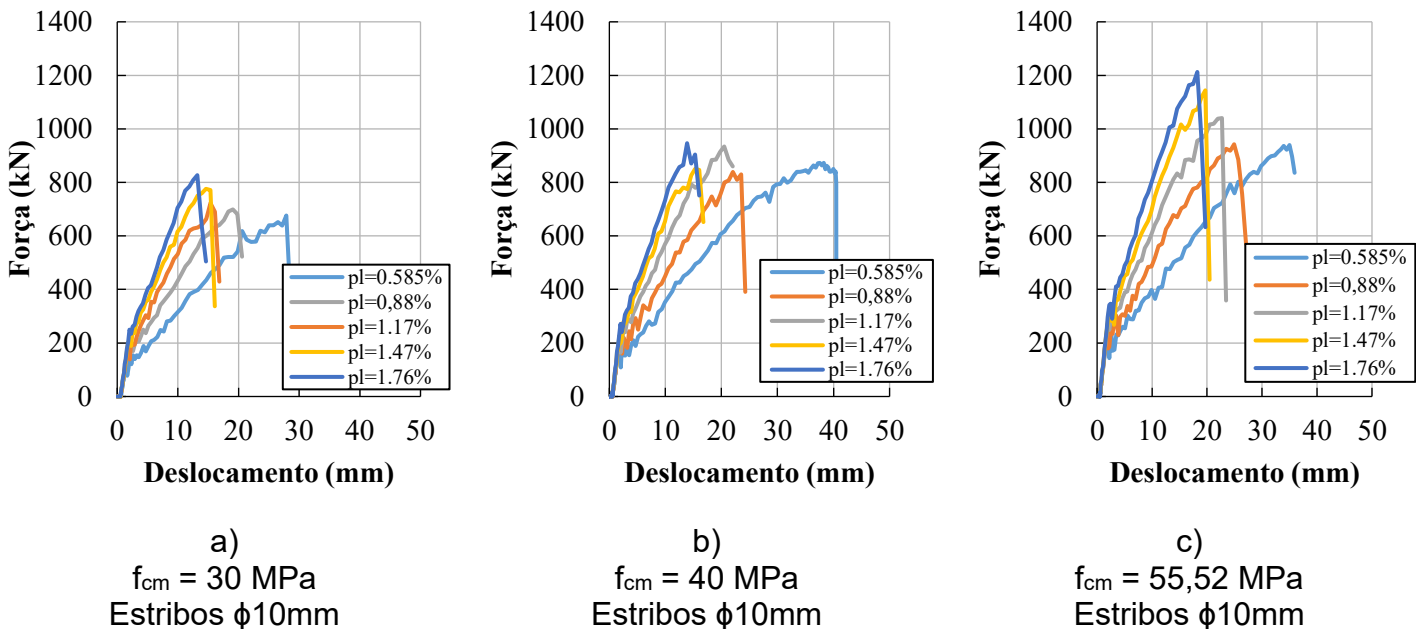
Por fim, ressalta-se que a consistência observada na validação reforça o potencial da modelagem numérica como ferramenta complementar ao dimensionamento tradicional, especialmente em situações que envolvem geometrias não convencionais e condições fora do domínio de aplicação das expressões normativas.

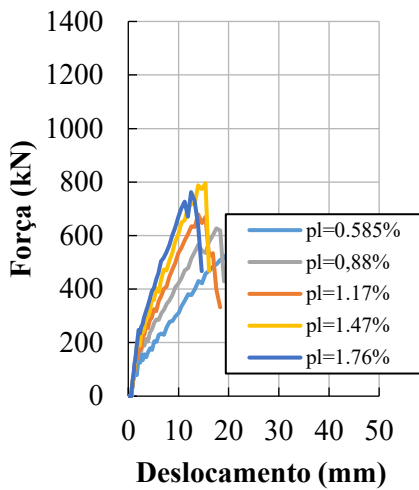
## 6 RESULTADOS

### 6.1 CURVAS FORÇA – DESLOCAMENTO

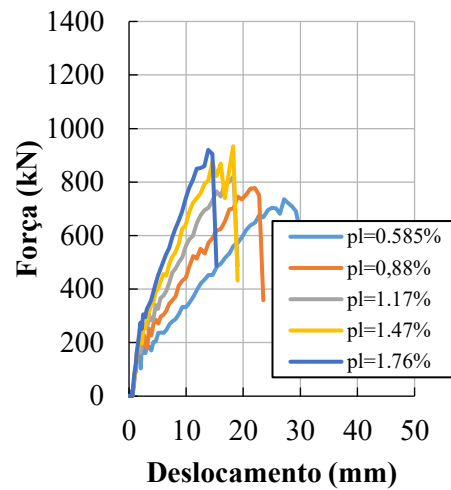
A Figura 10 apresenta as curvas força × deslocamento obtidas para os 30 modelos analisados, considerando diferentes, resistências do concreto ( $f_{cm}$ ) em MPa, taxas de armadura longitudinal ( $\rho_l$ ) em porcentagem e diâmetro  $\phi$  dos estribos em mm. Analisando as curvas, é possível constatar que todas as curvas apresentam um trecho inicial aproximadamente linear, com o surgimento de fissuras inclinadas mudando o seu comportamento em sequência, até atingir a força máxima, onde ocorre a redução da capacidade resistente das vigas.

Figura 10 – Curvas força × deslocamento de acordo com a resistência à compressão do concreto e diâmetro adotado para os estribos.

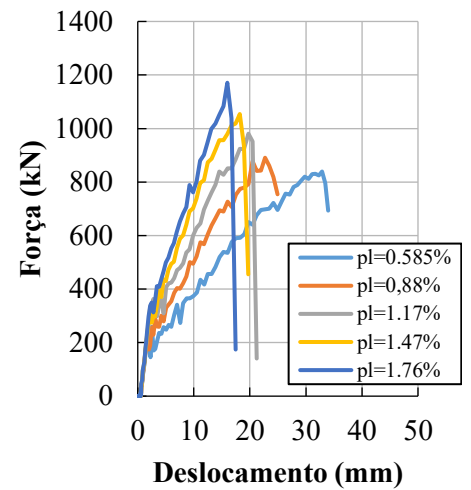




d)  
 $f_{cm} = 30$  MPa  
 Estribos  $\phi 8$ mm



e)  
 $f_{cm} = 40$  MPa  
 Estribos  $\phi 8$ mm

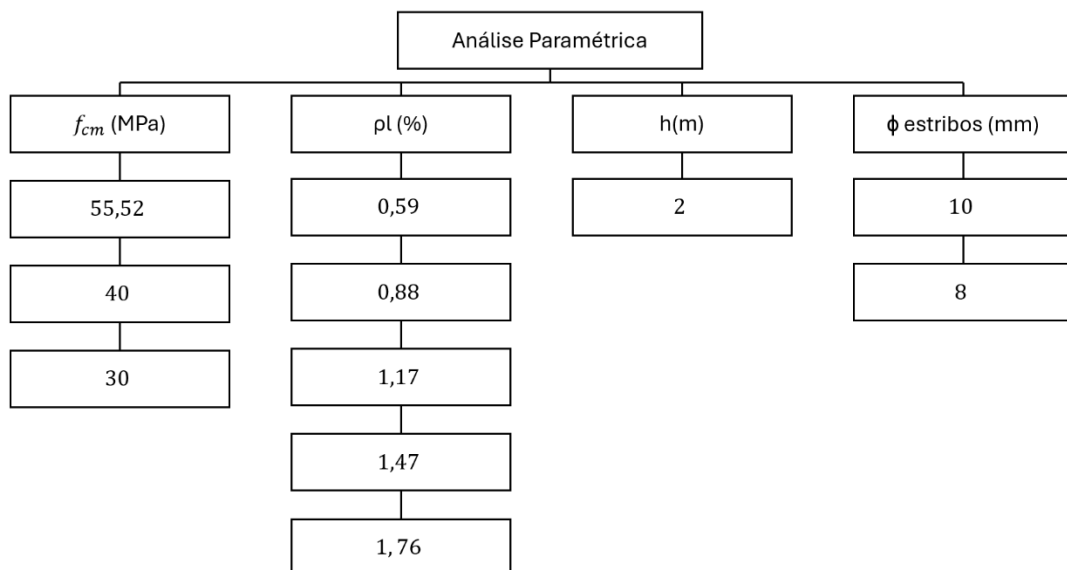


f)  
 $f_{cm} = 55,52$  MPa  
 Estribos  $\phi 8$ mm

## 6.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA

A análise paramétrica conduzida neste trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes variáveis de projeto na capacidade resistente à força cortante de vigas de grande altura, bem como verificar o nível de concordância entre os resultados obtidos por modelagem numérica e aqueles previstos pelas expressões normativas. Para isso, foram considerados diferentes parâmetros, os quais são apresentados na Figura 11 .

Figura 11 – Parâmetros considerados na análise paramétrica das vigas estudadas.



Fonte: Autor (2026).

Para a análise paramétrica foram considerados fatores relevantes, tais como, os coeficientes de segurança para aço  $\gamma_y$  e para o concreto  $\gamma_c$  iguais a 1, propriedades dos materiais foram tomadas com seus valores médios de resistência ( $f_{cm}$  e  $f_{ym}$ ) e a capacidade resistente à força cortante foi considerada a reação do apoio esquerdo.

Para os modelos com estribos de 10 mm, a Tabela 3 apresenta de forma sistematizada os resultados obtidos por meio das análises numéricas, bem como as respectivas previsões de resistência ao cisalhamento segundo as formulações normativas da NBR 6118, do Eurocode 2 e do ACI 318:19. Há diferentes combinações de resistência à compressão do concreto ( $f_{cm}$ ) e taxas de armadura longitudinal ( $\rho_l$ ), permitindo uma avaliação abrangente da influência desses parâmetros na resposta estrutural das vigas. Além dos valores absolutos de força resistente, a tabela também apresenta as relações entre os resultados numéricos e normativos, possibilitando uma análise direta do nível de concordância entre as abordagens.

Tabela 3 – Comparação entre previsões de resistência à força cortante pelos modelos numéricos e pelas expressões normativas para estribos de 10 mm.

Modelo	$f_{cm}$ (MPa)	$\rho_l$ (%)	$V_{R,MEF}$ (kN)	$V_{R,calc}$	$V_{R,calc}$	$V_{R,calc}$	$\frac{V_{R,MEF}}{V_{R,calc}}$	$\frac{V_{R,MEF}}{V_{R,calc}}$	$\frac{V_{R,MEF}}{V_{R,calc}}$
				(kN)	(kN)	(kN)			
				NBR	EC	ACI	NBR	EC	ACI
FC30-PL50- $\phi$ 10mm	30	0.59	471.94	961.25	1016.99	876.37	0.49	0.46	0.54
FC30-PL75- $\phi$ 10mm		0.88	485.45	961.25	1016.99	876.37	0.51	0.48	0.55
FC30-PL100- $\phi$ 10mm		1.17	499.36	961.25	1016.99	876.37	0.52	0.49	0.57
FC30-PL125- $\phi$ 10mm		1.47	531.16	961.25	1016.99	876.37	0.55	0.52	0.61
FC30-PL150- $\phi$ 10mm		1.76	561.34	961.25	1016.99	876.37	0.58	0.55	0.64
FC40-PL50- $\phi$ 10mm	40	0.59	588.47	1078.47	1016.99	942.02	0.55	0.58	0.62
FC40-PL75- $\phi$ 10mm		0.88	568.51	1078.47	1016.99	942.02	0.53	0.56	0.60
FC40-PL100- $\phi$ 10mm		1.17	624.96	1078.47	1016.99	942.02	0.58	0.61	0.66
FC40-PL125- $\phi$ 10mm		1.47	575.27	1078.47	1016.99	942.02	0.53	0.57	0.61
FC40-PL150- $\phi$ 10mm		1.76	632.25	1078.47	1016.99	942.02	0.59	0.62	0.67
FC55-PL50- $\phi$ 10mm	55.52	0.59	628.19	1242.57	1016.99	1029.32	0.51	0.62	0.61
FC55-PL75- $\phi$ 10mm		0.88	629.85	1242.57	1016.99	1029.32	0.51	0.62	0.61
FC55-PL100- $\phi$ 10mm		1.17	687.93	1242.57	1016.99	1029.32	0.55	0.68	0.67
FC55-PL125- $\phi$ 10mm		1.47	749.41	1242.57	1016.99	1029.32	0.60	0.74	0.73
FC55-PL150- $\phi$ 10mm		1.76	790.11	1242.57	1016.99	1029.32	0.64	0.78	0.77
Média							0.55	0.59	0.63
COV (%)							7.64%	15.20%	9.76%

Fonte: Autor (2026).

De maneira análoga, para os modelos com estribos de 8 mm, a Tabela 4 reúne os resultados das análises numéricas e suas correspondentes estimativas normativas, considerando as mesmas variações de resistência do concreto e taxa de armadura longitudinal adotadas na análise paramétrica.

Tabela 4 – Comparação entre previsões de resistência à força cortante pelos modelos numéricos e pelas expressões normativas para estribos de 8 mm.

Modelo	$f_{cm}$ (MPa)	$\rho_l$ (%)	$V_{R,MEF}$ (kN)	$V_{R,calc}$	$V_{R,calc}$	$V_{R,calc}$	$\frac{V_{R,MEF}}{V_{R,calc}}$	$\frac{V_{R,MEF}}{V_{R,calc}}$	$\frac{V_{R,MEF}}{V_{R,calc}}$
				(kN) NBR	(kN) EC	(kN) ACI	NBR	EC	ACI
FC30 - PL50_φ8mm	30	0.59%	445.69	814.81	650.88	713.66	0.55	0.68	0.62
FC30 - PL75_φ8mm		0.88%	442.58	814.81	650.88	713.66	0.54	0.68	0.62
FC30 - PL100_φ8mm		1.17%	473.84	814.81	650.88	713.66	0.58	0.73	0.66
FC30 - PL125_φ8mm		1.47%	542.61	814.81	650.88	713.66	0.67	0.83	0.76
FC30 - PL150_φ8mm		1.76%	522.96	814.81	650.88	713.66	0.64	0.80	0.73
FC40 - PL50_φ8mm	40	0.59%	507.44	932.04	650.88	779.32	0.54	0.78	0.65
FC40 - PL75_φ8mm		0.88%	531.95	932.04	650.88	779.32	0.57	0.82	0.68
FC40 - PL100_φ8mm		1.17%	558.03	932.04	650.88	779.32	0.60	0.86	0.72
FC40 - PL125_φ8mm		1.47%	624.70	932.04	650.88	779.32	0.67	0.96	0.80
FC40 - PL150_φ8mm		1.76%	616.63	932.04	650.88	779.32	0.66	0.95	0.79
FC55 - PL50_φ8mm	55.52	0.59%	568.76	1096.14	650.88	866.61	0.52	0.87	0.66
FC55 - PL75_φ8mm		0.88%	599.28	1096.14	650.88	866.61	0.55	0.92	0.69
FC55 - PL100_φ8mm		1.17%	652.52	1096.14	650.88	866.61	0.60	1.00	0.75
FC55 - PL125_φ8mm		1.47%	696.11	1096.14	650.88	866.61	0.64	1.07	0.80
FC55 - PL150_φ8mm		1.76%	765.5	1096.14	650.88	866.61	0.70	1.18	0.88
Média							0.60	0.88	0.72
COV (%)							9.48%	16.00%	10.53%

Fonte: Autor (2026).

De forma geral, os resultados evidenciam que as resistências obtidas por meio das modelagens numéricas apresentaram valores sistematicamente inferiores às previsões normativas, independentemente das variáveis analisadas. Esse comportamento confirma a tendência já observada na literatura e no estudo preliminar desenvolvido no artigo, indicando que as formulações normativas podem superestimar a capacidade resistente de vigas de grande altura, sobretudo em condições que extrapolam o domínio tradicional de aplicação dessas expressões.

Ao se analisar a influência do diâmetro dos estribos, observa-se que o aumento de 8 mm para 10 mm resultou em elevação da capacidade resistente obtida

numericamente, o que era esperado do ponto de vista físico, uma vez que o aumento da área de armadura transversal contribui diretamente para o mecanismo resistente ao cisalhamento. No entanto, ao se considerar as relações entre os valores numéricos e normativos, verifica-se que essa variação não promoveu alterações significativas na tendência geral dos resultados. Para os modelos com estribos de 8 mm, as razões médias entre os valores numéricos e normativos foram da ordem de 0,60 para a NBR 6118, 0,88 para o Eurocode 2 e 0,72 para o ACI 318. Já para os modelos com estribos de 10 mm, essas razões passaram a aproximadamente 0,55, 0,59 e 0,63, respectivamente.

Adicionalmente, a análise do coeficiente de variação (COV) das relações entre os resultados numéricos e normativos reforça essa tendência de comportamento. Para os modelos com estribos de 8 mm, foram obtidos valores de COV iguais a 9,48% para a NBR 6118, 16,00% para o Eurocode 2 e 10,53% para o ACI 318, enquanto para os estribos de 10 mm os valores correspondentes foram de 7,64%, 15,20% e 9,76%, respectivamente. Observa-se que, em ambas as configurações, a dispersão dos resultados se mantém em níveis semelhantes, com maior variabilidade associada ao Eurocode 2 e comportamento mais uniforme para a NBR 6118 e o ACI 318. A proximidade entre os valores obtidos para os dois diâmetros indica que a alteração da armadura transversal não exerce influência significativa na variabilidade dos resultados, corroborando a constância da relação entre as respostas numéricas e normativas ao longo das diferentes combinações analisadas.

Esses resultados indicam que, embora o aumento do diâmetro dos estribos eleve a resistência absoluta da viga, sua influência na discrepância entre os modelos numéricos e normativos não é significativa. Em outras palavras, o ganho de resistência proporcionado pelo aumento da armadura transversal é detectado de forma semelhante tanto pelo modelo numérico quanto pelas expressões normativas, não alterando substancialmente o nível de conservadorismo ou insegurança associado a cada abordagem.

No que diz respeito à resistência à compressão do concreto, observa-se que o aumento de  $f_{cm}$  resulta em elevação da capacidade resistente numérica, o que está em consonância com o comportamento esperado do material. Entretanto, a análise das razões entre valores numéricos e normativos revela que a discrepância tende a se acentuar para concretos de menor resistência. Isso sugere que as formulações normativas não capturam de forma adequada os efeitos não lineares associados ao comportamento do concreto de baixa resistência sob solicitações de cisalhamento, especialmente em vigas de grande altura, nas quais os mecanismos de transferência de esforços são mais complexos.

A influência da taxa de armadura longitudinal mostrou-se particularmente relevante nos resultados obtidos. Observa-se que o aumento da taxa de armadura promoveu um crescimento consistente da resistência ao cisalhamento obtida numericamente, evidenciando a contribuição indireta da armadura longitudinal no mecanismo resistente. Esse efeito está associado à maior capacidade de controle da abertura e propagação das fissuras inclinadas, bem como à melhoria na transferência de tensões ao longo da viga.

Por outro lado, as expressões normativas analisadas apresentam baixa sensibilidade a essa variação, resultando em valores constantes de resistência para diferentes taxas de armadura longitudinal. Essa limitação contribui para o aumento da discrepância entre os resultados numéricos e normativos à medida que a taxa de armadura cresce, evidenciando uma deficiência dos modelos teóricos em incorporar adequadamente esse parâmetro.

Além da influência na resistência última, o aumento da taxa de armadura longitudinal também se refletiu de forma significativa na rigidez global das vigas, fato que é perceptível ao analisar as curvas força versus deslocamento, indicando que o acréscimo da taxa de armadura resulta em um aumento da inclinação inicial dessas curvas, caracterizando maior rigidez estrutural. Esse comportamento pode ser atribuído à maior capacidade da armadura em restringir deformações e retardar o desenvolvimento das fissuras, proporcionando uma resposta estrutural mais rígida nos estágios iniciais de carregamento.

De maneira geral, os resultados obtidos indicam que as variações nos parâmetros analisados influenciam significativamente a resposta estrutural das vigas em termos absolutos, porém não alteram de forma substancial a tendência de discrepância entre os resultados numéricos e normativos. Essa constância sugere que as limitações das expressões normativas estão mais relacionadas à própria formulação dos modelos do que às variáveis específicas de projeto.

Diante desse cenário, evidencia-se a importância da utilização de modelos numéricos como ferramenta complementar no estudo de vigas de grande altura submetidas à força cortante. As modelagens em elementos finitos permitem uma representação mais fiel dos mecanismos físicos envolvidos, capturando efeitos que não são devidamente considerados nas equações normativas, como a influência da armadura longitudinal na rigidez e na resistência, a redistribuição de tensões e o comportamento não linear do concreto.

Assim, embora as normas técnicas continuem sendo fundamentais para o dimensionamento estrutural, os resultados deste estudo reforçam a necessidade de sua utilização com cautela em situações fora do domínio usual de aplicação, sendo recomendável o emprego de análises numéricas para complementar a avaliação da segurança e do desempenho estrutural.

## **7 CONCLUSÃO**

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o comportamento de vigas de grande altura submetidas à força cortante, por meio de modelagem numérica em elementos finitos, bem como comparar os resultados obtidos com as previsões fornecidas por diferentes modelos normativos. A partir da estratégia adotada, foi possível desenvolver um modelo numérico capaz de representar de forma consistente os principais mecanismos resistentes envolvidos, incluindo a formação e propagação de fissuras inclinadas, a redistribuição de tensões internas e a contribuição conjunta do concreto e das armaduras.

A etapa de validação demonstrou que o modelo desenvolvido apresentou boa concordância com os resultados experimentais de referência de calibração, tanto em termos da resposta global da estrutura quanto na representação dos padrões de fissuração. Esse resultado conferiu confiabilidade à modelagem adotada, permitindo sua utilização na análise paramétrica conduzida ao longo do trabalho.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que as resistências ao cisalhamento estimadas por meio da modelagem numérica foram, de maneira geral, inferiores às previstas pelas normas analisadas. Essa tendência foi observada de forma consistente para diferentes níveis de resistência do concreto, taxas de armadura longitudinal e diâmetros de estribos, indicando que os modelos normativos podem superestimar a capacidade resistente de vigas de grande altura.

No que se refere à influência dos parâmetros analisados, constatou-se que o aumento da resistência à compressão do concreto, da taxa de armadura longitudinal

e diâmetro dos estribos, resultou em elevação da capacidade resistente das vigas. No entanto, as expressões normativas mostraram-se pouco sensíveis a algumas dessas variações, particularmente no que diz respeito à taxa de armadura longitudinal, o que contribuiu para o aumento da discrepância entre os resultados numéricos e teóricos.

A variação do diâmetro dos estribos, por sua vez, demonstrou influência direta na resistência ao cisalhamento, conforme esperado do ponto de vista físico. Entretanto, essa alteração não foi suficiente para modificar de forma significativa a relação entre os resultados numéricos e normativos, indicando que as diferenças observadas estão mais associadas às limitações das formulações teóricas do que às variáveis específicas de projeto.

Adicionalmente, a análise das curvas força versus deslocamento evidenciou que o aumento da taxa de armadura longitudinal promove um incremento na rigidez global das vigas, refletido na maior inclinação dessas curvas. Esse comportamento, embora relevante do ponto de vista estrutural, não é explicitamente considerado nas formulações normativas de verificação ao cisalhamento, reforçando a necessidade de abordagens mais abrangentes para a avaliação desse tipo de elemento.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a modelagem numérica se apresenta como uma ferramenta eficaz e complementar às metodologias tradicionais de dimensionamento, especialmente no estudo de vigas de grande altura, nas quais os mecanismos resistentes são mais complexos e nem sempre adequadamente representados pelas equações normativas. A utilização de modelos em elementos finitos permite uma análise mais detalhada do comportamento estrutural, contribuindo para uma avaliação mais segura, econômica e eficiente dessas estruturas.

Por fim, ressalta-se que os resultados deste trabalho indicam a necessidade de aprimoramento das formulações normativas no que se refere à consideração de parâmetros como a taxa de armadura longitudinal e os efeitos associados ao comportamento não linear do concreto.

## REFERENCIAS

ABNT. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2023

ACI COMMITTEE 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary**. . Farmington Hills, MI: [s.n.], 2019

ALBUQUERQUE, A. C. e colab. **Thermo-mechanical analysis of mass concrete elements made of rubberized concrete**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, n. 3, p. 580–589, Jun 2019. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-41952019000300580&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952019000300580&tlng=en)>.

CARREIRA, D J e CHU, K H. **Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression**. ACI Journal, 1985.

CEN. **EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. . Brussels: [s.n.], 2004

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **fib Model Code for Concrete Structures 2010**. Berlin: Ernst & Sohn, 2010.

GENIKOMSOU, A S e POLAK, M A. **Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Slabs with Punching Shear Reinforcement**. Engineering Structures, v. 98, p. 38–48, 2015.

HORDIJK, D A. **Tensile and Tensile Fatigue Behaviour of Concrete; Experiments, Modelling and Analyses**. HERON, v. 37, n. 1, 1992.

**PREDICTION OF SHEAR FAILURE LOAD OF A 2 m-DEEP BEAM – Grupo de Construcción – gCONS (UDC)**. Disponível em: <<https://www.gcons.udc.es/contest-horvital/>>. Acesso em: 19 mar 2026.

RANGEL, C S e REGIS, R M L e SOUSA, L R. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto com diferentes modelos normativos**. Revista Estrutura, v. 25, n. 1, p. 45–56, 2020.