

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA MODELAGEM DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

M. F. PEREIRA¹, A. L. CHRISTOFORO², J. P. B. ALMEIDA³
Universidade Paulista¹, Universidade Federal de São Carlos^{2,3}
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8667-1718>³
boff.joaopaulo@gmail.com³

Submetido 03/08/2020 - Aceito 20/11/2020

DOI: 10.15628/holos.2021.10875

RESUMO

O avanço da tecnologia no campo da construção civil vem resultando em estruturas de concreto armado de diferentes soluções e cada vez mais esbeltas, requerendo análises mais refinadas das que os métodos analíticos previstos em normas técnicas. Essa pesquisa objetivou analisar a precisão de resultados obtidos por meio de aplicação do Método dos Elementos Finitos na simulação numérica de vigas de concreto armado. Investigou-se a influência da escolha de modelos constitutivos e ajustes de parâmetros nos resultados das simulações assim como avaliou-se a precisão de algumas equações analíticas normativas com relação à força última da viga eleita. Para

tanto, foi utilizado o programa comercial ATENA e as simulações foram validadas com base em resultados obtidos em ensaios de vigas de concreto armado à flexão. Foram testados modelos constitutivos disponíveis no programa e ajustes realizados de acordo com critérios previstos na literatura. Dos resultados das simulações numéricas, observou-se uma boa concordância com os valores experimentais e maior precisão quando comparado com os dimensionamentos das normas técnicas. Verificou-se também que a precisão da simulação depende diretamente da definição dos modelos e ajustes adotados na modelagem.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação numérica, concreto armado, elementos finitos, parâmetros de modelos constitutivos.

INFLUENCE OF PARAMETERS ON MODELING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

ABSTRACT

The advancement of technology in the field of civil construction has resulted in reinforced concrete structures of different solutions and increasingly slimmer, this requires more refined analyzes than the analytical methods provided for in technical standards. This research aimed to analyze the precision of results obtained by the application of the Finite Element Method in the numerical simulation of reinforced concrete beams. The influence of the choice of constitutive models and parameter adjustments on the results of the simulations was investigated, as well as the precision of some normative analytical equations in relation to the ultimate strength of the beam studied. For this purpose,

the commercial software ATENA was used and the simulations were validated based on results obtained in tests of bending reinforced concrete beams. The constitutive models available in the software were tested and adjustments were made according to criteria provided for in the literature. The results of the numerical simulations, there was a good agreement with the experimental values and greater precision when compared to the design from the technical standards. It was also found that the accuracy of the simulation depends directly on the definition of the models and adjustments adopted in the modeling.

KEYWORDS: Numerical simulation, reinforced concrete, finite element, constitutive model parameters.



1 INTRODUÇÃO

Os critérios de dimensionamento de estruturas de concreto armado são estabelecidos por normas técnicas que consideram em sua análise métodos analíticos e hipóteses básicas sobre o comportamento dos materiais e elementos estruturais. Como exemplo, pode-se citar a norma brasileira ABNT NBR 6118 (2014) e a americana ACI 318 (2019), que adotam aproximações da distribuição de tensões e deformações no comportamento do aço e concreto.

O rápido avanço da tecnologia e dos materiais vem resultando em estruturas de concreto de diferentes soluções (CERVENKA, 2012), sendo gradativamente executadas estruturas mais esbeltas e complexas, requerendo o uso de métodos mais refinados para a análise de seus comportamentos (STRAMANDINOLI e LA ROVERE, 2017).

A aplicação de simulação numérica baseada na análise não linear (ANL) e no método dos elementos finitos (MEF) vem se tornando uma importante ferramenta para os projetos de estruturas de concreto (CERVENKA, 2012), uma vez que este tipo de análise considera tanto a não linearidade física dos materiais como a não linearidade geométrica dos elementos (STRAMANDINOLI e LA ROVERE, 2017).

Segundo Kaklauska *et al.* (2011), a simulação numérica se apresenta como alternativa frente às limitações de geometria e tipos de carregamentos considerados nas normas de projetos. De acordo com Gribniak *et al.* (2013), embora os métodos normativos garantam a segurança dos projetos, eles não refletem o real comportamento de tensões e deformações dos elementos estruturais.

Simular numericamente o comportamento de elementos de concreto armado com base no MEF não é uma tarefa tão simples e requer aplicações de aproximações e otimizações, com o objetivo de obter resultados mais próximos do comportamento real do elemento analisado (BUTEAN e HEGHES, 2020). A eficiência de análises não lineares de elementos finitos é influenciada de forma significativa pelas escolhas realizadas durante a modelagem (BELLETTI *et al.*, 2014). A precisão dos resultados depende dos modelos constitutivos, parâmetros, condições de contorno, carregamentos e tamanhos dos elementos finitos considerados (SUCHARDA *et al.*, 2014; KAKLAUSKA *et al.*, 2011; SMARZEWSKI, 2016).

Sucharda *et al.* (2014) analisaram a aplicação do modelo de ruptura plástica de materiais na modelagem de vigas de concreto armado. Para tanto, utilizaram do software comercial ATENA. Para representar o comportamento do concreto, os autores adotaram o modelo de *Fracture-Plastic* com parâmetros obtidos pela literatura e recomendados pelo próprio programa. Também, utilizou-se o método de solução de equações não lineares de Newton-Rapshon. Segundo os autores, a simulação numérica apresentou resultados próximos aos obtidos experimentalmente, entretanto as variações entre as capacidades à flexão das vigas obtidas numericamente e experimentalmente são provenientes da definição de parâmetros dos modelos e aproximações.

Gribniak *et al.* (2013), também com o uso do programa ATENA, analisaram a precisão da flecha imediata de vigas de concreto armado estimada por meio de documentos normativos e



simulação numérica. Para representar o comportamento do concreto utilizaram o modelo *SBeta Material* disponível no programa, sendo realizadas duas simulações, considerando-se o efeito da retração do concreto em uma delas. Os resultados obtidos indicaram uma maior precisão em relação aos resultados experimentais quando considerada a simulação com o efeito de retração.

Torres (2018), ao simular vigas reforçadas com fibras de aço com o uso do programa ATENA, adotou diferentes modelos constitutivos para representação do concreto convencional e reforçado. O autor representou o comportamento do aço pelo modelo multilinear e adotou o método de Newton-Raphson para a solução das equações não lineares. As simulações apresentaram boa concordância com os resultados experimentais. Entretanto, houve necessidade de alterações de parâmetros do modelo do concreto para aproximar os comportamentos da simulação e do experimento.

Bohara *et al.* (2019) simularam pilares de concreto armado submetido à esforços laterais com diferentes modelos constitutivos de concreto e com o uso do software LS-DYNA, fornecendo apenas os parâmetros básicos para cada modelagem. Observou-se significativa influência da escolha do modelo constitutivo do concreto na precisão do comportamento dos pilares, quando comparado com os resultados experimentais. A influência do modelo constitutivo em simulações numéricas de elementos de concreto armado também foi analisada por Liu *et al.* (2020), que desenvolveram modelos numéricos com o auxílio do software ABAQUS e compararam com modelos disponíveis no referido software com diferentes combinações, observando maior precisão dos resultados em função dos ajustes realizados.

Butean e Heghes (2020) avaliaram, por meio de simulação numérica, o comportamento de vigas de concreto armado com uma ou mais camadas de concreto com diferentes resistências à compressão. Para tanto, utilizaram do software ATENA e do método Arc-Length para solução das equações não lineares. Para representação dos resultados obtidos experimentalmente, segundo os referidos autores, fez-se necessário a realização de testes e otimizações abrangentes dos parâmetros utilizados na modelagem.

A aplicação de métodos numéricos baseados no MEF tem se apresentado como boa ferramenta na representação do comportamento de estruturas de concreto armado. Entretanto, verifica-se a prática da aplicação de diferentes tipos de combinações de modelos constitutivos dos materiais e/ou ajustes de parâmetros para a obtenção de resultados mais precisos. Ainda, é possível observar que não há consenso na escolha destes parâmetros.

Neste contexto, este estudo objetivou analisar a precisão de resultados obtidos por meio da aplicação de métodos numéricos na simulação do comportamento de vigas à flexão, quando comparados com resultados obtidos experimentalmente e por meio de métodos analíticos definidos em normas de projeto. Ainda, buscou-se avaliar a influência da definição do modelo constitutivo e ajustes de parâmetros nos resultados das simulações. Utilizou-se o software comercial ATENA para a análise numérica e foram analisadas algumas características como capacidade resistente, deslocamentos, rigidez, padrão fissuratório e modos de ruptura dos elementos estruturais.



2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Dimensionamento segundo a ABNT NBR 6118 (2014)

Os critérios para o dimensionamento de vigas de concreto armado à flexão pela norma brasileira ABNT NBR 6118 (2014) são baseados no princípio dos estados limites, devendo-se atender aos estados limites últimos (ELU) e de serviços (ELS). A ABNT NBR 6118 (2014) estabelece no item 17.2.2 algumas hipóteses básicas, como: as seções transversais se mantêm planas após deformações, as deformações nas barras devem ser a mesmas do concreto em seu entorno, as resistências à tração do concreto são desprezadas no ELU e adota-se um diagrama parábola-retângulo na distribuição de tensões no concreto.

Com base nas hipóteses e critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118 (2014), considerando armadura simples e impondo o equilíbrio dos esforços internos, a linha neutra da seção transversal de uma viga retangular é determinada pela Equação (1) que define a relação β_x entre a linha neutra (x) e a altura útil (d) da seção transversal.

$$\beta_x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_w \cdot d} \quad (1)$$

Da Equação (1), A_s é a área de aço da armadura, f_{yd} é a resistência de cálculo à tração do aço, α_c e λ são 0,85 e 0,8, respectivamente, para concretos de até 50 MPa, f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto e b_w é a largura da seção transversal. O momento fletor resistente da seção analisada (M_{Rd}) pode ser obtido pela Equação (2).

$$M_{Rd} = \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot \beta_x \cdot b_w \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{\lambda \cdot \beta_x}{2}\right) \quad (2)$$

Os coeficientes de ponderações das ações e resistências são definidos nos itens 11 e 12 da ABNT NBR 6118 (2014).

2.2 Dimensionamento segundo a ACI 318 (2019)

As recomendações de dimensionamento de vigas de concreto armado da norma ACI 318 (2019) estão estabelecidas na parte 3 do capítulo 22. No item 22.2 estão definidas as condições e hipóteses de dimensionamento, com premissas similares à da ABNT NBR 6118 (2014). Com base em tais premissas, de acordo com a ACI 318 (2019), a profundidade da linha neutra da seção transversal de uma viga submetida à flexão pode ser obtida por meio da Equação (3).

$$\beta_1 \cdot c = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (3)$$

Da Equação (3), β_1 é definido pelo item 22.2.2.4.3 da ACI 318 (2019) em função da resistência à compressão do concreto, c é a altura da linha neutra, A_s é a área de aço da armadura,

f_y é a resistência à tração do aço, f_c' é a resistência à compressão do concreto e b a largura da seção transversal. A intensidade do momento fletor resistente da seção (M_n) é expresso pela Equação (4).

$$M_n = \phi \cdot \left(A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\beta_1}{2} \right) \right) \quad (4)$$

Da Equação (4), ϕ é o coeficiente de redução definido na Tabela 21.2.2 da ACI 318 (2019) e d denota a altura útil da seção transversal.

2.3 Experimento analisado

Cinco vigas bi-apoiadas ensaiadas à flexão por Canaval (2016) foram escolhidas para comparação dos resultados obtidos pelas simulações numéricas. O referido autor analisou o comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas. Para a comparação, considerou-se apenas os resultados obtidos experimentalmente com as cinco vigas de referência, sem aplicação de reforços. Os detalhes da geometria e armaduras das vigas ensaiadas, bem como detalhes do ensaio à flexão a quatro pontos, estão apresentados na Figura 1.

As vigas do experimento possuem comprimento de 200 cm e seção transversal de 12 cm x 22 cm. Segundo Canaval (2016), o concreto apresentou, na data de realização dos ensaios, resistência à compressão de 22,78 MPa e módulo de elasticidade de 27,04 GPa. A armadura longitudinal foi composta por duas barras de aço CA-50, com diâmetro de 12,5 mm. Adotou-se, na parte superior do elemento, armadura construtiva longitudinal (porta estribos) formada por duas barras de aço CA-60, com diâmetro de 5 mm. Ademais, utilizou-se estribos de aço CA-60 com 5 mm de diâmetro, espaçados a cada 10 cm. De acordo com o autor, a armadura longitudinal apresentou tensão de escoamento média de 601 MPa e tensão de ruptura média de 719 MPa, valores obtidos por meio de ensaios de tração uniaxial.

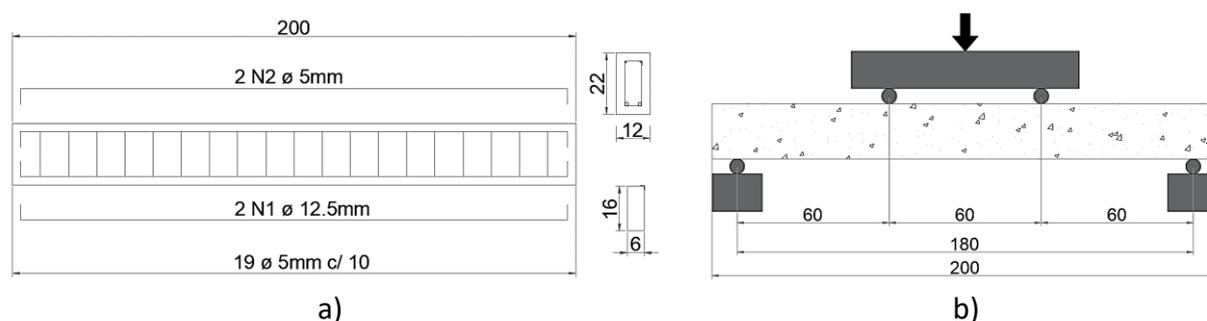


Figura 1: Detalhes das vigas ensaiadas: a) armaduras b) ensaio à flexão – medidas em cm quando não indicado.

Fonte: Adaptado de Canaval (2016).

Os deslocamentos das vigas, a cada incremento de carga, foram medidos por meio de sensores de medição de deslocamento linear (LDVT), instalados no meio do vão. Os comportamentos das vigas à flexão são apresentados na Figura 2 com os diagramas força *versus* deslocamento e padrão fissuratório.

Segundo Canaval (2016), todas as vigas romperam por flexão. A Tabela 1 apresenta os resultados dos deslocamentos (flechas) e carregamentos na ruptura obtidos nos ensaios das vigas. Note-se que apenas a viga V1Ref apresentou maior deslocamento quando comparada com as demais vigas.

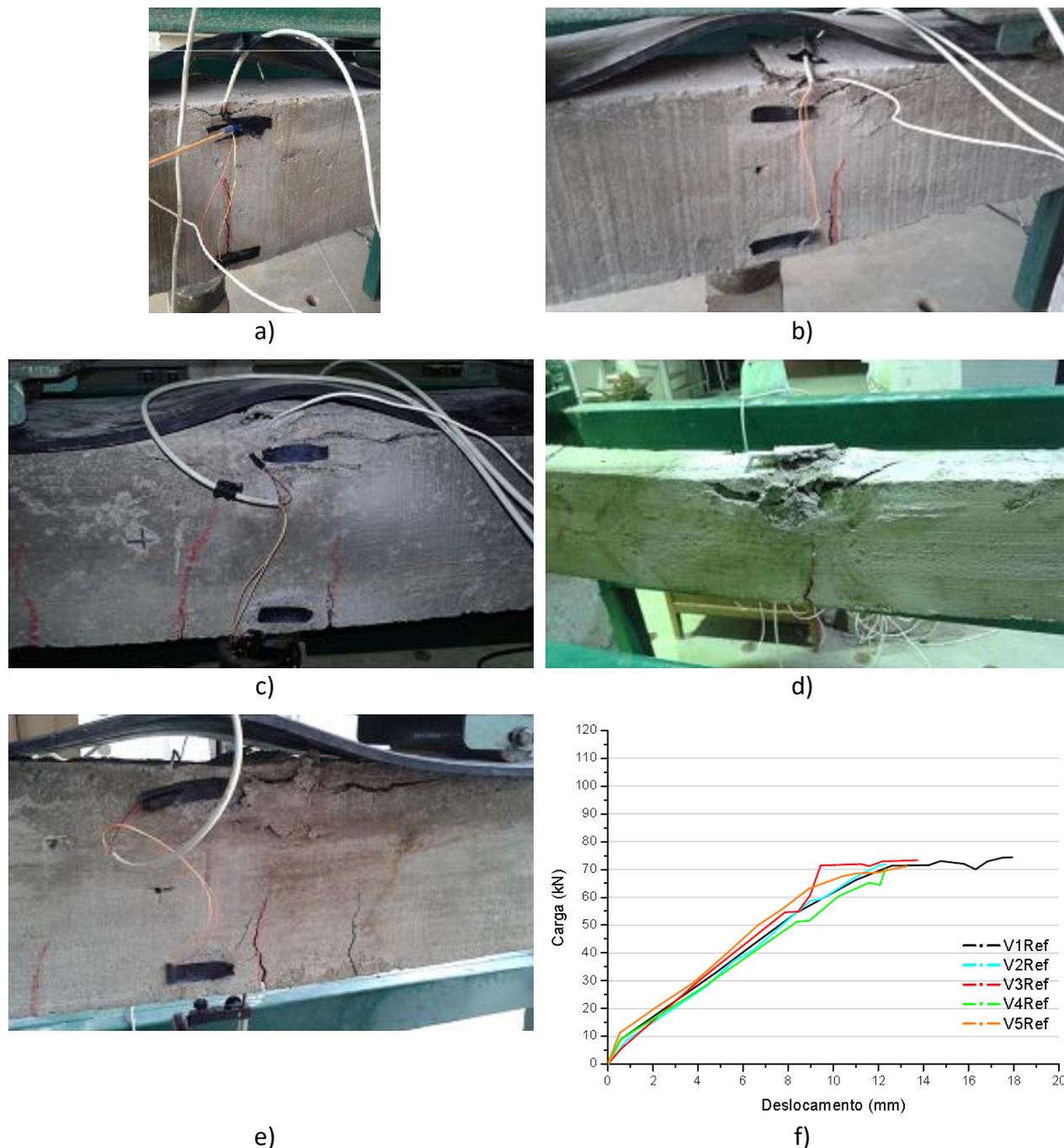


Figura 2: Comportamento das vigas a flexão: a) V1Ref, b) V2Ref, c) V3Ref, d) V4Ref, e) V5Ref, f) diagramas Força versus Deslocamento.

Fonte: Adaptado de Canaval (2016).

Tabela 1: Resultados obtidos na ruptura.

Viga	Flecha (mm)	Carga (kN)
V1Ref	17,95	74,36
V2Ref	12,32	71,87
V3Ref	13,75	73,34
V4Ref	12,31	70,08
V5Ref	13,27	71,12
Resultados médios	13,92	72,15

Fonte: Adaptado de Canaval (2016).

2.4 Análise não linear via MEF

Com o objetivo de analisar o comportamento das vigas ensaiadas por Canaval (2016), realizou-se simulações numéricas com base no MEF, utilizando o software comercial ATENA, da empresa *Cervenka Consulting*. De acordo com Cervenka e Cervenka (2015), o ATENA é um programa desenvolvido para análises não lineares de elementos finitos, possuindo ferramentas específicas para simulação computacional de estruturas de concreto e concreto armado. Os itens 2.4.1 a 2.4.6 apresentam os principais aspectos adotados nas simulações numéricas.

2.4.1 Modelo constitutivo para o concreto

O software ATENA dispõe de diferentes modelos constitutivos para a simulação do comportamento do concreto. Na simulação das vigas analisadas, optou-se por adotar o modelo *SBeta Material*, que considera o comportamento não linear do concreto na compressão, incluindo os efeitos de endurecimento e amolecimento. Esse modelo também considera a fratura baseada na tensão da mecânica da fratura não linear, o critério de ruptura de tensão biaxial, a redução da tensão de compressão a redução da rigidez ao cisalhamento após a fissuração, o efeito *tension stiffening* e dois modelos de fissuras: direção fixa e direção rotativa. Informações mais detalhadas estão disponíveis na documentação do software (CERVENKA *et al.*, 2018). Na Figura 3 são apresentadas as principais relações constitutivas e os critérios de falha considerados pelo modelo.

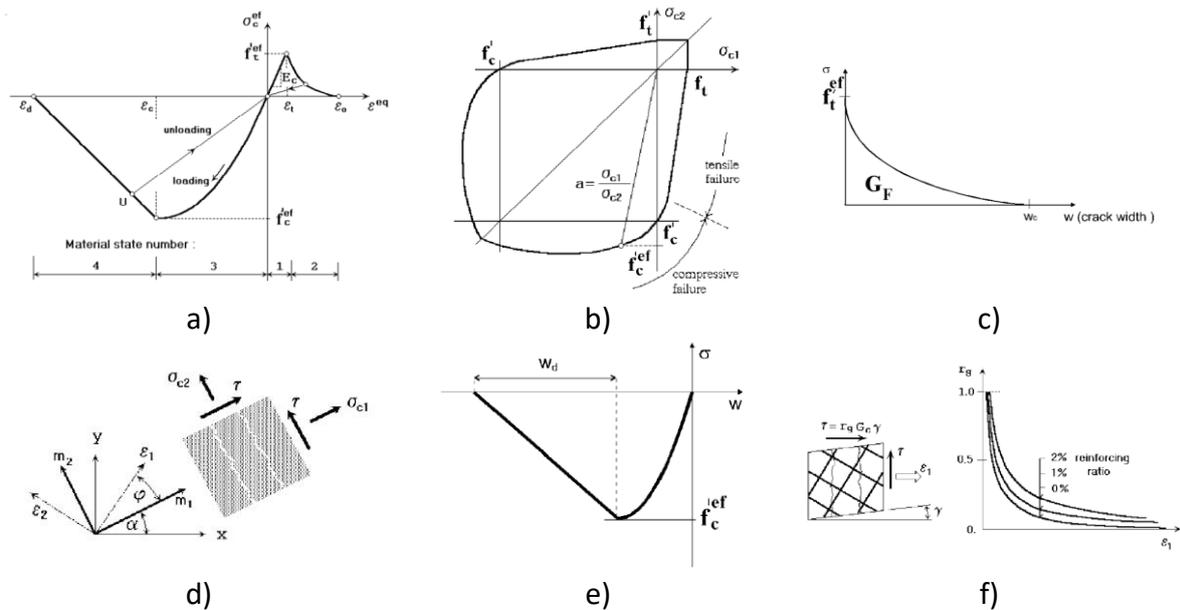


Figura 3: Principais características do modelo SBeta Material.

Fonte: Cervenka *et al.*, (2018).

O comportamento não linear do concreto é apresentado na Figura 3a) pelo diagrama da tensão efetiva (σ_c^{ef}) e a deformação uniaxial equivalente (ε^{eq}), sendo σ_c^{ef} na maioria dos casos uma tensão principal e ε^{eq} considerada como a deformação causada por uma tensão axial (σ_{ci}) em ensaio, o que permite representar o dano no concreto pela não linearidade com σ_{ci} . Tal relação constitutiva permite calcular o módulo de elasticidade para a matriz de rigidez do material e analisar o estado de dano em que se encontra o concreto.

Os valores máximos de tensões de compressão e tração são obtidos por meio do critério de falha de tensões no estado biaxial apresentado na Figura 3b), que considera uma proporcionalidade entre as tensões principais no concreto e a força axial do ensaio de compressão.

O comportamento do concreto na tração é assumido como elástico linear antes da fissuração. Após o surgimento de fissuras considera-se o modelo fictício baseado na abertura de fissuras e na energia de fratura, conforme ilustra a Figura 3c), na qual w é a espessura, σ a tensão normal e G_F a energia de fratura da fissura. Para as fissuras adotou-se o modelo fixo, representado na Figura 3d), o qual define a direção da fissura com base na direção da tensão principal no momento de formação da fissura, se mantendo fixa durante todo do carregamento.

A capacidade de deformação do concreto após atingir a tensão máxima de compressão (*strain softening*) é representada pelo modelo fictício apresentado na Figura 3e), na qual w_d é a deformação plástica do concreto, sendo recomendado pelo software o valor de 0,5 mm quando não obtida experimentalmente.

Na Figura 3f) é apresentado o critério para as tensões cisalhantes, podendo-se observar uma redução do módulo de cisalhamento com o aumento da deformação normal das fissuras, resultando em uma redução de rigidez ao cisalhamento em face da fissuração do concreto (CERVENKA *et al.*, 2018).

Os parâmetros adotados para as simulações do comportamento do concreto estão apresentados na Tabela 2. Inicialmente, tais parâmetros foram calculados pelo programa a partir do fornecimento da resistência à compressão do concreto e com base nos critérios considerados pelo modelo *SBeta Material*.

Visando aproximar a rigidez da simulação com o observado experimentalmente por Canaval (2016), adicionalmente foram realizados ajustes em alguns dos parâmetros. Butean e Heghes (2020), Torres (2018) e Sucharda *et al.* (2014), que utilizaram o software ATENA em suas análises, também verificaram a necessidade de ajustar alguns parâmetros para aproximar o comportamento da simulação do real. Na Tabela 2 são apresentadas duas configurações de modelo adotadas para o concreto, uma que considera os parâmetros determinados pelo software e outra com os ajustes realizados.

Tabela 2: Parâmetros adotados para o modelo do concreto.

	Parâmetros	Valores iniciais	Valores ajustados
Básico	E_c [MPa]	2.695E+04	2.601E+04
	ν [-]	0.2	0.2
	f_t [MPa]	1.929	1,688
	f_c [MPa]	-19.36	-19.36
Tração	$\sigma_{t,amol}$	Exponencial	Exponencial
	G_f [MN/m]	4.822E-05	4.822E-05
	Modelo de fissura	Fixed	Fixed
Compressão	ϵ_{cp} [-]	-1.437E-03	-1.437E-03
	Φ_f [-]	0.8	0.8
	$\sigma_{c,amol}$	Crush band	Crush band
	w_d [m]	-0.0005	-0.0006
Cisalhamento	Φ_c	Variable	Variable
	t/c [MN/m ³]	Hyperbola A	Hyperbola A
Diversos	ρ	2.300E-03	2.300E-03
	α [1/K]	1.200E-05	1.200E-05

Da Tabela 2, os parâmetros básicos são formados pelo módulo de elasticidade (E_c), coeficiente de Poisson (ν) e pelas resistências à tração (f_t) e compressão (f_c). Dos parâmetros de tração, $\sigma_{t,amol}$ refere-se ao tipo de amolecimento à tração e G_f à energia específica de fratura. Dos parâmetros de compressão, ϵ_{cp} é a deformação de compressão obtida no ensaio de compressão uniaxial, Φ_f é o fator de redução da resistência a compressão devido a fissuras, $\sigma_{c,amol}$ é o tipo de amolecimento à compressão e w_d é a deformação última de compressão. Dos parâmetros de cisalhamento, Φ_c é o fator de retenção ao cisalhamento e t/c a interação entre tração e compressão. Por fim, dos parâmetros diversos, ρ é o peso específico e α é o coeficiente de expansão térmica do concreto.

Nota-se que dos parâmetros da Tabela 2, apenas E_c , f_t e w_d tiveram seus valores ajustados. A escolha dos parâmetros a serem ajustados se deu com base em diferentes tentativas de simulações, sendo observada significativa influência de tais parâmetros na representação do comportamento do concreto. Em relação aos ajustes realizados, f_t foi estimada por meio da

Equação (5), conforme prescrições da ABNT NBR 6118 (2014), uma vez que fornece valor mais conservador quando comparado ao calculado pelo software. O E_c foi considerado como o resultado obtido experimentalmente por Canaval (2016) e ajustado pelo limite inferior do desvio padrão. W_d foi ajustado para -0,0006 de modo a aproximar a rigidez da simulação com a do experimento. Ressalta-se que o valor sugerido pelo software (-0,0005) é uma recomendação para os casos em que a deformação última do concreto não é obtida experimentalmente, bem como que a alteração aplicada é de pequena ordem.

$$f_{ct} = 0,21 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

2.4.2 Modelos constitutivos do aço

Para a simulação do comportamento das armaduras, foram adotados dois tipos de modelos disponíveis no programa ATENA, o bilinear com endurecimento e o multilinear, conforme diagramas apresentados na Figura 4.

Considerando uma aproximação mais simplificada, o modelo bilinear com endurecimento, Figura 4a), considera no trecho inclinado do diagrama o comportamento elástico do aço até atingir a tensão de escoamento, enquanto o segundo trecho representa o comportamento plástico com endurecimento até o limite de ductilidade do aço. Já o modelo multilinear, Figura 4b), permite modelar todos os quatro estágios do comportamento do aço: regime elástico, patamar de escoamento, endurecimento e ruptura (CERVENKA *et al.*, 2018).

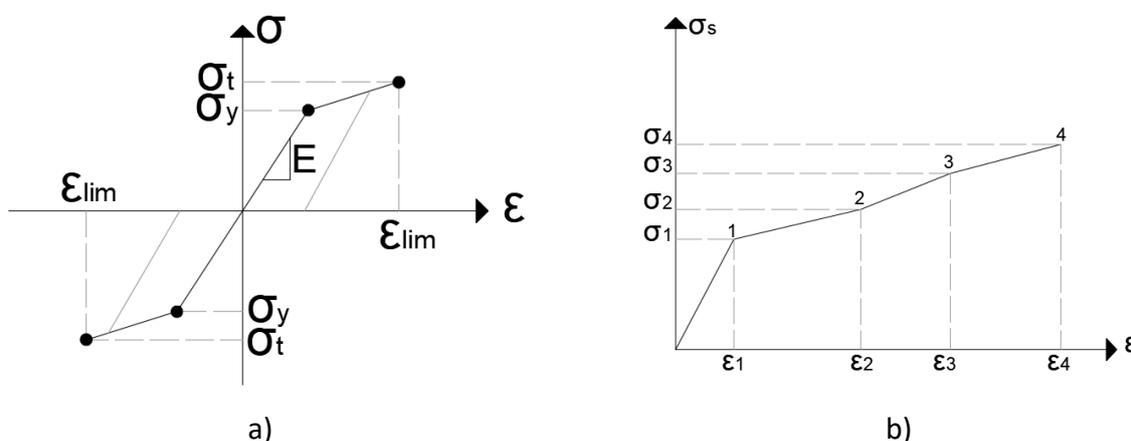


Figura 4: Modelos constitutivos do aço.

Fonte: adaptado de Cervenka *et al.*, (2018).

Para a simulação considerando o modelo bilinear, os valores das tensões de escoamento (σ_y), tensão última (σ_t) e deformação limite (ϵ_{lim}) foram inseridos de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de Canaval (2016) para armadura CA-50 e diâmetro de 12,5 mm. Para a armadura CA-60 e diâmetro de 5 mm adotou-se os resultados experimentais obtidos por Ferreira (2019).

O módulo de elasticidade (E_s) foi adotado como o resultado obtido experimentalmente por Ferreira (2019) para o aço CA-60 e como 200 GPa para o aço CA-50, conforme recomendação da ACI 318 (2019). A Tabela 3 apresenta os parâmetros considerados para o modelo bilinear do aço. Ressalta-se que este tipo de modelo também foi adotado nas análises de Zhang *et al.* (2014), Smarzewski (2016), Tjitradi *et al.* (2017), Cai *et al.* (2017) e Stramandinoli e La Rovere (2017).

Tabela 3: Parâmetros adotados para o modelo do aço.

	Parâmetros do aço	
	CA-50 – 12,5 mm	CA-60 – 5 mm
E_s [GPa]	200	191,3
σ_y [MPa]	601	646,8
σ_t [MPa]	719	670,6
ϵ_{lim} [-]	0,048	0,065

Com relação a simulação considerando o modelo multilinear, os valores das tensões (σ_i) e deformações (ϵ_i) foram preenchidos com base nos resultados de ensaios de tração axial em armaduras obtidos por Torres (2018), que detalhou intervalos de tensão de deformação observados e também aplicou em sua análise numérica. Os valores inseridos na simulação estão apresentados na Tabela 4, ressalta-se que para a simulação da armadura longitudinal de diâmetro 12,5 mm foi considerada o comportamento da armadura com diâmetro comercial mais próxima, 16,0 mm, disponível nos ensaios realizados pelo referido autor.

Tabela 4: Relação tensão deformação do aço.

Ponto	ϕ 5 mm CA60		ϕ 16 mm CA50	
	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
1	512,38	0,0027	410,14	0,0022
2	563,91	0,0032	480,60	0,0030
3	595,63	0,0037	531,48	0,0038
4	617,24	0,0042	563,70	0,0046
5	639,24	0,0052	593,30	0,0060
6	671,94	0,0082	622,75	0,0082
7	704,65	0,0200	692,60	0,0200

Fonte: adaptado de Torres (2018).

2.4.3 Modelos constitutivos da aderência entre o aço e concreto

Para a simulação da aderência entre o aço e concreto foram adotados dois modelos disponíveis no programa ATENA: aderência perfeita entre os materiais e o modelo proposto por CEB-FIP Model Code 1990. No primeiro modelo considera-se aderência perfeita entre o aço e concreto, enquanto no segundo o comportamento da aderência é simulado com base na resistência a compressão do concreto, tipo e diâmetro de armadura, condição de confinamento do elemento e qualidade da aderência.

Modelos para simulação da aderência entre o aço e o concreto foram considerados nas simulações de Zhang *et al.* (2014) e Torres (2018), enquanto que a aderência foi considerada perfeita nos estudos de Belletti *et al.* (2014), Smarzewski (2015), Tjitradi *et al.* (2017) e Stramandinoli e La Rovere (2017).

2.4.4 Modelo constitutivo das placas de aço de apoios

Para o comportamento das placas de aço consideradas nos apoios e pontos de aplicação da carga, adotou-se o modelo *Plane Stress Elastic Isotropic* disponível no software, que considera uma relação tensão deformação linear, módulo de elasticidade de 200 GPa, módulo de Poisson igual a 0,3, peso específico de 0,023 MN/m³ e coeficiente de expansão térmica de 0,000012 1/K.

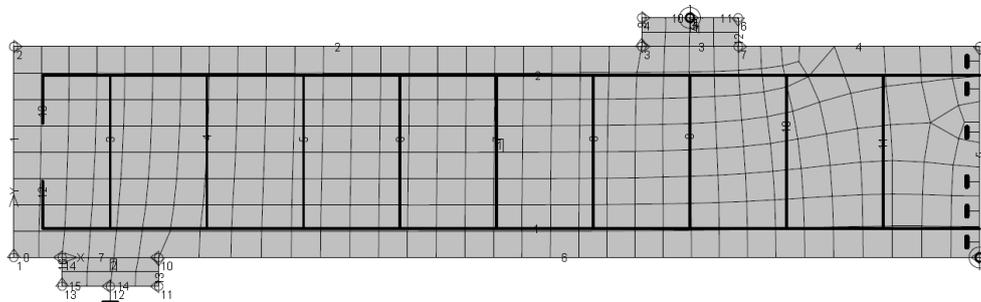
2.4.5 Modelagem

Tendo em vista a simetria em relação ao eixo vertical central das vigas ensaiadas por Canaval (2016), optou-se pela modelagem de apenas metade da viga. Na Figura 5 estão detalhadas a condição de simetria adotada, armaduras, malha de elementos finitos e condições de contorno.

O deslocamento vertical na linha central da placa metálica de apoio foi restringido, conforme detalhe da Figura 5b). Já a seção transversal do centro do vão da viga teve o deslocamento horizontal restringido, Figura 5d). Na linha central da placa metálica superior foi estabelecido um deslocamento incremental de 0,1 mm de modo a representar a aplicação do carregamento, Figura 5c).

A malha de elementos finitos da simulação foi definida até se obter a melhor convergência com os resultados experimentais e foi composta por 339 nós e 282 elementos sólidos hexaédricos, esses tipo *CCIsoQuad* disponíveis no software, sendo 266 referentes ao concreto e 16 as placas metálicas. A viga e placas metálicas tiveram suas espessuras definidas em 12 cm, compostas por 4 elementos finitos com espessura de 3 cm, a altura e o comprimento de cada elemento finito foi distribuída de forma otimizada pelo software. As armaduras foram definidas como elementos de barras e de acordo com os modelos de material de aço, diâmetro e quantidade de barras definidos.

Para a análise dos deslocamentos em função do incremento de carga, foram definidos dois pontos de monitoramento, o primeiro situado na face inferior do vão central da viga e o segundo na linha central da placa metálica, conforme apresentado na Figura 5.



a)

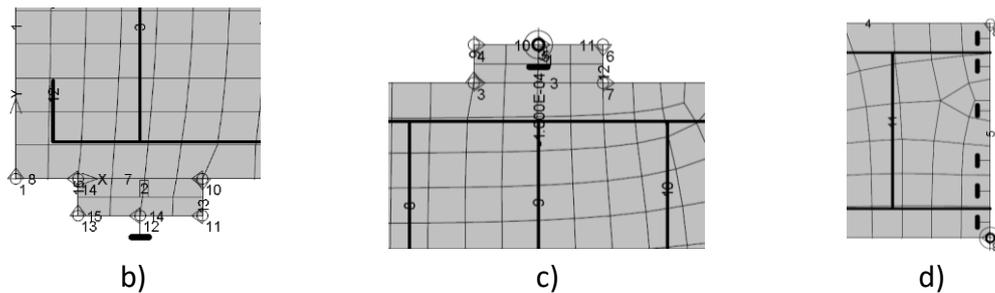


Figura 5: Detalhes da simulação: (a) vista geral da viga, (b) restrição de deslocamento do apoio na vertical, (c) ponto de aplicação da carga e (d) restrição de deslocamento da seção transversal central na horizontal.

2.4.6 Método numérico para solução das equações não lineares

Para resolução do sistema de equações não lineares optou-se pelo método de Newton-Rapshon disponível no software. O referido método tem como mecanismo soluções iterativas para determinados intervalos de deslocamentos a partir de uma solução aproximada inicial do sistema, sendo a matriz de rigidez do elemento atualizada a cada incremento de deslocamento (TORRES, 2018). O conceito da solução de equações não lineares pelo método de Newton-Rapshon é representado na Figura 6.

O referido método também foi adotado nas análises de Belletti *et al.* (2014), Sucharda *et al.* (2014), Cai *et al.* (2017), Stramandinoli e La Rovere (2017) e Butean e Heghes (2020). A análise foi definida em 50 etapas com limite de 100 iterações a cada incremento de deslocamento.

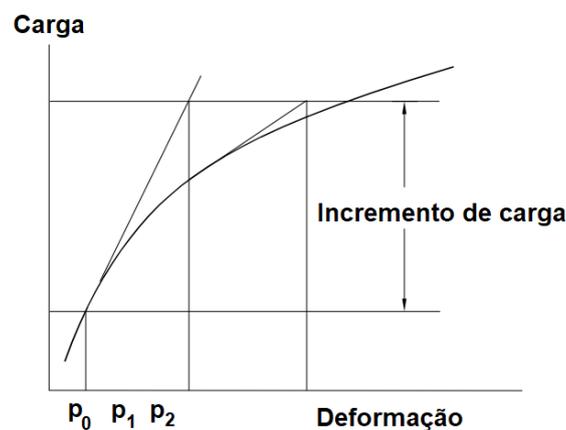


Figura 6: Representação do conceito do método Newton-Rapshon.

Fonte: adaptado de Cervenka, Jendele e Cervenka (2018).

2.4.7 Simulações realizadas

Com o objetivo de obter uma simulação com a maior aproximação possível do comportamento real das vigas ensaiadas por Canaval (2016), bem com avaliar a influência das alterações de modelos e parâmetros consideradas, foram realizadas oito simulações com diferentes combinações do modelo do aço, ajustes de parâmetros do concreto e comportamento

da interface concreto/aço. A Tabela 5 apresenta a identificação de cada simulação e condições consideradas.

Tabela 5: Simulações realizadas.

Simulações	Modelo aço	Ajustes no modelo do concreto	Aderência concreto/aço
A1	Bilinear	Não	Perfeita
A2	Bilinear	Não	CEB-FIP - 1990
A3	Bilinear	Sim	Perfeita
A4	Bilinear	Sim	CEB-FIP - 1990
B1	Multilinear	Não	Perfeita
B2	Multilinear	Não	CEB-FIP - 1990
B3	Multilinear	Sim	Perfeita
B4	Multilinear	Sim	CEB-FIP - 1990

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados normativos

Na Tabela 6 são apresentadas as capacidades à flexão das vigas considerando os critérios das normas técnicas ABNT NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2019). Com o objetivo de comparar com os resultados experimentais e numéricos, os momentos fletores resistentes das vigas obtidas nos dimensionamentos foram convertidos em forças pontuais. Ainda, buscando-se também comparar variações entre os resultados obtidos pelas referidas normas, foram calculadas a capacidade de projeto (F_d), considerando os fatores de segurança, e a capacidade última (F_u), sem a consideração de tais fatores. Analisando-se os resultados, é possível observar que considerando os fatores de segurança, a norma brasileira se apresenta mais conservadora, apresentando capacidade resistente inferior quando comparada com a norma americana, tal variação se deve aos diferentes valores de fatores de segurança adotados por cada norma. Quando analisados os resultados referentes à capacidade última, sem aplicação de fatores, nota-se que os valores são iguais, resultados que se mostram coerentes tendo em vista que as equações 1 a 4 utilizam dos mesmos critérios, sendo esta capacidade última a ser comparada com os resultados experimentais e numéricos.

Tabela 6: Resultados de projeto.

Norma	Força (kN)	
	F_d	F_u

ABNT NBR 6118 (2014)	49,71	59,68
ACI 318 (2019)	53,60	59,68

3.2 Resultados das simulações numéricas

Conforme exposto anteriormente, foram realizadas oito simulações numéricas considerando diferentes modelos do aço, ajustes no modelo do concreto, conforme Tabela 2, e condições distintas da aderência entre o concreto e aço. As simulações foram realizadas com base nas condições da Tabela 5. Na Figura 7 são apresentados os diagramas força *versus* deslocamento de cada simulação e na Tabela 7 os valores das cargas últimas e deslocamentos observados.

Analisando-se os diagramas apresentados na Figura 7, é possível observar que as simulações apresentaram comportamentos semelhantes até atingirem aproximadamente o carregamento de 50 kN, após, observa-se consideráveis diferenças de comportamento em função dos critérios adotados em cada simulação.

As simulações que consideraram o modelo bilinear para o aço, A1 a A4, apresentaram maior rigidez quando comparadas com as que consideraram o modelo multilinear, B1 a B4. Como exemplo, a simulação A1 apresentou capacidade última 8,9% maior e deslocamento 7,6% menor quando comparado com a simulação B1. Já as simulações A2 e B2, apresentaram menores variações, entretanto, a simulação que considerou o modelo bilinear do aço, A2, também apresentou maior rigidez.

Em relação às simulações que consideraram ajustes de parâmetros do modelo do concreto, A3, A4, B3 e B4, foi possível observar aumento da capacidade última e do deslocamento para todos os casos em relação às simulações sem ajustes. A simulação A3 apresentou capacidade 3,9% e deslocamento 7,2% superior quando comparada com a simulação A1, enquanto a simulação B3 apresentou aumentos de 4,2% e 10,28% quando comparada com a simulação B1.

As simulações que consideraram o modelo de aderência *CEB-FIP Model Code 1990*, seja combinado ou não com ajustes no modelo do concreto, modelo bilinear ou multilinear do aço, apresentaram diminuições de capacidade última e deslocamento, em todos os casos.

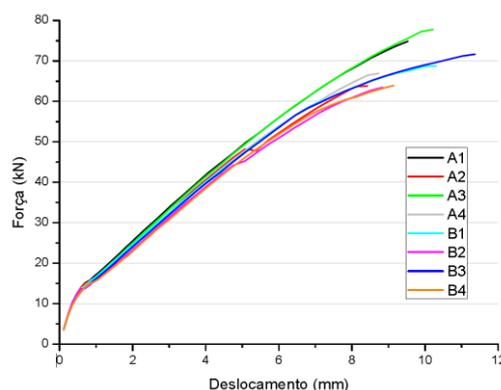


Figura 7: Diagramas Força versus Deslocamento das simulações.

Tabela 7: Resultados das simulações.

Simulação	Força (kN)	Deslocamento (mm)
A1	74,86	9,53
A2	63,84	8,43
A3	77,78	10,22
A4	66,92	8,73
B1	68,74	10,31
B2	63,48	8,84
B3	71,66	11,37
B4	63,94	9,15

Analisando-se a influência do modelo de aço adotado, é possível observar que o modelo bilinear resultou em simulações de vigas mais rígidas quando comparado com a aplicação do modelo multilinear, o que se mostra coerente tendo em vista que o primeiro modelo se refere a uma aproximação do diagrama tensão-deformação do aço e considera apenas dois estágios de seu comportamento. Em relação aos ajustes considerados no modelo do concreto, o aumento da capacidade última e do deslocamento também se se mostraram coerentes, tendo em vista que a deformação plástica do concreto foi considerada maior nos modelos ajustados. Ainda, observou-se que a adoção do modelo de aderência *CEB-FIP Model Code 1990* resultou na diminuição da capacidade última e do deslocamento das vigas, devido a menor aderência entre o aço e concreto.

3.3 Comparações entre os resultados

Na Figura 8 é apresentada a comparação entre todas as simulações, resultados experimentais e resultados obtidos pelos dimensionamentos das normas ABNT NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2019). A análise dos diagramas força *versus* deslocamento da Figura 8 permite verificar que as simulações conseguiram representar com boa aproximação o comportamento das vigas ensaiadas por Canaval (2016).

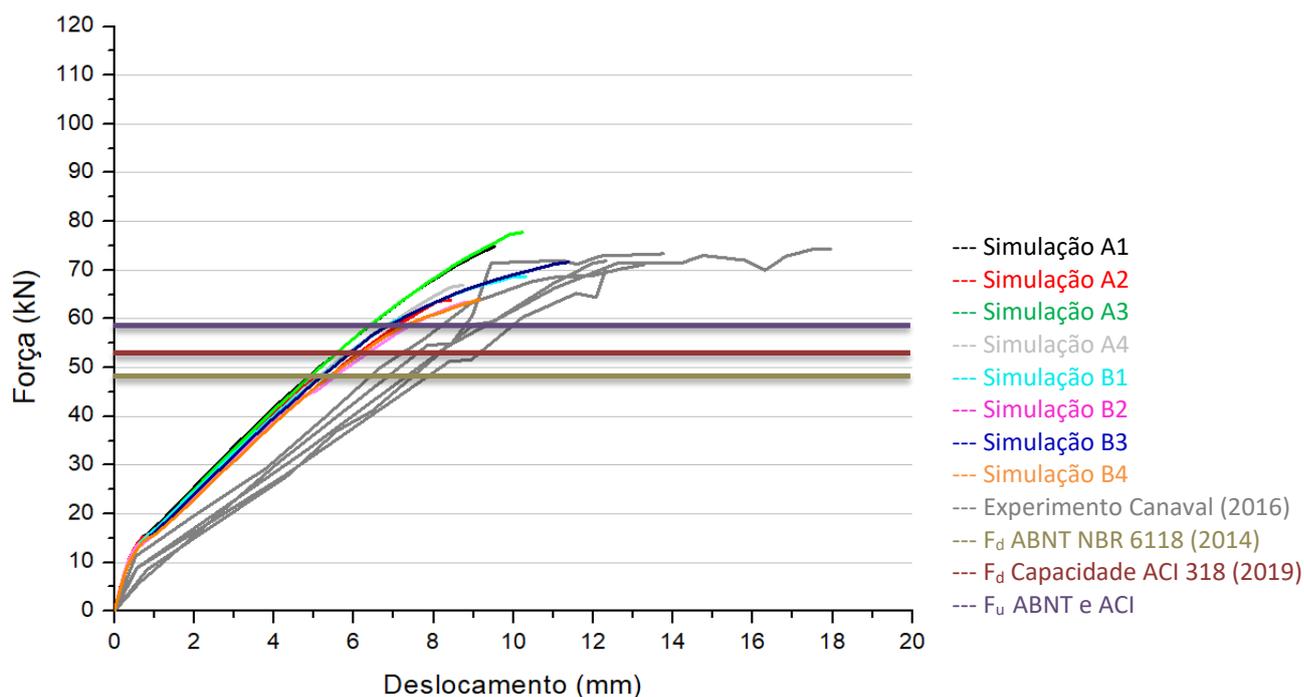


Figura 8: Comparação dos resultados.

Observando-se os diagramas da Figura 7 e os resultados da Tabela 7 e comparando-os com os resultados obtidos experimentalmente por Canaval (2016), Figura 2 e Tabela 1, é possível verificar que a simulação B3 apresentou maior proximidade de carga última e deslocamento. Ressalta-se que na simulação B3 foi considerado o modelo multilinear para o aço, ajustes de parâmetros do modelo do concreto e aderência perfeita entre o aço e concreto.

A carga média última obtida experimentalmente foi de 72,15 kN, enquanto na simulação B3 foi de 71,66 kN, apresentando variação de 0,68%. Já a carga última (59,68 kN) determinada de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2019) apresentou variação de 17%, quando comparada com o resultado experimental, o que mostra uma maior precisão da aplicação de método numéricos baseados no MEF frente ao método analítico das normas.

Observou-se também boa aproximação entre os deslocamentos. Experimentalmente o deslocamento médio das vigas na ruptura foi de 13,92 mm, enquanto a simulação B3 apresentou um deslocamento de 11,37 mm, resultando em uma variação de 2,55 mm ou 18%. Conforme já exposto, uma das vigas ensaiadas por Canaval (2016) apresentou deslocamento discrepante quando comparada com as demais vigas, vide Tabela 1, desconsiderado-se o deslocamento da viga V1Ref da média, a variação entre os deslocamentos da simulação e experimental reduz para 11,9%.

Analisando-se o comportamento à flexão por meio dos digramas da Figura 8, é possível observar que as simulações B4 e B2 apresentaram as menores inclinações, entretanto, quando comparadas com os resultados experimentais, as referidas simulações apresentaram variações de 11,41 e 10,77% na carga última e 36,49 e 34,26% no deslocamento, respectivamente.

Para análise em questão, o modelo multilinear permitiu representar de forma mais precisa a rigidez da viga, mesmo utilizando dados experimentais de armadura de diâmetro comercial

superior para a armadura longitudinal como já detalhado. O referido resultado se mostra coerente uma vez que o modelo bilinear considera apenas dois pontos do digrama tensão deformação do aço, enquanto no multilinear se utiliza de intervalos detalhando melhor o comportamento do aço. Em relação à aderência entre o concreto e o aço, a premissa de aderência perfeita entre os materiais proporcionou resultados mais próximos dos reais, enquanto o modelo proposto pelo software resultou na diminuição de cargas últimas e deslocamentos.

Ainda, o ajuste da deformação última do concreto, W_d , se mostrou muito efetivo para diminuir a rigidez da viga nas simulações, uma vez que foi possível aumentar o deslocamento no concreto após atingir seu pico de tensão. Conforme já exposto, o ajuste no referido parâmetro foi de pequena ordem e o valor proposto pelo software ATENA é uma estimativa para os casos em que tal característica não é obtida por meio de ensaios.

3.4 Outros resultados da simulação numérica

Além da carga última e deslocamento das vigas durante o ensaio à flexão, a simulação numérica permitiu obter outros resultados do comportamento estrutural da viga. As distribuições das tensões principais de compressão e deformações principais de tração do concreto na carga última estão apresentadas na Figura 9. Analisando-se a Figura 9a) é possível verificar a concentração de tensões de compressão na parte superior da viga junto a região de aplicação da carga, bem como a concentração de esforços de tração na parte inferior da viga, Figura 9b), indicando um comportamento típico de ruptura por flexão.

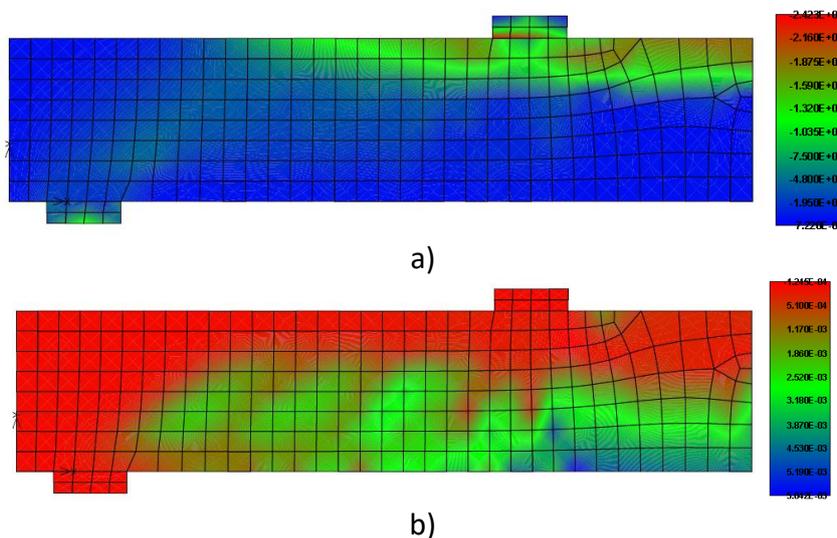


Figura 9: Distribuições de tensões e deformações: a) compressão b) tração.

A Figura 10a) apresenta os diagramas de deformações axiais das armaduras, na qual é possível observar claramente o comportamento das armaduras na carga última. Notam-se maiores deformações da armadura longitudinal junto ao centro da viga devido aos esforços de flexão, bem como deformações pelos estribos devido aos esforços cisalhantes. A Figura 10b) apresenta a viga em sua posição deformada e seu padrão fissuratório na carga última do ensaio à flexão. Nota-se

comportamento das fissuras similar ao verificado experimentalmente por Canaval (2016), conforme a Figura 2.

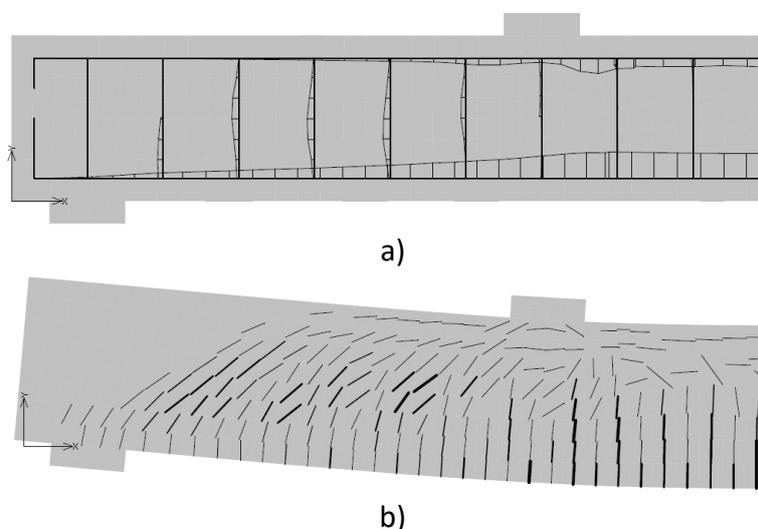


Figura 10: Deformações da armadura e padrão fissuratório.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo buscou analisar a precisão de simulações numéricas baseadas no MEF na análise do comportamento de vigas de concreto armado. Utilizou-se o software ATENA, as simulações foram validadas por meio de resultados experimentais e depois comparadas com resultados obtidos por dimensionamentos previstos em normas técnicas baseados em métodos analíticos. Também foi avaliada a influência das escolhas de modelos constitutivos e ajustes de parâmetros nos resultados das simulações. Das análises realizadas, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- a aplicação de métodos numéricos na simulação do comportamento de estruturas de concreto armado forneceu resultados similares aos obtidos experimentalmente, apresentando resultados mais precisos quando comparados com os obtidos por normas técnicas. Para o caso analisado, características como capacidade última, deslocamentos e rigidez apresentam boa concordância com os resultados experimentais.
- observou-se significativa influência da definição de modelos constitutivos e considerações de ajustes de parâmetros nos resultados das simulações. Para o modelo constitutivo do concreto adotado, foram necessários ajustes de alguns parâmetros de modo a aproximar a rigidez da simulação do experimento. Para o aço, o modelo multilinear permitiu obter comportamentos mais próximos dos reais. Já em relação à aderência entre o aço e o concreto, a consideração de aderência perfeita apresentou resultados mais satisfatórios.
- além de fornecer a capacidade última e deslocamentos, a aplicação da simulação numérica forneceu informações mais detalhadas sobre o comportamento do

elemento analisado, como o diagrama força versus deslocamento, distribuição de tensões e deformações e o padrão fissuratório, características não obtidas com a aplicação de métodos analíticos previstos em normas.

Como principal resultado da presente análise, pode-se confirmar a boa concordância entre resultados obtidos experimentalmente e por meio de aplicação de métodos numéricos nas análises de estruturas de concreto, se apresentando como importante ferramenta de projetos estruturais. Ainda, ressalta-se a importância da cuidadosa avaliação dos modelos constitutivos adotados e ajustes de parâmetros realizados durante a modelagem, devendo-se entender os conceitos de cada modelo.

5 REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute (2019) 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. Michigan, USA, 623 p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2014) NBR 6118. **Projeto de Estruturas de Concreto Armado - Procedimento**. Rio de Janeiro, 238 p.
- Belletti, B.; Damoni, C.; Hendriks, M. A. N.; Boer, A. (2014) Analytical and numerical evaluation of the design shear resistance of reinforced concrete slabs. **Structural Concrete**, v. 15, n. 3 - DOI: 10.1002/suco.201300069
- Bohara, R. P.; Tanapornraweekit, G.; Tangtermsirikul, S. (2019) Investigation of concrete material models for analysis of seismic behavior of reinforced concrete under reversed cyclic load. **Songklanakarin J. Sci. Technol.**, v. 41, n. 4, p. 951-958 – DOI: 10.14456/sjst-psu.2019.120
- Butean, C.; Heghes, B. (2020) Flexure Behavior of a Two Layer Reinforced Concrete Beam. **Procedia Manufacturing**, v. 46 p. 110-115 – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.017
- Canaval, J. H. (2016) **Estudo experimental do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão por meio de graute, armaduras e conectores**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG.
- Cervenka, V. (2012) Reliability-based non-linear analysis according to fib Model Code 2010. **Structural Concrete** 14, n. 1, DOI: 10.1002/suco.201200022.
- Cervenka, V.; Cervenka, J. (2015) **ATENA Program Documentation, Part 2-1. User's Manual for ATENA 2D**, Praga, República Tcheca.
- Cervenka, V.; Jendele, L.; Cervenka, J. (2018) **ATENA Program Documentation, Part 1. Theory**, Praga, República Tcheca.
- Ferreira, D. C. (2019) **Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP.



- Gribniak, V.; Cervenka, V.; Kaklauskas, G. (2013) Deflection prediction of reinforced concrete beams by design codes and computer simulation. **Engineering Structures**, v. 56, p. 2175-2186 – DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.08.045
- Kaklauskas, G.; Gribniak, V.; Girdzius, R. (2011) Average stress-average strain tension-stiffening relationships based on provisions of design codes. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, v 12, p. 731-736 – DOI: 10.1631/jzus.A1100029.
- Liu, C.; Yang, Y.; Wang, J.; Fan, J.; Tao, M.; Mo, Y. L. (2020) Biaxial reinforced concrete constitutive models for implicit and explicit solvers with reduced mesh sensitivity. **Engineering Structures**, v. 219, 110880 – DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110880.
- Scherer, M.; Morsch, I. B.; Real, M. V. (2019) Reliability of reinforced concrete beams designed in accordance with Brazilian code NBR-6118:2014. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 12, n. 5, p. 1086-1125. – DOI: 10.1590/S1983-41952019000500007
- Smarzewski, P. (2015) Numerical solution of reinforced concrete beam using Newton-Raphson method with adaptive descent. **Biuletyn WAT**, v. 64, n. 4, p. 207-221 – DOI: 10.5604/12345865.1186371
- Smarzewski, P. (2016) Numerical solution of reinforced concrete beam using arc-length method. **Biuletyn WAT**, v. 65, n. 1, p. 33-46 – DOI: 10.5604/12345865.1197966
- Stramandinoli, R. S. B.; LA ROVERE, H. L. (2017) Finite element model for nonlinear analysis of reinforced concrete beams and plane frames. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 2, p. 386-414 – DOI: 10.1590/S1983-41952017000200007
- Sucharda, O.; Brozovsky, J.; Mikolasek, D. (2014) Numerical Modelling and Bearing Capacity of Reinforced Concrete Beams. **Engineering Materials**, v. 577-578, p. 281-284 – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.577-578.281
- Tjitradi, D.; Eliatun, E.; Taufik, S. (2017) 3D ANSYS Numerical Modeling of Reinforced Concrete Beam Behavior under Different Collapsed Mechanisms. **International Journal of Mechanics and Applications**, v. 7, n. 1, p. 14-23 - DOI: 10.5923/j.mechanics.20170701.02
- Torres, C. A. B. (2018) **Análise experimental e numérica do comportamento de vigas de concreto armado com adição de fibras de aço**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP.
- Zhang, L.; Sun, Y.; Xiong, W. (2014). Experimental study on the flexural deflections of concrete beam reinforced with Basalt FRP bars. **Materials and Structures**, v. 48, p. 3279-3295 – DOI: 10.1617/s11527-014-0398-0

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Pereira, M. F., Christoforo, A. L., Almeida, J. P. B. (2021). Influência de parâmetros na modelagem de vigas de concreto armado. *Holos*. 37(1), 1-23.



SOBRE OS AUTORES

M. F. PEREIRA

Engenheiro Civil, graduado pela Universidade Paulista no ano de 2014. Especialista em Projetos de Estruturas de Concreto Armado pela FEC - Unicamp em 2018. Especialista em Patologia nas Obras Civis pelo Grupo IDD em 2020. Membro IBRACON e ALCONPAT Brasil. Sócio Diretor na Solitex - Consultoria em Patologia nas Obras Civis. Atua em projetos e análise de estruturas de concreto armado, com realização de inspeções, ensaios não destrutivos e destrutivos, diagnósticos, recuperação e reforço estrutural. E-mail: mfpereiraengenharia@gmail.com
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-811X>

A. L. CHRISTOFORO

Possui Pós-Doutorados em Estatística, em Engenharia de Materiais e em Engenharia de Estruturas pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (UNESP), campus de Ilha Solteira e de Rio Claro, Pós-Doutorado em Engenharia de Estruturas pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP) e Pós-Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais pela Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos FZEA/USP. Doutor e Mestre em Engenharia de Estruturas pela EESC/USP, Especialista em Matemática Aplicada pela UNESP de Rio Claro e graduado em Engenharia Civil Pela Universidade de Franca (UNIFRAN). Foi professor Interino na UNEMAT e posteriormente professor Visitante nessa mesma instituição, ministrando aulas de disciplinas diversas para o curso de Engenharia Civil. Foi concursado na vaga de Álgebra Linear, Cálculo Diferencial e Integral e Geometria Analítica da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT / Sinop / MT), concursado na área de Resistência dos Materiais no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ / MG) e concursado na vaga de Mecânica das Estruturas no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), onde leciona atualmente, orientando alunos de graduação e de pós-graduação (Mestrado e Doutorado - PPGE Civ) com supervisões de estágios de pós-doutorados. Organizou vários eventos técnico-científicos, dentre eles o Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional (ERMAC), patrocinado pela Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional (SBMAC) e o Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial (CONEMI), financiado pela Federação Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial (FENEMI). Membro da Comissão de Estudo de Estruturas de Madeiras (ABNT/CE-02:126.10) do Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB-02): Ensaio de caracterização de peças estruturais de madeira, e membro da diretoria do Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira (IBRAMEM). Atua na modelagem numérica de estruturas de madeira (estruturas mistas; em situação de incêndio) e de materiais compósitos para aplicações diversas, em estruturas de madeira, na caracterização da madeira, na fabricação e na caracterização de produtos engenheirados a base de madeira e de resíduos lignocelulósicos (MLC, PPH, MDP, MDF, OSB, LVL, etc.) e na modelagem estatística. Possui 2658 citações com índices de produção h-23 e i10-89. E-mail: <https://orcid.org/0000-0002-4066-080X>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4066-080X>

J. P. B. ALMEIDA

Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos (2019). Especialista em Projeto, Execução e Desempenho de Estruturas e Fundações pela IPOG (2019). Graduado em Engenharia Civil pela Universidade do Estado de Mato Grosso (2014). Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Estruturas de Madeira, Concreto Armado e Concreto Protendido. E-mail: boff.joaopaulo@gmail.com
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8667-1718>

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento



Pareceristas *Ad Hoc*: ROBERTO CHRIST E ADRIANO SILVA FORTES

