

ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO DA NBR 6118:2014 UTILIZANDO MEF

YURI HENRIQUES DA SILVA^{1*}; MATHEUS AGUSTINI²;
FLÁVIA GELATTI³

¹Engenheiro civil, UNIVALI, Itajaí-SC, yurihs@globo.com;

²Engenheiro civil, UNIVALI, Itajaí-SC, matheus-agustini@hotmail.com;

³Professora Mestre, UNIVALI, Itajaí-SC, flaviagelatti@univali.br;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

RESUMO: A presente pesquisa teve como objetivo estudar comparativamente os métodos de dimensionamento de vigas de concreto armado propostos pela NBR 6118:2014, utilizando análises não lineares. Os dimensionamentos foram realizados manualmente, enquanto as análises foram efetuadas no *software* ANSYS®, empregando-se tanto elementos sólidos quanto elementos de barra. Com os modelos validados, foi realizado o redimensionamento de uma viga de três apoios, baseando-se nas três análises preconizadas pela NBR 6118:2014, sendo elas análise linear, análise linear com redistribuição e análise plástica. Os dados de taxa de armadura e as características de perda de rigidez das vigas foram estudadas por meio da modelagem e análise não linear em método dos elementos finitos, gerando assim, comparativos que serviram de base para as conclusões desta pesquisa. Deste modo, constatou-se que cada dimensionamento apresenta uma característica de perda de convergência distinta, sendo essa motivada pela distribuição das armaduras e pelas características numéricas do modelo estrutural. O modelo, por sua vez, permitiu avaliar diversos aspectos dos casos aqui analisados, se mostrando confiável e com potencial para aferir demais situações de modelagem estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem estrutural, dimensionamento, análises não lineares, método dos elementos finitos.

ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAM SIZING METHODS OF NBR 6118: 2014 USING FEM

ABSTRACT: The present research had the objective of study comparatively the design methods of reinforced concrete beams proposed by NBR 6118: 2014, using a nonlinear analysis. The design of reinforcement was calculated manually, while the analysis were performed using ANSYS® software, employing both solid elements and bar elements. With the validated models, a three-support beam was redesigned, based on the three analyzes recommended by NBR 6118: 2014, being they linear analysis, linear analysis with redistribution and plastic analysis. The reinforcement rate data and the stiffness loss of the beams were studied through nonlinear finite element method modeling and analysis, thus generating comparative data for the conclusions of this research. In this way, it was verified that each dimensioning presents a characteristic of loss of different convergence, being this one motivated by the distribution of the reinforcement and by the numerical characteristics of the structural model. The model, in turn, allowed to evaluate several aspects of the cases analyzed here, being reliable and with potential to assess other situations of structural modeling.

KEYWORDS: Structural modeling, sizing, nonlinear analysis, finite element method.

INTRODUÇÃO

A evolução dos métodos de análise estrutural se dá em passos largos, podendo-se notar tal fato em projetos estruturais, estudos na área ou até mesmo analisando o porte das construções contemporâneas.

Considerando a grande popularização de computadores e o desenvolvimento do método dos elementos finitos no final das décadas de 80 e 90 (AZEVEDO, 2003), aponta-se a evolução de análises estruturais utilizando elementos finitos como um tema que apresenta grande potencial de refinamento e aprimoramento, possibilitando melhor conhecimento do comportamento estrutural e otimização no uso de materiais de construção.

A análise linear, dentre as análises estruturais que se tem conhecimento, é a mais difundida quando se trata de dimensionamento de estruturas de concreto armado. No que se diz respeito à análise linear com redistribuição e a análise linear pura, salienta-se que essas se diferem devido a primeira ser regida por coeficientes de redistribuição e esses reduzem momentos em zonas hiperestáticas presentes nas vigas. Ainda, tem-se a análise plástica, também contemplada na NBR 6118:2014, que redistribui os momentos atuantes em determinados elementos estruturais, porém de forma mais intensa e dependente da capacidade de rotação plástica (FONTES; PINHEIRO, 2005).

Desta maneira, este estudo busca redimensionar uma viga previamente dimensionada e ensaiada em laboratório por Cruz (1996), segundo as análises: linear, linear com redistribuição e plástica, indicadas pela NBR 6118:2014, e comparar com os resultados obtidos no *software* ANSYS® de modo que seja possível indicar qual método de dimensionamento reflete mais fielmente os resultados obtidos na ruptura experimental.

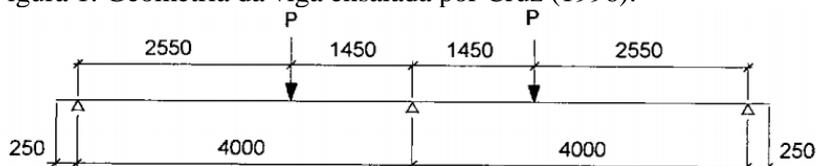
No modelo do *software* ANSYS®, são consideradas as não linearidades físicas dos materiais sendo as armaduras modeladas de forma explícita, sendo assim um modelo numérico exclusivamente utilizado para verificação, não sendo utilizado para dimensionamento. Nesta pesquisa, o mesmo foi utilizado para checagem mais refinada dos resultados de cada método de dimensionamento da NBR 6118:2014.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado com base em análises estruturais (análise linear, análise linear com redistribuição, análise plástica) propostas pela NBR 6118:2014, executadas em ambiente computacional, utilizando o *software* ANSYS®, e validadas por meio de ensaios laboratoriais desenvolvidos por Cruz (1996). A viga hiperestática de Cruz (1996) foi escolhida, pois possibilitou a aplicação das análises da NBR 6118:2014 que preveem redistribuição de momentos.

Cruz (1996), em sua tese, ensaiou vigas de concreto armado contínuas hiperestáticas compostas por dois vãos com seção transversal retangular de 15 cm de largura e 35 cm de altura (Figura 1). A geometria e carregamento ($P = 120$ kN) da viga experimental de Cruz (1996) foram utilizados para redimensionar as vigas segundo as análises indicadas pela NBR 6118:2014. Posteriormente as vigas dimensionadas foram modeladas no *software* ANSYS®.

Figura 1. Geometria da viga ensaiada por Cruz (1996).



Dimensões em mm.

Fonte: CRUZ, 1996, p. 73.

Os modelos numéricos não lineares do *software* ANSYS® foram previamente validados por Silva e Gelatti (2017) sendo então empregados nesta pesquisa.

A modelagem das vigas de concreto armado se iniciou pela definição da malha de elementos finitos da geometria de concreto, sendo realizada em elementos sólidos compostos por oito nós. Em seguida, as barras de aço foram inseridas no concreto por meio de elementos de barra com dois nós por elemento. Posteriormente, utilizaram-se comandos numéricos a fim de mesclar e evitar possíveis deslocamentos entre os elementos de aço e concreto, simulando assim uma aderência perfeita entre tais materiais.

Foram modelados ainda os aparelhos de apoio da viga, sendo esses em elementos sólidos configurados como aço carbono. A escolha do aço carbono para os aparelhos de apoio foi feita

almejando-se distribuir melhor as cargas aplicadas nos elementos de concreto, bem como evitar problemas de convergência, decorrentes da concentração de esforços e fissurações indesejadas nestas áreas.

Avaliaram-se os resultados de carga e deslocamento até a perda de convergência do modelo numérico, dados esses obtidos no *software* ANSYS® a partir das vigas dimensionadas conforme as análises propostas pela NBR 6118:2014. Tais resultados foram comparados com os apresentados em laboratório para a viga ensaiada por Cruz (1996).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

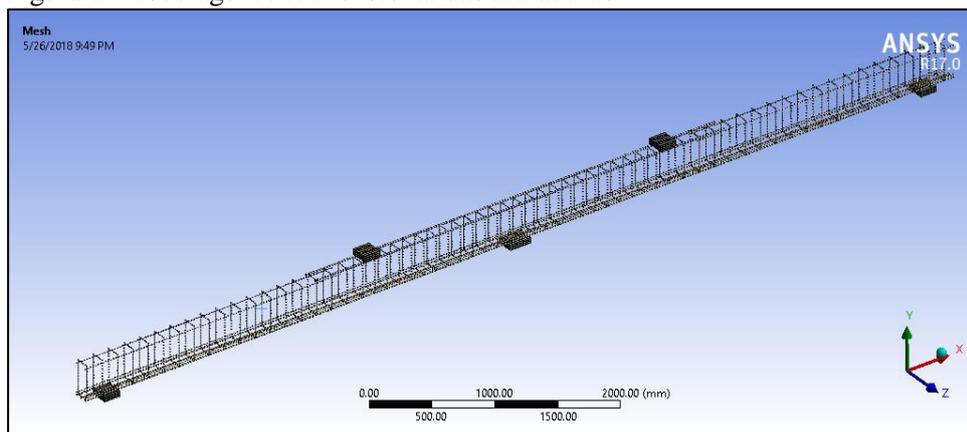
As áreas de aço obtidas no processo de dimensionamento das vigas para as três análises propostas pela NBR 6118:2014 estão compiladas na Tabela 1.

Tabela 1: Área de aço calculada e efetiva do apoio central e dos vãos.

Método	Apoio central		Vão	
	As (cm ²)	As efetiva (cm ²)	As (cm ²)	As efetiva (cm ²)
Análise linear	5.68	6.03	3.17	3.25
Análise redistrib.	4.44	4.57	3.92	4.02
Análise plást.	3.85	4.02	4.30	4.91

Fonte: Autor, 2017.

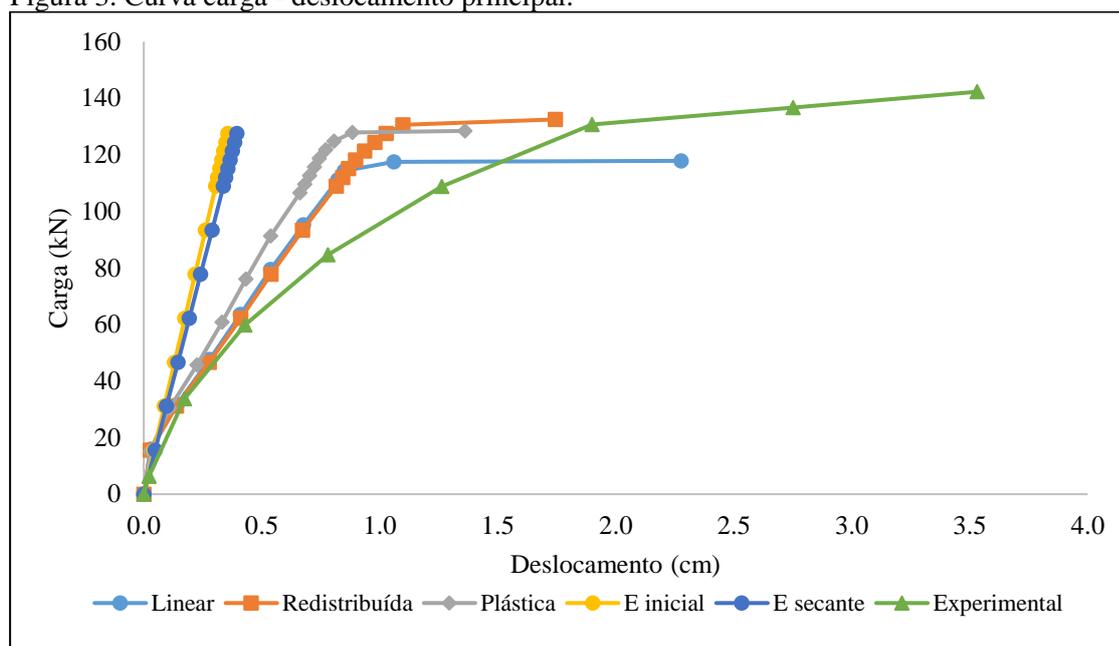
Figura 2. Modelagem tridimensional das armaduras.



Fonte: Autor, 2017.

Após a configuração dos parâmetros do concreto e aço, seguiu-se a modelagem das vigas e definição da malha de elementos finitos, sendo o número de elementos finitos da malha estável 10211 elementos. Os dados de Cruz (1996) foram então coletados e compilados em gráfico a fim de facilitar as análises. No diagrama da Figura 3 é possível perceber três grupos de curvas: (a) as mais inclinadas e lineares dizem respeito ao módulo de elasticidade inicial e secante do concreto e estão dispostas apenas para efeito de comparação; (b) as curvas intermediárias surgiram dos dados coletados nas simulações e dizem respeito aos modelos estruturais anteriormente dimensionados; (c) a curva menos inclinada representa os resultados experimentais de Cruz (1996).

Figura 3. Curva carga - deslocamento principal.



Fonte: Autor, 2017.

Foi possível constatar que os modelos se comportaram da forma esperada, visto que os caminhos percorridos pelo gráfico da Figura 3 apresentaram comportamento linear em alguns trechos de reta e em pontos chaves ocorreram mudanças de direção, indicando duas etapas distintas da viga: início da fissuração do concreto armado e início da plastificação do aço.

Constatou-se que a análise plástica foi mais rígida no trecho de fissuração, pois tem maior taxa de armadura no vão que os modelos com outras análises. Tal afirmação justifica sua maior rigidez nos trechos antes da plastificação.

Ainda, a maior diferença entre as taxas de armadura no apoio e vão provocou, provavelmente, no dimensionamento linear, a maior sensibilidade ao escoamento do aço.

O comportamento pouco previsível apresentado após o ponto de plastificação pode ser explicado pela característica de plastificação perfeita do modelo constitutivo do concreto. Nesse modelo, os efeitos de *strain softening* do concreto não foram considerados, se traduzindo em uma justificativa para o ocorrido, diferentemente do comportamento experimental, em que essa perda de rigidez é mais suavizada.

Foi realizada a leitura e identificação dos pontos de fissuração do concreto e escoamento do aço no gráfico da Figura 3. A Tabela 2 identifica esses valores.

Tabela 2. Pontos de fissuração e escoamento de acordo com as três análises.

Método	Fissuração		Escoamento	
	Desloc. (mm)	Carga (kN)	Desloc. (mm)	Carga (kN)
Análise linear	0.288	15.889	8.506	114.398
Análise redistr.	0.284	15.556	9.354	121.330
Análise plást.	0.266	15.222	8.057	124.824

Fonte: Autor, 2017.

Comparando as cargas de escoamento das armaduras obtidas nos dimensionamentos se fez possível calcular as variações entre o cálculo manual e o modelo em elementos finitos, aferindo assim a sua fidelidade. A consideração de escoamento foi baseada em análise gráfica visual, sendo a mudança de inclinação da curva carga *versus* deslocamento do modelo numérico, o parâmetro para escolha do ponto. A Tabela 3 compila esses resultados.

Tabela 3. Ponto de escoamento da armadura de acordo com a análise gráfica.

Ponto de escoamento da armadura			
Método	Descrição	Carga (kN)	Erro
Análise linear	Calculado	127.490	
	MEF	114.398	-10.27%
Análise redistrib.	Calculado	123.357	
	MEF	121.330	-1.64%
Análise plást.	Calculado	125.416	
	MEF	124.824	-0.47%

Fonte: Autor, 2017.

Foi observado que a maior diferença em relação a carga de ruptura calculada manualmente e por método dos elementos finitos foi da análise linear, sendo que a carga prevista no modelo analítico/manual indica em todos os casos que a plastificação ocorreu em um nível de carga superior ao que indica o modelo mais preciso por elementos finitos.

Apesar de ser um método simplificado de consideração das não linearidades, a análise plástica se mostra eficiente na identificação do ponto de escoamento, apresentando diferenças mínimas em relação ao modelo em elementos finitos não linear.

CONCLUSÃO

O método dos elementos finitos se mostrou uma ferramenta de grande precisão e versatilidade, pois propiciou relacionar efeitos estruturais vistos nas disciplinas fundamentais de estruturas com as respostas estruturais dos materiais ensaiados numericamente, fazendo com que o conceito de comportamento estrutural dos autores fosse ampliado e uma visão nova do assunto fosse abordada.

Analisando-se os valores de taxa de armadura dos dimensionamentos realizados, pode-se notar que, o coeficiente de redistribuição impactou significativamente na distribuição de armadura pertencente à viga. Embora tenha ocorrido uma variação da taxa de armadura, o consumo geral de aço não sofreu vastas alterações, visto que, em uma viga com apenas um apoio intermediário, a economia de armadura no apoio central é superada pelo consumo duplicado desse nos vãos adjacentes.

O comportamento de plastificação perfeita do concreto influenciou a curva carga deslocamento das vigas após o concreto presente nessas atingir a tensão de plastificação, gerando assim alguma discordância entre os modelos experimentais e numéricos. Nesse modelo, os efeitos de *strain softening* do concreto não foram considerados, se traduzindo em uma justificativa para o ocorrido.

Apesar de ser um método simplificado de consideração das não linearidades, a análise plástica se mostrou eficiente na identificação da carga de escoamento, apresentando diferenças mínimas em relação ao modelo em elementos finitos não linear.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- ANSYS. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Canonsburg. 2013. Disponível em: <[http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Mechanical%20APDL%20Theory%20Referen ce.pdf](http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Mechanical%20APDL%20Theory%20Referen%20ce.pdf)>. Acesso em: 21 de maio 2017.
- Azevedo, A. F. M. Método dos elementos finitos. Porto: FEUP, 2003. Disponível em: <http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/Livro_MEF_AA.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2017.
- Cruz, A. C. da. Capacidade de redistribuição de esforços em vigas contínuas. 1996. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.
- Fontes, F. F.; Pinheiro, L. M. Análise linear com redistribuição e análise plástica de vigas de edifícios. In: Congresso Brasileiro do Concreto. CBC 2005, São Carlos. Anais... São Carlos: IBRACON, 2005. p.72-85.
- Silva, Y. H.; Gelatti, F. Validação de modelo constitutivo para vigas de concreto armado no software ANSYS®. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. CRICTE 28., 2017, Ijuí. Anais... Ijuí: UNIJUÍ, 2017. p. 1 - 5.