

ANÁLISE DAS TENSÕES EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL NO SOFTWARE ANSYS®

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: Saber com precisão com que carga um elemento estrutural falha é uma tarefa difícil, sendo assim, a presente pesquisa teve como objetivo o estudo das tensões e formas de ruptura de vigas modeladas em ambiente computacional. A viga em estudo foi extraída de bibliografia, sendo a mesma dimensionada conforme a NBR 6118:1978. A viga avaliada possui três apoios, sendo um desses rotulado fixo e os outros dois rotulados móveis. Posteriormente, essa foi modelada em elementos finitos, no *software* ANSYS®, utilizando para isso modelos reológicos que consideram as não linearidades físicas de ambos os materiais, concreto e aço. A viga foi levada até além de sua carga de ruptura de forma que fosse causada a perda de convergência do modelo e as tensões de ruptura fossem excedidas. Com isso, foi identificado como sendo o mecanismo de ruptura de uma viga hiperestática de três apoios, a formação de bielas comprimidas e estas foram esmagadas quando a tensão última do concreto foi excedida. Ainda, pode-se verificar que o redimensionamento dos estribos com base na NBR 6118:2014 proporcionou a redistribuição dessas tensões antes concentradas nas bielas, fazendo com que a viga resistisse a patamares de carga superiores.

PALAVRAS-CHAVE: Ruptura de vigas, elementos finitos, modelos reológicos, redistribuição de tensões.

ANALYSIS OF TENSIONS ON REINFORCED CONCRETE BEAMS USING THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL IN ANSYS® SOFTWARE

ABSTRACT: Knowing precisely at what load a structural element fails is a difficult task, and thus, the present research had as its objective the study the tensions and rupture forms of beams modeled in a computational environment. The studied beam was extracted from a bibliography, being the same dimensioned according to NBR 6118: 1978. The beam evaluated has three supports, one of them is fixed and the other two are movable. Subsequently, this was modeled on finite elements in ANSYS® software using rheological models that consider the physical nonlinearities of both materials, concrete and steel. The beam loaded beyond its rupture load so that the convergence loss of the model was caused and the rupture stresses were exceeded. Thus, it was identified as the mechanism of rupture of a hyperstatic beam of three supports, the formation of compressed connecting rods, these were crushed when the ultimate tensile stress of the concrete was exceeded. Also, it can be verified that the resizing of the stirrups according NBR 6118:2014 provided the redistribution of those stresses previously concentrated in the connecting rods, causing the beam to resist higher loading levels.

KEYWORDS: Beam rupture, finite elements, rheological models, stress redistribution.

INTRODUÇÃO

Com o aumento do poder de processamento dos computadores, diminui-se o custo computacional de soluções em análises estruturais mais refinadas, sendo os modelos numéricos não lineares uma forma mais confiável de avaliar o comportamento de elementos estruturais.

Neste caso, o método dos elementos finitos se apresenta como um método numérico simples e de fácil emprego quando o assunto é modelos numéricos não lineares, sendo possível modelar praticamente qualquer estrutura à medida que a malha é refinada.

Utilizando modelos em três dimensões, as análises de tensões ganham mais confiabilidade, visto que diversos efeitos geométricos de distribuições de tensões internas nos elementos são então considerados nas análises, justificando assim seu custo computacional mais elevado em comparação com análises estruturais lineares. Outra utilidade dessas análises mais elaboradas seria prever com precisão onde será originado o primeiro ponto de ruptura da viga, ou seja, o primeiro elemento finito que apresentará falha, tornando o método útil para utilização em diversas áreas da engenharia estrutural.

Este estudo busca analisar as tensões e formas de ruptura de vigas modeladas em ambiente computacional, utilizando modelos reológicos que consideram as não linearidades físicas de ambos os materiais, concreto e aço. A viga avaliada foi modelada, no *software* ANSYS®, e levada até além de sua carga de ruptura de forma que fosse causada a perda de convergência do modelo e as tensões de ruptura fossem excedidas.

MATERIAL E MÉTODOS

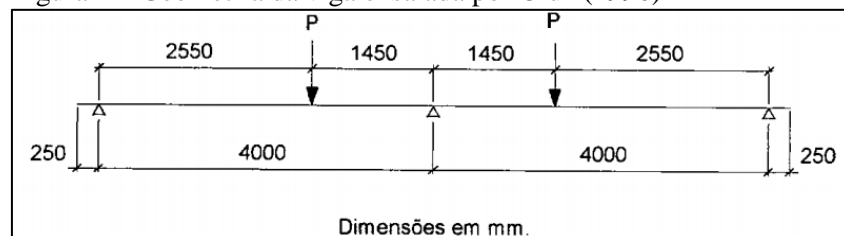
O *software* utilizado para as modelagens em elementos finitos foi o ANSYS®. Os algoritmos de criação de malha do *software* possibilitaram projetar as geometrias e facilmente gerar a malha de elementos finitos mais adequada para a mesma. Quanto aos tipos de elementos finitos criados pelo *software* ANSYS®, os elementos LINK 180 e SOLID 65 foram de fundamental importância para esta pesquisa, sendo esses, elementos lineares com dois nós e tridimensionais com oito nós, respectivamente. O elemento LINK 180 foi utilizado para a modelagem da armadura da viga, enquanto o elemento SOLID 65 foi utilizado para a modelagem do concreto.

Foram empregados também as bibliotecas de modelos reológicos para facilitar as simulações e economizar tempo, sendo esses modelos editados conforme as características da viga analisada. O modelo reológico não linear utilizado para o concreto foi configurado como multilinear para simular o modelo elastoplástico sugerido na NBR 6118:2014. O mesmo é dotado de coeficientes de transmissão de esforços por meio de fissuras, refinando os resultados de tensões nos elementos e fazendo com que o comportamento pós fissuração desse material seja considerado nas análises. Já no caso do aço, foi adotado um modelo bilinear para simular as duas zonas comportamentais desse material, sendo a primeira a zona elástica seguida da zona de encruamento isotrópico.

O critério de falha do elemento estrutural, ou seja, a viga, foi a perda de convergência do modelo numérico de modo que o último *substep* com dados convergentes é o passo de carga considerado válido. Deste modo, a simulação foi refeita utilizando a carga referente ao último *substep* convergente, de forma a ter certeza de que o mesmo é um *substep* válido e fazendo com que a simulação termine em perfeita convergência.

A viga utilizada no estudo trata-se de uma viga hiperestática com três apoios, sendo um rotulado fixo e dois rotulados móveis. A viga hiperestática foi escolhida, pois possibilitava a aplicação das análises da norma que preveem redistribuição de momentos. Sua seção transversal é de 15 cm de largura e 35 cm de altura e sua geometria pode ser conferida na Figura 1.

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



FONTE: Cruz, 1996.

As análises das tensões desenvolvidas nesta pesquisa levaram em conta os diagramas de tensões nodais gerados pelo *software* ANSYS®. O mesmo executa a interpolação dos valores nos elementos a fim de possibilitar a geração dos gráficos e a extração de valores intermediários. O número de

elementos da malha estável utilizada nas simulações foi de 10211 elementos, considerando os elementos de concreto, aço e os utilizados nos apoios.

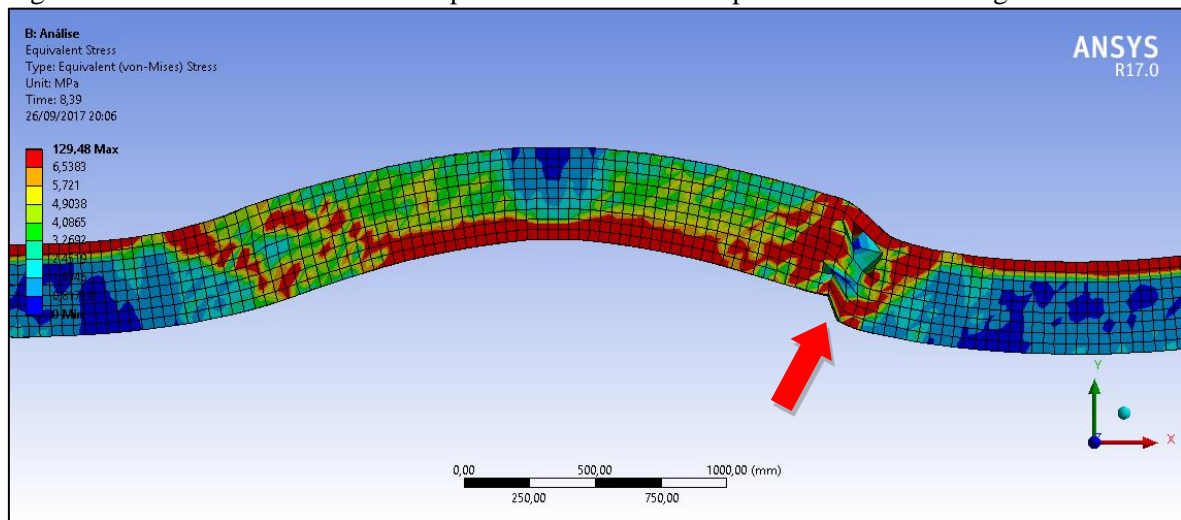
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados e posterior análise de tensões e formas de ruptura da viga modelada no *software* ANSYS®, estudada na presente pesquisa.

A tensão no concreto chegou a valores muito altos se comparados ao modelo constitutivo do concreto, pois o material, a partir daquele momento, não teve como dissipar as tensões, originando a ruptura.

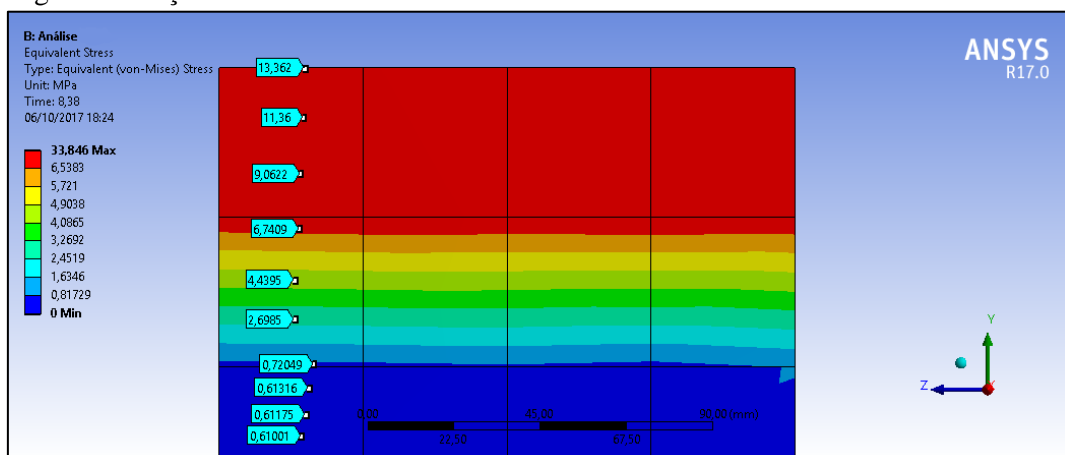
Na Figura 2, o primeiro ponto de ruptura do elemento estrutural foi representado por meio de uma seta vermelha.

Figura 2 – Tensão nos elementos no apoio central no instante posterior à não convergência.



Foi extraída uma seção transversal do vão a fim de confirmar a altura da linha neutra próxima a calculada pelo dimensionamento manual. O local da extração da seção pode ser conferido na Figura 1, indicado por uma seta na cor vermelho. Observou-se que os níveis de tensão crescem de forma mais expressiva a partir da altura de cerca de dois nonos da altura total da viga, o que gera um resultado de linha neutra de 7,78 cm. Na Figura 3, pode-se analisar os dados apresentados. No cálculo manual foi obtida a altura de linha neutra de 7,47 cm. Os resultados de linha neutra obtidos pela análise gráfica dos resultados em método dos elementos finitos foram considerados válidos.

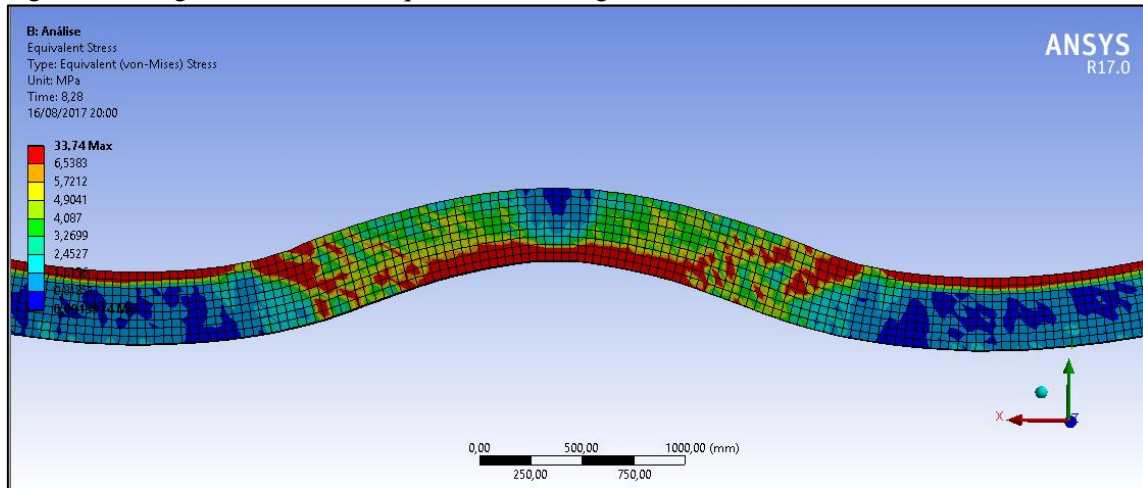
Figura 3 – Seção transversal do vão.



Identificou-se por meio dos diagramas de tensões nos elementos finitos, a formação de bielas de compressão indo do ponto de aplicação das cargas até o apoio central da viga. Pode-se especular

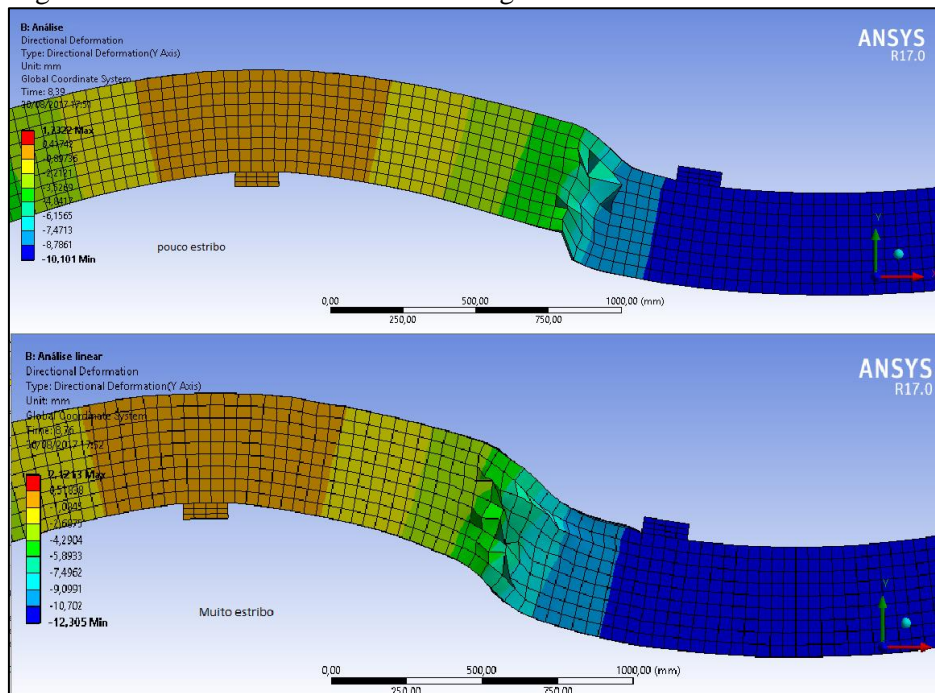
que o motivo da ruptura da viga foi o esmagamento do concreto comprimido na região das bielas, já que a região da viga onde ocorreu a perda de convergência do modelo numérico é a mesma onde surgiram as bielas comprimidas. A Figura 4 contém o diagrama de tensões da viga indicando a formação das bielas.

Figura 4 – Diagrama de tensões equivalentes da viga de Cruz (1996).



O suposto motivo da origem da ruptura é confirmado pelo estudo feito com a simulação da viga anterior redimensionada, sendo que nesta os estribos foram reforçados. Os estribos originais eram de dois ramos com diâmetro de 6,3 mm espaçados a cada 12,00 cm. Tendo sido feito o redimensionamento, para atender a NBR 6118:2014, já que a sua armadura original seguiu as prescrições de 1978, foram modelados estribos de dois ramos com 6,3 mm de diâmetro espaçados a cada 8,00 cm. Mediante o redimensionamento e posterior estudo dos deslocamentos, foi possível notar que o ponto de não convergência mudou de lugar, se dirigindo para próximo do apoio, como é possível observar na Figura 5.

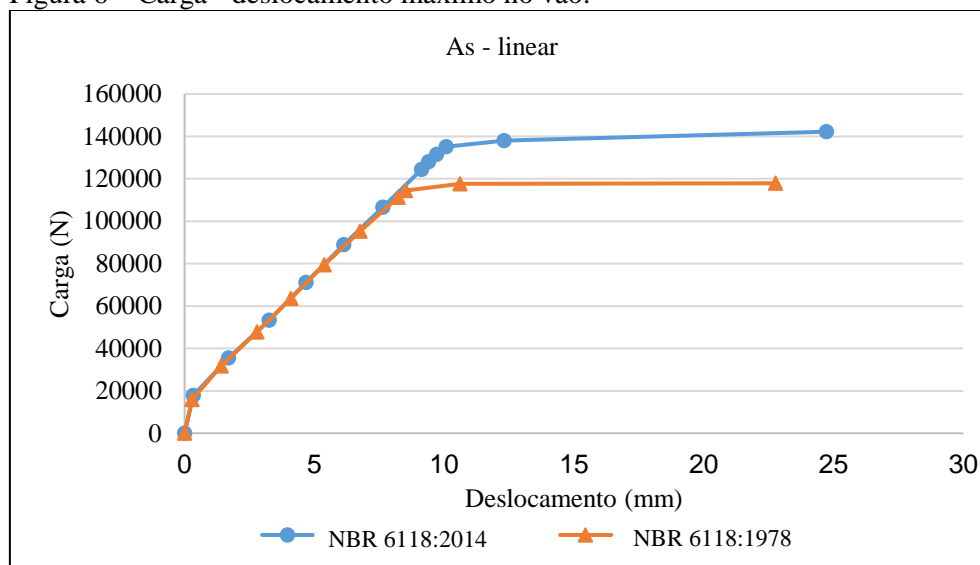
Figura 5 – Pontos de início da não convergência do modelo.



A carga de ruptura atingida pelo modelo com estribos redimensionados sofreu significativo aumento, indicando o que já se esperava: o aumento da inclinação da biela de compressão torna a viga mais resistente à ruptura por esforços cisalhantes.

No gráfico da Figura 6 é possível analisar os dados obtidos com as modelagens antes e depois do redimensionamento dos estribos.

Figura 6 – Carga - deslocamento máximo no vão.



CONCLUSÃO

Uma descoberta pertinente extraída por meio dos diagramas foi que o modelo rompeu em uma seção intermediária, sendo essa localizada entre a região de momento negativo e positivo. A seção de ruptura, e conseqüentemente a perda de convergência do modelo, só apareceu por ter sido criado um plano de compressão que levou o concreto a patamares insuportáveis de tensão, tendo o aço entrado em escoamento por conta da falha do binário concreto-aço.

A carga de ruptura atingida pelo modelo com estribos redimensionados sofreu significativo aumento, indicando o que já se esperava: que o aumento da inclinação da biela de compressão tornasse a viga mais resistente à ruptura por esforços cisalhantes. Um fato de grande importância a respeito da modelagem dos estribos e análise de resultados é que assimetrias no processo de definição das geometrias e geração da malha de elementos finitos podem influenciar nos pontos de início de ruptura, fato que foi confirmado por meio de estudos presentes neste trabalho.

O modelo permitiu avaliar diversos aspectos dos casos analisados, se mostrando confiável e com potencial para avaliar outras situações de modelagem estrutural. Por fim, é necessário advertir que associar a perda de convergência com a ruptura pode originar resultados enganosos, sendo necessário, para fins de confirmação, analisar o elemento por meio de análises não lineares geométricas.

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%20Reference.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.