



USE OF EMBEDDED REINFORCEMENT IN ANSYS FOR NON LINEAR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Bruna Manica Lazzari

bruna.ml@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul / Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Ipiranga, 6681; Zip-Code: 90619-900; Porto Alegre-RS, Brazil / Av. Osvaldo Aranha, 99; Zip-Code: 90035-190; Porto Alegre-RS, Brazil

Américo Campos Filho

americo@ufrgs.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99; Zip-Code: 90035-190; Porto Alegre-RS, Brazil

Paula Manica Lazzari

p.manica.lazzari@gmail.com

Universidade Federal de Santa Catarina

Rua Dr João Colin, 2700; Zip-Code: 89218-035, Joinville-SC, Brazil

Abstract. *This paper presents the development of a computational model, based on the finite element method, through the ANSYS platform, for the study of reinforced concrete structures, under plane stress states. For the representation of the constitutive equations of concrete and steel, it was implemented a new model of material with the help of the customization tool UPF (User Programmable Features) of ANSYS, where new subroutines were added to the main program in FORTRAN language. The implementation of this new model enabled the use of two-dimensional quadratic elements of 8 nodes (PLANE183) with embedded reinforcement (REINF263), making the solution of the problem faster and more effective. In order to validate the subroutines added to the system, it was simulated the reinforced concrete beams, tested by Leonhardt e Walther (1962), covering a wide variety of behaviors, including situations of failures by bending and shearing. The comparison between experimental and numerical analysis showed satisfactory results.*

Keywords: Reinforced concrete beams, Element-embedded rebar model, ANSYS, UPF

1 INTRODUÇÃO

Em virtude de sua importância dentro da engenharia estrutural, as peças de concreto armado têm sido objeto de permanente estudo, produzindo importantes publicações no meio acadêmico e profissional sobre este assunto. Isto se deve ao comportamento extremamente complexo do material concreto estrutural, que, uma vez submetido a solicitações, apresenta uma resposta altamente não-linear. Esta não-linearidade é causada, entre outros fatores, pela fissuração e diferença entre as resistências à tração e à compressão do concreto; pela plastificação do aço e do concreto; e pelos fenômenos relacionados ao tempo, como a fluência e a retração do concreto e a relaxação do aço. O conhecimento do comportamento mecânico e da distribuição de tensões nessas peças quando submetidas aos mais diversos tipos de carregamento é fundamental para realizar um dimensionamento seguro e otimizado de modo a reduzir custos.

O método dos elementos finitos já se tornou uma ferramenta consagrada e mundialmente reconhecida, por sua capacidade de analisar estruturas muito complexas de uma maneira mais próxima à realidade, simulando facilmente diferentes disposições geométricas, tipos de carregamentos e condições de contorno, através de um recurso computacional. Além disto, a possibilidade de implantação de rotinas para análise não-linear do concreto e da armadura proporciona a resolução de uma ampla variedade de problemas encontrados na engenharia e pode ser usado na análise do funcionamento de estruturas de concreto.

Desta forma, apresenta-se neste trabalho um modelo computacional para simulação numérica de vigas de concreto armado, sob estados planos de tensão, aplicando o método dos elementos finitos, utilizando a plataforma ANSYS. Para a representação do modelo constitutivo do concreto e da armadura, utilizou-se a ferramenta de customização UPF (*User Programmable Features*) do ANSYS, onde foram adicionadas ao programa principal as novas sub-rotinas desenvolvidas em linguagem FORTRAN. A grande vantagem da implementação deste modelo foi a possibilidade da utilização de elementos bidimensionais quadráticos de 8 nós e 2 graus de liberdade por nó (PLANE183) com armadura incorporada (REINF263), de modo a reduzir o esforço computacional e tornar a solução do problema muito mais rápida e eficaz.

A fim de validar as sub-rotinas implementadas através da interface com o programa principal, foram simuladas as vigas de concreto armado, ensaiadas por Leonhardt e Walther (1962), que abrangem uma grande variedade de comportamentos, incluindo situações de falhas por flexão e corte. A comparação entre análises numéricas e experimentais mostraram resultados bastante satisfatórios.

2 MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

Para a análise do comportamento de uma estrutura, é muito importante o conhecimento aprofundado das propriedades mecânicas, bem como das equações constitutivas dos materiais que compõem esta estrutura. Estas equações constitutivas são expressões que relacionam as tensões e as deformações, sendo essenciais nas simulações numéricas de materiais como o concreto estrutural, o qual é constituído por uma mistura de um conjunto de agregados e uma pasta de cimento associados com barras de armadura, possuindo resposta não-linear.

2.1 Modelo constitutivo para o concreto

Como o comportamento do concreto é extremamente complexo, a montagem de equações constitutivas, considerando todas as características do material, não é uma tarefa simples. Para a situação em que se tem a ação de cargas instantâneas, interessando apenas o efeito imediato, é utilizado, portanto, um modelo elastoplástico, até que seja atingida a superfície de ruptura do material. A partir deste momento considera-se que o ponto de integração esteja fissurado ou esmagado. Como a principal característica do comportamento do concreto é ser um material que possui baixa resistência à tração, em comparação a sua resistência à compressão, foram utilizados, dois modelos distintos para descrever o seu comportamento. Para o concreto comprimido foi empregado um modelo elastoplástico com endurecimento e, para o concreto tracionado, foi utilizado um comportamento elástico linear até a ruptura, a partir da qual foi considerada a contribuição do concreto entre fissuras na rigidez total da estrutura.

O modelo para o concreto usa o critério de ruptura proposto por Ottosen (1977), sugerido pelo Código Modelo *fib* 2010 (2012). Admite-se que o concreto comprimido apresente um comportamento elastoplástico com endurecimento isotrópico.

O concreto tracionado, por sua vez, é modelado como sendo um material que, antes de fissurar, comporta-se como um material elástico linear e, após a fissuração, utiliza-se o modelo de fissuras distribuídas com um enrijecimento à tração (*tension stiffening*). O modelo de fissuração utilizado é baseado na formulação apresentada por Hinton (1988). Na Fig. 1a estão representadas as seções transversais da superfície de ruptura de Ottosen (1977) e na Fig. 1b está representado o diagrama tensão-deformação para o concreto tracionado.

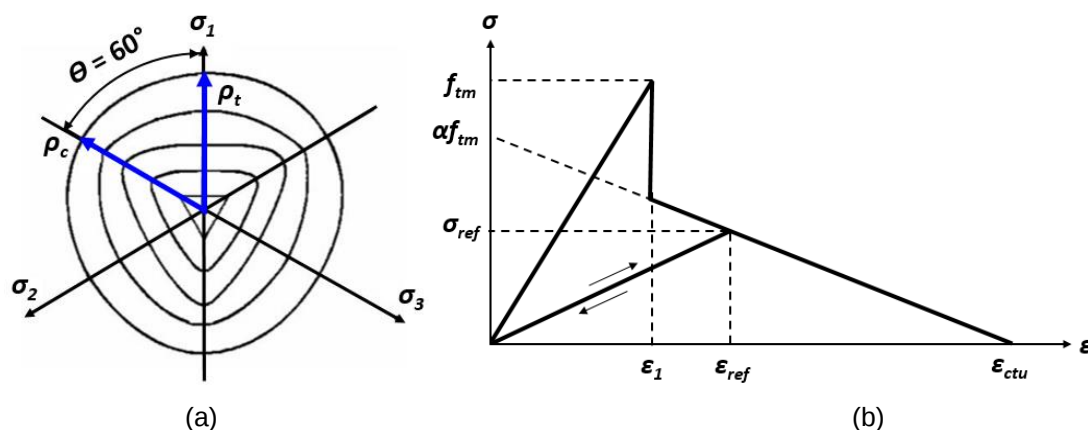


Figura 1. (a) Superfície de ruptura de Ottosen (1977); (b) Curva tensão-deformação para o concreto tracionado

2.2 Modelo constitutivo para a armadura

Em relação às armaduras, considera-se que as barras de aço resistam apenas a esforços axiais, apresentando o mesmo comportamento em tração e compressão. A representação se dá por um diagrama tensão-deformação bilinear.

As barras de armadura seguem dois comportamentos, dependendo do processo de fabricação do material. Para aços com patamar de escoamento bem definido, adotou-se o modelo elastoplástico perfeito. Para os aços encruados a frio, utilizou-se um comportamento

elastoplástico com endurecimento linear a partir de 85% da tensão de escoamento, f_y . A Fig. 2 mostra a representação através do diagrama tensão-deformação bilinear do modelo elastoplástico perfeito em comparação com o modelo elastoplástico com endurecimento linear.

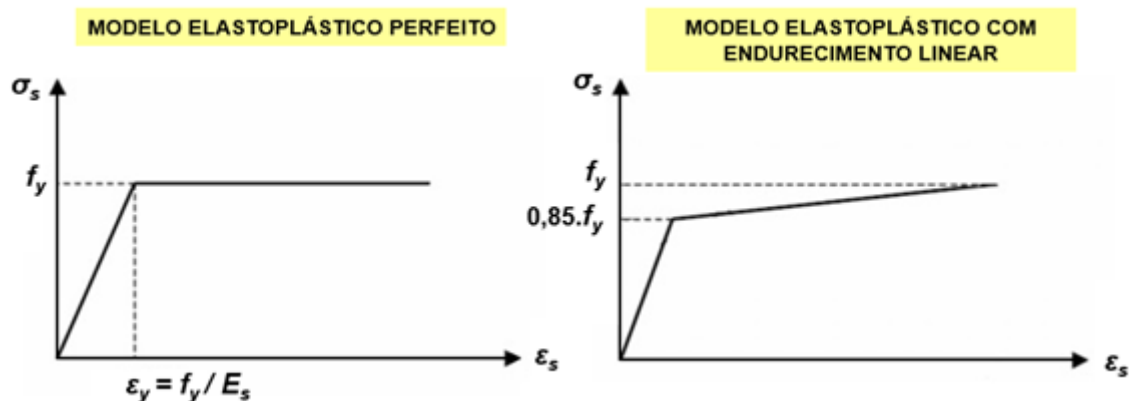


Figura 2. Modelo elastoplástico perfeito e modelo elastoplástico com endurecimento linear para armaduras

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para a simulação numérica das estruturas de concreto armado realizadas neste trabalho, optou-se por utilizar o método dos elementos finitos. A partir deste método foi possível considerar o comportamento não-linear dos materiais concreto e aço, incluindo os processos de fissuração do concreto e de plastificação do concreto e do aço.

Para a criação do modelo numérico deste trabalho, foi utilizado o programa ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*), versão 14.5. Este software, já muito bem aceito no meio acadêmico, permite fazer análises estáticas, dinâmicas, de fluídos de materiais lineares ou não-lineares, atribuindo comportamentos elástico, plástico, viscoso ou uma combinação dos mesmos. A plataforma ANSYS oferece também opções diversificadas para a escolha de elementos finitos e de modelos constitutivos. Além disso, o sistema disponibiliza ainda uma ferramenta de customização UPF (*User Programmable Features*), que permite, por exemplo, a implementação numérica de novos materiais e novos elementos finitos através de programação em linguagem FORTRAN.

Para a modelagem do concreto, utilizou-se, o elemento finito plano PLANE183, que integra o conjunto de elementos presente na biblioteca do ANSYS. Trata-se de um elemento de ordem superior, quadrático, bidimensional, de 8 nós, possuindo dois graus de liberdade por nó, correspondentes às translações na direção dos eixos X e Y. Para o caso de estado plano de tensões, é possível incluir uma espessura (*thickness*) para este elemento através do comando *Real Constant* do ANSYS. Este elemento foi escolhido por proporcionar bons resultados, sem a necessidade de um grande refinamento da malha de elementos, reduzindo-se significativamente o esforço computacional necessário para as análises. Além disso, o mesmo possui compatibilidade com o elemento REINF263, o qual foi utilizado para representar as barras de armadura ao longo das peças de concreto estrutural, de forma incorporada. Na Fig. 3a está representada a geometria do elemento PLANE183 e na Fig. 3b estão indicados os tipos de elementos finitos que suportam o elemento de reforço REINF263.

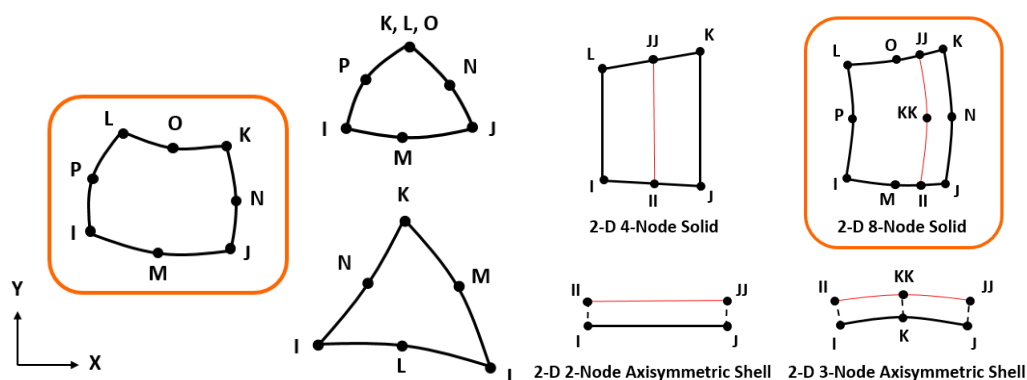


Figura 3. (a) Elemento PLANE183; (b) Tipos de elementos que suportam o elemento REINF263 da biblioteca ANSYS

O elemento de reforço REINF263, por sua vez, pode ser utilizado juntamente com determinados elementos planos ou de casca da biblioteca do ANSYS. Este elemento é adequado para simulação de fibras de reforço com uma única orientação. Cada fibra é modelada separadamente, conforme o seu material e seção transversal, como uma barra que possui apenas rigidez axial, podendo-se especificar várias fibras de reforço REINF263 em um único elemento base. As coordenadas nodais, graus de liberdade, e conectividades do elemento de reforço são idênticas às do elemento base.

Como a base deste trabalho é a análise de peças sob estados planos de tensão, a armadura das vigas foi condensada na modelagem computacional, conforme apresentado na Fig. 4. Esta mesma figura indica ainda como adicionar este reforço através do menu principal e um exemplo de discretização de uma viga com transparência, a fim de visualizar os elementos de reforço REINF263.

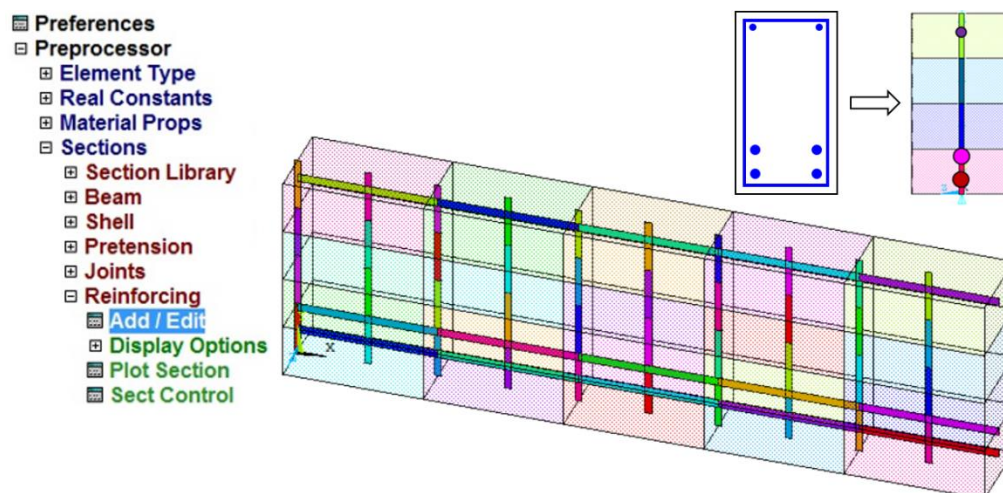


Figura 4. Exemplo de discretização com elementos REINF263

Além de uma grande variedade de elementos finitos, o ANSYS disponibiliza também alguns modelos constitutivos para a representação do comportamento de cada material. Para o concreto, por exemplo, o programa utiliza um modelo elastoplástico com a superfície de ruptura de cinco parâmetros de Willam e Warnke (1975). Entretanto, este modelo só é disponibilizado para o elemento SOLID65, o qual não permite o uso de armadura incorporada, exige uma

quantidade muito maior de elementos finitos para a representação da estrutura, além de ser extremamente difícil de controlar a convergência. Desta forma, as simulações numéricas em concreto estrutural tornam-se extremamente lentas, exigindo máquinas com alta capacidade computacional.

Com o objetivo de adotar o uso de armadura incorporada, utilizando os elementos REINF263 em conjunto com os elementos PLANE183, empregou-se a ferramenta de customização UPF do ANSYS. Através da UPF, foi possível a implementação numérica de um novo material elastoplástico com fissuração para o concreto, baseado no critério de ruptura de Ottosen (1977), recomendado pelo Código Modelo *fib* 2010 (2012). Este novo modelo para o concreto foi implementado através da rotina USERMAT (*User Material Routine*), presente no sistema de customização, utilizando a linguagem de programação FORTRAN.

Para que o sistema UPF esteja disponível, deve-se instalar o ANSYS, ativando o item *ANSYS Customization Files*, sendo criadas automaticamente as pastas *custom* e *customize* dentro do diretório C:\Program Files\ANSYS Inc\v145\ansys. Desta forma, é possível acessar a rotina USERMAT, e assim escrever as novas equações constitutivas do material. Para o caso do concreto, o novo modelo foi criado dentro da sub-rotina USERMATPS, que é chamada pela rotina USERMAT nos casos de elementos sob estados planos de tensão. Esta rotina USERMAT contém outras três sub-rotinas editáveis: a USERMAT3D, para elementos axissimétricos e sob estados planos de deformação; a USERMATBM, para elementos tridimensionais da categoria BEAM; e a USERMAT1D, para elementos unidimensionais. Além do elemento PLANE183, esta rotina também está disponível para uma série de elementos como LINK180, SHELL181, PLANE182, SOLID185, SOLID186, SOLID187, BEAM188 e BEAM189. Para utilizar esta subrotina USERMAT, contendo o novo modelo de concreto implementado, é necessário fazer a sua compilação e ligação com o programa principal ANSYS. Este procedimento foi executado através da criação de uma *Dynamic-Link Library* (DLL).

A rotina USERMAT é usada em qualquer análise do ANSYS que requer comportamento mecânico, sendo chamada para cada iteração de *Newton-Raphson*. No incremento de tempo inicial, o programa ANSYS guarda as tensões, deslocamentos e as variáveis necessárias que serão atualizadas ao final do incremento de tempo. Os parâmetros de entrada, necessários para o funcionamento do novo modelo constitutivo, fornecidos pelo arquivo de entrada de dados são definidos pelo comando TB, USER. Na Fig. 5, é apresentado um exemplo de utilização do novo modelo de concreto implementado através do comando TB, USER. Este comando requer apenas cinco variáveis para o seu cálculo: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, resistência à compressão do concreto, tipo de agregado utilizado e etapas de cálculo, sendo os demais parâmetros calculados internamente.

```
! -----  
! CONCRETE - USER - material 1  
! -----  
!  
!Constitutive model of user material  
!  
tb,user,1,2,5           ! Material ID:1, 2 temperatures, 5 constants (prop)  
tbtemp,1.0             ! First temperature  
tbdata,1,2754.8,0.2,2.42,2,21.002 ! Temperature: 1, E, poisson, fc, aggregate, loading step  
!                     ! Aggreg. 1: basalt, 2: quartz, 3: limestone, 4: sandstone  
tb,state,1,,9          ! Define 9 state variables  
!  
! -----
```

Figura 5. Exemplo de utilização da rotina USERMAT para o concreto

Devido às vantagens citadas anteriormente em utilizar armadura incorporada nos modelos computacionais, nas análises realizadas neste estudo foi adotada esta forma para representação da armadura. Para representar o comportamento do aço, foi utilizado o modelo BISO (*Bilinear Isotropic Hardening*), disponível na biblioteca interna do ANSYS, definido conforme a Fig. 6. A inclinação inicial da curva tensão-deformação é dada pelo módulo de elasticidade do material (E). Após a tensão de escoamento inicial (σ_0), o diagrama continua ao longo de uma linha com inclinação definida pelo módulo tangente (E_T), que é o módulo de endurecimento, especificado pelo usuário.

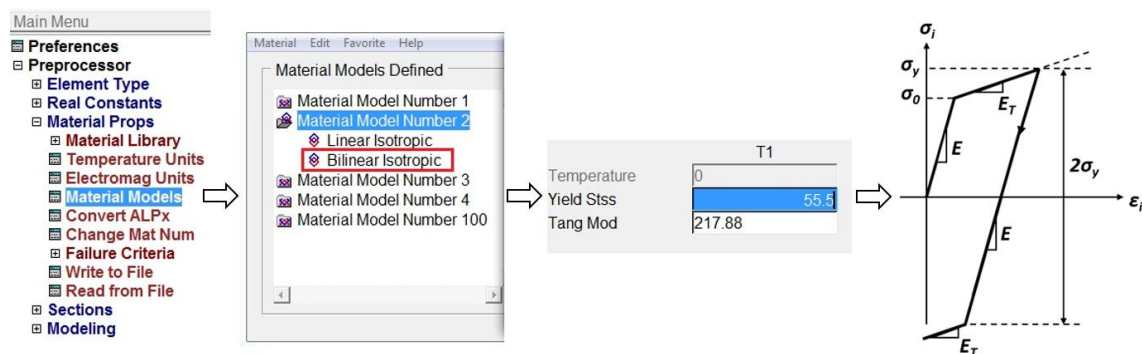


Figura 6. Modelo BISO - ANSYS

4 ANÁLISE DAS VIGAS EM CONCRETO ARMADO

Para verificar a eficiência deste modelo nas análises não-lineares de estruturas em concreto armado, o estudo de um conjunto de quatro vigas bi-apoiadas de concreto armado, denominadas ET1, ET2, ET3 e ET4, ensaiadas por Leonhardt e Walther (1962) é apresentado a seguir. Nessas vigas são aplicadas duas cargas concentradas, cujas posições podem ser vistas na Fig. 7. Todas as vigas possuem o mesmo vão, de 3,0 m e mesma altura, de 35 cm, possuindo, entretanto, diferentes seções transversais. A resistência média à compressão do concreto, com base nos resultados experimentais, é de 2,42 kN/cm². De acordo com a Fig. 7, todas as vigas possuem a mesma armadura longitudinal. Esta consiste, inferiormente, de quatro barras de 20 mm de diâmetro ($f_y = 42,8$ kN/cm²), sendo duas localizadas a 3 cm da borda inferior e duas localizadas a 6 cm da mesma borda e, superiormente, de duas barras de 8 mm de diâmetro ($f_y = 46,5$ kN/cm²), localizadas a 3 cm da borda superior. Todas as barras são de aço encruado a frio (antiga classe B). Os estribos verticais são constituídos por barras de 6 mm de diâmetro ($f_y = 32$ kN/cm²), em aço com dureza natural (antiga classe A), e estão espaçados conforme o esquema apresentado na Fig. 7. O módulo de elasticidade do aço E_s , é considerado igual a 210 GPa para o aço classe A e 195 GPa para o aço da antiga classe B.

Para o estudo computacional destas quatro vigas, aproveitando a simetria de geometria e de carregamento, dividiu-se a altura de cada peça em quatro elementos e a metade do comprimento longitudinal em cinco. Adotou-se, portanto, uma malha de vinte elementos finitos quadrangulares, quadráticos, de oito nós para estado plano de tensão (PLANE183), conforme apresenta a Fig. 8. No interior destes elementos foram acrescentados os elementos REINF263, para representar a armadura incorporada das vigas. Em relação às restrições, foi adicionado um apoio simples, na direção Y, ao nó inferior do elemento de extremidade da viga e apoios simples, na direção X, em todos os nós localizados no meio do vão da peça.

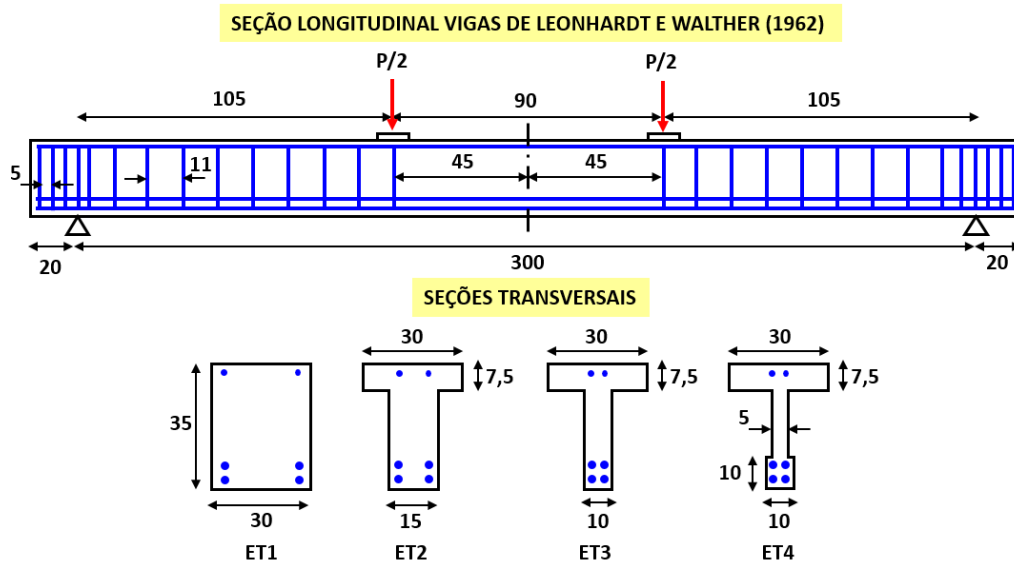


Figura 7. Esquema das seções longitudinal e transversal das vigas de Leonhardt e Walther (1962) (cotas e medidas em centímetros)

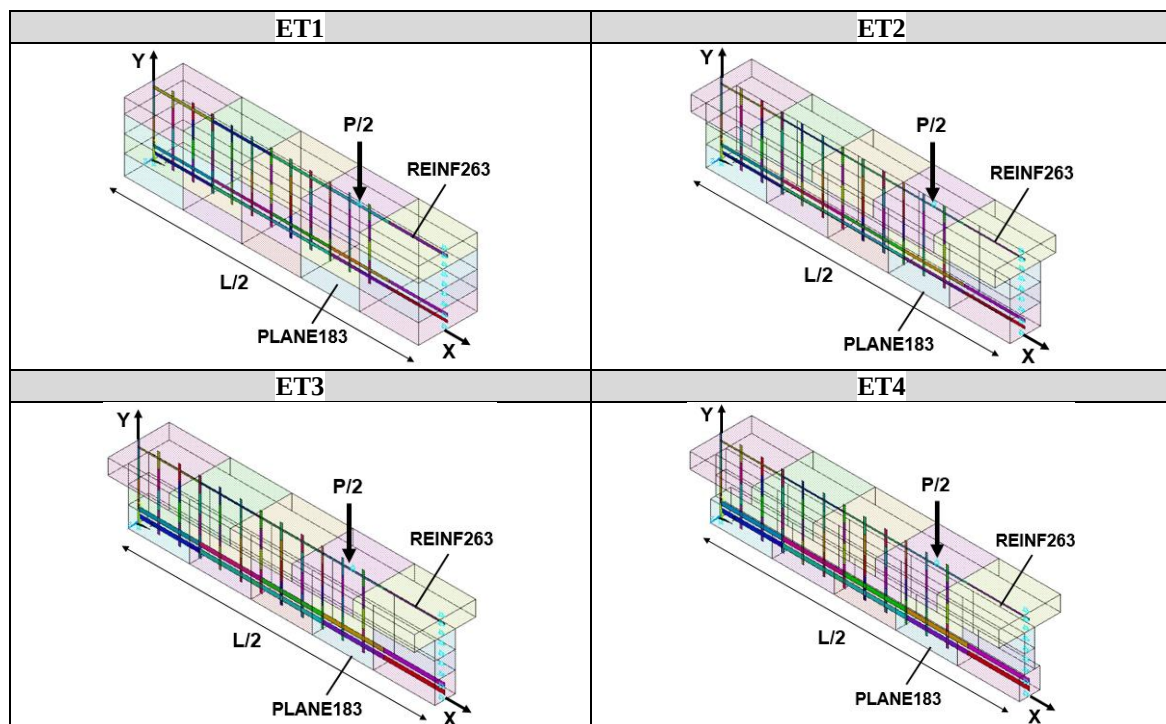


Figura 8. Discretização em elementos finitos para análise computacional das vigas de Leonhardt e Walther (1962)

Apenas a título de comparação entre quantidades de elementos finitos utilizados, são apresentadas, a seguir (Fig. 9), as distribuições de malha realizadas por Kunzler (2013) para as mesmas vigas de Leonhardt e Walter (1962), mas usando o modelo de armadura discreta. Neste caso, apenas um quarto da geometria das vigas foi modelado, usando elementos SOLID65 para representar os elementos de concreto, e LINK8 para representar as armaduras. Na análise computacional, por exemplo para a viga ET1, foram utilizados elementos de 2,5 cm de

dimensão, resultando em um total de 5712 elementos sólidos. Portanto, uma vez que apenas 20 elementos estão sendo usados para a modelagem da mesma viga, porém utilizando armadura incorporada, é possível comprovar o ganho computacional obtido frente ao modelo discreto.

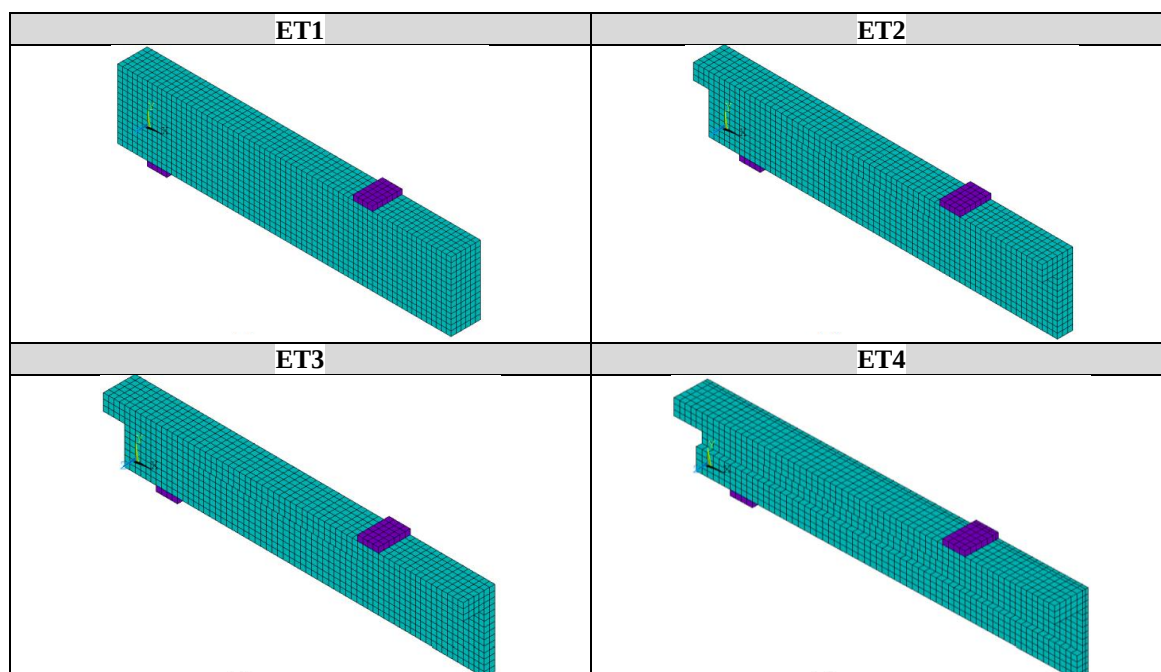


Figura 9. Discretização em elementos finitos feita por Kunzler (2013), utilizando o modelo de armadura discreta para as vigas de Leonhardt e Walther (1962)

Na Fig 10 é possível observar as curvas carga-deslocamento das vigas ET1, ET2, ET3 e ET4, e a evolução das flechas ao longo do carregamento. Inicialmente foi aplicado apenas o peso próprio da estrutura com um incremento de tempo com intervalo igual a 1 dia, até os 28 dias após a concretagem. Para simular o carregamento instantâneo destas vigas até a sua ruptura, foi aplicado um incremento de deslocamento vertical no ponto em que, no ensaio experimental, a carga concentrada estava localizada. Desta forma, o eixo das cargas do diagrama carga-deslocamento foi obtido multiplicando por dois o valor das reações verticais no nó de apoio, uma vez que apenas metade da estrutura foi representada no modelo numérico. Para o eixo dos deslocamentos, mediu-se o deslocamento vertical no nó inferior de extremidade, do elemento localizado no centro do vão da estrutura. Os resultados do diagrama carga-deslocamento mostram boa correlação entre as curvas apresentadas.

A fim de observar a distribuição de tensões ao longo da estrutura, nas Figuras 11, 12 e 13 estão indicadas as distribuições de tensões no concreto e na armadura para as vigas ET1, ET2, ET3 e ET4. Em geral, observa-se que, à medida que a largura da alma da viga diminui, e, consequentemente, a área da seção resistente de concreto é reduzida, as tensões nos estribos aumentam e ocorre ruptura por cisalhamento.

No diagrama de tensões axiais da armadura, pode-se observar que, na viga ET1, quando se atinge a carga de ruptura, a armadura inferior já se encontra no patamar de escoamento enquanto que os estribos estão levemente tracionados. Nas vigas ET2 e ET3 pode-se verificar que a armadura inferior atinge tensões próximas ao patamar de escoamento, e a tensão média nos estribos atinge a sua tensão axial máxima. Já a viga ET4 atinge a tensão máxima nos estribos

antes de iniciar o processo de escoamento da armadura inferior. Desta forma fica evidente que a viga ET1 rompe por flexão, as vigas ET2 e ET3 rompem por cisalhamento, apesar da ruptura à flexão ocorrer quase ao mesmo tempo, e a viga ET4 rompe por cisalhamento.

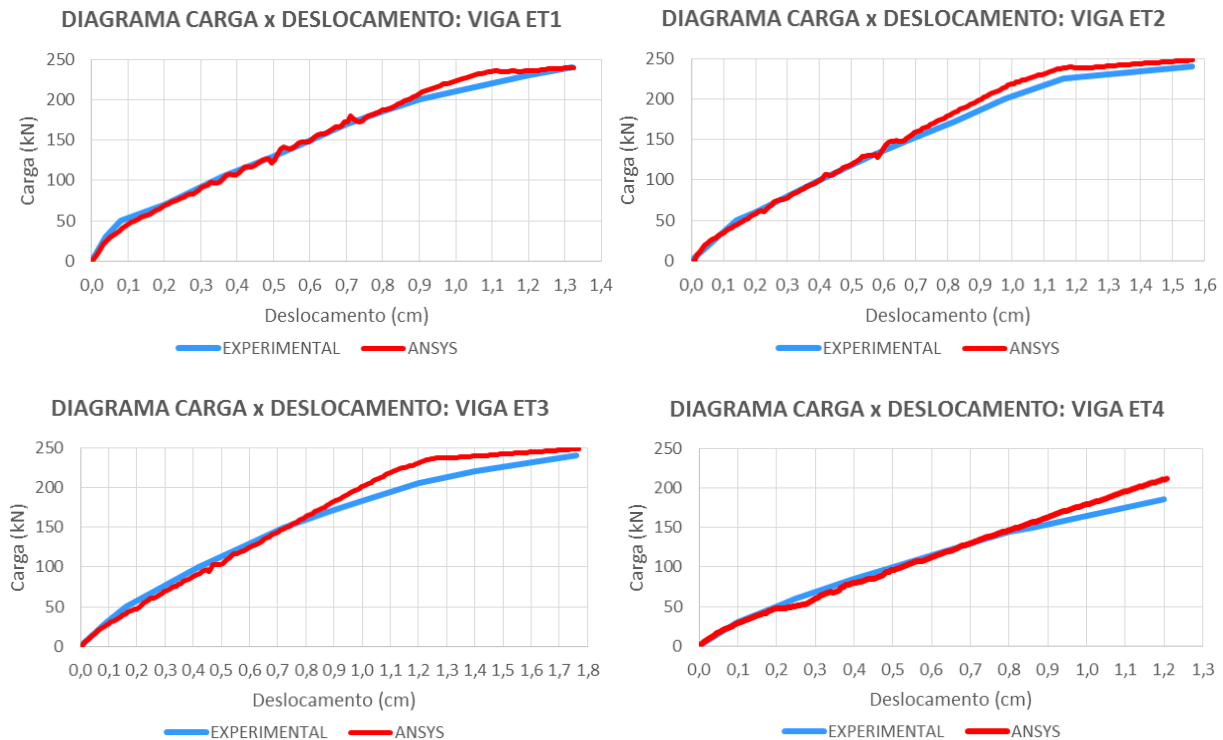


Figura 10. Comparação entre as flechas obtidas no ensaio experimental e pelo modelo computacional, para as vigas de Leonhardt e Walther (1962)

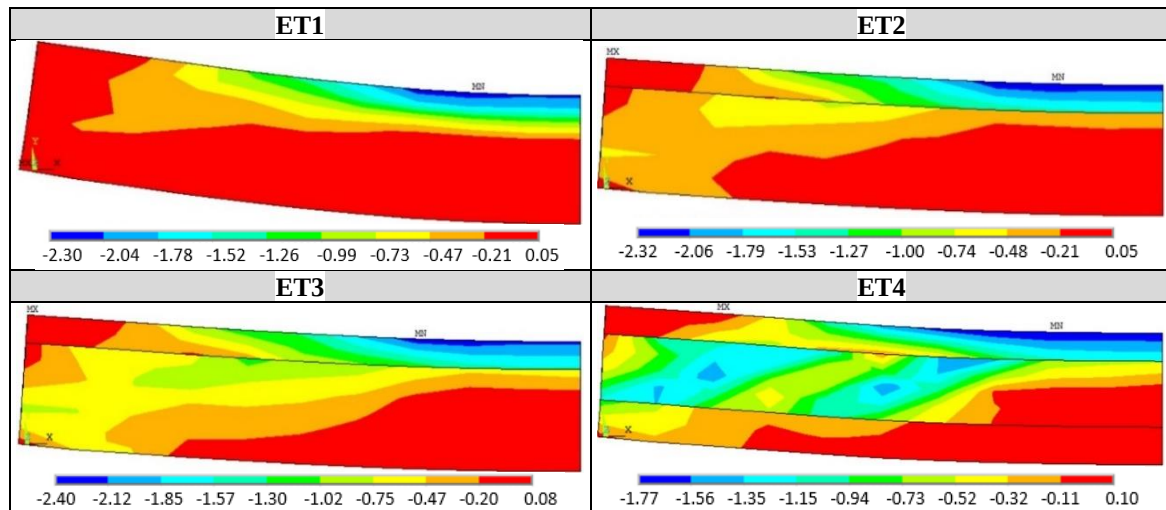


Figura 11. Tensão σ_x dos elementos de concreto, segundo o modelo computacional (unidades em kN/cm²)

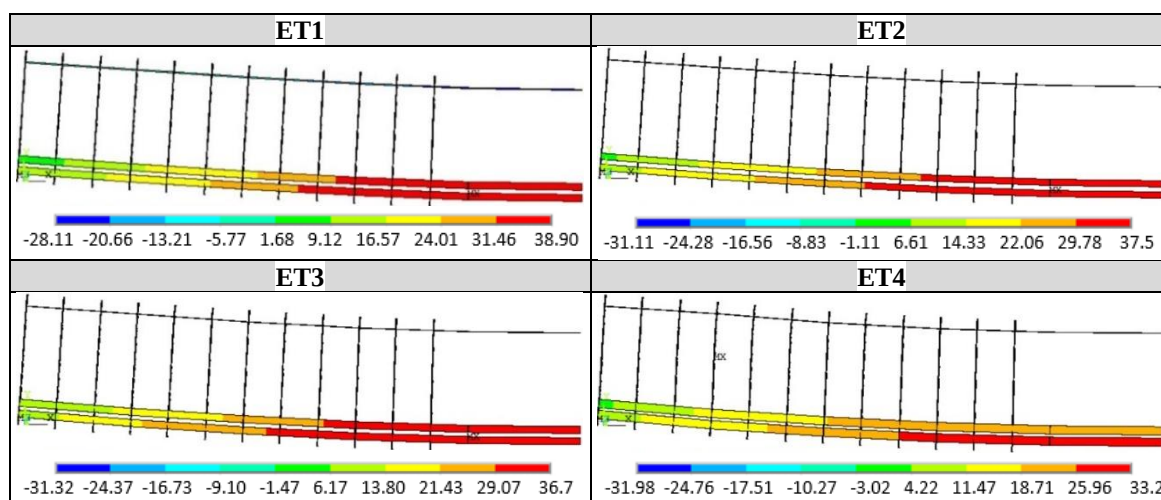


Figura 12. Tensões na armadura longitudinal e estribos, segundo o modelo computacional (unidades em kN/cm^2)

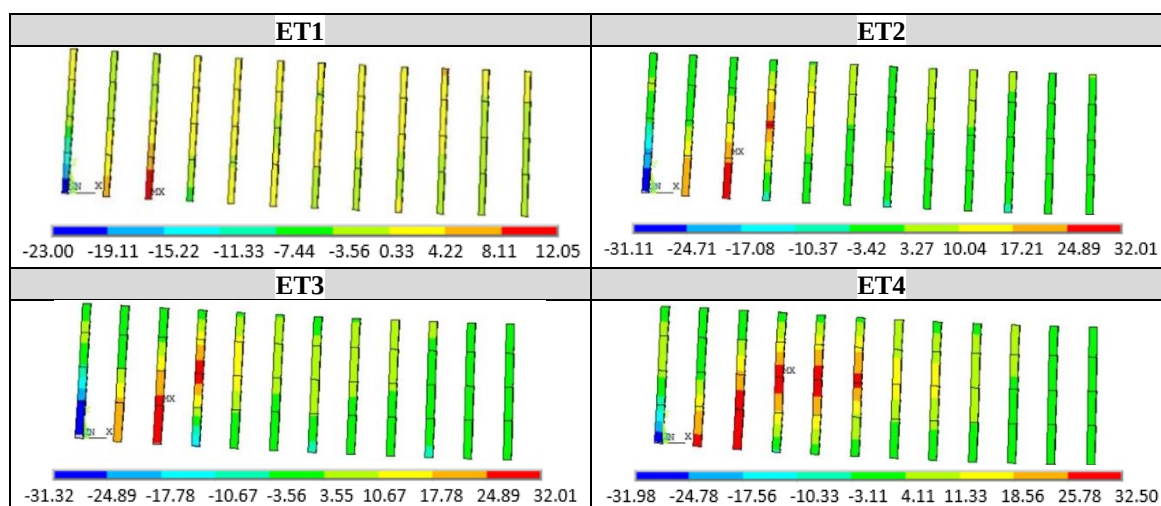


Figura 13. Tensões na armadura transversal, segundo o modelo computacional (unidades em kN/cm^2)

5 CONCLUSÕES

A partir deste trabalho, foi possível gerar, no software ANSYS, um modelo computacional que utiliza elementos de armadura incorporados aos elementos de concreto, o que diminuiu significativamente o esforço computacional e tornou a análise extremamente versátil. O software ANSYS mostrou-se muito eficiente para a implementação deste modelo, além de proporcionar uma ampla biblioteca de elementos finitos disponíveis internamente e ferramentas gráficas interessantes para a visualização dos resultados obtidos.

A fim de validar as sub-rotinas adicionadas ao programa principal, foram analisadas quatro vigas de concreto armado ensaiadas por Leonhardt e Walther (1962), as quais abrangem uma grande variedade de comportamentos, incluindo falhas por flexão e por corte. Foram observadas as tensões no concreto e nas barras de armadura, as deformadas da estrutura, os diagramas de

carga-deslocamento nos centros dos vãos das vigas, as cargas de ruptura, e os diagramas de deslocamento-tensão nas armaduras protendidas. Conforme o relatório apresentado no presente trabalho, a comparação entre as análises numéricas e experimentais mostraram resultados bastante satisfatórios. A análise completa dos resultados está apresentada integralmente em Lazzari (2015).

Com os bons resultados obtidos através deste modelo, verifica-se a possibilidade de se simular computacionalmente o funcionamento real de diferentes peças de concreto estrutural. Assim, pode-se concluir que a ferramenta UPF, disponibilizada pelo ANSYS, permite uma análise do comportamento destas estruturas em um tempo reduzido e de forma precisa, otimizando o aproveitamento dos materiais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico o apoio para realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

Ansys, 2013. *Inc. Theory reference* (Version 14.5).

Fédération Internationale du Béton. *fib Model Code* 2010, 2012. Bulletin No 65/66.

Hinton, E., 1988. *Numerical methods and software for dynamic analysis of plates and shells*. Swansea: Pineridge Press Limited, 550p.

Kunzler, P. S., 2013. *Análise paramétrica por elementos finitos de vigas de concreto armado e protendido pré-tracionadas com abertura na alma*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, Brasil.

Lazzari, B.M., 2015. *Análise por Elementos Finitos de Peças de Concreto Armado e Protendido sob Estados Planos de Tensão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, Brasil.

Leonhardt, F.; Walther, R., 1962. *Beiträge zur behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau*. Beton und Stahlbetonbau. v. 57. n. 7.

Ottosen, N. S., 1977. *A failure criterion for concrete*. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, v. 103, n.4, p.527-535.

Willam, K.J.; Warnke, E.P., 1975. *Constitutive models for the triaxial behavior of concrete*. International Association of Bridge Structures, Proceeding, v. 19, p. 1-30.