

USO DE ARMADURA INCORPORADA NO ANSYS CUSTOMIZADO PARA A ANÁLISE DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO

Bruna Manica Lazzari¹; Américo Campos Filho²; Paula Manica Lazzari³; Alexandre Rodrigues Pacheco⁴

Resumo

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de um modelo computacional, através do método dos elementos finitos, para análise não linear de estruturas em concreto armado sob estados planos de tensão com a utilização de armadura incorporada no ANSYS. O objetivo deste trabalho foi implementar dois procedimentos distintos no modelo computacional, baseados em um modelo elasto-viscoplastico. No primeiro, a resposta da estrutura é dada para um carregamento instantâneo, considerando o material com um comportamento elastoplástico. No segundo, a resposta da estrutura é dada ao longo do tempo, considerando, neste caso, que o material possui um comportamento viscoelástico. 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 Bresler e Scordelis (1963), 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.

Palavras-chave: Vigas de Concreto Armado; Armadura Incorporada; ANSYS; UPF.

¹ Professora e Doutoranda, UFRGS e PUCRS, bruna.ml@gmail.com, Porto Alegre, Brasil.

² Professor Doutor, UFRGS, americo@ufrgs.br, Porto Alegre, Brasil.

³ Professora Doutora, UFRGS, p.manica.lazzari@gmail.com, Porto Alegre, Brasil (correspondência).

⁴ Professor Doutor, UFRGS, apacheco@ufrgs.br, Porto Alegre, Brasil.

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, versão 14.5. 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 Bresler e Scordelis (1963), 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, as deformações e o tempo, 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 comprimido é composto por um critério de ruptura, por um critério de plastificação e por uma regra de endurecimento. Optou-se pelo uso do critério de ruptura proposto por Ottosen (1977), sugerido pelo Código Modelo *fib* 2010 (2012). O critério de Von Mises foi utilizado como critério de plastificação, e, como regra de endurecimento, foram aplicadas as equações propostas pelo Código Modelo *fib* 2010 (2012).

O concreto tracionado, por sua vez, é modelado como sendo um material elástico com amolecimento, ou seja, 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 Figura 1a está representada a superfície de ruptura de Ottosen (1977) e na Figura 1b está representado o diagrama tensão-deformação para o concreto tracionado. As tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 representam as tensões principais. A resistência à tração média do concreto, calculada a partir das formulações do Código Modelo *fib* 2010, é indicada por f_{tm} . O parâmetro ε_1 representa a deformação de formação da fissura. A deformação ε_{ref} corresponde ao máximo alongamento atingido pelo ponto de integração, sendo σ_{ref} a tensão correspondente. Na Figura 1b, α é um parâmetro que define a inclinação do ramo linear descendente e ε_{ctu} é um parâmetro que indica a deformação limite para a qual a colaboração do concreto entre fissuras não deve mais ser considerada. Neste trabalho, adotou-se, os valores de 0,6 e 0,001 para α e ε_{ctu} , respectivamente.

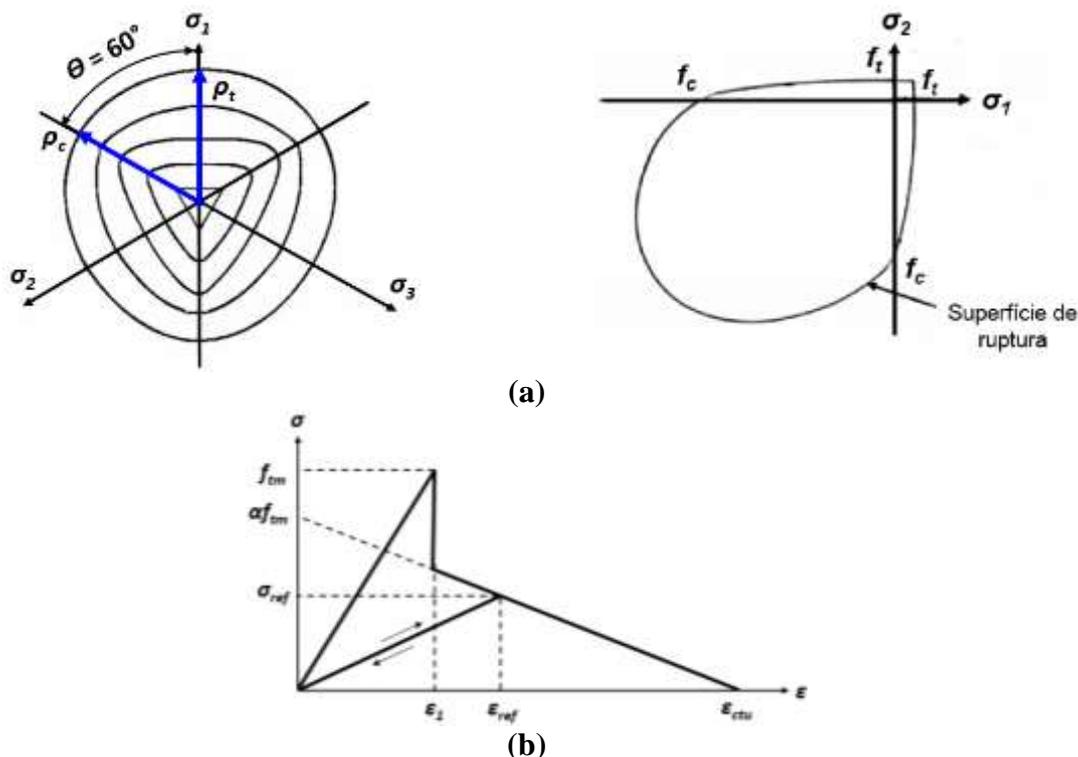


Figura 1. (a) Superfície de ruptura de Ottosen (1977); (b) Curva tensão-deformação para o concreto tracionado.

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 Figura 2a mostra a representação através do diagrama tensão-deformação bilinear do modelo elastoplástico perfeito, e a Figura 2b o diagrama referente ao modelo elastoplástico com endurecimento linear.

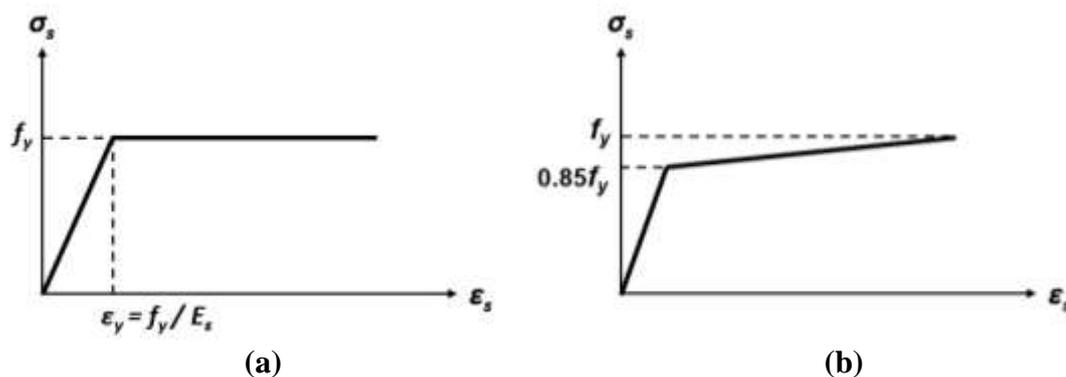


Figura 2. (a) Modelo elastoplástico perfeito; (b) Modelo elastoplástico com endurecimento linear.

2.3. Propriedades dependentes do tempo

Os efeitos dependentes do tempo, como a fluência e a retração no concreto, influenciam significativamente no comportamento do concreto, possuindo a mesma ordem de grandeza das deformações imediatas, geradas por níveis usuais de tensão. Estes efeitos devem, portanto, ser levados em consideração sempre que possível nas análises numéricas.

Para representar as deformações imediatas juntamente com as deformações não-imediatas, é possível utilizar um modelo viscoelástico. As deformações instantâneas provêm do modelo elástico, aparecendo de forma simultânea às tensões correspondentes, sem variar ao longo do tempo. Já as deformações não-imediatas, provêm do modelo viscoso, aparecendo com o passar do tempo, a medida em que o material é submetido a um certo carregamento.

Para representar o comportamento viscoelástico do material, utilizaram-se elementos do tipo Maxwell; que são compostos por dois elementos reológicos básicos: elementos elásticos (mola) em série com elementos viscosos (amortecedor). Como este elemento é muito simples para representar o comportamento de um material tão complexo quanto o concreto, foi utilizado, no presente estudo, o modelo das camadas superpostas, através de um conjunto de elementos tipo Maxwell.

No modelo das camadas superpostas define-se que o sólido analisado é composto por várias camadas, superpostas entre si, sendo que cada camada pode possuir tanto espessuras quanto propriedades mecânicas diferentes. As camadas sofrem juntas a mesma deformação total, sendo que cada uma contribui com uma parcela, conforme sua espessura e_i . Para este estudo, o modelo reológico adotado para simular o comportamento viscoelástico dos materiais, foi uma cadeia de 5 elementos de Maxwell, associados em paralelo. Nas Figuras 3a e 3b, estão representados o modelo das camadas superpostas e o modelo de Maxwell generalizado, respectivamente.

A determinação dos parâmetros da função de fluência e de retração do concreto, foi feita de acordo com as recomendações do Código Modelo *fib* 2010 (2012). Neste estudo não foi considerado o efeito da deformação térmica, sendo as condições de temperatura utilizadas apenas na calibração do desenvolvimento das propriedades do concreto no decorrer do tempo.

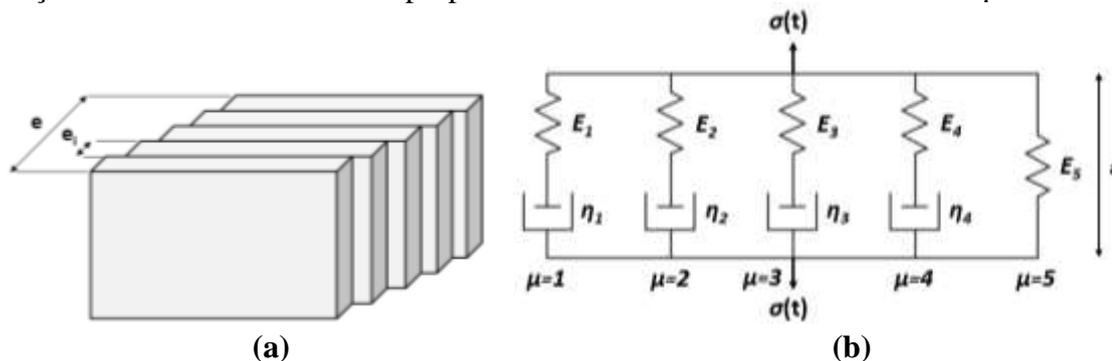


Figura 3. (a) Modelo das camadas superpostas; (b) Modelo de Maxwell generalizado.

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, 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 Figura 4a está representada a geometria do elemento PLANE183 e na Figura 4b estão indicados os tipos de elementos finitos que suportam o elemento de reforço REINF263.

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.

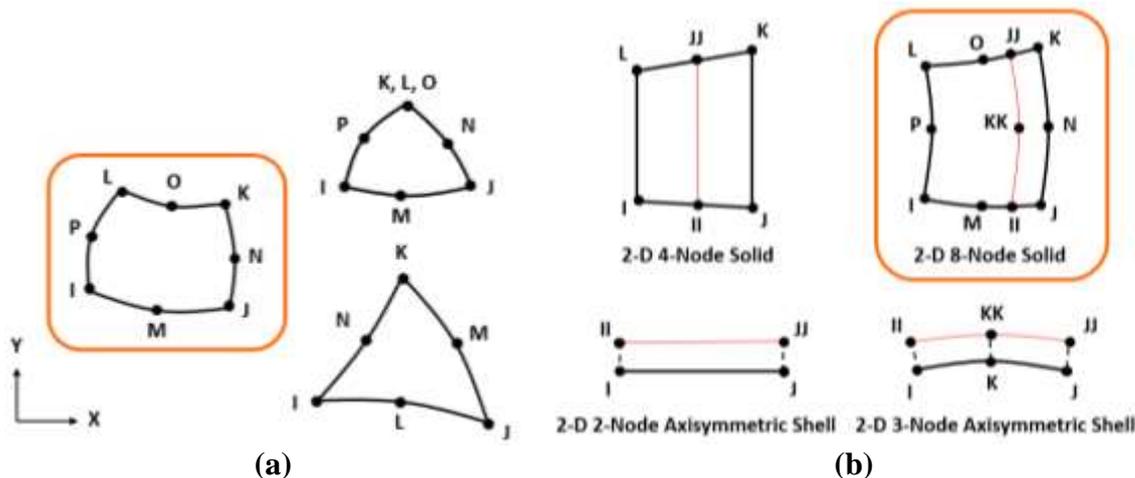


Figura 4. (a) Elemento PLANE183; (b) Tipos de elementos que suportam o elemento REINF263.

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 Figura 5. 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.

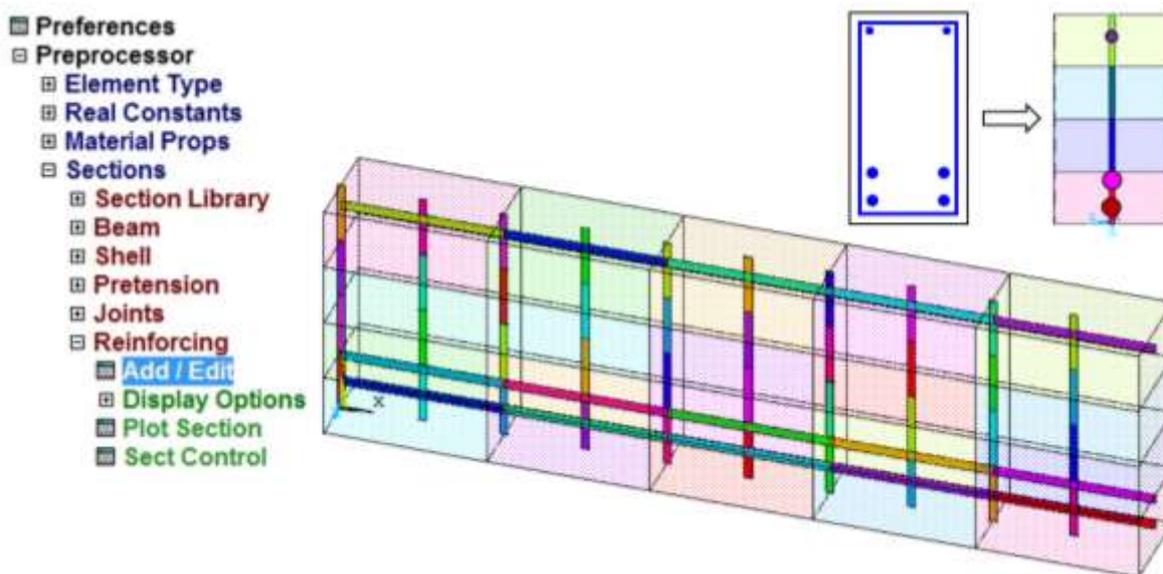


Figura 5. Exemplo de discretização com elementos REINF263.

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 elasto-viscoplástico 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 Figura 6, 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 6. Exemplo de utilização da rotina USERMAT para o concreto.

O parâmetro correspondente às etapas de cálculo, presente na Figura 6, é referente aos dois procedimentos distintos utilizados para simular o comportamento elasto-viscoplástico do concreto. O primeiro deles, denominado etapa 1, visa a calcular o estado de deformação da estrutura, decorrido um certo período de tempo da aplicação do carregamento; já o segundo, denominado etapa 2, procura obter a resposta da estrutura submetida a um carregamento instantâneo. No modelo

computacional, permite-se que sejam aplicados tantos carregamentos quanto necessários, sendo as etapas executadas sucessivamente, de acordo com as datas especificadas dos carregamentos.

Na etapa 1, determina-se a resposta da estrutura ao longo do tempo através de um processo incremental do tempo real (em dias). Para este estudo, utilizou-se um intervalo de tempo fixo e igual a um dia. Esta etapa refere-se, portanto, ao comportamento viscoelástico do concreto, para o qual foi definido um modelo de cinco camadas, levando-se em conta os efeitos de fluência e retração. Neste procedimento de cálculo, a tensão total é dividida para cada ponto de integração, para cada uma das cinco camadas, conforme o valor do seu módulo de elasticidade longitudinal.

Na etapa 2, busca-se o equilíbrio da estrutura após a aplicação do incremento de carga. Esta fase corresponde, portanto, ao estado estável, onde o comportamento elastoplástico da estrutura é analisado. Neste caso, considera-se uma única camada para os materiais, ou seja, no início desta etapa, calcula-se, em cada ponto de integração, uma tensão total, que é igual ao somatório das tensões em cada uma das cinco camadas, obtidas na etapa 1.

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 Figura 7. 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. O módulo tangente não pode ser inferior a zero, ou maior do que o módulo de elasticidade inicial.

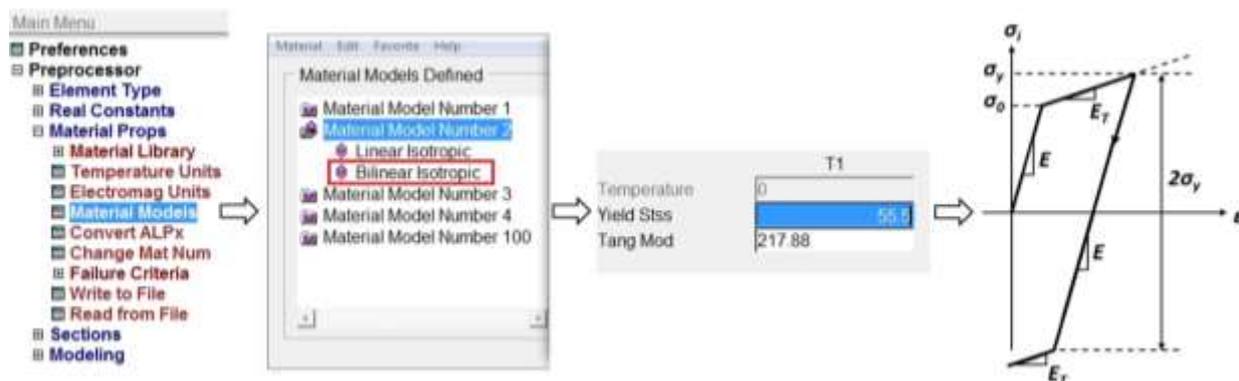


Figura 7. Modelo BISO - ANSYS.

4. ANÁLISE DE 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 doze vigas bi-apoiadas de concreto armado, ensaiadas por Bresler e Scordelis (1963) é apresentado a seguir. Estas vigas foram divididas em quatro grupos (OA, A, B e C) e três séries (1, 2 e 3). Cada grupo possui a mesma seção transversal de concreto e cada série se diferencia pela quantidade de armadura longitudinal, pelo comprimento do vão e pela resistência e módulo de elasticidade do concreto (Figura 9). Vale salientar que as vigas da série OA não contêm estribos. Todas as vigas foram submetidas a cargas concentradas monotonicamente aplicadas em seu centro, como pode ser observado na Figura 8.

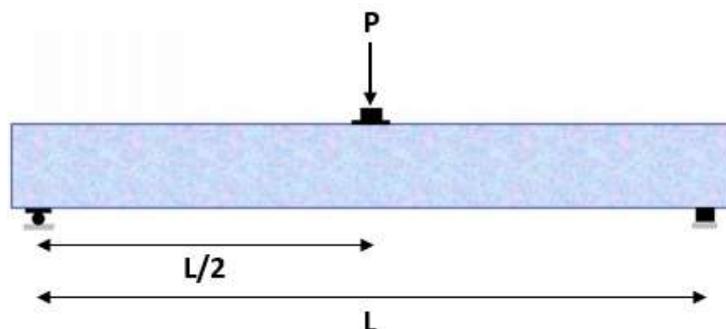


Figura 8. Esquema do carregamento na seção longitudinal das vigas de Bresler e Scordelis (1963).

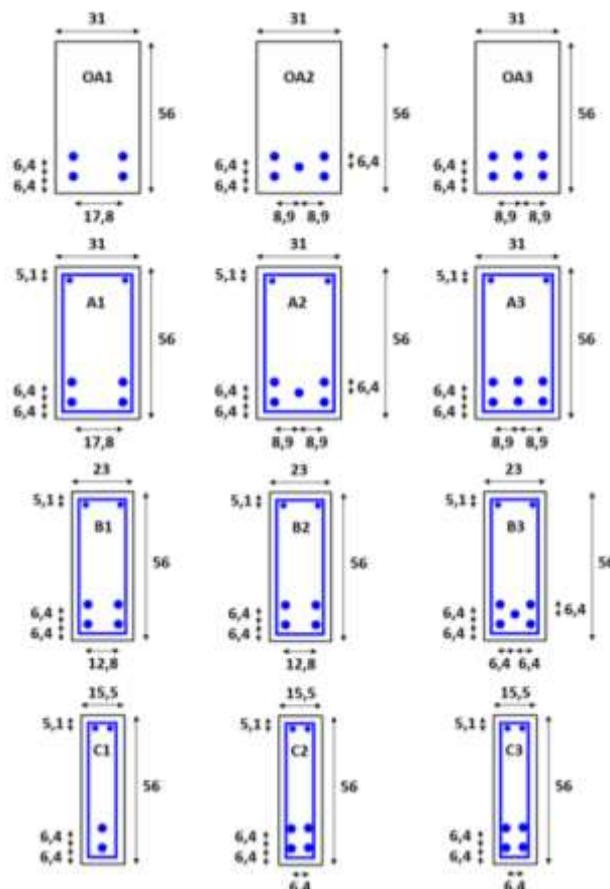


Figura 9. Detalhes das seções transversais das vigas de Bresler e Scordelis (1963) (cotas e medidas em centímetros).

Detalhes sobre a seção transversal, vão e características do concreto de cada viga são apresentados na Tabela 1. Observa-se que o vão das vigas da série 1 é o menor, com 3,66 m, aumentando para 4,57 m nas vigas da série 2, e para 6,4 m para as vigas da série 3. Conforme indicado na tabela, todas as vigas possuem a mesma altura h , que é igual a 56 cm. Nas Tabelas 2 e 3 são apresentadas as características das armaduras transversais e longitudinais.

A tabela 2 mostra as informações de tensão de escoamento e módulo de elasticidade para as armaduras inferiores (A_s), superiores (A'_s), e estribos. Os dados sobre o detalhamento, quantidade de barras e bitolas utilizadas, estão listados na tabela 3. Esta tabela indica que as barras de armadura longitudinal tracionada têm um diâmetro de 28,7 mm e as barras da armadura comprimida, um diâmetro de 12,7 mm. Quando usados, os estribos tem uma bitola de 6,4 mm.

Tabela 1. Propriedades do concreto e da seção transversal das vigas.

VIGAS	f_c (kN/cm ²)	E_c (kN/cm ²)	Vão (cm)	h (cm)	b (cm)	OBSERVAÇÃO
OA1	2,25	2413	366			
OA2	2,37	2413	457	56	31	sem estribos
OA3	3,76	3447	640			
A1	2,41	2413	366			
A2	2,43	2413	457	56	31	com estribos
A3	3,50	3447	640			
B1	2,48	2413	366			
B2	2,32	2413	457	56	23	com estribos
B3	3,87	3447	640			
C1	2,96	2413	366			
C2	2,38	2413	457	56	15,5	com estribos
C3	3,50	3447	640			

Tabela 2. Propriedades das armaduras longitudinais e transversais das vigas.

SÉRIES	A_s		A'_s		ESTRIBOS	
	f_y (kN/cm ²)	E_s (kN/cm ²)	f_y (kN/cm ²)	E_s (kN/cm ²)	f_y (kN/cm ²)	E_s (kN/cm ²)
1	55,5	21787				
2	55,5	21787	34,54	20133	32,54	18961
3	55,3	20546				

Tabela 3. Detalhamento da armadura das vigas.

VIGAS	A_s		A'_s		ESTRIBOS
	Área (cm ²)	Barras	Área (cm ²)	Barras	
OA1	25,88	4 Ø 28,7 mm			
OA2	32,35	5 Ø 28,7 mm	-	-	-
OA3	38,81	6 Ø 28,7 mm			
A1	25,88	4 Ø 28,7 mm			
A2	32,35	5 Ø 28,7 mm	2,53	2 Ø 12,7 mm	Ø 6,4 mm c/ 21 cm
A3	38,81	6 Ø 28,7 mm			
B1	25,88	4 Ø 28,7 mm			
B2	25,88	4 Ø 28,7 mm	2,53	2 Ø 12,7 mm	Ø 6,4 mm c/ 19 cm
B3	32,35	5 Ø 28,7 mm			
C1	12,94	2 Ø 28,7 mm			
C2	25,88	4 Ø 28,7 mm	2,53	2 Ø 12,7 mm	Ø 6,4 mm c/ 21 cm
C3	25,88	4 Ø 28,7 mm			

Para o estudo computacional destas doze vigas, aproveitando a simetria de geometria e carregamento, dividiu-se a altura de cada peça em quatro elementos e a metade do comprimento longitudinal em cinco, conforme indica a Figura 10. No interior destes elementos foram acrescentados os elementos REINF263, para representar a armadura incorporada das vigas. A Figura 10 apresenta ainda uma vista isométrica dos elementos do ANSYS utilizados em cada modelo. Em relação às restrições, foi adicionado um apoio simples, na direção Y, ao nó inferior do elemento de extremidade da viga (elemento 1) e apoios simples, na direção X, em todos os nós localizados no meio do vão da peça (elementos 5, 10, 15 e 20).

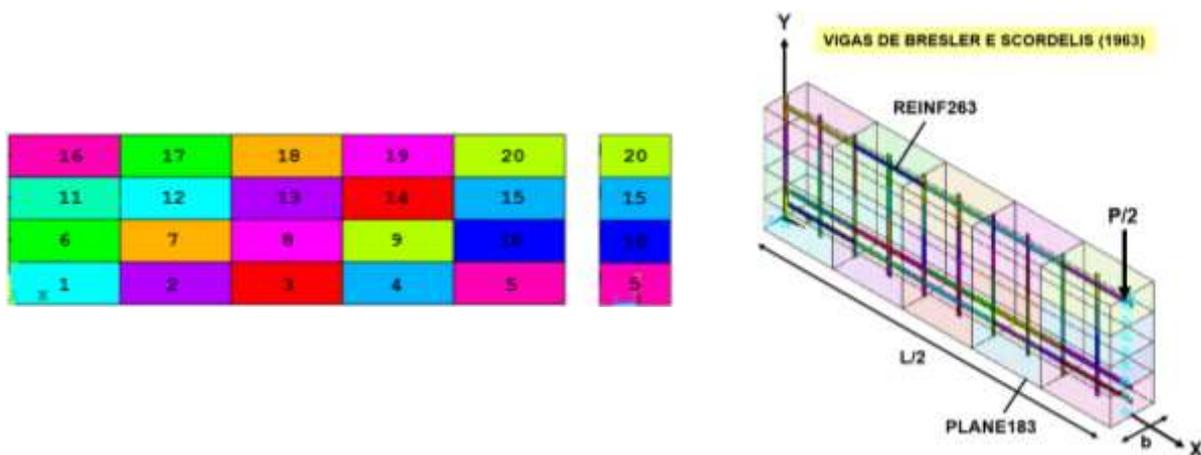


Figura 10. Discretização em elementos finitos para modelagem numérica das vigas de Bresler e Scordelis (1963).

Na Figura 11 é possível observar as curvas carga-deslocamento das vigas AO, A, B e C das séries 1, 2 e 3. Para simular o carregamento instantâneo destas vigas até a sua ruptura, foi aplicado um 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 (elemento 5). De um modo geral obteve-se boa aproximação entre as respostas numéricas e os resultados experimentais de Bresler e Scordelis (1963).

Com base nestas curvas, observa-se que os menores valores das cargas de ruptura foram obtidos pelas vigas do grupo C, ou seja, as vigas com menores dimensões de seções transversais. As vigas que suportaram maior valor de carga, em contrapartida foram as vigas do grupo A.

A fim de observar a distribuição de tensões no concreto e na armadura ao longo da estrutura, indica-se nas Figuras 12 a 16 a distribuição de tensões para as vigas mais curtas (série 1) e para as vigas com maior vão (série 3), no momento de aplicação da carga de ruptura.

Com base na análise dos resultados obtidos pelo modelo numérico, foi possível concluir que as vigas de maiores comprimentos de vão (série 3) rompem por flexão com esmagamento do concreto, ocorrendo uma pequena influência do cisalhamento. Nestas vigas é possível observar que as armaduras inferiores já estão entrando em escoamento. Já, as vigas de comprimentos de vão curtos e intermediários (séries 1 e 2) rompem por flexão e cisalhamento, apresentando estribos mais solicitados na região de fissuras inclinadas.

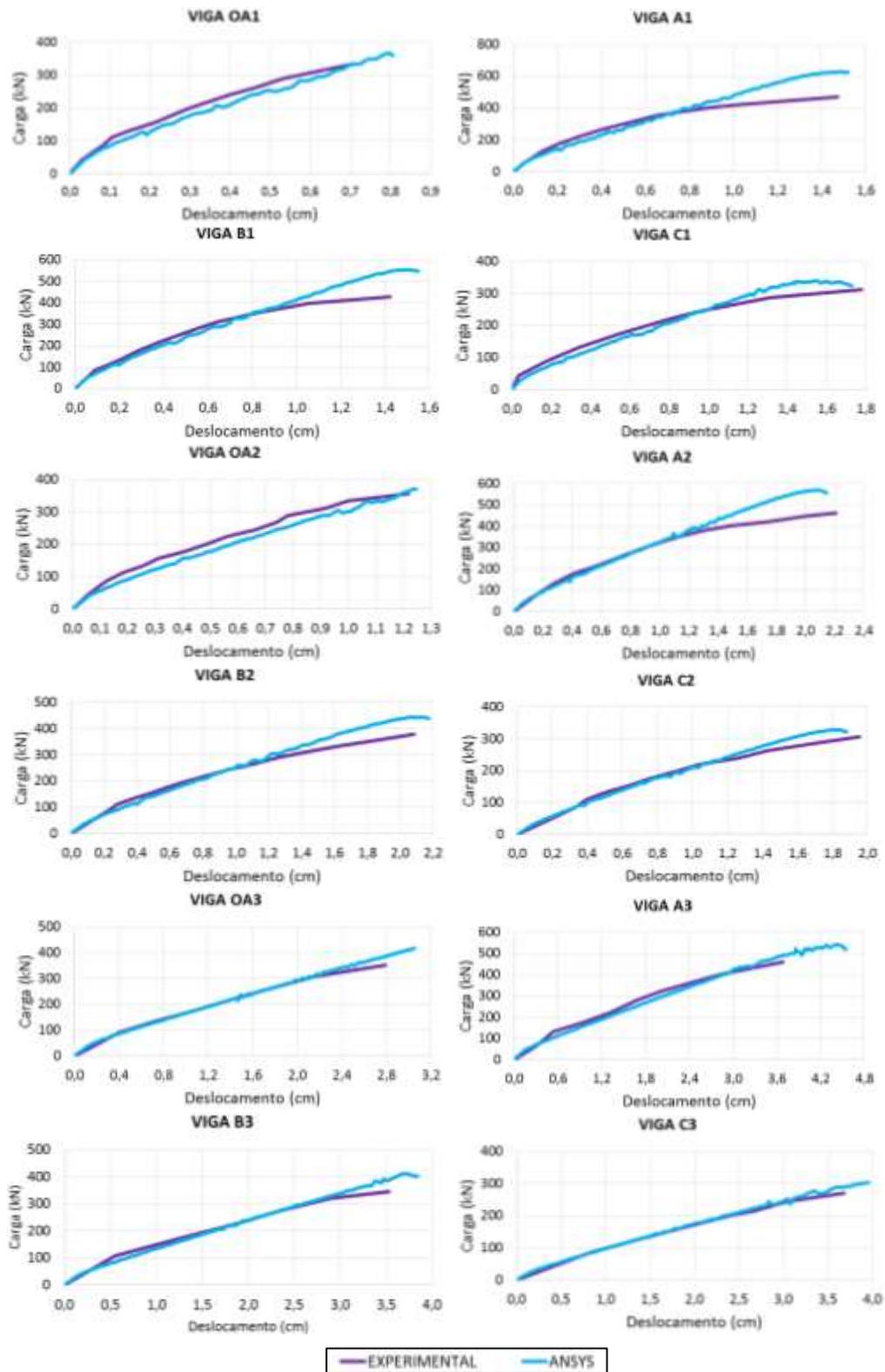


Figura 11. Comparação entre as flechas obtidas no ensaio experimental e pelo modelo computacional, para as vigas de Bresler e Scordelis (1963).

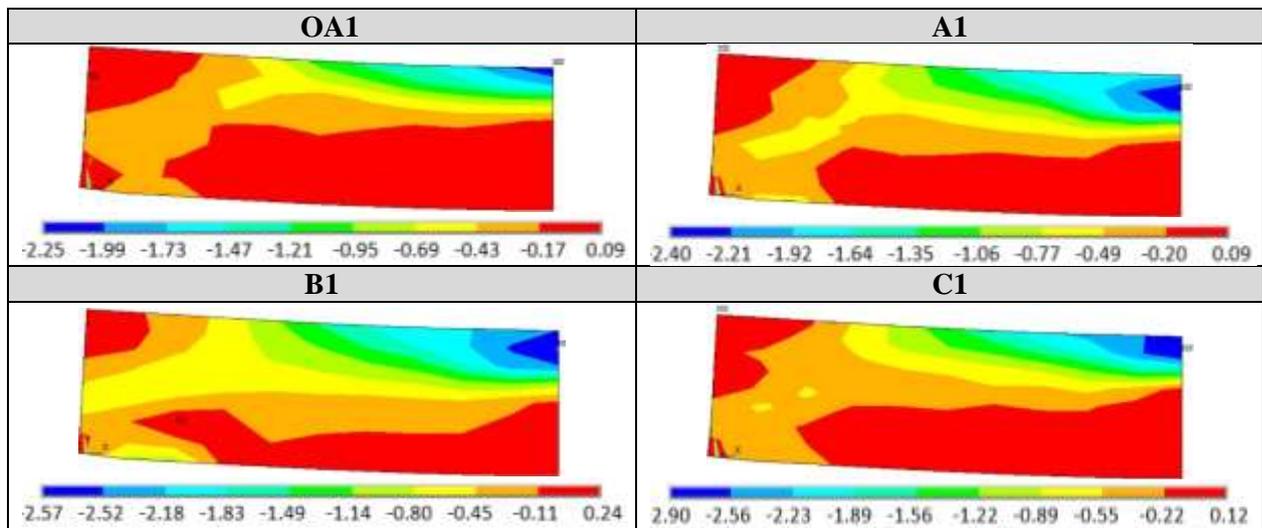


Figura 12. Tensão σ_x nos elementos de concreto das vigas OA1, A1, B1 e C1, segundo o modelo computacional (unidades em kN/cm²).

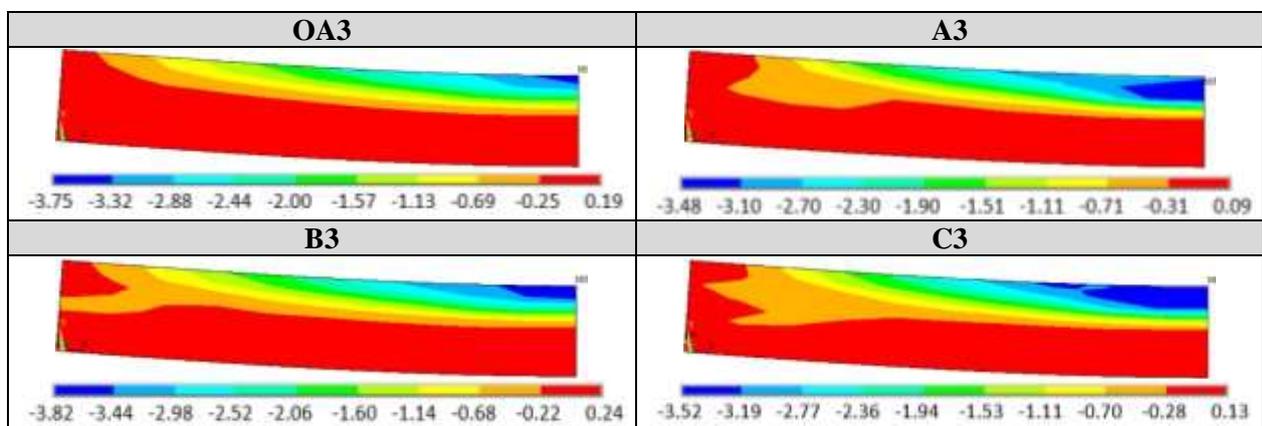


Figura 13. Tensão σ_x nos elementos de concreto das vigas OA3, A3, B3 e C3, segundo o modelo computacional (unidades em kN/cm²).

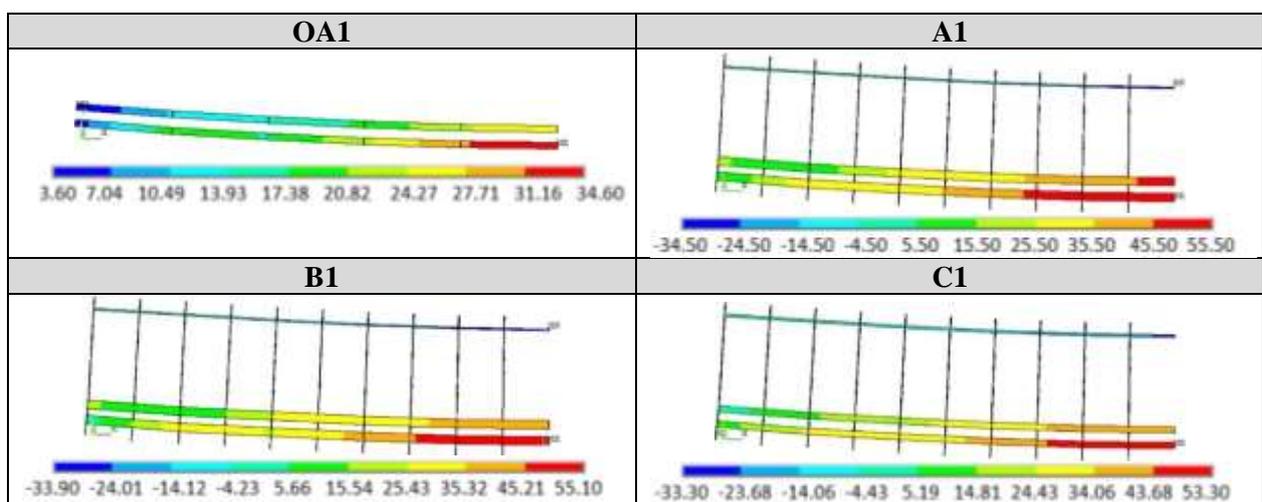


Figura 14. Tensões na armadura longitudinal e estribos das vigas OA1, A1, B1 e C1, segundo o modelo computacional (unidades em kN/cm²).

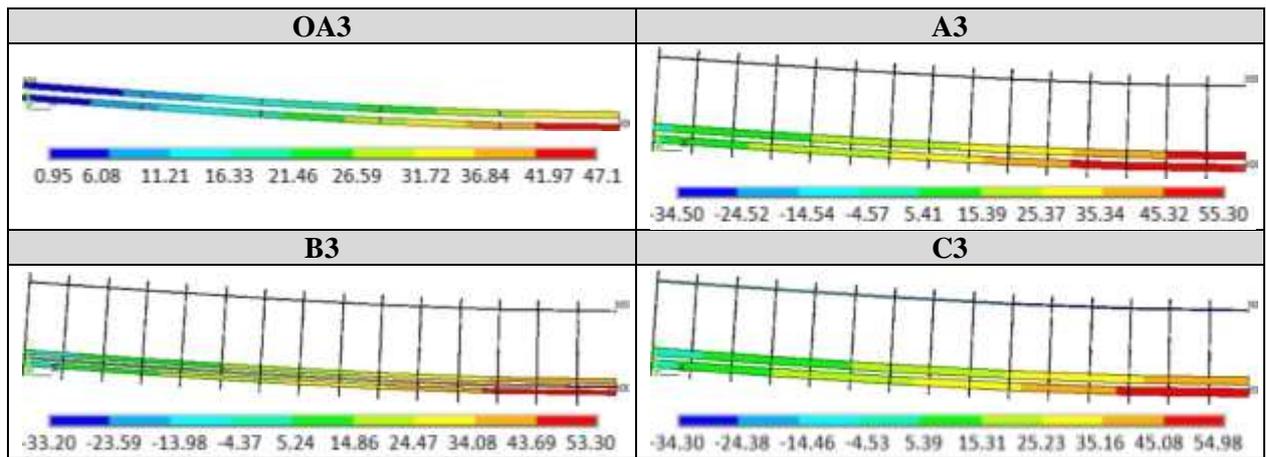


Figura 15. Tensões na armadura longitudinal e estribos das vigas OA3, A3, B3 e C3, segundo o modelo computacional (unidades em kN/cm²).

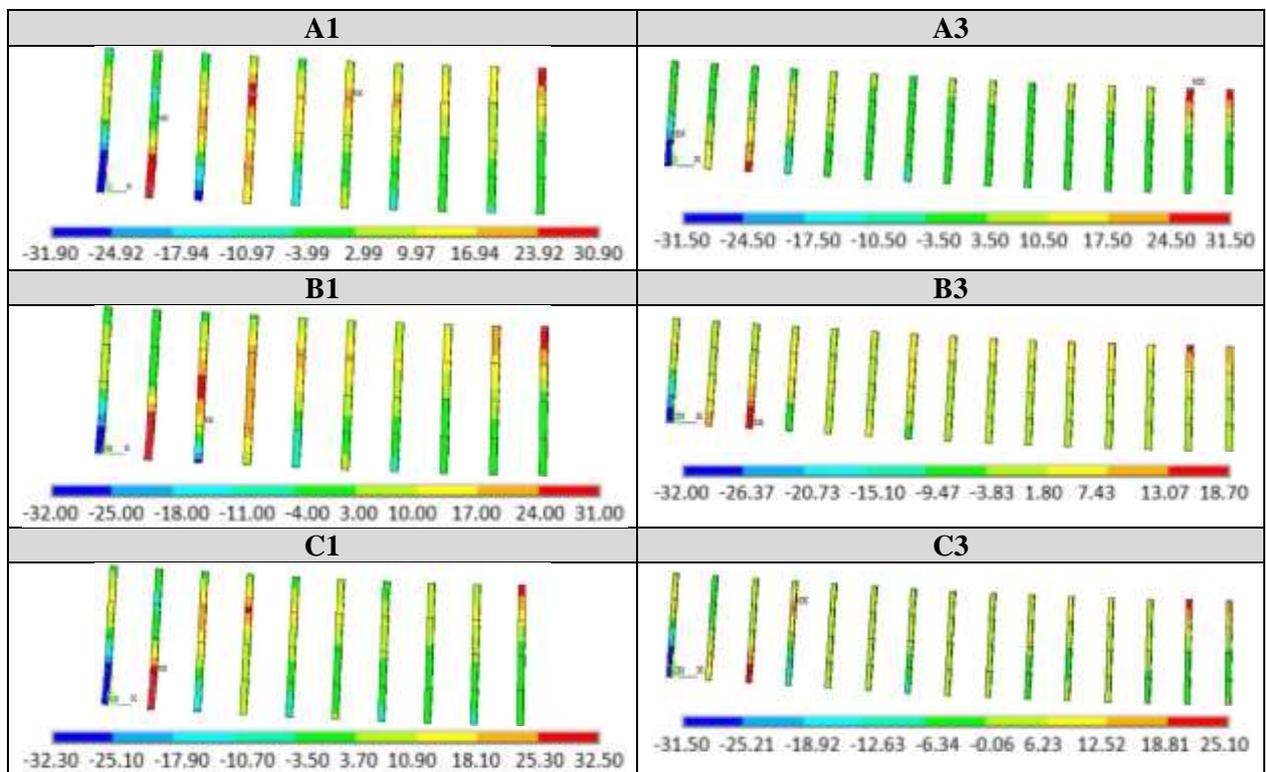


Figura 16. Tensões na armadura transversal das vigas das séries 1 e 3, segundo o modelo computacional (unidades em kN/cm²).

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. Este modelo elasto-viscoplástico com fissuração foi implementado em linguagem FORTRAN no sistema de customização do ANSYS (UPF), levando em conta os modelos de compressão e tração do

concreto. 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 doze vigas de concreto armado ensaiadas por Bresler e Scordelis (1963), 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 e os diagramas de carga-deslocamento nos centros dos vãos das vigas. 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bresler, B. e Scordelis, A.C. (1963). Shear strength reinforced concrete beams. *ACI Journal*, v. 60, n. 1, p. 51-72.
- 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. Pineridge Press Limited, Swansea, Wales, UK.
- 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 PósGraduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, Brasil.
- Ottosen, N. S. (1977). A failure criterion for concrete. *Journal of Engineerign Mechanics Division, ASCE*, v. 103, n.4, p.527-535.
- Willam, K.J. e Warnke, E.P. (1975). Constitutive models for the triaxial behavior of concrete. *International Association of Bridge Structures, Proceeding*, v. 19, p. 1-30.

USE OF EMBEDDED REINFORCEMENT FE ELEMENTS IN CUSTOMIZED ANSYS FOR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

ABSTRACT

This work 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. The ultimate goal of this work is to implement two different procedures in the computational model that are based on an elasto-viscoplastic model. In the first procedure, the response of the structure is given for an instantaneous loading, considering the material with an elastoplastic behavior. In the second one, the response is given over time, considering the material as having a viscoelastic behavior. The representation of the constitutive equations of concrete and steel is carried out through a new model 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 eight-node quadratic elements (PLANE183) with embedded reinforcement elements (REINF263), making the solution of the problem faster and more effective. In order to validate the subroutines added to the system, the reinforced concrete beams tested by Bresler and Scordelis (1963), which cover a wide variety of structural behaviors, were modeled and analyzed with the procedures proposed. The comparison between experimental and numerical analysis showed a good adherence between results.

Keywords: Reinforced Concrete Beams; Embedded Reinforcement; ANSYS; UPF.

CONCLUSIONS

Through this work, it was possible to implement, in the ANSYS platform, a computational model that uses reinforcing bar FE elements embedded to the concrete FE elements, reducing considerably the computational effort and turning the process of modeling into an extremely versatile one. This elasto-viscoplastic model with cracking was implemented in FORTRAN language in the ANSYS customization system (UPF), taking into account concrete compression and tensile models.

The ANSYS platform showed to be very appropriate for this kind of model implementation since it presents a large finite element (FE) library that is internally available, as well as gives useful graphical tools to help in the visualization and post-processing of the obtained results.

The validation of the subroutines added to the main program was carried out by modeling and analyzing twelve reinforced concrete beams lab tested by Bresler and Scordelis (1963), which are well-known for presenting a large range of structural behaviors, showing failures that go from lower to higher levels of both shear and flexure.

The level of stress was assessed both in the concrete and in the rebar elements, as well as observing the strains and the measured load-displacement diagrams for the midspans of the beams.

According to what is reported in this work, the comparison between the numerical results and the lab experiment data show that they present a quite good agreement. The complete analysis of the results is presented in the work by Lazzari (2015).

Considering the good results obtained with the proposed model, the task of computationally simulating the real behavior of different structural concrete elements becomes more possible. Additionally, it can be also concluded that the UPF capability offered in the ANSYS platform allows the analysis of structural concrete elements in a precise and less time-consuming fashion, optimizing the use of materials.