

ANÁLISE NÃO LINEAR DE LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO O ANSYS APDL 15.0

Gustavo Ribeiro da Silva (Mestrando da Universidade Federal do Rio Grande do Sul) E-mail: gustavoribeirods@gmail.com

Américo Campos Filho (Professor Titular da Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

Mauro de Vasconcellos Real (Professor Titular da Universidade Federal do Rio Grande)

Resumo: Este artigo foi elaborado para demonstrar a eficácia de um modelo de elementos finitos, 3D, não linear, utilizando um modelo constitutivo elastoplástico para o concreto, implementado através da ferramenta UPF (*User Programmable Features*) do software ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*). Os modelos analisados são de lajes lisas, lajes que se apoiam diretamente em pilares sem a presença de capitéis, com e sem armadura de cisalhamento. A avaliação do modelo adotado é feita através da comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais de outros autores. Assim, no final é verificado a eficiência do modelo e discutidos os pontos mais relevantes no que diz respeito à modelagem numérica realizada.

Palavras-chave: Elementos finitos, lajes lisas, ANSYS, Sistema UPF.

NONLINEAR ANALYSIS OF FLAT SLABS OF REINFORCED CONCRETE USING ANSYS APDL 15.0

Abstract: This article was elaborated to demonstrate the efficiency of a 3D, nonlinear, finite element model, using a elastoplastic constitutive model for the concrete, implemented through the UPF (*User Programmable Features*) tool of ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*) software. The analyzed models are flat slabs with and without shear reinforcement. Evaluation of the model was performed through comparison of the numeric results with experimental results from other authors. Therefore, the model efficiency is verified and the most relevant issues are discussed, regarding the numeric modeling performed.

Keywords: Finite element, flat slabs, ANSYS, UPF System.

1. INTRODUÇÃO

As demandas do mercado da construção civil têm exigido vãos cada vez maiores e, ao mesmo tempo, alturas das vigas cada vez menores. Isto tem levado muitos projetistas à adoção da solução do pavimento em laje lisa em concreto armado ou protendido. O pavimento sem vigas permite uma menor altura entre lajes e uma maior liberdade de divisão interna em prédios comerciais ou residenciais, economia de formas e concreto, facilidades nos projetos complementares, facilidade de armação e concretagem, menores prazos de execução, menores cargas nas fundações devido à diminuição do peso próprio da estrutura, maior ventilação e iluminação e maior liberdade arquitetônica. No entanto, a ausência das vigas torna possível a ruptura das lajes por punção junto aos pilares.

A punção em lajes ocorre devido às reações localizadas dos pilares diretamente em uma pequena área da laje, fazendo com que as tensões sejam elevadas nessas regiões. A principal consequência dessas tensões de cisalhamento elevadas é a ruptura caracterizada pela ausência de escoamento da armadura, gerando uma ruptura frágil e sem aviso prévio. Devido a essa característica, deve-se dimensionar a estrutura para que, caso a ruína ocorra, ela não se dê por punção, mas sim por flexão. A resistência à punção, quando dimensionada inadequadamente, pode causar graves acidentes como o colapso de uma laje ou mesmo a ruína total da estrutura.

Além do problema da punção, o comportamento altamente não linear dos materiais dificulta a análise e a compreensão desse tipo de estrutura. Assim, é apresentada nesse

trabalho uma análise não linear de lajes lisas de concreto armado através do método dos elementos finitos, utilizando o software ANSYS APDL v15.0, com o intuito de demonstrar a capacidade do modelo adotado.

A ferramenta de customização do ANSYS, UPF (*User Programmable Features*), foi utilizada para adoção de um modelo constitutivo implementado por Lazzari (2016) e modificado neste estudo. Essa ferramenta possibilitou a implementação, em linguagem FORTRAN (*Formula Translation System*), de um modelo elastoplástico com fissuração para a modelagem do concreto. Utilizando o software, foram modeladas lajes estudadas por outros autores, visando a validação do modelo numérico implementado.

2. MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

O modelo constitutivo disponibilizado pelo ANSYS para representação do comportamento do concreto é o modelo *concrete*, baseado no modelo de Willam & Warnke, que possui cinco parâmetros que controlam a superfície de ruptura. Esse modelo representa de forma satisfatória o comportamento do concreto, porém o uso dele no programa limita-se ao uso do elemento SOLID65. Além disso, o modelo pode apresentar instabilidades numéricas durante a sua utilização, sendo necessário desabilitar a consideração do concreto esmagado. Deste modo, com intenção de se utilizar um elemento que permita o uso de armaduras incorporadas e que represente de forma real o comportamento do concreto, optou-se pelo emprego da ferramenta de customização UPF. Esse modelo é explicado de forma concisa nos itens a seguir.

2.1 MODELO PARA O CONCRETO

Para descrever o comportamento do concreto, adotaram-se dois modelos diferentes, um para o concreto comprimido e outro para o concreto tracionado. O modelo do concreto comprimido é composto por um critério de ruptura, um critério de plastificação e por uma regra de endurecimento.

O critério de ruptura adotado é o de Ottosen (1977), o qual é adotado pelo Código Modelo fib 2010 (2012). Essa superfície de ruptura é representada por seções dos planos desviadores conforme Figura 1. O critério de plastificação utilizado foi o de Von Mises, considerando-se que o concreto comprimido tenha endurecimento isotrópico e que as superfícies de plastificação tenham a mesma forma da superfície de ruptura.

A movimentação da superfície de plastificação durante a deformação plástica é definida por uma regra de endurecimento, que é determinada pela relação tensão-deformação plástica efetiva, sendo possível extrapolar os resultados de um ensaio uniaxial para uma situação multiaxial. Foi utilizado o diagrama tensão-deformação proposto pelo Código Modelo fib 2010 (2012) para representar o concreto comprimido, conforme mostra a Figura 2.

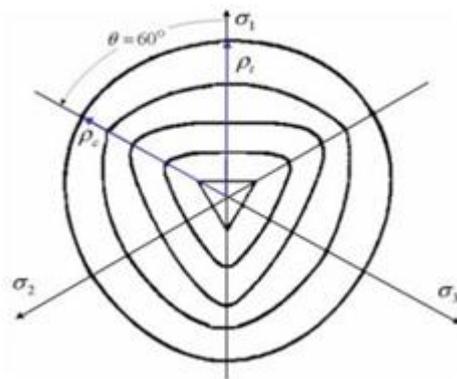


Figura 1 - Seções dos planos desviadores

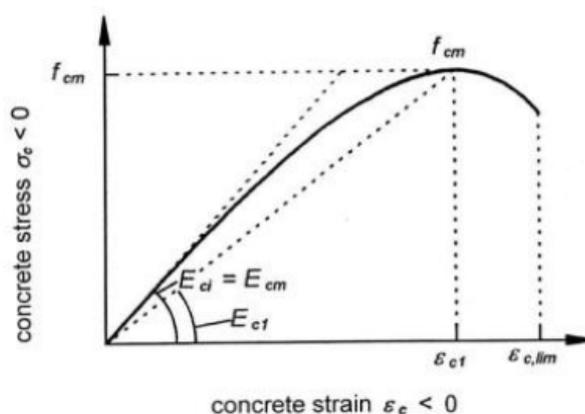


Figura 2 - Diagrama tensão-deformação para o concreto comprimido

O concreto tracionado foi modelado como sendo um material elástico com amolecimento. Antes de fissurar, o concreto comportou-se como um material elástico linear e, após a fissuração, utilizou-se o modelo de fissuras distribuídas. O modelo de fissuras distribuídas avalia o dano da fissuração modificando as propriedades do material e atualizando a relação tensão-deformação. Foi adotado o critério proposto pelo boletim nº 156 do CEB para verificar a fissuração do concreto. De acordo com esse critério, tem-se que:

- a) Se $\sigma_1 \geq f_{tm}/2$, o ponto de integração fissurou;
- b) Se $\sigma_1 < f_{tm}/2$, o ponto de integração esmagou.

Onde:

σ_1 = Tensão principal de tração;

f_{tm} = Resistência média a tração do concreto.

Para a consideração da contribuição na resistência a esforços de tração após a fissura, Lazzari (2016) adotou a metodologia proposta por Hinton (1988), que considera a degradação da aderência, ocasionando perda na resistência à tração pós-fissuração através da introdução de um ramo descendente na curva tensão-deformação, conforme mostra a Figura. 3.

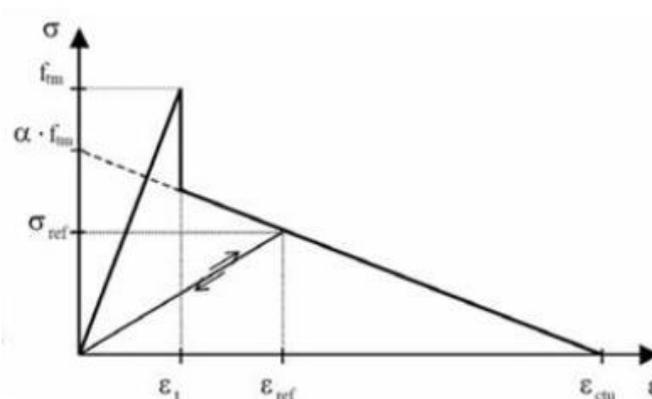


Figura 3 - Diagrama tensão-deformação para o concreto tracionado

2.2 MODELO PARA O AÇO

Adotaram-se dois modelos constitutivos para a modelagem do aço: o modelo elastoplástico perfeito e o modelo elastoplástico com endurecimento linear. A determinação do modelo adotada para cada aço depende do processo fabricação. Os dois modelos podem ser representados pelo modelo interno do ANSYS, denominado BISO (*Bilinear Isotropic Hardening*), sendo utilizados dois parâmetros de entrada, a tensão de escoamento inicial (σ) e o módulo de endurecimento (E_t).

Para aços obtidos por laminação a quente com patamar de escoamento bem definido adotou-se o modelo elastoplástico perfeito (Figura 4). Para os aços encruados a frio adotou-se o modelo elastoplástico com endurecimento linear a partir de 0,85 da tensão de escoamento (Figura 5).

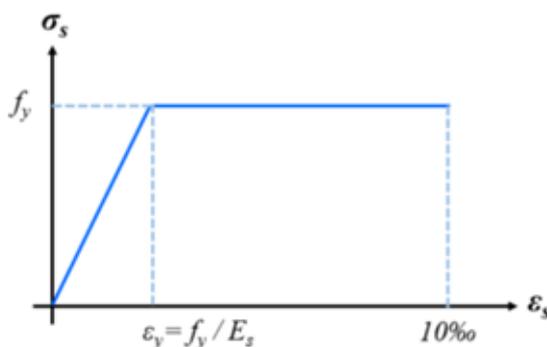


Figura 4 – Modelo elastoplástico perfeito para o aço

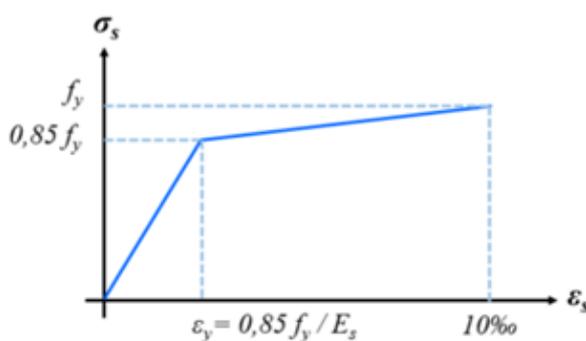


Figura 5 – Modelo elastoplástico com endurecimento linear

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para a escolha dos elementos finitos, levou-se em consideração aspectos relacionados ao tipo de análise, tempo de processamento computacional, número de graus de liberdade e a possibilidade do uso de armaduras incorporadas, devido à eficiência na programação do modelo numérico e à maior liberdade na utilização da malha de elementos finitos, necessitando assim, um esforço computacional menos oneroso.

Para modelagem do concreto da laje foi utilizado o elemento SOLID186, sendo este um elemento quadrático tridimensional com três graus de liberdade por nó (translação segundo os eixos X, Y e Z), composto por 20 nós distribuídos conforme a Figura 6a. Esse elemento pode apresentar, além da configuração hexaédrica, configurações piramidal, prismática ou tetraédrica, permitindo que a malha se adapte à geometria do modelo. A escolha desse elemento foi baseada na possibilidade da formulação de materiais com plasticidade, possibilidade do uso de armadura incorporada e necessidade de pequena discretização para se obter bons resultados. Esses fatores reduzem de forma significativa o tempo de processamento da análise.

Para a modelagem da armadura das lajes utilizou-se o elemento REINF264. Esse elemento é utilizado de forma incorporada e apresentando apenas rigidez uniaxial. O elemento REINF264 é utilizado junto com elementos de barra, de placa, de casca ou elementos sólidos para fornecer reforço extra a esses elementos. O mesmo é adequado para simulação de fibras de reforço com direções arbitrárias. As coordenadas nodais, graus de liberdade e conectividade do elemento são a mesmas que a do elemento base. O elemento permite modelos com plasticidade, fluência, tensão inicial, grandes deflexões e grande capacidade de deformação. A Figura. 6b mostra a geometria do elemento quando utilizado juntamente com o elemento SOLID186

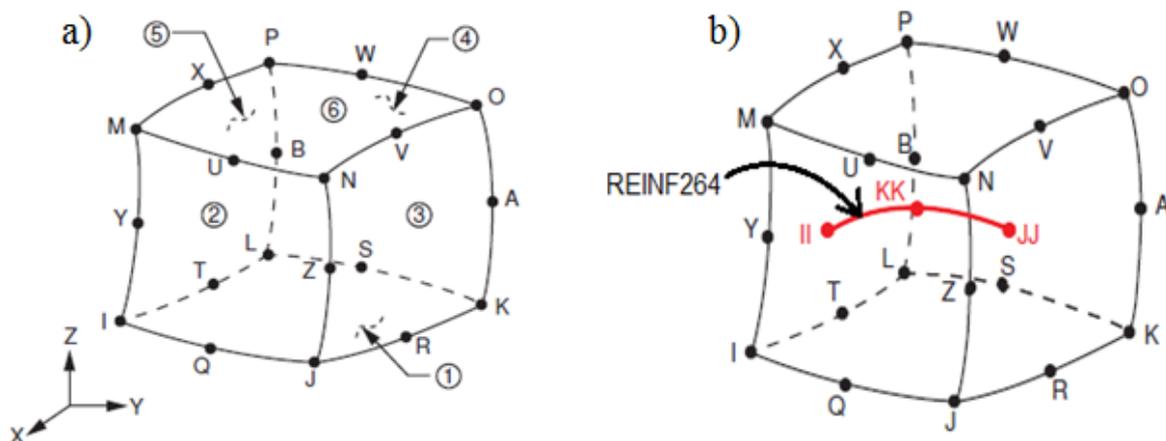


Figura 6 – a) Elemento SOLID186 b) Elemento REINF264

A análise utilizando elementos finitos implica o uso de métodos numéricos para a solução de sistemas de equações. No caso de análise envolvendo a não-linearidade física e ou geométrica, o uso de métodos eficazes é de extrema importância para a solução de sistema de equações não-lineares. Um método numérico de convergência bastante eficaz é o método de Newton-Raphson, utilizado internamente pelo software.

O carregamento das estruturas foi dado através do incremento de deslocamento, que se mostrou um método de melhor convergência. O critério de convergência foi estabelecido no vetor de resíduo de deslocamento $\{R\}$, sendo satisfeito quando a norma deste vetor, $\|\{R\}\|$,

atinge valores menores ou iguais à tolerância estabelecida de 0,2 % da norma no vetor de deslocamento aplicado. A norma euclidiana foi utilizada e é representada pela Eq. (1).

$$\|R\|_2 = \left(\sum_i^n R_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A modelagem das lajes de Coelho (1999) Lima (2012) e Trautwein (2006) foram utilizadas nesse trabalho para observar a eficiência do modelo numérico adotado.

O trabalho de Coelho (1999) apresenta os resultados de ensaios de dez lajes de concreto armado realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. Conforme dados dos ensaios experimentais realizados por Coelho (1999), utilizou-se uma armadura de flexão superior na laje constituída por 20 barras de diâmetro de 12,5 mm em cada direção, espaçadas de 94 mm, enquanto 12 barras de diâmetro de 6,3 mm em cada direção, com espaçamento de 163 mm, compuseram a armadura de flexão inferior. O cobrimento adotado foi de 2 cm. A laje de lado $L=180$ cm e espessura $t=13$ cm apresentou uma área central de 12×12 cm carregada com uma força de 316 kN, correspondente à carga última encontrada nos ensaios experimentais realizados. Para validação do modelo numérico, adotaram-se, como características dos materiais, os valores encontrados nos ensaios experimentais realizados por Coelho (1999). A laje analisada neste trabalho é a laje denominada L1.

O modelo numérico é representado por um quarto da laje devido à simetria da estrutura, sendo composto por uma malha de 300 elementos SOLID186 e por barras de armadura incorporada conforme descrição do modelo experimental, utilizando o elemento REINF264. A Figura. 7 mostra a malha de elementos finitos utilizados e a representação dos elementos de reforço.

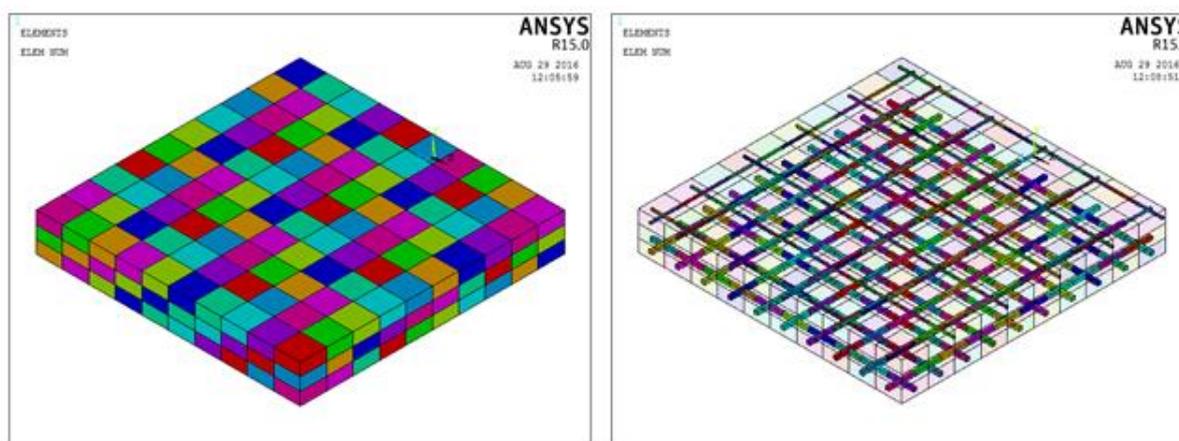


Figura 7 – Malha de elementos finitos e elementos de reforço

O carregamento da laje foi realizado através de incrementos de deslocamento na posição central da laje. O diagrama carga-deslocamento mostrado na Figura. 8 apresenta o resultado dos valores obtidos por simulação numérica e os valores do resultado experimental de Coelho (1999). Os deslocamentos nodais na direção y e as tensões nas barras de armadura são apresentados nas Figuras. 9 e 10, respectivamente.

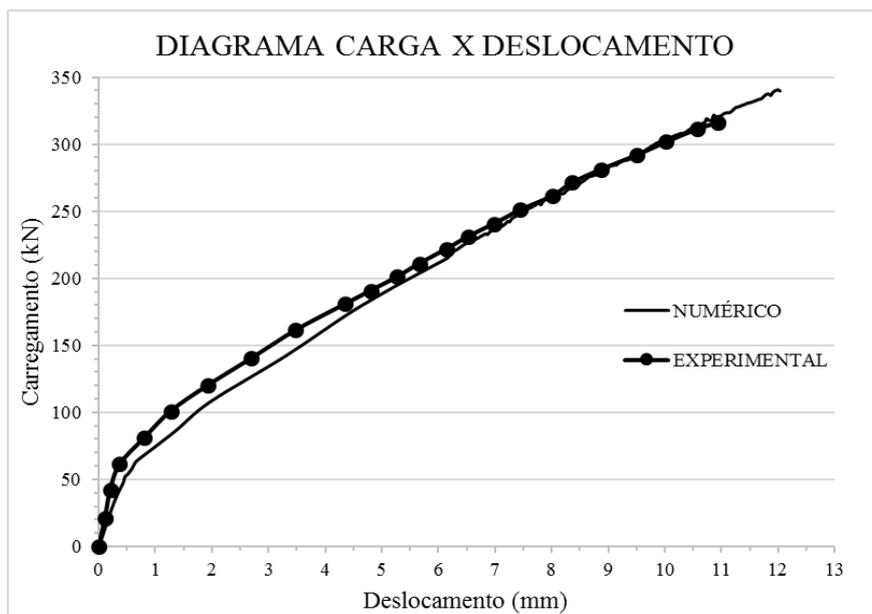


Figura 8 - Diagrama carga-deslocamento no centro da laje L1 de Coelho

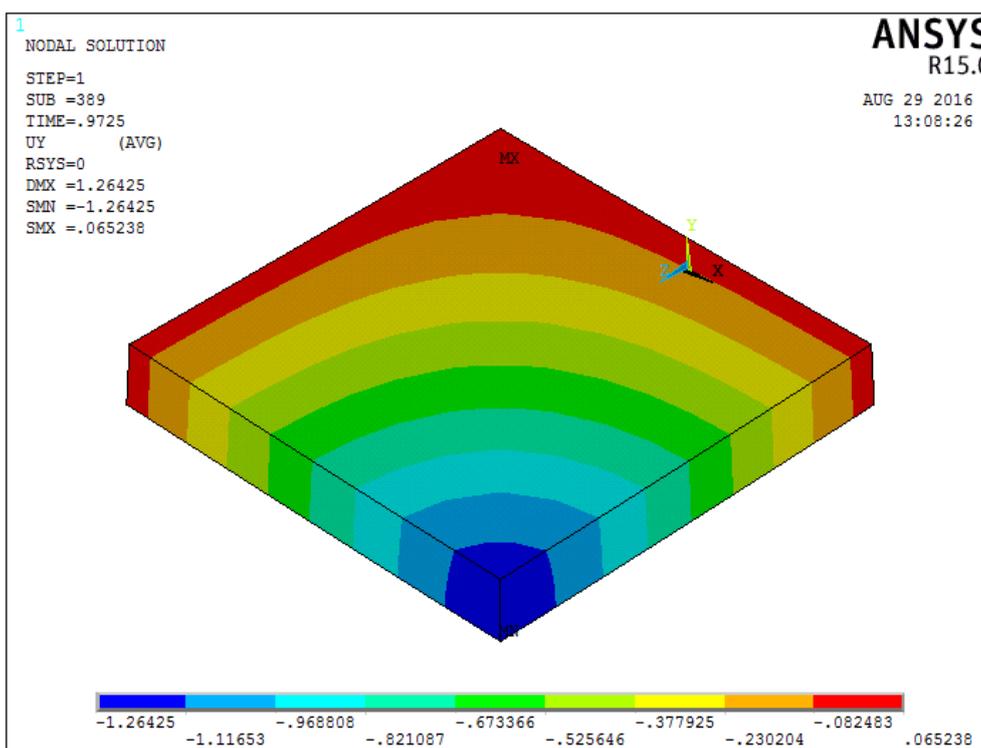


Figura 9 - Deslocamento vertical da laje

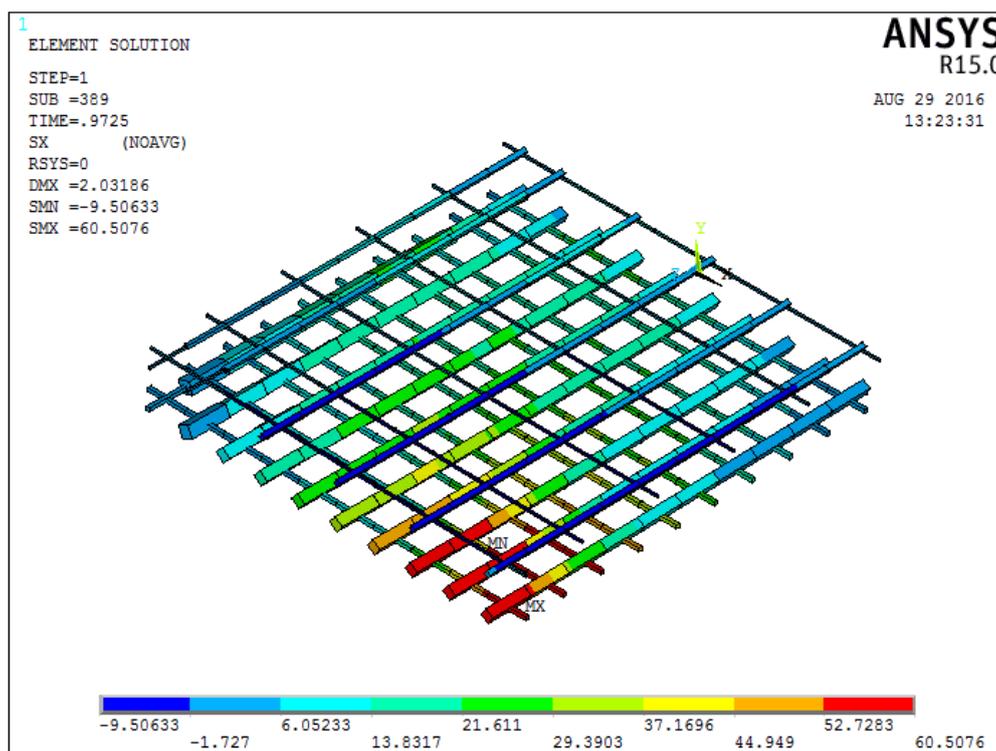


Figura 10 – Tensão normal nas armaduras de flexão

Lima (2012) ensaiou no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília lajes lisas para análise da resistência ao cisalhamento e do comportamento de ligações laje-pilar, em lajes apoiadas em pilares internos quadrados com e sem armadura de cisalhamento para um carregamento centrado. As lajes ensaiadas apresentaram dimensões de 250 cm de lado e de 18 cm de altura.

Todos os modelos de lajes tinham pilares quadrados com dimensões de face de 30 cm e comprimentos de 80 cm e 60 cm nas partes superiores e inferiores, respectivamente. A laje escolhida para comparação com o modelo numérico adotado foi a laje denominada L0-01.

As armaduras de flexão superior e inferior dos modelos ensaiados foram do tipo CA 50. As armaduras superiores foram compostas por barras com diâmetro de 16 mm, e espaçamentos de 90 mm em uma direção e 100 mm na outra. As armaduras de flexão inferiores foram compostas por barras de 8 mm dispostas uniformemente nas duas direções, com a função de evitar a formação de fissuras durante transporte e manter a ligação laje-pilar após a ruptura por cisalhamento. As propriedades dos materiais adotadas foram iguais às propriedades encontradas nos ensaios de Lima (2012).

Foi modelado apenas um quarto da laje devido à simetria do problema. A malha de elementos finitos utilizada foi composta por 784 elementos. A Figura. 11 apresenta a malha de elementos finitos utilizados e a representação dos elementos de reforço.

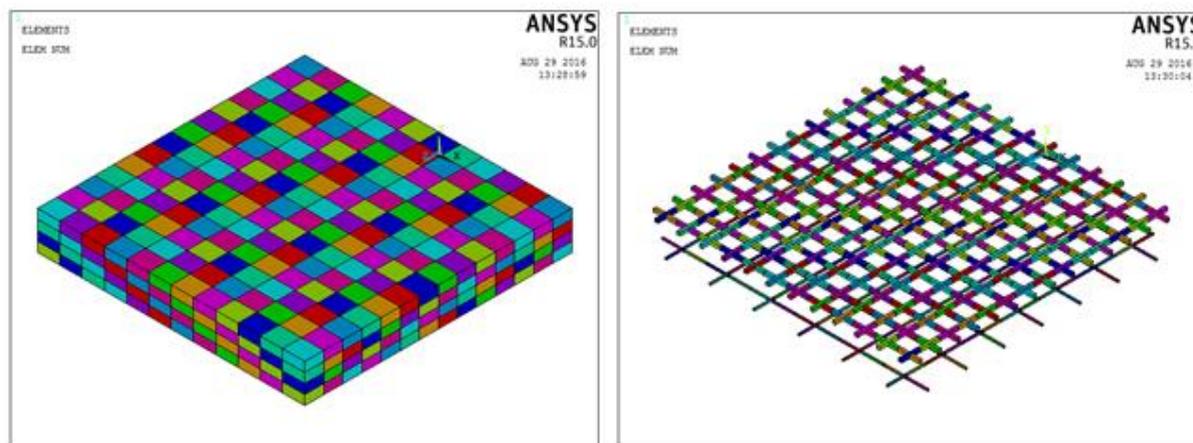


Figura 11 - Malha de elementos finitos e elementos de reforço

A Figura 12 exibe o diagrama carga-deslocamento do modelo experimental e numérico para a laje L0-01. Os deslocamentos nodais na direção y e as tensões nas barras de armadura são apresentados nas Figuras. 13 e 14, respectivamente.

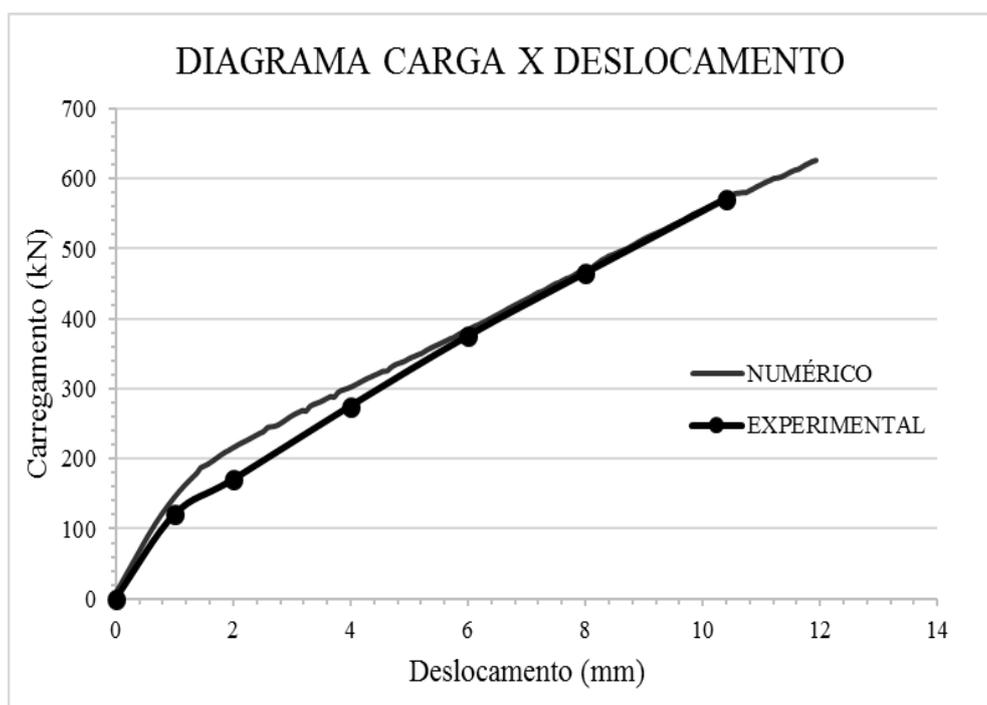


Figura 12 - Diagrama carga-deslocamento no centro da laje L0-01de Lima

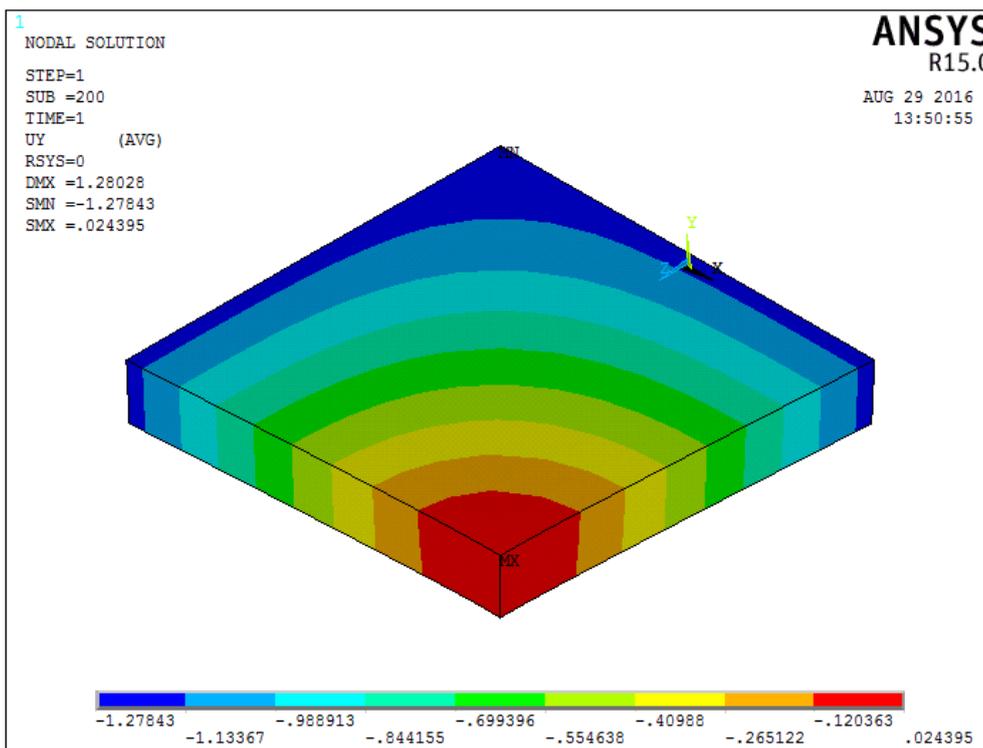


Figura 13 - Deslocamento vertical da laje

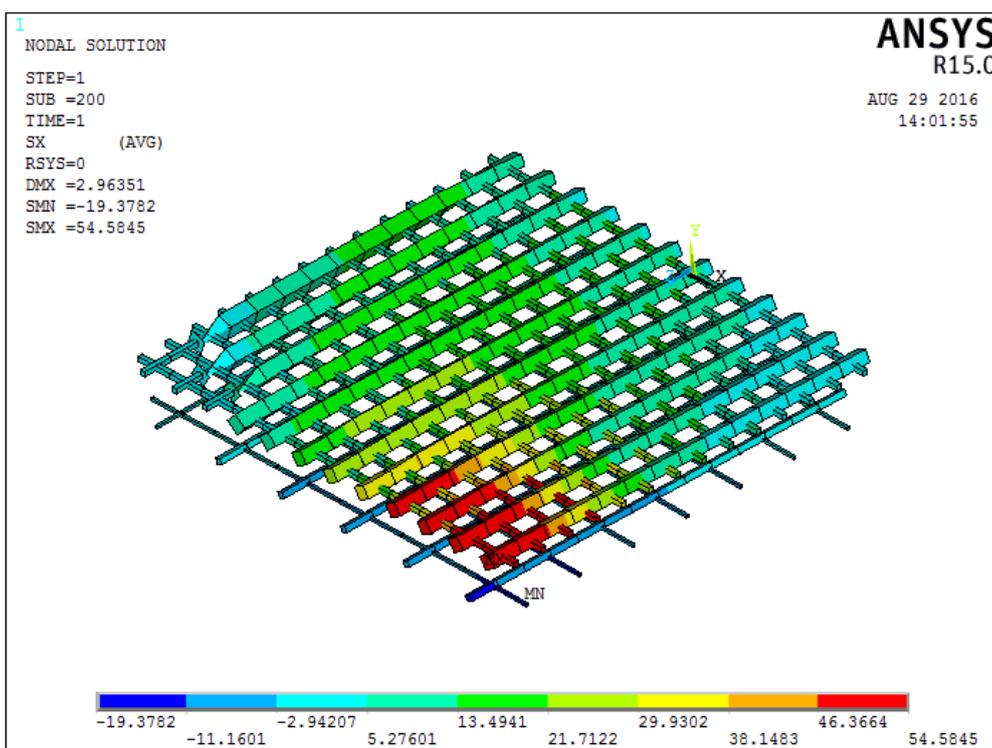


Figura 14 - Tensão normal das armaduras da laje L0-01

Trautwein (2006) ensaiou lajes lisas de concreto com armadura de cisalhamento do tipo “stud” interno, submetidas a um carregamento simétrico aplicado por uma placa quadrada de 20 cm de lado. A laje escolhida para validação do modelo adotado é denominada Laje E1 pelo autor dos ensaios experimentais. A laje estudada é uma laje quadrada de 300 cm de lado e 20 cm de altura, possui armadura de flexão composta por 31 barras de 16 mm de diâmetro no bordo superior em cada direção, espaçadas a cada 10 cm, e no bordo inferior é composta por 21 barras de 8 mm em cada direção, espaçadas a cada 15 cm. A armadura de cisalhamento para essa laje é composta por doze linhas de “studs”, distribuídos de forma radial, com onze elementos de 10 mm de diâmetro, espaçados de 6 cm. As linhas são posicionadas de maneira a formar um ângulo de 30° entre as linhas adjacentes. O concreto utilizado nos ensaios apresentou uma resistência média à compressão igual a 40,4 MPa. O aço utilizado para a armadura de flexão e para a armadura de cisalhamento foi o CA-50. As propriedades dos materiais adotadas foram as mesmas apresentadas por Trautwein (2006).

Foi modelado apenas um quarto da laje devido à simetria do problema. A malha de elementos finitos utilizada foi composta por 226 elementos. As Figuras 15 e 16 apresentam a malha de elementos finitos utilizados e a representação dos elementos de reforço, respectivamente.

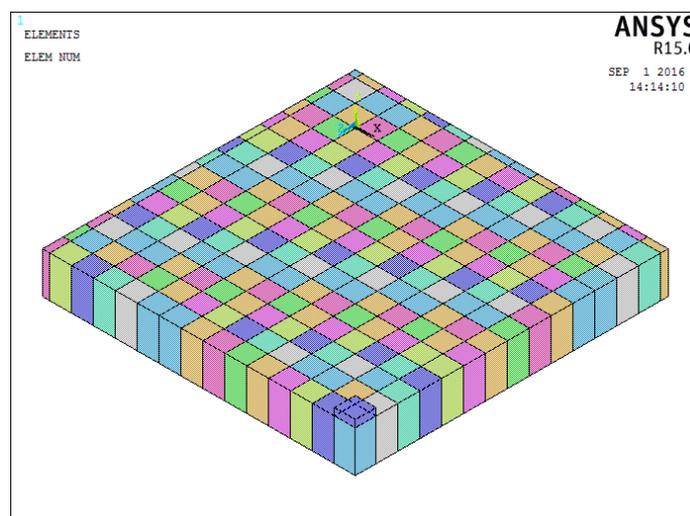


Figura 15 - Malha de elementos SOLID186

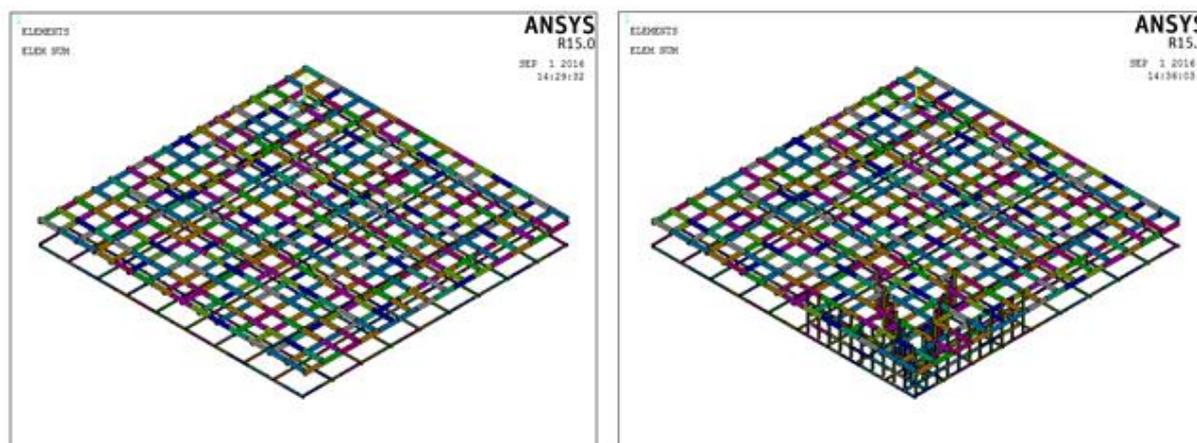


Figura 16 – Armadura de flexão e armadura de flexão juntamente com a armadura de cisalhamento

A Figura 17 exibe o diagrama carga-deslocamento do modelo experimental e numérico para a laje E1. Os deslocamentos nodais na direção y e as tensões nas barras de armadura são apresentados nas Figuras. 18 e 19, respectivamente.

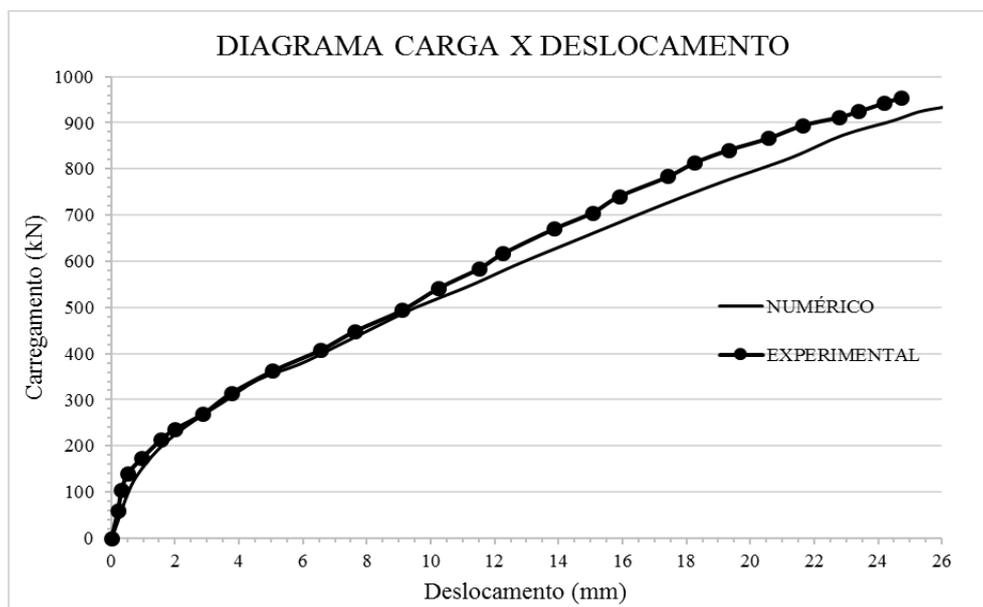


Figura 17 - Diagrama carga-deslocamento no centro da laje E1

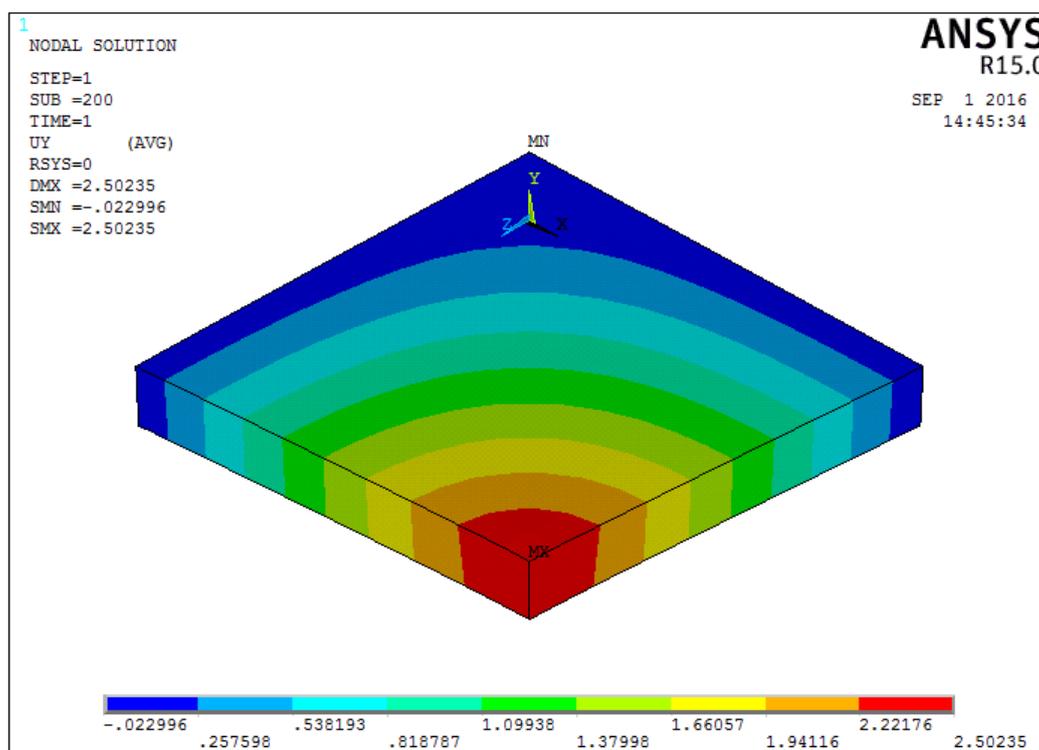


Figura 18 - Deslocamento vertical da laje E1

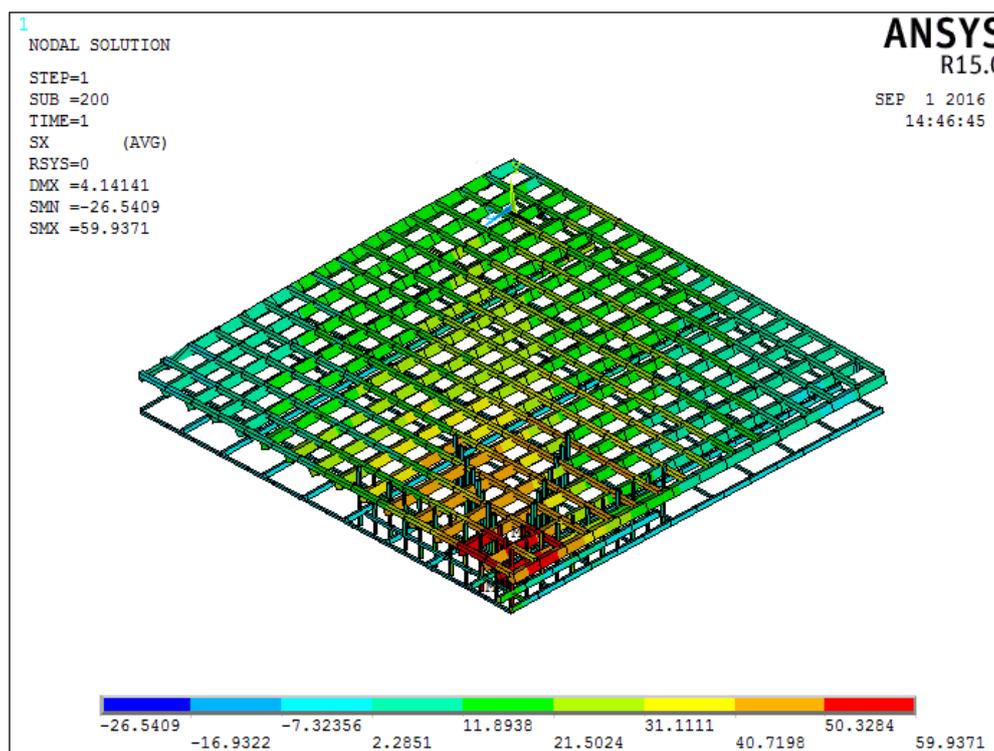


Figura 19 - tensão normal das armaduras da laje E1

4. CONCLUSÕES

Apesar da análise de lajes lisas de concreto armado ser complexa, observou-se nesse trabalho que o modelo adotado apresentou uma excelente aproximação com os resultados experimentais encontrados na literatura técnica, tanto para as lajes com e sem armadura de cisalhamento.

O modelo elastoplástico do concreto implementado utilizando a ferramenta UPF do ANSYS mostrou-se um modelo com boa estabilidade numérica, compatível com elementos de armadura incorporada e com critérios que representam de forma satisfatória o comportamento do material. Além disso o uso de um elemento sólido, quadrático possibilitou uma menor discretização das lajes estudadas.

O uso da armadura incorporada representou um ganho no tempo de processamento e na elaboração do modelo. Esse tipo de armadura permite que o usuário não fique limitado à malha de elementos finitos, podendo dessa forma reduzir a quantidade de elementos necessários para se fazer a análise.

Por fim, os resultados obtidos para a carga de ruptura das lajes analisadas foram próximos aos resultados experimentais, apresentando um erro de 7,28% para laje L1, 9,46% para laje L0-01 e 2,41% para laje E1. Esses resultados mostram a capacidade de o modelo numérico representar o comportamento muito próximo ao real da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

LAZZARI, P.M. *Análise Não Linear Tridimensional de Viga Segmentada com Protensão Externa Utilizando o ANSYS*. IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2016.

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

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN, fib. Model Code 2010. Final Draft 2 vol (Bulletins 65-66), 2012.

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

ANSYS, Inc. Theory reference (Version 15.0), 2013.

COELHO, A. E. G. *Puncionamento em lajes cogumelo de concreto armado com resistência de 30 MPa e armadura de cisalhamento vertical e inclinada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

LIMA, A. W. *Estudo experimental e analítico de punção em lajes lisas de concreto armado utilizando polímeros reforçados com fibra de carbono (prfc) como armadura de cisalhamento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

TRAUTWEIN, L. M. *Punção em lajes cogumelo de concreto armado: análise experimental e numérica*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. USP, São Paulo, 2006.