

Estudo a Punção em Lajes Lisas Nervuradas de Concreto Armado com cargas desbalanceadas.

Autor(es): Jorge Luís Rodrigues Freire¹; Ricardo José Carvalho Silva²

¹Engenharia Civil, CCET, UVA, jorgefreire647@gmail.com,

²Docente/Pesquisador, CCET, UVA, ricardo.carvalho222@gmail.com.

Resumo: Punção é um evento que se manifesta em sistemas estruturais constituídos exclusivamente de lajes e pilares, frequentemente referidos como lajes lisas. Nesse fenômeno, um pilar, sob a influência de uma carga concentrada em uma área relativamente reduzida, transpassa a laje, levando à sua ruptura. Neste trabalho foi realizado a modelagem computacional de três lajes lisas nervuradas de concreto armado, cujas suas dimensões são de 2220mm x 2220mm com 300mm x 300mm de nervuras, com diferentes áreas maciças sendo elas assim submetidas a cargas desbalanceadas na região dos seus apoios denominados P_x e P_y . Dessa maneira, para a simulação dos três modelos de laje, L1, L2 e L3, foi utilizado o programa *ANSYS Workbench*, que trabalha com o modelo de elementos finitos, com ele foi possível verificar a resistência de lajes lisas nervuradas com sua carga última de ruptura e comparar com as normas em vigor de concreto armado, com o objetivo de analisar o comportamento da laje lisa nervurada quando sujeita a variações de cargas desbalanceadas em sua parte superior, levando em consideração a área de região maciça.

Palavras-chave: Carga, Ruptura e Modelagem Computacional

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Punção é um fenômeno que ocorre nos sistemas estruturais compostos apenas por lajes e pilares, mais conhecido como lajes lisas, no qual o pilar, devido a uma força concentrada em uma área relativamente pequena, perfura a laje, causando a sua ruptura. Este sistema estrutural possui diversas vantagens em relação a outros sistemas, contudo, o perigo que a punção representa a torna um problema deveras preocupante ao se realizar um projeto de laje lisa. Dessa maneira, faz-se necessário a investigação sobre as cargas de rupturas desse tipo de laje, através das formas em que as normas técnicas disponibilizam para fazer esse tipo de verificação e conseqüentemente analisar a segurança que esse modelo de laje passa para a indústria da construção civil, por isso é importante a abordagem dessa temática tendo em vista que a cidade de Sobral está passando por um processo de crescimento urbano, aumentando gradativamente o porte de suas estruturas, portanto é necessário analisar as cargas que iram atuar nas lajes de forma desbalanceada, para assim conseguir tem uma efetividade e segurança no empreendimento. A ruptura por punção é caracterizada pela formação de fissuras inclinadas na laje ao redor de apoios, formando um tipo de cone, ou cargas concentradas e a não observância de grandes deslocamentos na laje antes da ruptura, ou seja, a ruptura ocorre de forma repentina por ser frágil, por isso é importante que sejam utilizados meios para que os elementos da estrutura apresentem uma boa ductilidade

para que então sofram deformações excessivas antes de alcançar sua carga de ruptura final. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da laje lisa nervurada quando sujeita a variações de cargas desbalanceadas em sua parte superior, levando em consideração a área de região maciça. A intenção é fornecer informações que possam aumentar a segurança das estruturas que utilizam esse tipo de laje, beneficiando assim a sociedade, analisando dessa maneira se as normas ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118, EUROCODE 2 e a AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318M-14 adotam métodos seguros para as verificações das cargas últimas de ruptura das lajes lisas nervuradas de concreto armado.

MATERIAIS E MÉTODOS

A verificação da punção em lajes lisas nervuradas é um aspecto importante estrutural para garantir a segurança e a capacidade de carga da estrutura. Sendo assim, esse trabalho apresenta 4 (quatro) tipos de verificações quanto a resistência a punção, sendo esses a norma americana, *AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318M-14*, a norma brasileira de estruturas, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118, a norma europeia, EUROCODE 2 e ao programa computacional ANSYS Workbench 17, no qual é amplamente utilizado na engenharia para análise de elementos finitos e simulações computacionais, isso envolve dividir um modelo complexo, que é uma laje nervurada, em pequenos elementos para analisar o comportamento estrutural e assim obtermos uma comparação entre a última carga de ruptura que as normas citadas determinam, com a do modelo computacional e assim observarmos as suas variações ao longo dos testes. Dessa maneira, foi preciso fazer a validação da modelagem de lajes no programa computacional para obter a garantia de que os resultados encontrados no *Ansys* sejam seguros e precisos.

- Fórmulas para verificação da resistência a punção de acordo com a ACI318M-14:

$$\checkmark V_{PS,ACI} < \left\{ \begin{array}{l} 0,33 * \lambda_s * \lambda * \sqrt{f_c} * u_1 * d \\ (0,17 * \frac{0,33}{\beta}) * \lambda_s * \lambda * \sqrt{f_c} * u_1 * d \\ \left(0,17 + \frac{0,083 * \alpha_s * d}{u_1}\right) * \lambda_s * \lambda * \sqrt{f_c} * u_1 * d \end{array} \right\}$$

$$\checkmark \lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1+0,004*d}} < 1 \quad \lambda = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ (para concretos normais)} \\ \text{entre } 0,75 \text{ e } 0,85 \text{ (para concretos leves)} \end{array} \right\}$$

$$\checkmark \alpha_s = \left\{ \begin{array}{l} 40 \text{ (pilar intermediário)} \\ 30 \text{ (pilar de extremidade)} \\ 20 \text{ (pilar de canto)} \end{array} \right\} \quad u - \text{perímetro de controle}$$

- ✓ β = razão entre maior e a menor dimensão do pilar.

- Fórmulas para verificação da resistência a punção de acordo com a NBR 6118:

$$\checkmark V_{PS,NBR} = 0,18 * \varepsilon * (100 * \rho * f_c)^{1/3} * u_1 * d$$

$$\checkmark \varepsilon = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) < 2$$

- ✓ ρ – taxa de armadura da laje

- ✓ u – perímetro de controle
- Fórmulas para a verificação da resistência a punção de acordo com a Eurocode 2:
- ✓ $V_{SR,EC} = 0,18 \cdot \varepsilon \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot b_w \cdot d$
- ✓ $\varepsilon = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) < 2$
- ✓ ρ – taxa de armadura da laje

Dessa forma, foi realizada a modelagem computacional uma laje de Mouro (2005), essa laje foi realizada o experimento em laboratório obtendo uma carga última de ruptura de 375kN, portanto para a validação do modelo computacional de elementos finitos abordado nesse projeto, foi analisado a mesma laje de Mouro, obtendo uma carga de ruptura bem próxima da experimental no qual foi encontrado a carga última de ruptura de 380kN, tendo uma variação de cerca de 1%, o que torna essa pequena variação insignificante para a dimensão do experimento, validando assim a modelagem por meio do modelo de elementos finitos do *Ansys*.

Diante dessa situação e dos métodos apresentados, foi abordado nessa pesquisa a análise do comportamento das lajes lisas nervuradas quando estão submetidas a variação de carga em sua face com diferentes tipos de áreas maciças na região dos apoios, cuja essa área é a que mais sofre influência da punção nesse tipo de sistema construtivo. Dessa forma, algumas lajes lisas nervuradas foram experimentadas computacionalmente, com diferentes tipos de região maciça, essas lajes possuem dimensões de 2200mm x 2200mm com nervuras de 300mm x 300mm, sendo a primeira laje (L1) a ser analisada com 100% de área maciça, a segunda laje (L2) com 46% e a terceira laje com área de 35,16% maciça, na qual cada uma delas é submetida a onze (11) tipo de desbalanceamento de cargas, sendo possível dessa forma analisar a discrepância das cargas de ruptura em relação as que as três normas determinam.

Vale ressaltar, que os desbalanceamentos de cargas na face superior foram aplicados em 4 pontos simétricos da laje de forma concentrada, sendo elas com uma relação P_x/P_y , em que P_x é a carga aplicada no eixo X da laje e assim para Y, essa relação varia de 0 a 100% no qual foi aderido nos gráficos de variação uma escala de 10 em 10% para uma melhor visualização do comportamento da resistência a punção que essas lajes trabalham seus esforços na prática. Os ensaios foram realizados com concreto classe C-30 e aço CA-50.

Conforme a relação abaixo:

- P_x – Carga em X
- P_y – Carga em Y
- P_x/P_y – Relação de aplicação de cargas na laje lisa nervurada em P_x .

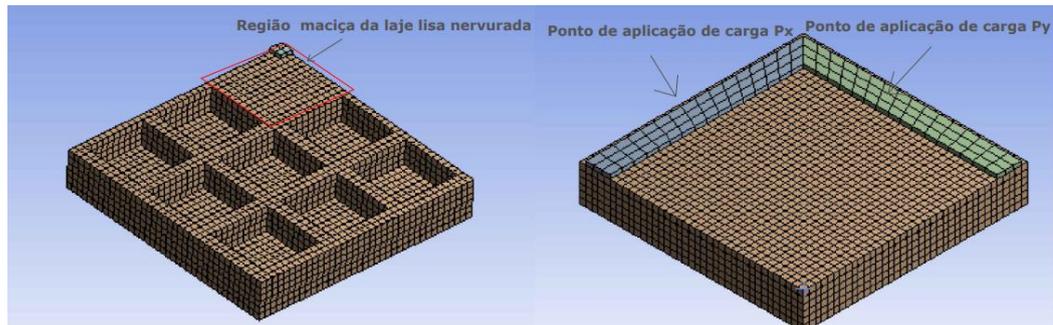


Figura 1- Região maciça e pontos de aplicação de carga Px e Py.

Essa relação pode ser melhor observada analisando o gráfico de perda de resistência das lajes nervuradas na aba dos resultados.

RESULTADO E DISCUSSÃO

Foram conduzidas simulações no *ANSYS Workbench 17* dos três tipos de lajes já mencionadas, durante os testes computacionais foi analisado e debatido o quanto as lajes lisas nervuradas perdem sua eficiência em relação a resistência a punção quando submetidas a

cargas desbalanceadas nos seus pontos de aplicação, como mostra o gráfico abaixo.

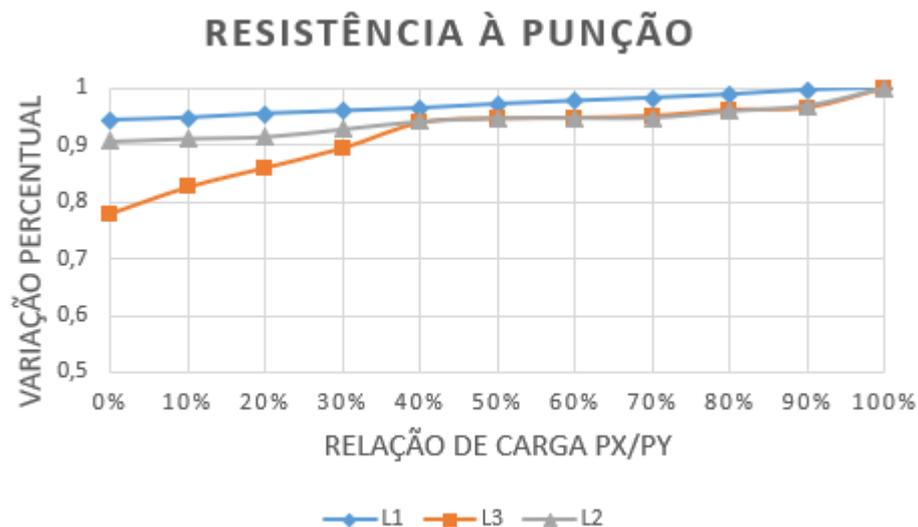


Figura 2 – Gráfico de perda de resistência a punção de L1, L2 e L3.

No primeiro modelo de laje, denominada L1, onde a região maciça abrange 100% da estrutura, observamos uma diminuição média de 5% na carga de ruptura em comparação com os valores estipulados pela NBR 6118, caindo de 488 kN para 463 kN, quando essa estrutura essa submetida há um carregamento total apenas em Py. Desse modo, observa-se que uma laje lisa nervurada onde predomina uma grande área de região maciça, é possível analisar que as verificações das fórmulas atendem as

expectativas da norma, estando enquadrada na margem de erro esperada, porém com uma ressalva de variação na perda de resistência a punção mesmo que ainda irrelevante.

Entretanto, ao analisar o segundo modelo de laje, chamado L2, onde uma porção maciça abrange aproximadamente 46% da área total, notamos uma redução de cerca de 10% na capacidade de carga prevista pela norma durante a simulação computacional. Isso difere da situação da L1, em que não ocorreu essa diminuição significativa na capacidade de carga. Isso é particularmente relevante quando se trata de estruturas de concreto armado, uma vez que a principal função das lajes lisas nervuradas é suportar cargas substanciais.

Dessa forma, quando as lajes possuem uma porção maciça que é inferior a 50% de sua área total, surge a questão se as normas atualmente em vigor são adequadamente calibradas para lidar com esse cenário prático. Isso levanta preocupações sobre a possibilidade de que as normas atuais apresentem deficiências em seu sistema de verificação, uma vez que não consideram adequadamente esse tipo de situação, que é mais comum na prática.

Na sequência, à análise do terceiro tipo de laje, denominado L3, onde a porção de área maciça abrange apenas cerca de 35,12%, representando uma redução de aproximadamente 10% em relação à região maciça da L2. Nesse cenário, observou-se uma significativa redução de 22% na capacidade de resistência à punção quando essa estrutura foi submetida a um carregamento total apenas na direção de P_y . É relevante destacar que, com base nos dados do gráfico apresentado, podemos analisar que, a partir do momento em que a relação entre as cargas P_x e P_y foi igual ou abaixo de 50%, ocorre uma acentuada diminuição na capacidade de resistência à punção. Esse decréscimo é altamente relevante, destacando a possível inadequação das normas vigentes, que não levam devidamente em conta essa ocorrência comum da prática nas suas elaborações teóricas. Essa observação ressalta a preocupação com a estabilidade desse tipo de sistema construtivo, que emprega lajes lisas nervuradas, e, por consequência, levanta questões sobre a segurança da população diante desse fenômeno, principalmente para cidade de Sobral que está passando por um grande processo de verticalização.

Um ponto de consideração relevante diz respeito à carga de ruptura encontrada no modelo computacional para a Laje 1, que totalizou 488 kN. Essa análise revela uma disparidade notável entre os resultados obtidos e as normas de referência utilizadas para a verificação.

De acordo com a norma ACI 318M-14, a carga de ruptura esperada seria de aproximadamente 324 kN, o que indica um nível de conservadorismo significativamente alto no método de verificação americano em relação de resistência à punção aos resultados computacionais. Por outro lado, sob a norma europeia EC2, a carga de ruptura calculada foi de 461 kN, mostrando uma abordagem menos conservadora do que a norma americana e, conseqüentemente, mais próxima dos resultados obtidos no modelo computacional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta análise abrangente dos modelos de laje L1, L2 e L3, pode-se destacar uma série de estudos críticos que têm implicações significativas no contexto da engenharia de estruturas de concreto armado e, mais especificamente, no sistema de lajes lisas nervuradas. Estas reduções de resistência à punção é um ponto de preocupação, uma vez que as lajes nervuradas são projetadas para suportar cargas consideráveis, e essa diminuição significativa pode indicar inadequações nas normas existentes ao lidar com esses casos.

Esses achados sugerem que as normas existentes podem não estar adequadamente calibradas para lidar com lajes lisas nervuradas que possuem uma porção maciça menor do que 50% de sua área total e estão submetidas a carregamentos desbalanceados. Isso levanta sérias preocupações sobre a estabilidade desse tipo de sistema construtivo, especialmente em áreas urbanas em processo de verticalização, como a cidade de Sobral. Portanto, é imperativo que haja uma revisão criteriosa das normas de estruturas para garantir a segurança da população e a adequação das estruturas construídas. As conclusões aqui apresentadas se referem exclusivamente às análises realizadas nessa pesquisa, portanto mais estudos são necessários

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Programa de Bolsa de Permanência Universitária (PBPU) por disponibilizar a bolsa na modalidade BICT, tornando possível a realização deste trabalho e ao Grupo GEM.

REFERÊNCIAS

. Ansys® Workbench, **Release 17.1, Help System, Coupled Field Analysis Guide**, ANSYS, Inc.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6118, **Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2014.

SILVA JÚNIOR, F. E. S. **Modelagem e análise de estruturas de concreto armado no software Ansys Workbench**. Sobral, 2020.

SILVA, Ricardo José Carvalho. **Shear in Beams**. Universidade Estadual Vale do Acaraú. Sobral, 2022. (Notas de Aula).

EUROCODE 2. **Design of Concrete Structures**, Part 1, General codes and codes for buildings, DD ENV, British Codes Institution, London, 2010;

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318M-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary**. Farmington Hills, Michigan, 2014.