

PUNÇÃO EM LAJES LISAS NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO

Autores: Isa Mara Isaías Sousa¹; Samilly Medeiros Araújo²; Ricardo José Carvalho Silva³

¹ Engenharia Civil, CCET, UVA; E-mail: isamaraisaiassousa@gmail.com,

² Engenharia Civil, CCET, UVA; E-mail: samillymedeiros12@gmail.com,

³ Docente/Pesquisador, CCET, UVA. E-mail: ricardo.carvalho222@gmail.com.

Resumo: As recomendações normativas brasileira, europeia e americana tratam a punção em lajes lisas nervuradas iguais as lisas maciças, entretanto pesquisas recentes mostram que isso é um equívoco, visto que as geometrias das nervuradas podem reduzir a resistência à punção drasticamente. Com o objetivo de estudar a resistência à punção foi realizada uma análise não linear em 15 lajes nervuradas através do *software Ansys*, variando o tamanho da região maciça e espaçamento entre nervuras, com intuito de verificar quando as normas começam a falhar. A partir das análises, foi constatado que as formulações normativas ficam mais distantes dos resultados computacionais a medida que o volume de concreto da laje é reduzido e isso é influenciado diretamente pela relação entre o espaçamento das nervuras e região maciça, parâmetros não considerados pelas normas. Espera-se que as conclusões aqui documentadas sirvam para sugerir melhoramentos nas formulações normativas e originar futuras publicações na área.

Palavras-chave: Punção. Lajes Nervuradas. Normas.

INTRODUÇÃO E OBJETIVO

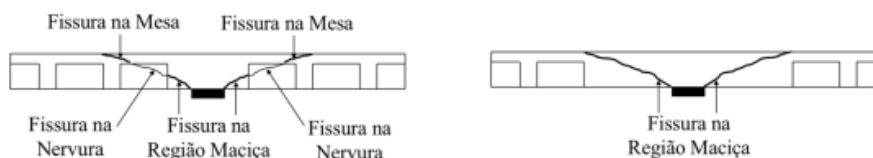
De acordo com estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Sobral atualmente conta com uma população de mais de 210 mil habitantes e está entre as 10 cidades mais ricas do Ceará. Com esse crescimento econômico e populacional, anualmente inúmeras novas edificações de alto padrão surgem no município o que impacta no consumo de recursos como o concreto, que apresenta um custo de matéria prima e execução de R\$ 689,18/m³ (SEINFRA, 2022) e utiliza cimento em sua produção, insumo que representa aproximadamente 5% das emissões antropogênicas de CO₂ no mundo, o que o caracteriza com um dos materiais mais relacionados às mudanças climáticas (WBCSD, 2007 apud. LIMA). Dentro desse contexto, faz-se necessário estudar métodos construtivos que quando dimensionados e executados corretamente, proporcionem vantagens econômicas e ambientais as edificações, como as lajes lisas nervuradas de concreto armado.

As lajes nervuradas são lajes maciças compostas por vigas em “T” unidirecionais ou bidirecionais, que formam na sua superfície inferior volumes prismáticos ou cúbicos vazados. Segundo a ABNT NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto de 2014, as zona de tração para momentos positivos estão localizadas nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte ou não, e a zona de compressão está localizada na capa/mesa de concreto. Por se tratar de uma laje lisa nervurada, ela também não apresenta vigas na ligação laje-pilar, tendo apenas uma pequena região maciça e ligação direta com o pilar, esse tipo de laje se popularizou bastante pela simplicidade de execução e pela economia gerada na obra. Estima-se que a

utilização dessa metodologia construtiva quando comparada a uma laje convencional gere uma economia de 30% dos insumos (BONAFÉ, 2017), pois todo o aço e concreto que não exercem função estrutural na laje são retirados e não é necessário o uso de compensados de madeira durante a concretagem, esses fatores reduzem a quantidade de mão de obra necessária para execução e resultam em edificações mais leves, além de influenciar diretamente na redução dos impactos ambientais negativos e do custo com a parte estrutural da edificação.

Entretanto a grande desvantagem da utilização desse sistema estrutural é a ruptura por punção, caracterizada pela reação do pilar na laje que leva ao aparecimento de tensões principais e concebem um cone de ruptura por punção, que pode causar o desligamento completo da laje com o pilar, proporcionando uma redistribuição de esforços e um colapso progressivo na estrutura. No caso de laje lisa nervurada, o tamanho da região maciça, que é definida durante o dimensionamento, influencia significativamente na resistência da laje, visto que a formação do cone de ruptura deve ficar na região maciça e caso isso não ocorra a resistência à punção da laje fica bem inferior à estimada pelas normas, que não consideram essa variável.

Figura 1: Cone de ruptura por punção se formando fora e dentro da região maciça.



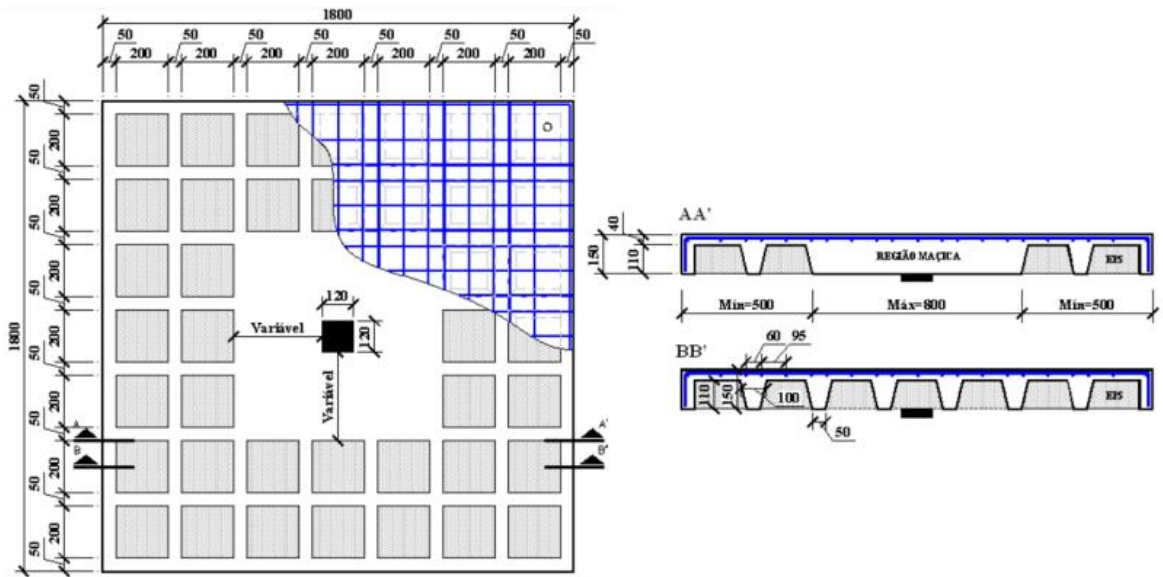
Fonte: Silva. (2021)

Atualmente, as normas tratam a resistência à punção em lajes lisas nervurada ou maciça de uma forma só, entretanto isso é um grande equívoco, visto que nos últimos anos pesquisas apontam resultados experimentais que mostram que lajes lisas nervuradas com pequena região maciça não devem ser tratadas igual as de grande região maciça porque a resistência cai significativamente, graças a região onde o cone de ruptura é formado. Tal discordância motivou e justificou a realização dessa pesquisa, que tem como objetivo investigar a resistência à punção de lajes nervuradas com diferentes tamanhos da região maciça e diferentes distâncias entre as nervuras. Dessa forma, esse estudo trata-se de um assunto de grande utilidade, tanto no viés científico quanto no viés prático, por sua originalidade e pelo seu elevado potencial de aplicação em lajes lisas, independentemente de suas condições de contorno e propriedades físicas.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo, foi utilizada uma das lajes do trabalho de Albuquerque (2009). Que conforme detalhado na figura 2, é uma laje nervurada bidirecional de concreto armado, com painéis de dimensões de 1800 mm x 1800 mm x 150 mm e taxa de armadura de 0,74 % , capa de 40 mm e nervuras (vigotas de concreto) de 50 mm de espessura, dispostas nas direções X e Y, ortogonais entre si. A resistência a compressão do concreto foi de 30 MPa e o aço teve tensão de escoamento de 500 MPa.

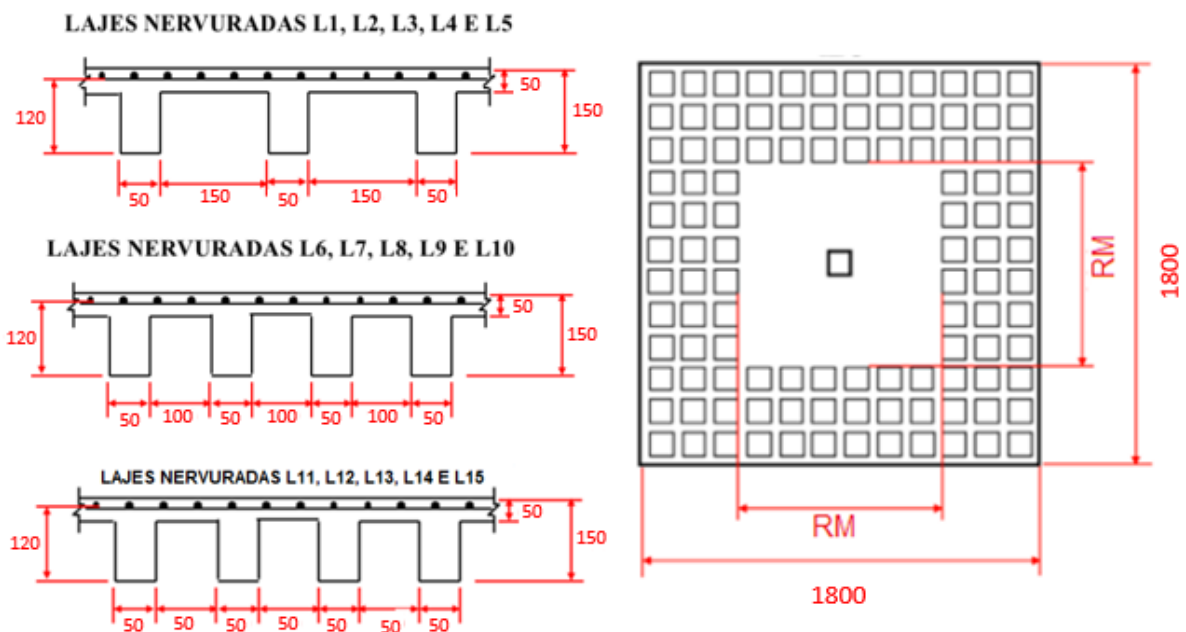
Figura 2: Detalhamento das lajes de Albuquerque (2009) com dimensões em mm.



Fonte: Albuquerque (2009)

Após a modelagem e validação dos resultados, foram desenvolvidos 3 grupos de lajes através da variação de espaçamento entre as nervuras e do tamanho de região maciça nas laje de Albuquerque (2009). No grupo A, o espaçamento entre as nervuras é de 150 mm, no grupo B ele é de 100 mm e no grupo C 50 mm, dentro de cada desses grupos o tamanho da região maciça varia em 19%, 35%, 51%, 68% e 84% do comprimento da laje.

Figura 3: Detalhamento dos três grupos de lajes modeladas.

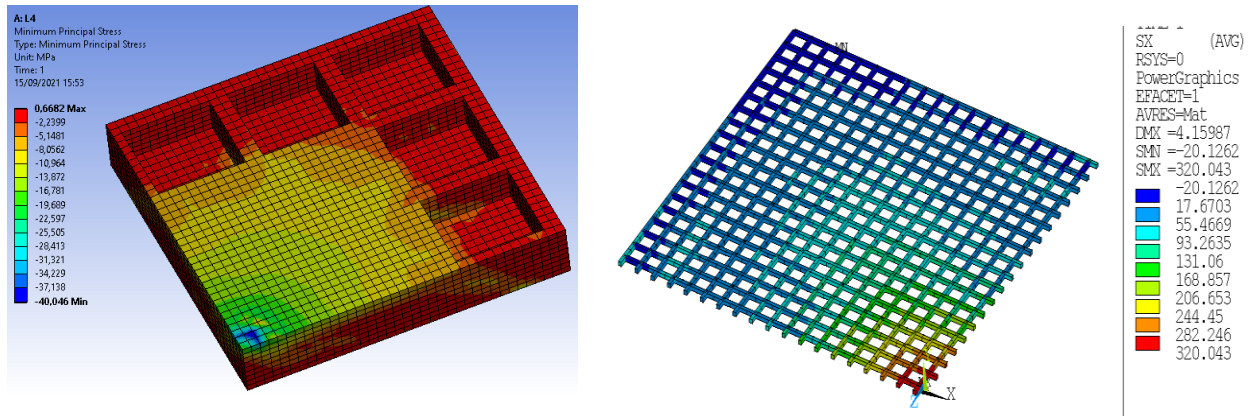


Fonte: Própria (2023).

A primeira etapa da pesquisa consistiu em um estudo numérico computacional das lajes no *Ansys Workbench*, onde cada uma delas foram analisadas a partir das dimensões detalhadas na figura 3. A princípio as 15 lajes tiveram sua geometria desenhada no *Ansys Design Modeler*, onde foram adicionados também o pilar, o apoio e as armaduras. Nesta modelagem, foi utilizado um modelo discreto e definida uma malha de elementos finitos onde

a armadura coincide com seus nós. Também foram definidos os materiais e as propriedades tanto do concreto como do aço. A análise computacional funcionou através de simulações aplicando carga passo a passo, através de *steps* e *substeps* até a ruptura da laje, neste caso foram utilizados 100 *substeps* e houve incremento de força até a ruptura, que é o ponto em que o aço escoou ou o concreto esmaga, como demonstrado na figura 4 com a laje 4 onde o concreto sofreu esmagamento enquanto o aço não chegou a escoar.

Figura 4: Demonstração das tensões do concreto e do aço na laje L4.



Fonte: Própria. (2023)

Após isso, foram utilizadas as recomendações normativas a punção com intuito de comparar esses resultados com os obtidos na análise computacional. Como as normas não levam em consideração os parâmetros que foram variados e tratam as lajes lisas nervuradas de forma similar as maciças, para as normas de punção as 15 lajes estudadas são iguais e é obtido o mesmo valor de ruptura em cada norma, pela brasileira NBR 6118 (2014) 311,41 kN, pela americana ACI 318 (2019) 234,97 kN e europeia EC2 (2010) 278,00 kN. A terceira etapa do projeto, consistiu na análise e comparação entre os resultados computacionais e normativos, através de parâmetros estatísticos e dos gráficos obtidos computacionalmente.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os resultados obtidos através das simulações, podemos observar na tabela 1 que o grupo C, que apresenta relação entre nervuras e vãos (50/50) de 1, praticamente não apresenta variação na sua ruptura quando variamos a região maciça da laje. O grupo B, com relação nervura por vãos (50/100) de 0,5 apresenta variação até a laje B3, que tem região maciça de 51%. O grupo A, com relação de (50/150) 0,33 se comporta de forma semelhante ao B e após a laje A4, com região maciça de 68% também não apresenta mais variação em suas rupturas. Comparando os grupos entre si, podemos observar que o grupo A foi o que rompeu com cargas menores e que quanto maior a região maciça da laje, maior foi a carga suportada pela laje.

Ao comparar os resultados obtidos de forma computacional com as formulações normativas, fica evidente que a norma que melhor estimou a ruptura foi a NBR 6118, para o grupo C e as lajes B5, B4, A5 e A4. As normas europeia e americana, apresentam resultados mais distantes do computacional.

Tabela 1: Comparação dos resultados computacionais e recomendações normativas.

LAJE	V_{comp} (kN)	V_{NBR}/V_{comp}	V_{EC2}/V_{comp}	V_{ACI}/V_{comp}
A1	140	2,22	1,99	1,68
A2	170	1,83	1,64	1,38
A3	220	1,42	1,26	1,07
A4	320	0,97	0,87	0,73
A5	330	0,94	0,84	0,71
B1	188	1,66	1,48	1,25
B2	224	1,39	1,24	1,05
B3	270	1,15	1,03	0,87
B4	315	0,99	0,88	0,75
B5	340	0,92	0,82	0,69
C1	343	0,91	0,81	0,69
C2	345	0,90	0,81	0,68
C3	348	0,89	0,80	0,68
C4	352	0,88	0,79	0,67
C5	360	0,87	0,77	0,65

Fonte: Própria (2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões deste trabalho limitam-se apenas aos resultados das 15 lajes aqui analisadas. Análises adicionais, tanto computacionais como experimentais, são necessárias para validação desses resultados. Assim, pode-se concluir que:

- A norma brasileira foi a que melhor estimou a ruptura por punção nas lajes nervuradas quando comparada as normas brasileira e americana.
- A norma americana ACI, foi a que apresentou resultados mais conservadores e distantes do computacional.
- Todas as rupturas obtidas através das normas brasileira (NBR) e europeia (EC2) apresentam resultados abaixo do valor computacional, mostrando que a laje romperia antes do previsto em ambos os casos.
- Quando a relação nervura-espacamento foi de 0,33 os resultados obtidos de forma computacional e na norma brasileira foram praticamente iguais, demonstrando que para este caso o percentual de região maciça não influencia os resultados.
- Analisando os dados de uma forma geral, concluímos que na maior parte dos casos a laje romperia antes do previsto pelas três normas.

Com isso, conclui-se que é necessário uma revisão das normas que tratam punção em lajes lisas nervuradas e uma criteriosa análise para inclusão dos parâmetros aqui mencionados após sua validação, que deverá ser feita com o aprofundamento da pesquisa possibilitando a variação de novos parâmetros como o da nervura-espacamento e generalizando todas as considerações desenvolvidas para um conjunto maior de lajes.

AGRADECIMENTOS

Ao PROVIC-PBPU e ao Grupo de Pesquisas em Estruturas e Materiais – GEM.

REFERÊNCIAS

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

ANSYS Inc. ANSYS Composite PrepPost User's Guide [Manual], Release 15.0. Canonsburg, Pennsylvania, EUA, 2013a. ANSYS Inc.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, p. 238, 2014.

BONAFÉ, Gabriel *et al.* Lajes nervuradas garantem economia à construção. **AECweb**, 2017. Disponível em: <https://datapedia.info/cidade/5853/ce/sobral#mapa>.

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

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico 2010: resultados Sobral-CE. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/sobral/panorama>.