



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE LAJES NERVURADAS
UNIDIRECIONAIS DE CONCRETO ARMADO**

JOÃO PEDRO FERREIRA DE SOUZA MARQUES

POMBAL – PB

2022

JOÃO PEDRO FERREIRA DE SOUZA MARQUES

ESTUDO PARAMÉTRICO DE LAJES NERVURADAS
UNIDIRECIONAIS DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Eric Mateus Fernandes Bezerra

M357e Marques, João Pedro Ferreira de Souza.

Estudo paramétrico de lajes nervuradas unidirecionais de concreto armado/ João Pedro Ferreira de Souza Marques. – Pombal, 2022.

21 f. il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2022.

“Orientação: Prof. Dr. Eric Mateus Fernandes Bezerra”.

Referências.

1. Lajes nervuradas. 2. Concreto armado. 3. Estudo paramétrico. I. Bezerra, Eric Mateus Fernandes. II. Título.

CDU 692.522 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

JOÃO PEDRO FERREIRA DE SOUZA MARQUES

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS DE
CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente João Pedro Ferreira de Souza Marques **APROVADO** em 29 de agosto de 2022 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande

Registre-se e publique-se.



Prof. Eric Mateus Fernandes Bezerra
(Orientador – UFCG)

Prof. Rodrigo Mendes Patrício Chagas
(Membro Interno – UFCG)

Prof. Francisco Rosendo Sobrinho
(Membro Externo – Unichristus)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por todas as bênçãos derramadas durante essa jornada que vivi no meio acadêmico.

Aos meu pais, Edinaldo e Joelma, e meu avô, Santino, que sempre me incentivaram e me deram apoio em todas as decisões, nunca deixaram eu desistir e sempre foram meu alicerce para chegar até aqui.

Ao meu orientador, professor Eric Mateus, que sempre me ajudou ao longo desse trabalho e não mediu esforços para me auxiliar, além de ter sido professor de algumas disciplinas que me fizeram seguir o lado de estruturas sempre foi muito objetivo e deixando poucas dúvidas, ou quase nenhuma, quando ministrava as aulas.

A banca Examinadora, em questão ao professor Rosendo Sobrinho e também professor Rodrigo Mendes, por terem aceitado participar da banca e agregar valor maior ao trabalho escrito.

A Livia, minha companheira que sempre esteve ao meu lado me apoiando e me encorajando em todas as decisões que tomei ao longo do período universitário.

As amigadas que construí durante a graduação, Adrielly, Isabele, Raquel, Camila, Jaciara e os demais que estiveram comigo.

E a todos que de alguma maneira me ajudaram durante essa graduação, muito obrigado!

Estudo Paramétrico de Lajes Nervuradas Unidirecionais de Concreto Armado

Parametric Study of Reinforced Concrete Unidirectional Ribbed Slabs

João Pedro Ferreira de Souza Marques, e-mail: joaopedrofsm1@gmail.com

Eric Mateus Fernandes Bezerra, e-mail: eric.mateus@professor.ufcg.edu.br

RESUMO

As lajes são um dos elementos estruturais que mais consomem concreto na sua concepção, fato que justifica a busca por soluções que façam melhor aproveitamento desse sistema. Como uma evolução das lajes maciças, as lajes nervuradas têm sido amplamente empregada em situações que demandam grandes vãos. Dentre estas, as lajes nervuradas moldadas no local por fôrmas plásticas oferecem uma série de vantagens econômicas, ambientais e construtivas. Com intuito de oferecer aos projetistas subsídios para escolha da fôrma numa etapa de pré-dimensionamento, o presente trabalho apresenta um estudo paramétrico de lajes nervuradas unidirecionais moldadas no local com fôrmas plásticas reutilizáveis comercializada pela empresa Impacto Protensão®. Foi estudada a influência da variação do vão em que se dispõe as nervuras (3 a 7 m), da classe de resistência do concreto (C25, C30 e C35) e da sobrecarga acidental sobre a laje (0,5, 1,5 e 2 kN/m²). Para cada combinação dessas variáveis, foram testadas todas as fôrmas presentes no catálogo da Impacto® e retornada aquela que apresentava o menor custo. A partir do estudo, foi possível notar que as melhores soluções tenderam a utilizar os moldes com intereixo de 61 cm, largura da base da nervura de 7 cm e altura com cerca de 6% do vão. Na maioria dos casos foi adotada capa com espessura de 4 cm e concreto classe C25.

Palavras-chave: Lajes nervuradas. Concreto armado. Estudo paramétrico.

ABSTRACT

Slabs are one of the structural elements that consume the most concrete in their design, a fact that justifies search for solutions that make better use of this system. As an evolution of solid slabs, ribbed slabs have been widely used in situations that demands large spans. The ribbed slabs molded in place by plastic formwork offer economic, environmental and constructive advantages. In order to provide designers with subsidies for choosing the formwork in a pre-dimensioning stage, the present work presents a parametric study of unidirectional ribbed slabs molded in place with reusable plastic formwork sold by the company Impacto Protensão®. In this article, it is shown the influence of the variation of the span in which the ribs are arranged (3 to 7 m), the concrete strength variation (25, 30 and 35MPa) and the accidental overload (0.5, 1.5, and 2 kN/m²). From the study, it was possible to notice that the best solutions tended to use formwork with 61cm of interaxis, rib with 7cm of width and height with about 6% of the span. In most cases, for the reinforced concrete it was adopted 4cm of cover and 25MPa strength.

Keywords: Ribbed slabs. Reinforced concrete. Parametric study

1. INTRODUÇÃO

As lajes, que formam os pisos e tetos dos edifícios, são, do ponto de vista estrutural, considerados elementos laminares planos submetidos predominantemente à flexão. Essa concepção decorre do fato delas possuírem espessura significativamente inferior às demais dimensões e por terem a função de transferir para vigas ou pilares as ações aplicadas diretamente pelos usuários, que são, em geral, ações normais ao seu plano. No entanto, Franca e Fusco (1997) destacam que, além disso, elas cumprem uma importante função na estabilidade global da estrutura, uma vez que, devido seu comportamento de diafragma rígido, os elementos contraventados podem se apoiar nos de contraventamento.

De acordo com Vizotto e Sartorti (2010), as lajes maciças, que são aquelas que possuem espessura constante e sem vazios ao longo de todo seu plano, é o sistema estrutural de lajes mais difundido e utilizado no meio técnico. Contudo, as lajes nervuradas, de acordo com Bezerra (2017), tendem a ser uma alternativa mais adequada do que as maciças quando os vãos da laje forem elevados. Isso porque, nesses casos, as deflexões passam a ser dominantes no projeto estrutural e as lajes nervuradas promovem um alívio do peso próprio, a partir da remoção do concreto nas regiões tracionadas, permitindo obter uma maior rigidez do que as maciças com o mesmo peso.

O alívio do peso do pavimento proporcionado pelo uso de lajes nervuradas reduz o consumo de concreto como um todo, tendo em vista que reduz as solicitações em vigas, pilares e fundações. Além disso, por possuir uma altura mais elevada com rigidez equivalente às maciças, esse sistema de laje promove uma redução do consumo de aço.

Com relação à fabricação, as lajes podem ser moldadas no local ou pré-fabricadas. Na concepção das lajes nervuradas no local usualmente emprega-se moldes plásticos reutilizáveis. A utilização destas traz uma série de benefícios econômicos e ambientais que estão associados à redução do consumo de materiais e aumento da produtividade na construção.

As lajes nervuradas podem ter nervuras em apenas um dos seus vãos ou direcionadas nos dois vãos. Quando uma laje possui uma geometria com aspecto mais retangular, haverá uma tendência natural dos esforços serem maiores na direção do menor vão, justificando, nesse caso, a utilização de lajes nervuradas unidirecionais. Como as fôrmas plásticas são, por questões construtivas, usualmente quadradas, fornecendo, assim, geometria idêntica para as nervuras nas duas direções, haveria, nesses casos de lajes mais retangulares, uma subutilização das nervuras na direção menos solicitada (maior vão). As lajes nervuradas bidirecionais, portanto, tendem a serem mais adequadas em lajes com um formato mais quadrado. Freires, Santana e Bezerra (2019) realizaram a análise de edifícios residenciais concebidos com lajes lisas maciças e nervuradas (unidirecionais e bidirecionais) protendidas e, nos casos analisados, notou que as lajes nervuradas unidirecionais foram as que resultaram em um menor custo com material.

Diversas variáveis descrevem o comportamento estrutural de uma laje nervurada. Para encontrar a área de aço nas nervuras, a partir da aplicação das condições de equilíbrio da seção, é necessário, por exemplo, estimar previamente valores para largura das nervuras, distância entre os eixos da nervura, espessura da mesa, altura da laje, tipo de aço e resistência à compressão do concreto. Como a filosofia empregada tradicionalmente na concepção de projetos estruturais é baseada em um processo iterativo, a escolha dos valores iniciais para essas variáveis irá influenciar significativamente na qualidade do projeto estrutural. Uma boa estimativa inicial reduz o tempo que é dispendido para corrigir os erros de concepção e abre espaço para a busca de soluções mais eficientes. Bezerra (2017) destaca que a definição prévia das variáveis está condicionada à sensibilidade e experiência do projetista.

Embora existam recomendações práticas empregadas com sucesso nessa etapa de pré-dimensionamento, como, por exemplo, a recomendação de que a altura de uma viga de concreto armado deve ter cerca de 10%, nem sempre é possível definir uma regra geral para problemas estruturais que dependem de muitos fatores.

Com intuito de auxiliar na tomada de decisão e diminuir essa dependência da sensibilidade e experiência do projetista, muitos estudos são feitos com intuito de investigar a resposta de um problema a partir da variação de parâmetros que governam seu comportamento.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como principal objetivo obter relações entre vão, sobrecarga acidental e as fôrmas disponíveis no catálogo da Impacto protensão® que apresentam menor custo, em termos de custo, ao projeto de lajes nervuradas unidirecionais em concreto armado. Serão avaliados, em uma rotina desenvolvida no *Microsoft Excel*® (Excel), painéis isolados de lajes, assumidas simplesmente apoiadas, com a variação do vão (3 a 7 m), da carga de utilização (0,5, 1,5 e 2 kN/m²) e da resistência do concreto à compressão 25, 30 e 35 MPa.

2. DIMENSIONAMENTO DE LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS

De acordo com a ABNT NBR 6118/2014, as lajes nervuradas podem ser moldadas no local ou com suas nervuras pré-moldadas, a qual sua zona de tração para momentos positivos fica localizada nas nervuras, podendo ser colocado material inerte. A mesma norma estabelece uma série de prescrições acerca das dimensões da laje que irá gerar reflexos na análise estrutural e no dimensionamento, a saber:

- a distância entre eixos das nervuras (b_f) não deve ser maior que 110 cm;
- a espessura da mesa (h_f) não deve ser inferior a 4 cm e a 1/15 da distância entre as faces da nervura (l_0) para os casos em que não existam tubulações horizontais embutidas; caso exista, a espessura mínima será de 5 cm quando o diâmetro da tubulação for menor ou igual a 10 mm ou 4 cm + ϕ quando o diâmetro for $\phi > 10$ mm;
- a espessura das nervuras (b_w) não deve ser inferior a 5 cm;
- em nervuras de largura inferior a 8 cm, não se utiliza armadura de compressão.
- Caso a distância entre eixos de nervura (b_f) seja menor ou igual a 65 cm, pode-se dispensar a verificação da flexão da mesa e adotar os critérios usados em lajes maciças para verificar o cisalhamento; se a distância entre eixos for menor do que 90 cm e a largura média das nervuras for igual ou superior a 12 cm, pode-se verificar o cisalhamento como laje, mas a flexão da mesa deve ser verificada; caso essas condições não sejam asseguradas, deve-se prever estribos nas nervuras; quando a distância entre eixos superar 110 cm, a mesa deve ser projetada como uma laje maciça apoiada em uma grelha de vigas.

A ABNT NBT 15575/2013, que apresenta critérios de qualidade do desempenho das edificações habitacionais, trouxe mudanças nas dimensões mínimas da espessura da mesa e da largura da nervura com intuito de considerar a segurança contra incêndio. Os novos limites, preconizados pela ABNT NBR 15200/2014, são aquelas que asseguram a função de corta-fogo por um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). Para um TRRF de 90 minutos (valor necessário para uma edificação residencial de 23 a 30 m de altura) de uma laje nervurada unidirecional, por exemplo, a largura mínima da nervura ao nível do centro geométrico das armaduras e a espessura da mesa são, respectivamente, 13 cm e 10 cm.

Normalmente, são usadas fôrmas plásticas reutilizáveis para moldar as lajes nervuradas *in loco* (Figura 1). Esses moldes formam vazios entre as nervuras e, por

serem extraídos quando finalizado o processo de escoramento, não contribuem no peso da estrutura. A resistência destes permite que eles sejam utilizados várias vezes.

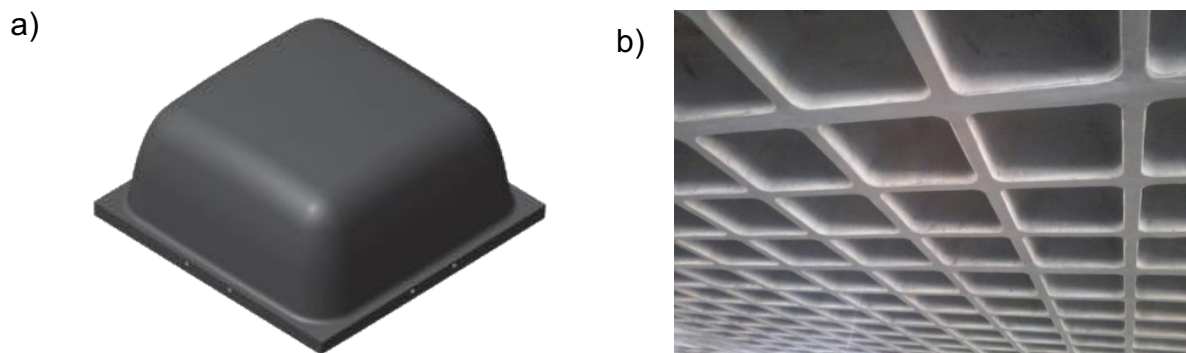


Figura 1 – a) Lajes nervuradas moldadas no local e b) molde reutilizável. (Bezerra, 2017)

O grupo Impacto Protensão[®] dispõe moldes plásticos cujas dimensões atendem aos limites apresentados. Os moldes são divididos em dois grupos de acordo com a distância entre eixos das nervuras: cubetas 61 x 61, com distância entre eixo de 61 cm e largura inferior da nervura de 7 cm; e cubetas 80 x 80, com distância entre eixo de 80 cm e largura inferior da nervura de 12,5 cm. Os mesmos moldes podem ser utilizados na confecção de lajes unidirecionais, mediante o acréscimo de “tapa nervuras” (Figura 2). Ao todo, a empresa conta com 8 possibilidades de moldes, que possuem alturas distintas.

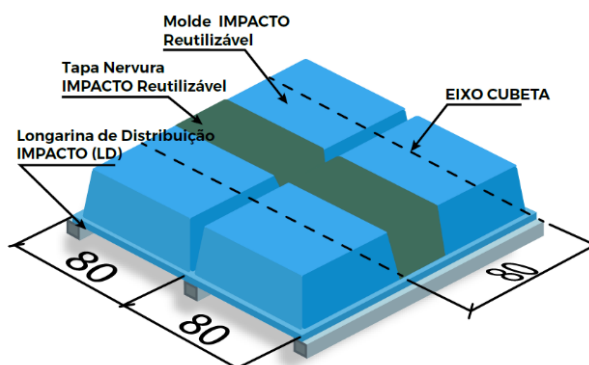


Figura 2 – Tapa nervura. (Impacto Protensão[®], 2020)

2.1. Dimensionamento de lajes nervuradas no Estado Limite Último

O dimensionamento de uma laje nervurada é, normalmente, feito isolando a nervura e assumindo que esta é uma viga de seção T. Ou seja, na análise estrutural é obtido o momento fletor máximo desenvolvido nas nervuras e, a partir deste, é feito o cálculo da armadura de flexão necessária assegurar o equilíbrio e, desse modo, evitar que a peça atinja a ruína. Esse formato da seção torna o desempenho do sistema eficiente para absorver momentos fletores positivos, em que traciona a nervura e comprime a mesa. Evita-se, portanto, trabalhar com vinculações que gerem momentos negativos no sistema.

Embora as nervuras possuam superfícies laterais inclinadas para facilitar a desforma, no dimensionamento pode ser considerada a seção como sendo retangular com espessura média. A Figura 3 apresenta uma seção típica de uma nervura usada no dimensionamento, com indicação da distância entre eixos das nervuras (b_f), largura (b_w) e altura (h) da nervura, espessura da capa (h_f) e altura útil da seção (d).

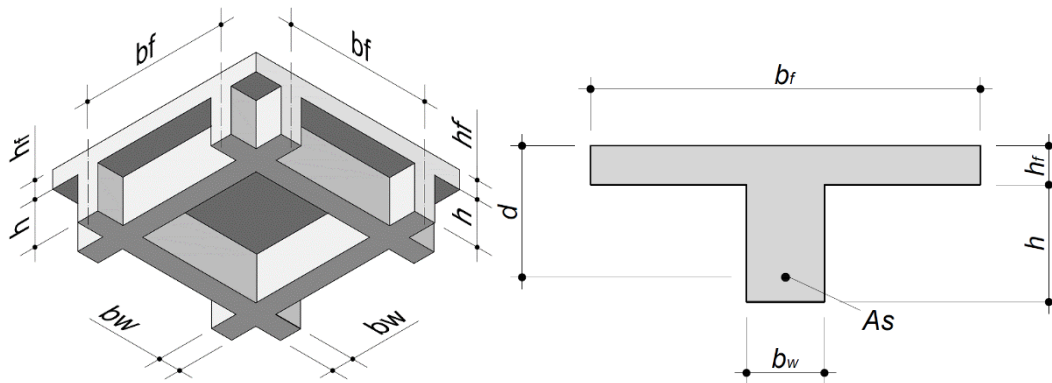


Figura 3 – Seção típica da nervura. (Bezerra, 2017)

2.1.1. Análise estrutural de lajes nervuradas unidirecionais

Quando a laje nervurada é unidirecional, pode-se aplicar a teoria de vigas na obtenção dos esforços internos e da flecha elástica. Sendo assim, uma laje simplesmente apoiada nas vigas com nervuras de comprimento L submetida a uma carga uniformemente distribuída P terá o momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$), força cortante máxima ($V_{m\acute{a}x}$) e flecha máxima ($\delta_{m\acute{a}x}$) dados, respectivamente, por:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{PL^2}{8} \quad (1)$$

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{PL}{2} \quad (2)$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5}{384} \frac{PL^4}{EI} \quad (3)$$

Sendo I o momento de inércia da seção transversal, calculado, conforme será visto na seção 2.2, de acordo com o estádio em que a seção se encontra e E o módulo de elasticidade longitudinal, que pode ser tomado como igual ao módulo de deformação secante, que, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), variando o f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa, pode ser obtido por:

$$E_{cs} = \alpha_i (\alpha_e 5600 \sqrt{f_{ck}}), \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (4)$$

Em que α_e é 1 para granito e gnaisse, enquanto α_e é dado por:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (5)$$

Nos pisos dos edifícios normalmente incidem a carga de utilização (com valores dados pela NBR 6120/2019), carga extra permanente (que inclui, por exemplo, o peso do revestimento) e o peso próprio. Nas lajes, essas cargas são comumente assumidas uniformemente distribuída em toda sua superfície. Portanto, para determinar o valor de P , que é uma carga linear distribuída na nervura, é necessário multiplicar a carga por unidade de área da laje pela distância entre eixos das nervuras (b_f), que é a largura de influência delas. Ressalta-se que os valores dessas cargas podem ser reduzidos ou

majorados de acordo com as combinações necessárias para verificação dos Estados Limites Último e de Serviço.

O peso próprio da laje pode ser inserido no modelo multiplicando o volume de concreto (V_c) pelo seu peso específico (assumido como sendo 25 kN/m^3) e dividindo isso pela área da laje. Para o cálculo de V_c , adota-se:

$$V_c = L_x L_y h - h_w L_x (b_f - b_w) n_v \quad (6)$$

Sendo L_x e L_y , respectivamente, o menor e o maior vão da laje (considerando que as nervuras estão dispostas na direção do menor vão) e n_v o número de vazios, obtido arredondando para o inteiro inferior a razão de L_y por b_f .

2.1.2. Armadura de flexão

As lajes são elementos submetidos predominantemente a cargas normais ao seu plano. Por essa razão, seu dimensionamento no Estado Limite Último (ELU) é feito calculando, para cada nervura, a área de aço que garante o equilíbrio das tensões normais na seção transversal inerentes ao momento fletor e verificando se a tensão de cisalhamento resistente da laje é suficiente para absorver os esforços cortantes.

Conforme já dito, cada nervura da laje pode ser considerada como uma viga de seção "T". Sendo assim, no cálculo da armadura de flexão deve ser verificada a posição da linha neutra da seção, tendo em vista que, caso a posição da linha neutra se encontre na capa da laje, a região de concreto comprimido terá o formato de um retângulo, e caso se encontre na nervura terá o formato de um "T".

Para determinar a formato da distribuição de tensão no concreto, compara-se a altura útil da seção (d), que é a distância do centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada à fibra mais comprimida, com a altura útil d_0 , que é o valor da altura que faz com que a posição da linha neutra esteja na interface da mesa com a nervura (CLÍMACO, 2016). Isto é, igualando a posição da linha neutra a espessura da capa (h_f) e aplicando as condições de equilíbrio da seção, obtém-se:

$$d_0 = \frac{M_d}{0,85 f_{cd} b_f h_f} + \frac{h_f}{2} \quad (7)$$

Sendo:

M_d = Momento fletor máximo de cálculo na nervura

f_{cd} = Resistência de cálculo à compressão do concreto

b_f = distância entre eixos das nervuras

Se $d > d_0$, significa que a linha neutra está dentro da mesa e o cálculo será feito como seção retangular com largura b_f e altura h_t (falso T). Nesse caso, o momento fletor adimensional (k_{Md}) é dado por:

$$k_{Md} = \frac{M_d}{d^2 f_{cd} b_f} \quad (8)$$

onde k_x é a posição relativa da linha neutra, isto é, a razão entre a posição da linha neutra (x) e altura útil (d), que pode ser obtida a partir de k_{Md} pelo equilíbrio da seção na forma:

$$k_x = 1,25 - 1,9174 \sqrt{0,425 - k_{Md}} \quad (9)$$

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), para que seja garantida a ductilidade, k_x deve ser menor que 0,45 para concretos com resistência inferior a 50 MPa. Dessa maneira, para que seja garantida a ductilidade da seção, a tensão na armadura deve ser igual a tensão de escoamento do aço f_{yd} . Com isso, a área de aço requerida será dada por:

$$A_{s,req} = \frac{M_d}{(1 - 0,4 k_x) d f_{yd}} \quad (10)$$

Por outro lado, se $d < d_0$, significa que a linha neutra está dentro da nervura e o cálculo será feito como seção T. Na formulação, é conveniente separar o momento equilibrado pelas abas, M_1 , e o momento que será equilibrado pela nervura. Nesse caso, o momento fletor adimensional será dado por:

$$k_{Md} = \frac{M_2}{d^2 f_{cd} b_w} \quad (11)$$

Sendo:

$$M_1 = 0,85 f_{cd} h_f (b_1 - b_w) (d - 0,5 h_f) \quad (12)$$

$$M_2 = M_d - M_1 \quad (13)$$

De posse do valor de k_{Md} , calcula-se k_x pela Equação (11) e a área requerida de aço será dada por:

$$A_{s,req} = \frac{M_1}{(d - 0,5 h_f) f_{yd}} + \frac{M_2}{(1 - 0,4 k_x) d f_{yd}} \quad (14)$$

Além da verificação da área de aço requerida, deve ser observado a armadura para combater o momento mínimo capaz de causar ruptura da seção de concreto simples dada por:

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_w (h + h_f) \quad (15)$$

Sendo ρ_{min} taxa de armadura mínima dada por (ARAÚJO, 2014)

$$\rho_{min} = \frac{0,078 f_{ck}^{2/3}}{f_{yd}} \geq 0,15\% \quad (16)$$

E área máxima de aço limitada a 4% da seção transversal bruta de concreto.

2.1.3. Verificação do cisalhamento

As dimensões dos moldes comercializados pela Impacto Protensão® são tais que permitem adotar os critérios usados em lajes maciças para verificar as tensões de cisalhamento. Sendo assim, é possível dispensar a utilização de estribos nas lajes nervuradas se for garantido que a força cortante máxima solicitante, majorada pelo

coeficiente de segurança, for menor do que a força cortante resistente de cálculo V_{Rd1} , que é dada por:

$$V_{Rd1} = \tau_{Rd} = k (1,2 + 40 \rho_1) b_w d \quad (17)$$

sendo:

$$\tau_{Rd} = 0,0375 f_{ck}^{2/3}, \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (18)$$

$$k = |1,6 - d| \geq 1, \text{ com } d \text{ em metros} \quad (19)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d} \leq 0,02 \quad (20)$$

Em que A_{s1} é a área de aço da armadura de compressão.

2.2. Dimensionamento de lajes nervuradas no Estado Limite de Serviço

Conforme apresentado na Equação 3, a deflexão máxima da nervura depende do momento de inércia da sua seção transversal (I). Essa medida, no entanto, irá variar se a peça estiver fissurada (estádio II) ou não (estádio I). Para identificar se a peça está no estágio I ou II, compara-se o momento atuante na seção crítica com um momento que gera uma tensão de tração igual à tensão resistente do concreto à tração (f_{ctm}). Essa medida comparada é chamada de momento de fissuração e é dada por:

$$M_r = \frac{1,2 f_{ctm} I_I}{x_I} \quad (21)$$

Sendo I_I o momento de inércia da seção bruta (estádio I) dado pelo teorema dos eixos paralelos:

$$I_I = \frac{b_f h_f^3}{12} + b_f h_f \left(\frac{h_f}{2} + h - x_I \right)^2 + \frac{b_w h^3}{12} + b_w h \left(\frac{h}{2} - x_I \right)^2 \quad (22)$$

E x_I a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada dada por:

$$x_I = \frac{0,5 b_w h^2 + b_f h_f h + 0,5 h_f^2 b_f}{b_w h + b_f h_f} \quad (23)$$

Se o momento solicitante, M , for menor ou igual ao momento que causa a fissuração, M_r , a peça se encontra no Estádio I e o cálculo do momento inércia será feito conforme a Equação (22). Por outro lado, se $M > M_r$, a seção crítica estará no Estádio II e algumas seções, mais próximas à seção crítica, estarão fissuradas enquanto outras, mais distantes, não estarão. Nesse caso, o momento de inércia usado no cálculo da flecha deverá ser o proposto por Branson, que, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), é dado por:

$$I_m = I_I \left(\frac{M_r}{M} \right)^3 + I_{II} \left[1 - \left(\frac{M_r}{M} \right)^3 \right] \quad (24)$$

I_{II} é o momento de inércia da seção no estágio II, que, para uma seção com geometria T, tem sua determinação condicionada à posição da linha neutra (x_{II}), determinada fazendo:

$$x_{II} = \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4a_1a_3}}{2a_1} \quad (25)$$

Sendo:

$$a_1 = \frac{b_w}{2}$$

$$a_2 = h_f(b_f - b_w) + \square A_s$$

$$a_3 = -d \square A_s - \frac{h_f^2}{2}(b_f - b_w)$$

\square = (coeficiente de homogeneização da seção) obtido pela razão do módulo de elasticidade do aço ($E_s = 210$ GPa) pelo módulo de elasticidade do concreto (E_c).

Para o caso de $x_{II} \leq h_f$, a linha neutra estará posicionada na mesa e será dada por:

$$I_{II} = \frac{b_f x^3}{3} + \square A_s (d - x_{II})^2 \quad (26)$$

Caso contrário tem-se:

$$x_{II} = \frac{(b_f - b_w) h_f^3}{12} + \frac{b_w x_{II}^3}{3} + (b_f - b_w) h_f \left(x_{II} - \frac{h_f}{2} \right)^2 + \square A_s (d - x_{II})^2 \quad (27)$$

Além da flecha imediata causa pelas ações diretas na estrutura, podem surgir, ao longo do tempo, um acréscimo de deslocamentos decorrente do fenômeno da fluência do concreto. Sendo assim, a flecha total máxima (δ) será dada pela soma da flecha imediata (δ_i) somada a flecha diferida no tempo. Essa última, por sua vez, pode ser obtida multiplicando a flecha imediata pelo coeficiente de fluência (α_f), isto é:

$$\delta = \delta_i (1 + \alpha_f) \quad (28)$$

O coeficiente de fluência pode ser estimado a partir do tempo, em meses, em que se deseja conhecer o valor da flecha diferida (t), da idade, em meses, em que a carga de longa duração é aplicada (t_0) e da taxa de armadura de compressão (ρ') conforme a seguinte equação preconizada pela NBR6118 (ABNT, 2014):

$$\alpha_f = \frac{\xi(t) - \xi(t_0)}{1 + 50 \rho'} \quad (29)$$

Sendo ξ um coeficiente que receberá o valor 2 quando o tempo for superior a 70 meses ou, caso contrário, o valor da expressão $\xi(t)=0,68(0,996)^t t^{0,32}$, com t em meses.

A flecha total deverá ser comparada com um valor limite que é estabelecido na tabela 13.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014) e está condicionado ao dano que se deseja evitar. Na ferramenta desenvolvida nesse trabalho, a flecha será comparada com o limite para aceitabilidade sensorial visual ($l_x/250$) e de vibração sentida no piso ($l_x/350$), sendo que a primeira é calculada para uma combinação quase-permanente das ações e a segunda para ação somente da carga acidental.

3. METODOLOGIA

Esse trabalho busca avaliar a influência da variação de parâmetros como vão, f_{ck} e sobrecarga acidental de lajes nervuradas unidirecionais simplesmente apoiadas, moldadas no local com fôrmas do tipo cubeta presentes no catálogo da Impacto Protensão®. Para tanto, foi desenvolvida uma planilha eletrônica capaz de realizar o dimensionamento das lajes de acordo com a metodologia apresentada na seção anterior.

Nesse estudo paramétrico, foi fixado o maior vão da laje em 10 m e o menor vão foi variado entre 3 e 7 m, com incremento de 1 m. Também foi fixado o cobrimento (2 cm) e a carga extra permanente sobre a laje (1,5 kN/m²). Com relação à carga acidental, foram avaliados os valores de 0,5, 1,5 e 2 kN/m², que são cargas usualmente usadas em edifícios comuns que. Para o f_{ck} do concreto, foram testadas as classes de resistência C25, C30 e C35.

Embora haja uma recomendação de que, de acordo com Araújo (2014), deve ser posto nervura transversal quando o vão for superior a 4 m, nesse trabalho, por simplificação, não foi considerado a nervura transversal.

Para cada combinação dessas variáveis, foram testados todos os moldes comercializados pela Impacto®, que os divide em dois grupos de acordo com a distâncias entre eixos das nervuras: cubetas 61 x 61, com distância entre eixo de 61 cm e largura inferior da nervura de 7 cm; e cubetas 80 x 80, com distância entre eixo de 80 cm e largura inferior da nervura de 12,5 cm. Para o primeiro grupo, existem moldes com alturas de 16, 18, 21, 26 e 30 cm com espessura da capa alternando entre os valores de 4, 5 e 6 cm. Já para o segundo, existem moldes com as alturas de 20, 25 e 30 cm com espessura da capa variando entre 5, 7,5 e 10 cm. A combinação dessas variáveis resulta, portanto, em 24 moldes.

Como foram analisados 7 vãos, 3 classes de resistência e 3 tipos de carga acidental, foram concebidos 63 modelos de laje e, para cada um deles, foram testados os 24 moldes da Impacto®. Em seguida foi registrado aquele que foi capaz de atender os requisitos projeto com o menor custo.

O custo para o m³ de concreto varia de acordo com o seu f_{ck} , enquanto o custo com o aço varia de acordo com o diâmetro das barras. Os valores utilizados nesse estudo, apresentados nas Tabelas 1 e 2, foram extraídos do ORSE (Orçamento de Obras de Sergipe).

Tabela 1 - Custo de concreto por m³ de acordo com f_{ck}

f_{ck} (MPa)	25	30	35
Custo (R\$/m ³)	472,06	485,08	498,10

Fonte: O Autor, 2022.

Tabela 2 - Custo por kg de aço CA-50 de acordo com o diâmetro da barra

Φ	6,3 mm	8,0 mm	10,0 mm	12,5 mm	16,00 mm	20,00 mm	25,00
Custo (R\$/kg)	11,80	11,87	11,19	9,69	9,69	11,17	11,17

Fonte: O Autor, 2022.

Convém destacar que foi limitado nesse estudo a utilização de no máximo duas barras por nervura para não precisar verificar o espaçamento entre as barras nem recalculá-la a altura útil quando for necessário dispor as barras em mais de uma camada. Com essa restrição do número de barras, foi escolhido entre duas e uma barra de acordo com a que levasse à menor área de aço. Ressalta-se, ainda, que há um ganho do ponto de vista construtivo nessa limitação do número de barras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo para os vãos analisados considerando uma sobrecarga acidental de 0,5 kN/m² e f_{ck} de 25 MPa. A partir desta, é possível notar que, com exceção do vão de 7 m, a espessura da capa teve o valor mínimo (4 cm). Em todos os casos, foi verificado que a cubeta com intereixo de 61 cm e espessura inferior da nervura de 7 cm trouxe os melhores resultados. Também foi possível notar que as melhores soluções conferiram às lajes, em média, altura com cerca de 5% do vão (desvio padrão de 0,2%). Com relação à armadura, com exceção do vão de 5 m, foi adotada uma barra por nervura.

Tabela 3 – Valores para concreto de 25 MPa e carga de 0,5 kN/m²

Vão (m)	b_f (m)	b_w (m)	h_f (m)	h_w (m)	Φ (mm)	h_t/L_x (%)	Nº barras	Custo/m ²
3,00	0,61	0,085	0,040	0,16	8,0	6,7	1	R\$ 37,79
4,00	0,61	0,085	0,040	0,18	10,0	5,5	1	R\$ 43,61
5,00	0,61	0,100	0,040	0,21	12,5	5,0	2	R\$ 52,62
6,00	0,61	0,115	0,040	0,26	10,0	5,0	1	R\$ 67,76
7,00	0,61	0,125	0,060	0,30	16,0	5,1	1	R\$ 85,63

Fonte: O Autor, 2022.

A Tabela 4 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo para os vãos analisados considerando uma sobrecarga acidental de 1,5 kN/m² e f_{ck} de 25 MPa. A partir desta, é possível notar que, assim como no caso da sobrecarga de 0,5 kN/m², com exceção do vão de 7 m, a espessura da capa teve o valor mínimo (4 cm). Observa-se que a ferramenta não encontrou uma solução dentre os moldes disponíveis para o vão de 7 m. Nenhuma combinação foi capaz de atender ao estado limite de deformações excessivas. Frisa-se, porém, que esse problema pode ser contornado com utilização de contraflecha. Para esse caso, foi possível notar que as melhores soluções conferiram às lajes, em média, altura com 6% do vão (desvio padrão de 0,5%), que é um pouco maior do que para o caso anterior, contudo, ainda na mesma faixa. Com relação à armadura, com exceção do vão de 5 m, foi adotada uma barra por nervura.

Tabela 4 – Valores para concreto de 25MPa e carga de 1,5 kN/m²

Vão (m)	b_f (m)	b_w (m)	h_f (m)	h_w (m)	Φ (mm)	h_t/L_x (%)	Nº barras	Custo/m ²
3,00	0,61	0,085	0,040	0,16	6,3	6,7	1	R\$ 39,87
4,00	0,61	0,085	0,040	0,18	8,0	5,5	1	R\$ 48,17
5,00	0,61	0,115	0,040	0,26	12,5	6,0	2	R\$ 59,61
6,00	0,61	0,125	0,040	0,30	16,0	5,7	1	R\$ 76,43
7,00	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2022.

A Tabela 5 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo para os vãos analisados considerando uma sobrecarga acidental de 2 kN/m² e f_{ck} de 25 MPa. Observa-se que, assim como para sobrecarga de 1,5 kN/m², a ferramenta não encontrou uma solução dentre os moldes disponíveis para o vão de 7 m. Nenhuma combinação foi capaz de atender ao estado limite de deformações excessivas. É possível notar que, assim como nos casos anteriores, as demais soluções adotaram a modulação com intereixo de 61 cm e largura inferior da nervura com 7 cm. Com relação à espessura da capa, em todos os casos foi adotada a espessura mínima de 4 cm, mostrando uma tendência de utilização desta em todos os casos. Por fim, foi possível notar que as melhores soluções conferiram às lajes, em média, altura com 6,3% do vão (desvio padrão de 0,9%), revelando também uma proximidade em relação aos demais casos. Com relação à armadura, em todos os casos foi adotada uma barra por nervura.

Tabela 5 - Valores para concreto de 25MPa e carga de 2 kN/m²

Vão (m)	b _f (m)	b _w (m)	h _f (m)	h _w (m)	Φ (mm)	h _f /L _x (%)	Nº barras	Custo/m ²
3,00	0,61	0,085	0,040	0,18	6,3	7,3	1	R\$ 41,28
4,00	0,61	0,085	0,040	0,18	12,5	5,5	1	R\$ 48,11
5,00	0,61	0,125	0,040	0,30	12,5	6,8	1	R\$ 65,56
6,00	0,61	0,125	0,040	0,30	16,0	5,7	1	R\$ 76,43
7,00	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2022

Após análise da variação do vão e sobrecarga acidental para concreto classe C25, foi feita a mesma análise para o concreto classe C30. A Tabela 3 apresenta os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo considerando uma sobrecarga acidental de 0,5 kN/m² e f_{ck} de 30 MPa. A partir desta, é possível notar que a espessura da capa teve o valor mínimo (4 cm) para todos os vãos. Também foi verificado em todos os casos que a cubeta com intereixo de 61 cm e espessura inferior da nervura de 7 cm trouxe os melhores resultados. Nesse caso, as soluções conferiram às lajes, em média, altura com cerca de 5,4% do vão (desvio padrão de 0,7%). Com relação à armadura, com exceção do vão de 5 m, foi adotada uma barra por nervura.

Tabela 6 - Valores para concreto de 30MPa e 0,5 kN/m²

Vão (m)	b _f (m)	b _w (m)	h _f (m)	h _w (m)	Φ (mm)	h _f /L _x (%)	Nº barras	Custo/m ²
3,00	0,61	0,085	0,040	0,16	8,0	6,7	1	R\$ 38,59
4,00	0,61	0,085	0,040	0,18	10,0	5,5	1	R\$ 44,46
5,00	0,61	0,100	0,040	0,21	12,5	5,2	2	R\$ 53,60
6,00	0,61	0,115	0,040	0,26	10,0	5,0	1	R\$ 68,94
7,00	0,61	0,125	0,040	0,30	16,0	4,9	1	R\$ 77,81

Fonte: O Autor, 2022.

A Tabela 4 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo para os vãos analisados considerando uma sobrecarga acidental de 1,5 kN/m² e f_{ck} de 30 MPa. A partir desta, é possível notar que, assim como no caso da sobrecarga de 0,5 kN/m², com exceção do vão de 7 m, a espessura da capa teve o valor mínimo (4 cm). Em todos os casos, foi verificado que a cubeta com intereixo de 61 cm e espessura inferior da nervura de 7 cm trouxe os melhores resultados. Para esse caso, foi possível notar que as melhores soluções conferiram às lajes, em média, altura com 5,7% do vão (desvio padrão de 0,7%). Com relação à armadura, em todos os casos foi adotada uma barra por nervura.

Tabela 7 - Valores para concreto de 30MPa e 1,5 kN/m²

Vão (m)	b _f (m)	b _w (m)	h _f (m)	h _w (m)	Φ (mm)	h _f /L _x (%)	Nº barras	Custo/m ²
3 m	0,61	0,085	0,040	0,16	6,3	6,7	1	R\$ 40,66

4 m	0,61	0,085	0,040	0,18	8,0	5,5	1	R\$ 49,02
5 m	0,61	0,115	0,040	0,26	12,5	6,0	1	R\$ 60,79
6 m	0,61	0,115	0,040	0,26	16,0	5,0	1	R\$ 71,63
7 m	0,61	0,125	0,060	0,30	10,0	5,1	1	R\$ 96,88

Fonte: O Autor, 2022.

A Tabela 58 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo para os vãos analisados considerando uma sobrecarga acidental de 2 kN/m² e f_{ck} de 30 MPa. É possível notar que as soluções adotaram a modulação com intereixo de 61 cm e largura inferior da nervura com 7 cm. Com relação à espessura da capa, houve um comportamento diferente em relação aos anteriores; para os menores vãos, de 3 m e 4 m, a capa teve valor mínimo (4 cm), enquanto os vãos de 5 m e 6 m usaram capa com espessura intermediária (5 cm) e o vão de 7 m teve a maior capa (6 cm). Por fim, foi possível notar que as melhores soluções conferiram às lajes, em média, altura com 5,7% do vão (desvio padrão de 0,9%). Com relação à armadura, em todos os casos foi adotada uma barra por nervura.

Tabela 8 - Valores para concreto de 30MPa e 2 kN/m²

Vão (m)	b_f (m)	b_w (m)	h_f (m)	h_w (m)	Φ (mm)	h_t/L_x (%)	Nº barras	Custo/m ²
3 m	0,61 m	0,085	0,040	0,18	6,3	7,3	1	R\$ 42,11
4 m	0,61 m	0,085	0,040	0,18	12,5	5,5	1	R\$ 48,96
5 m	0,61 m	0,100	0,050	0,21	10,0	5,2	1	R\$ 66,38
6 m	0,61 m	0,115	0,050	0,26	16,0	5,2	1	R\$ 76,32
7 m	0,61 m	0,125	0,060	0,30	16,0	5,1	1	R\$ 118,48

Fonte: O Autor, 2022.

Por fim, foi analisado o comportamento das lajes com concreto classe C35. A Tabela 3 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo considerando uma sobrecarga acidental de 0,5 kN/m² e f_{ck} de 35 MPa. A partir desta, é possível notar que, com exceção do vão de 7 m, a espessura da capa teve o valor mínimo (4 cm). Em todos os casos, foi verificado que a cubeta com intereixo de 61 cm e espessura inferior da nervura de 7 cm trouxe os melhores resultados. Também foi possível notar que as melhores soluções conferiram às lajes, em média, altura com cerca de 5,5% do vão (desvio padrão de 0,7%). Com relação à armadura, com exceção do vão de 5 m, foi adotada uma barra por nervura.

Tabela 9 - Valores para concreto de 35MPa e 0,5 kN/m²

Vão (m)	b_f (m)	b_w (m)	h_f (m)	h_w (m)	Φ (mm)	h_t/L_x (%)	Nº barras	Custo/m ²
3 m	0,61	0,085	0,040	0,16	8,0	6,7	1	R\$ 39,39
4 m	0,61	0,085	0,040	0,18	10,0	5,5	1	R\$ 45,31
5 m	0,61	0,100	0,040	0,21	12,5	5,2	2	R\$ 54,58
6 m	0,61	0,115	0,040	0,26	10,0	5,0	1	R\$ 70,12
7 m	0,61	0,125	0,060	0,30	16,0	5,1	1	R\$ 79,17

Fonte: O Autor, 2022.

A Tabela 4 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo considerando uma sobrecarga acidental de 1,5 kN/m² e f_{ck} de 35 MPa. A partir desta, é possível notar que a espessura da capa teve o valor mínimo (4 cm) para todos os vãos. Em todos os casos, foi verificado que a cubeta com intereixo de 61 cm e espessura inferior da nervura de 7 cm trouxe os melhores resultados. Para esse caso, foi possível notar que as melhores soluções conferiram às lajes, em média, altura com 5,5% do vão (desvio padrão de 0,8%). Com relação à armadura, em todos os casos foi adotada uma barra por nervura.

Tabela 10 - Valores para concreto de 35MPa e 1,5 kN/m²

Vão (m)	b _f (m)	b _w (m)	h _f (m)	h _w (m)	Φ (mm)	h _f /L _x (%)	Nº barras	Custo/m ²
3 m	0,61	0,085	0,040	0,16	6,3	6,7	1	R\$ 41,46
4 m	0,61	0,085	0,040	0,16	12,5	5,0	1	R\$ 48,30
5 m	0,61	0,115	0,040	0,26	12,5	6,0	1	R\$ 61,97
6 m	0,61	0,115	0,040	0,26	16,0	5,0	1	R\$ 72,82
7 m	0,61	0,125	0,040	0,30	10,0	4,9	1	R\$ 88,82

Fonte: O Autor, 2022.

A Tabela 5 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo considerando uma sobrecarga acidental de 2 kN/m² e f_{ck} de 35 MPa. É possível notar que, assim como em todos os casos anteriores, as soluções adotaram a modulação com intereixo de 61 cm e largura inferior da nervura com 7 cm. Com relação à espessura da capa, com exceção do vão de 7 m, foi adotada a espessura mínima de 4 cm. Por fim, foi possível notar que as melhores soluções conferiram às lajes, em média, altura com 5,4% do vão (desvio padrão de 1,1%). Com relação à armadura, com exceção do vão de 5, em todos os demais casos foi adotada uma barra por nervura.

Tabela 11 - Valores para concreto de 35MPa e 2 kN/m²

Vão (m)	b _f (m)	b _w (m)	h _f (m)	h _w (m)	Φ (mm)	h _f /L _x (%)	Nº barras	Custo/m ²
3 m	0,61 m	0,085 m	0,040 m	0,18 m	8,0 mm	7,3	1	R\$ 42,95
4 m	0,61 m	0,085 m	0,040 m	0,16 m	12,5 mm	5,0	1	R\$ 48,30
5 m	0,61 m	0,100 m	0,040 m	0,21 m	10,0 mm	5,0	2	R\$ 62,70
6 m	0,61 m	0,115 m	0,040 m	0,26 m	16,0 mm	5,0	1	R\$ 72,82
7 m	0,61 m	0,125 m	0,050 m	0,30 m	16,0 mm	4,9	1	R\$ 90,03

Fonte: O Autor, 2022.

As Tabelas 12, 13 e 14 trazem, respectivamente, as soluções mais econômicas, incluindo o f_{ck} , para os vãos com cargas acidentais de 0,5, 1,5 e 2 kN/m². A partir delas, é possível verificar que, na maioria dos casos (60%), as soluções mais econômicas foram aquelas que usaram f_{ck} de 25 MPa. Em cerca de 13% dos casos foram usados concretos C30 e nos outros 27% foram usados concreto C35. À medida em que se aumenta o vão e a sobrecarga, a adoção de resistências mais elevadas para o concreto, que conferem maior rigidez (necessária porque o limitante passa a ser o estado limite de deformações excessivas), torna-se mais recorrente.

Tabela 12 – Menor custo para a carga acidental 0,5 kN/m²

Vão (m)	b _f (m)	b _w (m)	h _f (m)	h _w (m)	Φ (mm)	f _{ck} (MPa)	Custo/m ²
3,00	0,61	0,085	0,040	0,16	8,0	25	R\$ 37,79
4,00	0,61	0,085	0,040	0,18	10,0	25	R\$ 43,61
5,00	0,61	0,100	0,040	0,21	12,5	25	R\$ 52,62
6,00	0,61	0,115	0,040	0,26	10,0	25	R\$ 67,76
7,00	0,61	0,125	0,040	0,30	16,0	30	R\$ 77,81

Fonte: O Autor, 2022.

Tabela 13 – Menor custo para a carga acidental 1,5 kN/m²

Vão (m)	b _f (m)	b _w (m)	h _f (m)	h _w (m)	Φ (mm)	f _{ck} (MPa)	Custo/m ²
3,00	0,61	0,085	0,040	0,16	6,3	25	R\$ 39,87
4,00	0,61	0,085	0,040	0,18	8,0	25	R\$ 48,17
5,00	0,61	0,115	0,040	0,26	12,5	25	R\$ 59,61
6,00	0,61	0,115	0,040	0,26	16,0	30	R\$ 71,63
7,00	0,61	0,125	0,060	0,30	10,0	35	R\$ 88,82

Fonte: O Autor, 2022

Tabela 14 – Menor custo para a carga acidental 2,0 kN/m²

Vão (m)	b _f (m)	b _w (m)	h _f (m)	h _w (m)	Φ (mm)	f _{ck} (MPa)	Custo/m ²
---------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------	-----------------------	----------------------

3,00	0,61	0,085	0,040	0,18	6,3	25	\$ 41,28
4,00	0,61	0,085	0,040	0,18	12,5	25	R\$ 48,11
5,00	0,61	0,100	0,040	0,21	10,0	35	R\$ 62,70
6,00	0,61	0,115	0,040	0,26	16,0	35	R\$ 72,82
7,00	0,61	0,125	0,050	0,30	16,0	35	R\$ 90,03

Fonte: O Autor, 2022

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho se propôs a desenvolver um estudo paramétrico de lajes nervuradas unidirecionais moldadas no local com fôrmas plásticas reutilizáveis comercializadas pela empresa Impacto Protensão®. Para tanto, foi verificado o maior vão da laje, a carga permanente extra, o cobrimento e o tipo do aço, e variou o menor vão entre 3 e 7 m (com incremento de 1 m), a carga acidental (0,5, 1,5 e 2 kN/m²) e o f_{ck} do concreto (25, 30 e 35 MPa). Para cada combinação dessas variáveis, foram testados todos os moldes comercializados pela Impacto® e registrado aquele que foi capaz de atender os requisitos projeto com o menor custo. Portanto, ao todo, os 24 moldes foram testados em 63 lajes.

Desse estudo, foi possível notar que as melhores soluções tenderam a usar moldes com 61 cm de intereixo e largura inferior da nervura de 7 cm, capa com 4 cm de espessura e altura total com cerca de 6% do vão da laje. Com relação ao f_{ck} , foi possível notar que as soluções mais econômicas tenderam a usar concreto classe C25, que é o mais barato. À medida em que se aumenta o vão (principalmente a partir de 6 m) e a sobrecarga, a adoção de resistências mais elevadas para o concreto, torna-se mais recorrente. Convém destacar que esses resultados não consideraram as restrições referentes à resistência ao fogo.

Além de fornecer diretrizes para o projeto de lajes nervuradas unidirecionais mais complexas, a metodologia apresentada no trabalho mostrou-se eficiente e pode servir de base para o desenvolvimento de outros trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 3. ed. v. 2. Rio Grande: Dunas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013.

BEZERRA, E. M. f. **Otimização multiobjetivo de lajes nervuradas em concreto armado**. 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

CORREIA, R. S.; BONO, G. F. F.; BONO, G. Otimização de vigas de concreto armado utilizando a ferramenta Solver. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, vol. 12, n. 4, p. 910-931, 2019.

FRANCA, A. B. M.; FUSCO, P. B. **As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios**. São Paulo: Afala & Abrapex, 1997.

FREIRES, M. R.; BEZERRA, E. M. F.; MONTEIRO, J. V. S.; PEIXOTO, L. K. S.; SANTAN, J. F. A. Estudo comparativo de sistemas de lajes lisas de concreto protendido. In: IBRACON, 62., 2020, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2020.

IMPACTO. Catálogo de dados técnicos. **Impacto**, 2022. Disponível em: <<http://impactoprotensao.com.br/catalogo-de-formas/>>. Acesso em: 08 jul. 2022.

LIMA, P. V. N.; BEZERRA, E. M. F.; PEIXOTO, L. K. S.; MONTEIRO, J. V. S. Desenvolvimento de uma planilha eletrônica para dimensionamento de seções de concreto armado sujeitas à flexocompressão oblíqua. In: IBRACON, 62., 2020, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2020.

NOGUEIRA, L. G. O.; BEZERRA, E. M. F.; Ferramenta em ambiente Excel para análise estrutural de treliças espaciais pelo método dos elementos finitos. In: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods In Engineering, 38, 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CILAMCE, 2017.

VIZOTTO, I.; SARTORTI, A. L. Soluções de lajes maciças, nervuradas com cuba plástica e nervuradas com vigotas treliçadas pré-moldadas: análise comparativa. In. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.15, Pág 19-28, 2010.