



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

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA EM AMBIENTE
EXCEL PARA PROJETO DE LAJES NERVURADAS
UNIDIRECIONAIS COM FÔRMAS PLÁSTICAS REUTILIZÁVEIS**

KLEYVSON BERTOLDO SILVA

POMBAL – PB

2022

KLEYVSON BERTOLDO SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA EM AMBIENTE EXCEL
PARA O PROJETO DE LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS COM
FÔRMAS PLÁSTICAS REUTILIZÁVEIS

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(a): Prof. Me. Eric Mateus
Fernandes Bezerra

POMBAL – PB

2022

S586d Silva, Kleyvson Bertoldo.

Desenvolvimento de uma ferramenta em ambiente Excel para o projeto de lajes nervuradas unidirecionais com fôrmas plásticas reutilizáveis / Kleyvson Bertoldo Silva. – Pombal, 2022.

26 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. Me. Eric Mateus Fernandes Bezerra”.

Referências.

1. Lajes nervuradas. 2. Ambiente Excel - Desenvolvimento de ferramenta. 3. VBA. 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.

KLEYVSON BERTOLDO SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA EM AMBIENTE EXCEL
PARA PROJETO DE LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS COM
FÔRMAS PLÁSTICAS REUTILIZÁVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente KLEYVSON BERTOLDO
SILVA **APROVADO** em 25 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. Me. Eric Mateus Fernandes Bezerra
(Orientador – UFCG)

Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza
(Membro Interno – UFCG)

Prof. Me. Jonathas Iohanathan Felipe de Oliveira
(Membro Externo – IFCE)

AGRADECIMENTOS

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Desenvolvimento de uma ferramenta em ambiente Excel para projeto de lajes nervuradas unidirecionais com fôrmas plásticas reutilizáveis

Development of a tool in Excel environment for the design of unidirectional ribbed slabs with reusable plastic molds

Kleyvson Bertoldo Silva, e-mail: kleyvson.bertoldo@estudante.ufcg.edu.br

Eric Mateus, 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. Diante desse contexto e devido o emprego indispensável de ferramentas computacionais em projetos de engenharia, o presente trabalho propõe a concepção de uma ferramenta em ambiente Excel®, com interface produzida com os formulários do VBA, para o projeto de lajes nervuradas unidirecionais moldadas no local com fôrmas plásticas reutilizáveis comercializada pela Impacto®. Após apresentação e validação da ferramenta, um estudo da influência da variação do vão e da sobrecarga acidental sobre a laje é desenvolvido com intuito de fornecer diretrizes para escolha da fôrma numa etapa de pré-dimensionamento.

Palavras-chave: Lajes nervuradas. Excel. VBA.

ABSTRACT

Slabs are one of the structural elements that consume the most concrete in their design, a fact that justifies the 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 demand large spans. Among these, the ribbed slabs molded in place by plastic forms offer a series of economic, environmental and constructive advantages. Given this context and due to the indispensable use of computational tools in engineering projects, the present work proposes the design of a tool in Excel® environment, with an interface produced with VBA forms, for the design of unidirectional ribbed slabs molded in place with reusable plastic molds sold by Impacto®. After presentation and validation of the tool, a study of the influence of the variation of the span and the accidental overload on the slab is developed in order to provide guidelines for choosing the formwork in a pre-design stage.

Keywords: Ribbed slabs. Excel. VBA.

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 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.

Existem diversos sistemas estruturais que empregam lajes de concreto armado, como, por exemplo, as lajes maciças, lajes nervuradas (pré-fabricadas ou moldadas no local “in loco”) e lajes mistas (LOPEZ; BONO; BONO, 2013). Elas podem ser apoiadas em vigas ou diretamente nos pilares (lajes lisas). A NBR 6118 (2014) define lajes nervuradas como lajes “cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte”.

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. Além disso, o aumento da rigidez das lajes vem acompanhado de um aumento da altura, que, por sua vez, promove uma redução do consumo de aço. Ressalta-se, ainda, que o alívio no peso impacta positivamente nas vigas, pilares e fundações.

Segundo Carvalho e Pinheiro (2013), a laje é normalmente a parte da estrutura que mais consome material, uma vez que o pavimento normalmente possui área extensa. Sahab, Ashour e Toropov (2005) mostram em seu estudo que as lajes representaram 91% do custo total do edifício para o projeto otimizado. Por essa razão, muitos trabalhos estudam o comportamento desse elemento estrutural, como pode ser visto em Ferreira (2016), Nogueira e Bezerra (2017), Correia, Bono e Bono (2019) e Lima et al. (2020).

Devido à complexidade inerente à descrição matemática do comportamento de uma estrutura, hoje, de acordo com Bezerra et al. (2017), é impraticável desenvolver um projeto desses elementos sem auxílio de uma ferramenta computacional. Em um contexto de mercado que demanda por celeridade na concepção dos projetos, a produtividade proporcionada pelas ferramentas computacionais as torna imprescindíveis. Além disso, há um notável potencial de emprego pedagógico destas para atuarem como um facilitador na compreensão do comportamento das estruturas (ASSIS; BEZERRA, 2017).

Monteiro et al. (2020) destacam que, embora haja no mercado muitos *softwares* que auxiliam desde a análise estrutural até o detalhamento das estruturas, o desenvolvimento de ferramentas que resolvam problemas específicos torna-se atrativo porque esses programas mais abrangentes possuem elevado valor de aquisição e nem sempre são necessários para situações pontuais.

Muitas linguagens e ambientes de programação podem ser empregadas na construção de ferramentas computacionais. Dentre estes, o Microsoft Excel® (Excel) tem sido, em função dos seus recursos matemáticos e interface intuitiva, amplamente utilizado em escritórios de engenharia para auxiliar em atividades que vão desde o orçamento, planejamento e controle de uma obra, até o dimensionamento dos elementos que a compõe

(NOGUEIRA; BEZERRA, 2017). Segundo Pacievitch (2016), o Excel foi um *software* que mudou o uso das planilhas eletrônicas. O programa oferece muitos recursos e soluções, formas para criar e formatar as planilhas conforme a necessidade, sendo um dos pioneiros a fazer isto. Com a implantação do Visual Basic for Applications – VBA, algumas funções do programa foram automatizadas facilitando ainda mais o manuseio.

O Visual Basic for Applications, combinado com o Excel, é uma ferramenta poderosa disponível. Encontra-se localizada nos computadores Desktops de cerca de 400 milhões de usuários do Microsoft Office, e a maioria, talvez, nunca soube como aproveitar o seu potencial de utilização. Usando o VBA, os usuários podem acelerar a produção de qualquer tarefa no Excel (JELEN, 2004).

Diante do exposto, esse trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional em ambiente Excel para o projeto de lajes nervuradas unidirecionais moldadas no local com fôrmas plásticas reutilizáveis. Para melhorar a interação com o usuário, será desenvolvida uma interface gráfica utilizando o recurso VBA UserForms. De posse da ferramenta, será efetuado um estudo paramétrico com intuito de evidenciar seu potencial de aplicação.

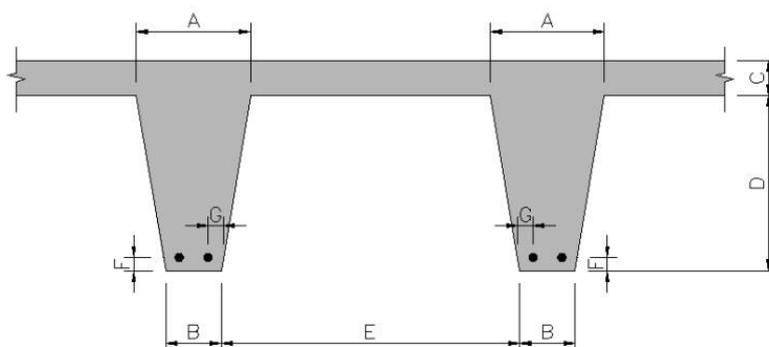
2. PROJETO DE LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS

Do ponto de vista estrutural, as lajes são classificadas, de acordo com Bastos (2015), como elementos de superfície sujeitas a cargas normais ao seu plano cuja finalidade é receber as cargas geradas pelos usuários, sejam elas o peso das pessoas, móveis, paredes ou qualquer outro tipo de carga pela qual foi projetada para resistir, podendo essas cargas concentradas, distribuídas de maneira linear ou sendo distribuídas por área.

Segundo CUNHA (1998), as lajes podem ser classificadas quanto à seção transversal (maciça, nervurada); quanto à execução (moldada in loco, pré-moldada); quanto ao apoio (em vigas/alvenaria estrutural, em pilares) e quanto à armação (armada em uma direção, em duas direções).

As lajes nervuradas foram concebidas com o intuito de promover um alívio do peso próprio da estrutura à medida que se tem um aproveitamento mais eficiente do concreto e do aço (FRANCA; FUSCO, 1997). Isso é feito removendo o concreto na zona de tração da laje para momentos positivos. A ligação entre a zona de concreto comprimido e as armaduras responsáveis por absorver as tensões de tração é feita pelas nervuras. Entre estas podem ser colocados materiais inertes, denominados enchimentos, com peso próprio reduzido. A (Figura 1) apresenta uma seção típica de uma laje nervurada.

Figura 1 – Seção típica de laje nervurada



Fonte: Pignatta (2012).

A = base superior
B = base inferior
C = espessura da mesa
D = largura da nervura
E = altura da nervura
F, G = recobrimento de armadura

Como consequência da remoção de parte do concreto tracionado, as lajes nervuradas, em comparação com as lajes maciças, podem apresentar maior rigidez com o mesmo peso próprio, o que possibilita maiores vãos entre os pilares, facilitando projetos pois o posicionamento das alvenarias não fica limitado pelas vigas, resultando em maior liberdade de projeto arquitetônico (SPOHR, 2008). Posição semelhante encontrada nos trabalhos de Dantas e Nascimento (2009), quando afirmam a possibilidade de os pilares serem locados conforme a necessidade do projeto arquitetônico e Albuquerque (1999) na medida em que constata que o fato da exigência de um menor número de vigas confere uma menor interferência do projeto estrutural no projeto arquitetônico.

Na concepção das lajes nervuradas *in loco*, podem ser usados materiais de enchimento, como, por exemplo, as lajotas cerâmicas (Figura 2-a) e EPS, que ficam permanentemente junto à laje, ou fôrmas reutilizáveis. As fôrmas de polipropileno apresentadas na (Figura 2-b), chamadas de cubas ou cubetas plásticas, além de acelerarem o processo construtivo, possuem como grande vantagem a rotatividade durante a execução da obra. De acordo com Spohr (2008), com o correto manuseamento das cubas, elas podem ser reutilizadas até 100 vezes, uma vida útil bem maior do que as fôrmas de madeiras utilizadas em sistemas convencionais. Ressalta-se que, ao contrário do que ocorre quando é utilizado entre as nervuras algum tipo de material de enchimento, tais fôrmas não incorporam peso à estrutura e consequentemente conduzem ações menores nos pilares e fundações.

Figura 2 – Lajes nervuradas moldadas com a) lajotas cerâmicas e b) com fôrmas de polipropileno

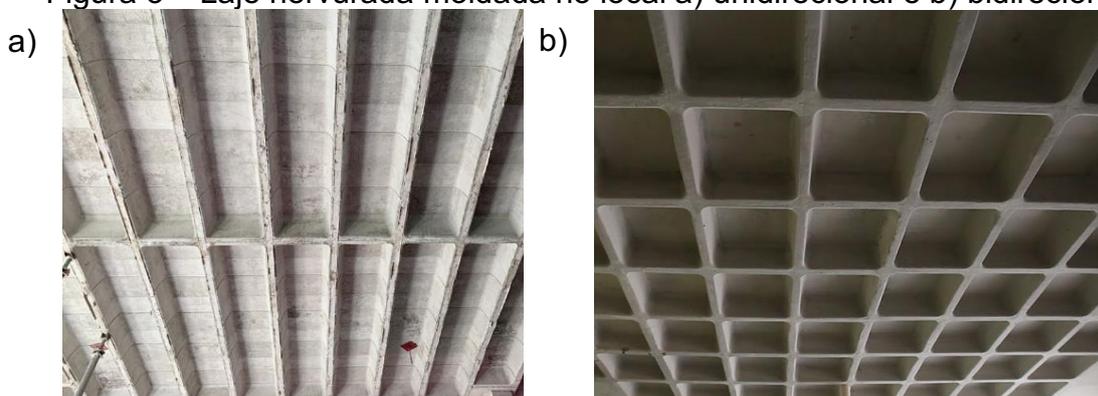


Fonte: a) acervo do autor (2022) e b) Atex (2022).

Assim como lajes maciças, as lajes nervuradas podem ter apoio contínuo (vigas, paredes de concreto, alvenaria estrutural), apoio discreto (diretamente em pilares) ou bordas em balanço. Para o caso de apoio em vigas ou paredes, a laje pode ser simplesmente apoiada ou engastada. Para lajes nervuradas, Bocchi Jr. (1995) recomenda evitar o uso de lajes engastadas ou em balanço, evitando o aparecimento de momentos negativos, que iriam gerar esforços de tração na parte superior e de compressão na parte inferior, região em que a área de concreto é reduzida, sendo insuficiente para resistir aos esforços solicitantes.

As lajes nervuradas podem ter nervuras em apenas um dos seus vãos (Figura 3-a) ou direcionadas nos dois vãos (Figura 3-b). 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) pretendidas e, nos seus casos analisados, notou que as lajes nervuradas unidirecionais foram as que resultaram em um menor custo com material.

Figura 3 – Laje nervurada moldada no local a) unidirecional e b) bidirecional



Fonte: (Atex, 2022).

Na Figura 3-a, embora a laje seja considerada unidirecional, é possível notar a existência de uma nervura transversal. A NBR 6118 (ABNT, 2014) não delimita nenhuma normativa com relação a adoção da nervura transversal, porém por meio de consultas aos fabricantes de lajes, a adoção de uma nervura de travamento para vãos de 4,0 m e duas nervuras para vãos de 6,0 m são baseadas em recomendações da referida norma da versão de 1980. Droppa Jr. (1999) ressalta em seu trabalho a importância que a nervura transversal confere em um eventual caso de colapso progressivo, ajudando no rearranjo dos esforços solicitantes e proporcionando uma maior rigidez à estrutura.

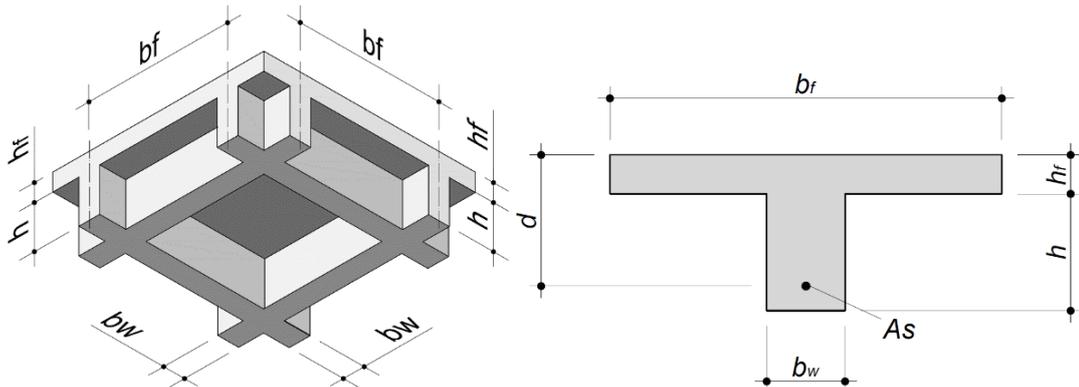
2.1. Dimensionamento de lajes nervuradas no Estado Limite Último

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 4 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 4 – Seção típica usada no dimensionamento



Fonte: 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 elástica 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), pode ser obtido por:

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

Em que α_e é igual a 1,2 para o agregado graúdo de basalto e diabásil, 1 para granito e gnaise, 0,9 para calcário e 0,7 para arenito, enquanto α_i é dado por:

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

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/m³) e dividindo isso pela área da laje. Para o cálculo de V_c , basta fazer:

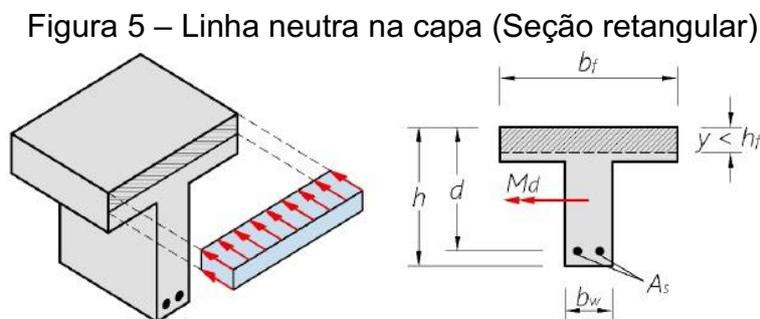
$$V_c = L_x L_y h - h_w L_x (b_f - b_w) n_v \quad (6)$$

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 .

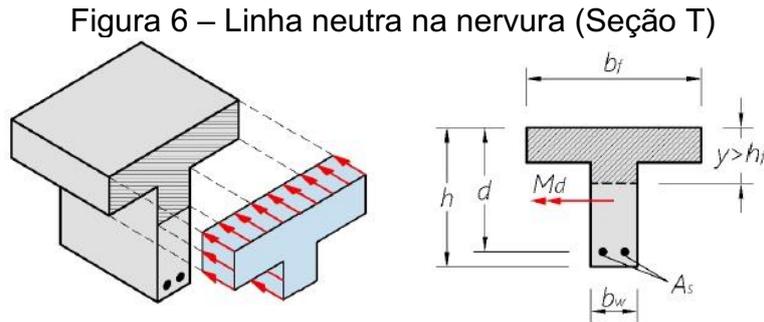
2.1.2. Armadura de flexão

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 (Figura 5), e caso se encontre na nervura (Figura 6), terá o formato de um "T".



Fonte: BEZERRA (2017).



Fonte: BEZERRA (2017).

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. 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 à compressão de cálculo 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:

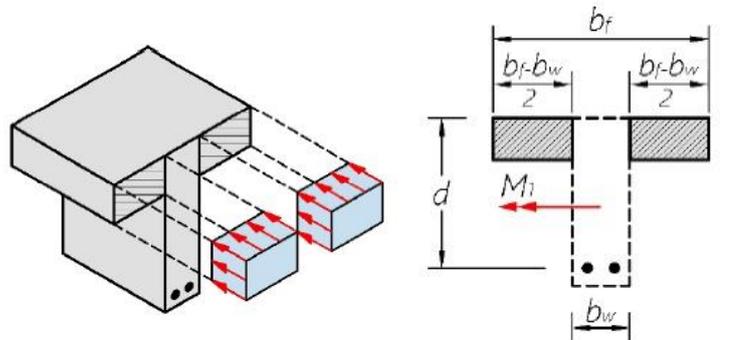
$$k_x = 1,25 - 1,9174 \sqrt{0,425 - k_{Md}} \quad (9)$$

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:

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

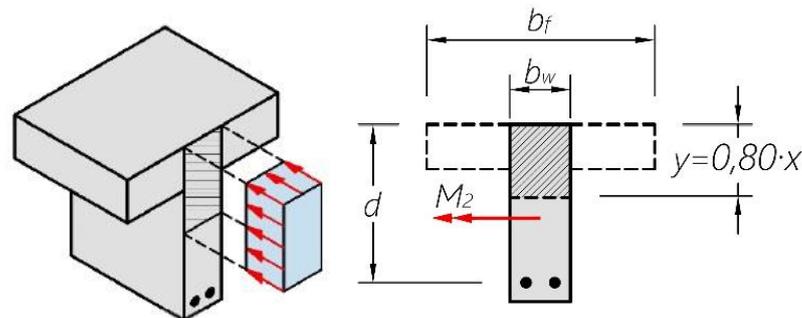
Por outro lado, se $d < d_0$, significa que a linha neutra está dentro da nervura e o cálculo será feito como seção T. Na formulação, é conveniente separar o momento equilibrado pelas abas, M_1 , (Figura 7 – M) e o momento que será equilibrado pela nervura (Figura 8 –).

Figura 7 – Momento equilibrado pelas abas



Fonte: BEZERRA (2017).

Figura 8 – Momento equilibrado pela alma



Fonte: BEZERRA (2017).

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® 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. Verificação do Estado Limite de Deformação Excessiva

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 por:

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

E x_I o centroide da seção bruta dado por:

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

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:

$$x_{II} = \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1} \quad (25)$$

Sendo:

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

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

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

η = (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:

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

Caso contrário tem-se:

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

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.

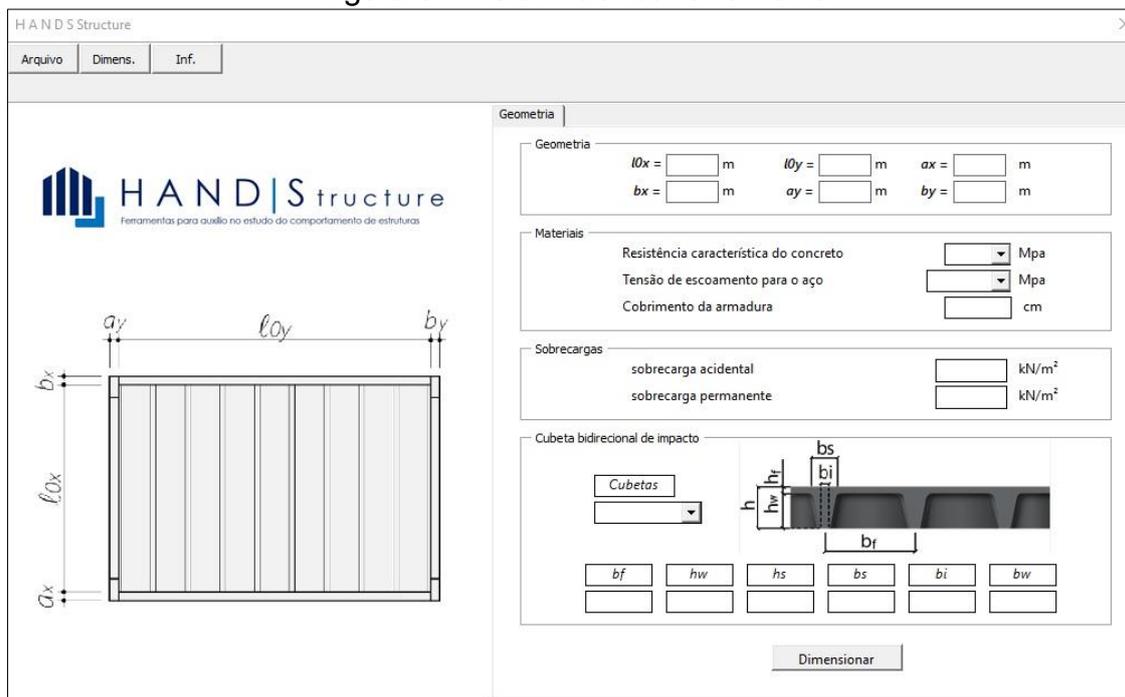
A flecha total deverá ser comparada com um valor limite que é estabelecido na tabela 13.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014) e está condicionado ao dano que se deseja evitar. Na ferramenta desenvolvida nesse trabalho, a flecha será comparada com o limite para aceitabilidade sensorial visual ($l_x/250$) e de vibração 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. APRESENTAÇÃO DA FERRAMENTA

A ferramenta desenvolvida nesse trabalho segue a metodologia de projeto exposta na seção anterior e se limita à análise de lajes nervuradas unidirecionais, simplesmente apoiadas em vigas nas suas quatro bordas e moldadas no local com fôrmas plásticas reutilizáveis do tipo cubeta presentes no catálogo da empresa Impacto protensão®, que comercializa esse tipo de molde. A combinação das ações é feita considerando carregamento normal e ação em serviço de edifícios residenciais ($\psi_1 = 0,4$ e $\psi_0 = 0,3$)

Embora tenha sido desenvolvida nas planilhas do Excel, não foi utilizada a interface gráfica desse *software*; para facilitar a interação com o usuário, foi desenvolvida uma interface própria (Figura 9) com auxílio do recurso VBA *UserForms*, onde são escritas as linhas de código para os objetos, métodos, propriedades e eventos.

Figura 9 – Tela inicial da ferramenta

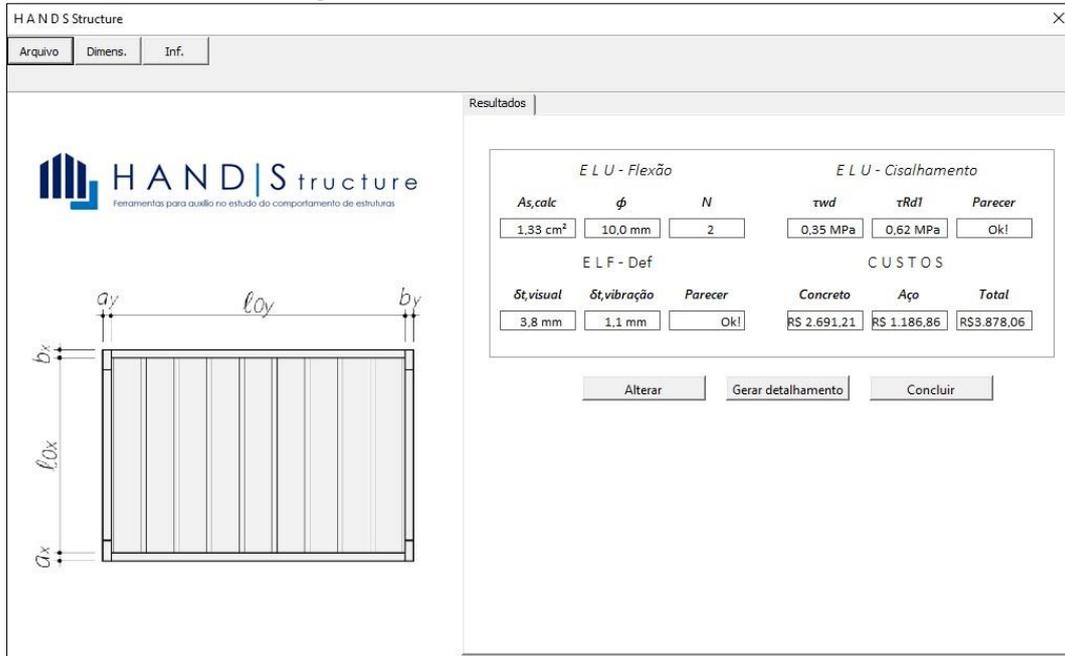


Fonte: Autoria própria (2022).

Ao abrir a ferramenta, o usuário deverá informar: dados geométricos, tais como as dimensões do maior vão livre da laje (l_y), do menor vão (l_x) e a largura das vigas de apoio (a e b); dados do material, como a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) e do aço ao escoamento (f_{yk}); dados das ações, como a carga de utilização e a carga extra permanente. Além disso, o usuário precisa escolher um dos moldes da Impacto, que já trazem consigo as dimensões da nervura e da espessura da capa. A empresa dispõe de moldes 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. 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. As fôrmas conferem às nervuras superfícies laterais inclinadas para facilitar a desforma. No dimensionamento, porém, considera-se uma seção transversal retangular para nervura com largura igual à espessura média.

Após inserção dos dados de entrada, o usuário deve clicar no botão “dimensionar”. A ferramenta, então, processa as informações e apresenta uma nova janela (Figura 10) com o resumo dos resultados para a área de aço calculada, seção transversal adotada, número de barras, tensão cisalhante calculada e resistente, flechas para deslocamento visíveis e vibrações sentidas, bem como uma estimativa dos custos relacionados ao concreto e aço. Por padrão, o cálculo desses custos pela ferramenta é baseado nos valores unitários extraídos do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) para o Estado da Paraíba referente ao mês de junho de 2022. Ressalta-se, porém, que esses índices podem ser alterados pelo usuário ao clicar no menu “Dados”, localizado no canto superior esquerdo da tela.

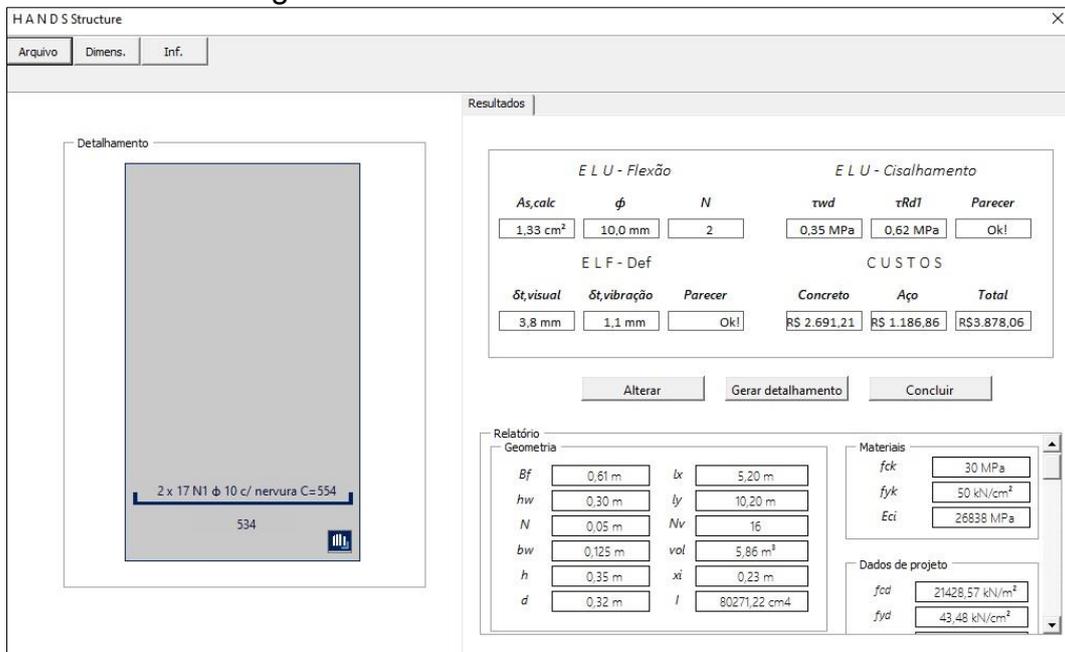
Figura 10 – Tela de saída de dados



Fonte: Autoria própria (2022).

Após verificar se a cubeta escolhida na entrada de dados leva a uma solução que atende aos critérios de projeto, o usuário pode gerar um detalhamento da armadura das nervuras (Figura 11) e será apresentado às etapas de cálculo realizadas de maneira pormenorizadas na aba “relatório”.

Figura 11 – Detalhamento dos resultados



Fonte: Autoria própria (2022).

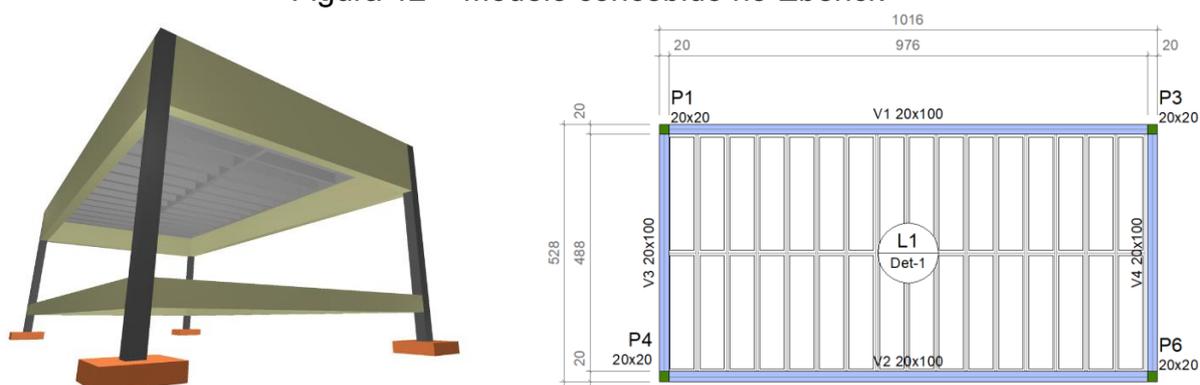
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Validação

Para verificar se a ferramenta desenvolvida nesse trabalho traz resultados coerentes, foi proposto o dimensionamento de uma laje nervurada unidirecional com vãos internos de 4,88 m x 9,76 m (moduladas para fôrma adotada), feita com concreto C30 e aço CA-50, simplesmente apoiada em vigas com 20 cm de largura. Foi considerado um cobrimento de 25 mm nas nervuras, carga de utilização de 2 kN/m² e carga de revestimento de 1,5 kN/m². O molde escolhido foi o 61/30/26 ($b_f = 61$ cm, $h_t = 30$ cm e $h_w = 26$ cm), cuja espessura média da nervura é de 11,5 cm.

O problema em questão foi, então, modelado no *software* Eberick® (Figura 12). Para tanto, foi necessário cadastrar o molde com as dimensões descritas anteriormente. Para conferir rigidez ao entorno da laje, foram adotadas vigas com 1 m de altura e pilares com seção 20 x 20 cm. Ressalta-se que o *software* discretiza a grelha de acordo com o tamanho das cubetas. Sendo assim, foi necessário manter pelo menos uma nervura transversal para obter os esforços e deslocamentos no meio da laje.

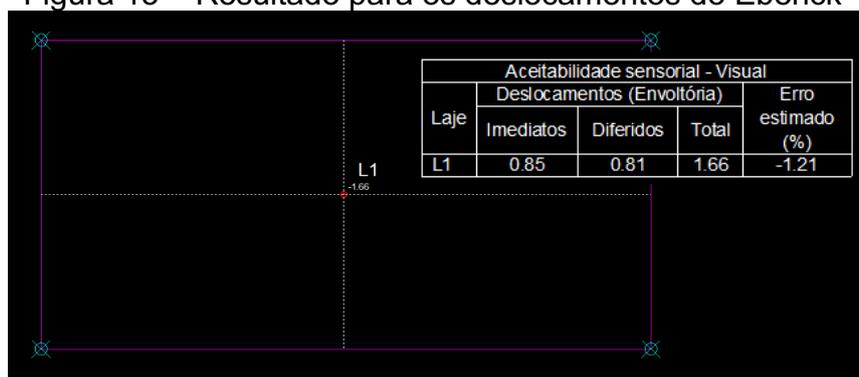
Figura 12 – Modelo concebido no Eberick®



Fonte: Autoria própria (2022).

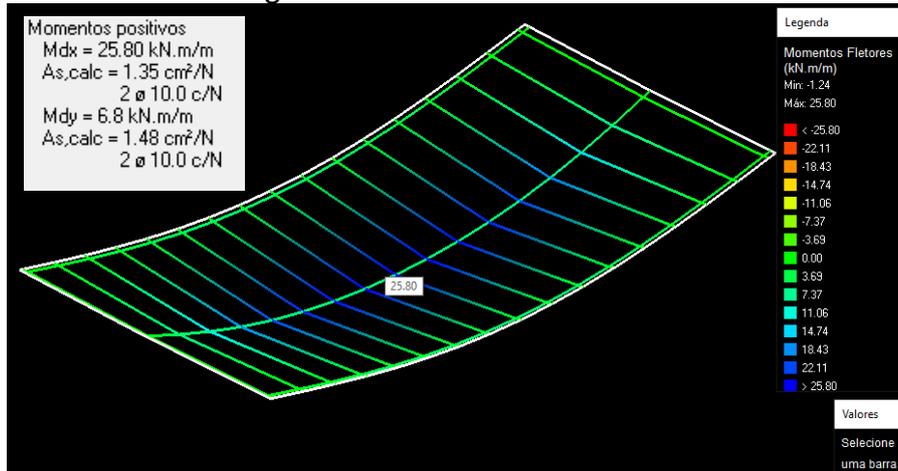
Conforme pode ser visto na Figura 13, a flecha imediata para combinação quase-permanente das ações (para verificar a aceitabilidade sensorial visual) fornecida pelo Eberick® foi de 0,85 cm, enquanto a flecha total foi de 1,66 cm. Já a Figura 14 mostra que o momento fletor de cálculo (majorado por 1,4) obtido pelo Eberick® na direção do menor vão foi de 25,89 kNm/m, isto é, o equivalente a 15,79 kNm/nervura. Isso leva a uma área de aço calculada de 1,48 cm²/nervura, sendo, então, adotada duas barras de 10 mm.

Figura 13 – Resultado para os deslocamentos do Eberick®



Fonte: Autoria própria (2022).

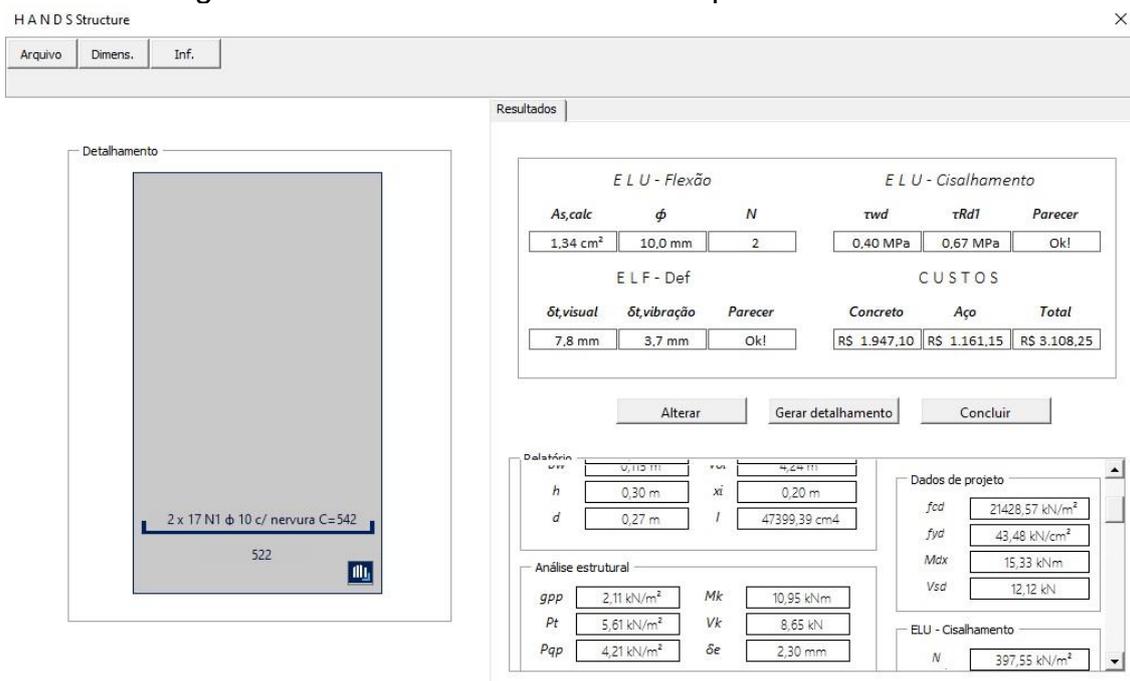
Figura 14 – Grelha do Eberick®



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 15 são apresentados os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida nesse trabalho e pelo Eberick®. Já a Tabela 1 traz um resumo dos resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida nesse trabalho e pelo Eberick®.

Figura 15 - Resultados da ferramenta para o Problema 1



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 1 – Comparação dos resultados da Ferramenta x Eberick®

Parâmetros	Eberick	Ferramenta	Diferença (%)
g_{PP} (kN/m ²)	2,33	2,47	5,67
M_d (kNm/nervura)	15,74	17,88	11,96
V_d (kN/nervura)	10,96	13,34	17,84
δ_i (cm)	0,85	0,58	31,76
δ_T (cm)	1,66	1,36	18,07
Armadura	2ø10 mm	2ø10 mm	-

Fonte: Autoria própria (2022).

Observando a Tabela 1, é possível notar que os resultados fornecidos pela ferramenta são consistentes e dentro de uma margem de diferença aceitável. As diferenças se devem, principalmente, pela existência da nervura transversal no modelo do Eberick® que não é considerada pela ferramenta. A ausência desta na ferramenta fez com que a estimativa do peso fosse inferior e os esforços internos fossem superiores. Essa diferença, no entanto, não teve impacto no resultado da área de aço utilizada, que, em ambas as ferramentas, levou a duas barras com diâmetro de 10 mm. Convém destacar que o cálculo da flecha foi a que apresentou maior diferença percentual e, diferentemente das outras medidas, contra a segurança. Porém, em termos de magnitude, a diferença não foi tão relevante, tendo em vista que a flecha total diferiu apenas 3 mm entre as estimativas.

4.2. Aplicação prática

Para mostrar o potencial de aplicação prática da ferramenta, foi desenvolvido um estudo paramétrico. Neste, foi fixado o maior vão da laje em 14 m e o menor vão foi variado entre 3 e 7 m, com incremento de 1 m. Também foram fixados o cobrimento (2,5 cm) e a carga de revestimento 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. Quanto aos materiais, foi considerado concreto de classe C30 e aço CA-50.

Para cada combinação dessas variáveis, foram testados todos os moldes comercializados pela Impacto (24 moldes). Como foram analisados 7 vãos e 3 tipos de carga acidental, foram concebidos 21 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.

A Tabela 2 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo para os vãos analisados considerando uma sobrecarga acidental de 0,5 kN/m². 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 intoreixo 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 5% do vão (desvio padrão de 0,2%).

Tabela 2 - Resultado da variação do vão para carga acidental de 0,5 kN/m²

Vão	$b_w/h/h_w$	Ø	n	h/l
3 m	61/20/16	6,3 mm	2	6,67%
4 m	61/22/18	8,0 mm	2	5,50%
5 m	61/25/21	12,5 mm	1	5,00%
6 m	61/30/26	10,0 mm	2	5,00%
7 m	61/35/30	16,0 mm	1	5,00%

Fonte: Autoria própria (2022).

A Tabela 3 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo para os vãos analisados considerando uma sobrecarga acidental de 1,5 kN/m². 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). Para o vão de 7 m foi necessário usar uma espessura de capa de 10 cm e cubeta com intoreixo de 80 cm e espessura inferior da nervura de 12,5 cm, enquanto em todos os outros vãos a modulação

com intereixo de 61 cm e largura inferior da nervura com 7 cm levaram aos melhores resultados. Para esse caso, foi possível notar que as melhores soluções conferiram às lajes, em média, altura com 5,9% do vão (desvio padrão de 0,5%), que é um pouco maior do que para o caso anterior, contudo, ainda mostra uma tendência à casa dos 5%.

Tabela 3 - Resultado da variação do vão para carga acidental de 1,5 kN/m²

Vão	$b_w/h/h_w$	\emptyset	n	h/l
3 m	61/20/16	10,0 mm	1	6,67%
4 m	61/22/18	12,5 mm	1	5,50%
5 m	61/30/26	10,0 mm	2	6,00%
6 m	61/34/30	16,0 mm	1	5,67%
7 m	80/40/30	12,5 mm	3	5,71%

Fonte: Aatoria própria (2022).

A Tabela 4 traz os resultados para armadura e moldes que apresentaram menor custo para os vãos analisados considerando uma sobrecarga acidental de 2 kN/m². 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. 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, com exceção do vão de 4 m (em que $h_f = 5$ cm), foram adotadas 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% do vão (desvio padrão de 0,5%), revelando também uma proximidade em relação aos demais casos.

Tabela 4 - Resultado da variação do vão para carga acidental de 2,0 kN/m²

Vão	$b_w/h/h_w$	\emptyset	n	h/l
3 m	61/20/16	10,0 mm	1	6,67%
4 m	61/23/18	12,5 mm	1	5,75%
5 m	61/30/26	10,0 mm	2	6,00%
6 m	61/34/30	16,0 mm	1	5,67%
7 m	x	x	x	x

Fonte: Aatoria própria (2022).

Com relação ao diâmetro das barras e a quantidade, convém destacar que a ferramenta limita a utilização de duas barras por nervura devido às simplificações na metodologia de cálculo empregada, que não verifica o espaçamento entre as barras nem recalcula a altura útil se for necessário dispor as barras em mais de uma camada. A ferramenta escolhe entre duas e uma barra de acordo com a menor área de aço. Vale mencionar que há um ganho do ponto de vista construtivo nessa limitação do número de barras.

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho se propôs a desenvolver uma ferramenta em ambiente Excel®, usando o recurso VBA UseForms, para projeto estrutural de lajes nervuradas unidirecionais moldadas no local com fôrmas plásticas reutilizáveis comercializadas pela empresa Impacto

Protensão®. Ao comparar os resultados fornecidos por esta com os obtidos pelo *software* Eberick, foi possível verificar que a metodologia empregada na concepção da ferramenta é capaz de trazer resultados coerentes e dentro de um limite aceitável de diferença quando comparadas com um *software* mais robusto e amplamente empregado na construção de projetos estruturais em concreto armado no Brasil.

Após validação da ferramenta, foi desenvolvido um estudo paramétrico, em que se fixou o maior vão da laje, a carga permanente extra, o cobrimento, o f_{ck} do concreto e o tipo do aço, e variou o menor entre 3 e 7 m (com incremento de 1 m) e a carga acidental (0,5, 1,5 e 2 kN/m²). Para cada combinação dessas variáveis, foram testados todos os moldes comercializados pela Impacto (24 moldes) e registrado aquele que foi capaz de atender os requisitos projeto com o menor custo.

Do estudo paramétrico, foi possível notar que as melhores soluções tenderam a usar moldes com 61 cm de entre-eixo 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. Convém destacar que esses resultados não consideraram as restrições referentes à resistência ao fogo.

Além de fornecer subsídios para o projeto de lajes nervuradas unidirecionais mais complexas, a ferramenta tem relevante valor no processo pedagógico na medida em que pode ser utilizada na compreensão acerca do comportamento das estruturas. Rapidamente é possível identificar a influência dos parâmetros nos resultados da laje sem precisar processar uma ferramenta mais robusta.

Em suma, a ferramenta obteve êxito no objetivo para o qual se propôs, mostrando uma alternativa para engenheiros e estudantes desenvolverem soluções customizadas de lajes nervuradas. A metodologia apresentada no trabalho mostrou-se eficiente e pode servir de base para o desenvolvimento de outros trabalhos.

6. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.T. **Análise de alternativas para edifícios em concreto armado**. 1999. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999

ANDRADE, F., **Excel para todos**. São Paulo: Nobel, 2002.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. Ed. Dunas – Rio Grande, 4ª ed, RS 2014.

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

_____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ASSIS, G. C. O.; BEZERRA, E. M. F.; Sistema multiplataforma para análise de pórticos planos utilizando ambiente web. In: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods In Engineering, 38, 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CILAMCE, 2017.

AVILLA JUNIOR, J. **Contribuição ao projeto e execução de lajes lisas nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP. 2005.

BETTE, S. C.; Silva, V. Pignatta. **Dimensionamento de lajes nervuradas de concreto armado em situação de incêndio por método gráfico**. In: anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves. IBRACON. 2012.

BEZERRA, E. M. F. **Otimização multiobjetivo de lajes nervuradas em concreto armado**. 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

BEZERRA, E. M. F.; OLIVEIRA, J. I. F.; ARAÚJO, D. A. M.; MELO, A. M. C. Aplicativo Android para análise e dimensionamento de lajes nervuradas em concreto armado. **59º Congresso Brasileiro do Concreto**. Bento Gonçalves, IBRACON, 2017.

BOCCHI JÚNIOR, C. F. **Lajes nervuradas de concreto armado: projeto e execução**. 1995. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

BOCHI JUNIOR, C. F.; GIONGO, J.S. **Lajes nervuradas: análise comparativa entre o cálculo aproximado e cálculo usando a teoria das grelhas**. 443 pg. 1993. III Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. **Estados limites de utilização**. São Carlos: EESC-USP, 1999. 32 p.

CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2013. v. 2.

CARVALHO, M. C. **Análise Comparativa estrutural e econômica entre as lajes maciça, nervurada treliçada e nervurada com cuba plástica em edifício de 10 pavimentos**. 2012. Pág 79. Dissertação (Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Departamento de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana.

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.

CUNHA, A. J. P.; SOUZA, V. C. M. **Lajes em concreto armado e protendido**. 2. ed. Niterói: EDUFF, 1998. 580 p.

DANTAS, M. F. C.; NASCIMENTO, S. C. S. **Análise Comparativa entre Sistemas Estruturais Convencionais e Estruturas de Lajes Nervuradas em Edifícios**. Salvador. Universidade Católica do Salvador, 2009.

DROPPA Jr., A. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

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.

JELEN, B. **Macros e VBA para Microsoft Excel**. Rio de Janeiro: Campos, 2004.

LOPEZ, A. F. O.; BONO, G. F. F.; BONO, G. **Análise numérica comparativa entre lajes maciças e nervuradas com diferentes tipos de materiais de enchimento**. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Argentina, v. XXXII, p. 3483-3495, 19 nov. 2013..

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.

MONTEIRO, J. V. S.; BEZERRA, E. M. F.; PEIXOTO, L. K. S.; MATIAS, B. S. Concepção de Aplicação Android para Dimensionamento de Sapatas Rígidas Isoladas. 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.

PACIEVITCH, Y. **Excel**. 2016. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/informatica/excel/>>. Acesso em: 08/08/2022.

SAHAB, M. G.; ASHOUR, A. F.; TOROPOV, V. V. Cost optimization of reinforced concrete flat slab buildings. **Engineering Structures**, n. 27, p. 313-322, 2005.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes em concreto armado**. 2005. 239 f. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SIMON, J. **Excel data analysis: your visual blueprint for analyzing data, Charts and PivotTables**. 2nd ed. London: Visual, 2005

SPOHR, Valdi Henrique. **Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas**. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria: UFSM, 2008. 108p.

VIZOTTO, Itamar; SARTORTI, Artur Lenz. **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