

ABERTURAS EM LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO

ANÁLISE DA SUA INFLUÊNCIA NO DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL ATRAVÉS DO MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES

Lucas Marcon Paz¹Endereço ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2261-0814>Luciano Zatti²Endereço ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9314-2954>

RESUMO

As aberturas em lajes são comumente vistas em edificações, uma vez que esta é uma solução bastante usual e necessária para passagens de linhas de água, esgoto, dados, entre outros. Sua correta execução é de suma importância para que não haja a presença de fissuras no elemento construtivo. Para que isto possa ser evitado, deve-se projetar uma armadura específica para esta região. Assim sendo, este trabalho analisou a influência destas aberturas quanto ao seu posicionamento e dimensão na resistência das lajes em que elas são empregadas. Para esta pesquisa, foi utilizada a norma brasileira ABNT NBR 6118:2014, que determina como deve ser feito o dimensionamento de lajes maciças em concreto armado e as aberturas. Neste trabalho também foi exposto quais tipos de materiais foram utilizados e o método de cálculo para dimensionamento dos elementos construtivos utilizados. Para que se pudesse atingir o objetivo proposto, foi elaborada uma matriz de análise de 10 lajes idênticas entre si, com diferentes tipos de aberturas e posicionamentos, para que então se pudesse dimensionar suas armaduras com o auxílio do *software* TQS e então, utilizando o mesmo programa, poder obter resultados de flechas. Aplicando-se o método, obteve-se que, quanto mais ao centro da laje e maior a sua abertura, maior foi o impacto gerado na flecha do elemento estrutural. Muito além, constatou-se que a melhor posição para a abertura seria no canto da laje, uma vez que as flechas aumentaram consideravelmente quando estas aberturas se localizavam no centro do elemento estrutural. Para a determinação das armaduras de reforço, fez-se uso do método empírico de Leonhardt e Mönning, que consiste na simples interrupção de barras, e então comparou-se este resultado com o que foi calculado através do método de bielas e tirantes, o qual consiste em encontrar as forças atuantes no entorno da abertura e então aplica-las na treliça idealizada, assim determinando as cargas atuantes. Com isto, foi possível determinar uma área de aço requerida. Com estes resultados, observou-se que o método empírico de Leonhardt e Mönning apresentou em toda a matriz de análise uma área de aço maior do que a obtida pelo método de bielas e tirantes, assim sendo este o mais conservador para estas situações.

Palavras-chave

Lajes de concreto armado; Aberturas; Resistência; Método de bielas e tirantes; TQS.

1 Engenheiro civil, Universidade de Caxias do Sul (UCS), Rio Grande do Sul. Impaz@ucs.br

2 Mestre em engenharia civil, Universidade de Caxias do Sul (UCS), Rio Grande do Sul. lzatti@ucs.br



OPENINGS IN SOLID CONCRETE SLABS

ANALYSIS OF ITS INFLUENCE ON STRUCTURAL DIMENSIONING THROUGH THE STRUT-AND-TIE MODELS

ABSTRACT

This manuscript main objective is to compare two methods of designing reinforcement around an opening in a solid slab of reinforced concrete, in addition to analyze the deflections observed in the structural element, in order to compare the impact caused to the service limit state between different types of openings presented. For this, an analysis matrix of 10 identical slabs was elaborated, with different types of openings and positions, so that their reinforcement could be dimensioned with the TQS software help and then, using the same application, to be able to obtain the deflection results. Applying the method, it was found that the further to the center of the slab and the larger was the opening, the greater was the impact generated in the deflections. For the determination of reinforcing reinforcements, the empirical method of Leonhardt and Mönning was used, and then this result was compared with what was calculated using the strut-and-tie model. With these results, it was observed that the empirical method of Leonhardt and Mönning presented throughout the analysis matrix, a greater steel area than that obtained by the strut-and-tie model, thus being the most suitable for these situations. This manuscript brings with it a possible future improvement in calculation methods for the situations in which it fits, seeking a methodological simplification.

Keywords

Reinforced concrete slabs; Openings; Resistance; Strut-and-tie models; TQS.

Submetido em: 18/08/2023 – Aprovado em: 22/09/2023 – Publicado em: 26/09/2023

1 INTRODUÇÃO

As lajes maciças de concreto armado são amplamente utilizadas em todos os tipos de construção civil no país. Este método é dado pela execução de formas onde, em seguida, são dispostas as armaduras e então o conjunto é concretado. Por vezes é possível que haja a necessidade de transpassar tubulações entre os pavimentos desta edificação e é aí que se faz necessária a abertura nestes elementos estruturais.

Para que se dimensione estas aberturas, a ABNT NBR 6118:2014 dispõe de regras onde as medidas destas passagens devem obedecer a alguns limites. Uma vez ultrapassado estes limites, a norma indica que há a necessidade de se fazer um estudo focado nestas aberturas, utilizando algum método já existente para determinar as armaduras necessárias. Um dos caminhos indicados é o método de bielas e tirantes. Esta metodologia já foi estudada e alguns autores, como Cardoso (2010) e Aguiar (2018), fizeram testes para determinar as armaduras de reforço para aberturas em diversos elementos estruturais, dentre eles, lajes. Nestes trabalhos foi constatado que o método pode ser utilizado, mas que outras metodologias também são aplicáveis.

Sabendo que estas aberturas influenciam diretamente nas flechas destas lajes de maneira a aumentá-las, o presente trabalho buscou analisar qual a melhor proporção de dimensões a ser adotada para estas aberturas e também qual seria o melhor posicionamento destas, além de avaliar o método de bielas e tirantes como sendo o caminho a se determinar as armaduras de reforço para estas situações. Com uma matriz de análise elaborada com alguns modelos de estudo, foi possível observar qual a melhor opção a ser aderida para uma menor influência destas fendas nas lajes maciças de concreto armado, determinando as flechas através de método computacional e definindo as armaduras através da metodologia proposta.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta a referência bibliográfica base para este trabalho, onde pode-se encontrar os conceitos básicos sobre lajes maciças em concreto armado, além das influências que aberturas podem causar nestes elementos estruturais. Foram também abordados os principais aspectos para o dimensionamento destas lajes.

2.1 Dimensionamento de lajes maciças e cálculo do estado limite de serviço (ELS)

As lajes maciças de concreto armado são dimensionadas de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, que elenca diversos fatores que deverão ser levados em conta no momento do cálculo. Neste presente trabalho, foram estudadas lajes apoiadas sobre vigas, mas a norma brasileira também aborda lajes do tipo cogumelo e lisa, que têm seu apoio diretamente nos pilares. Para as lajes apoiadas em vigas, a ABNT NBR 6118:2014 traz referenciais como os vãos

teóricos, a verificação das condições de apoio, que podem variar entre engastadas e simplesmente apoiadas, coeficientes multiplicadores para a análise de cargas, verificação para o estado limite de serviço (ELS) e o estado limite último (ELU) dos elementos e dimensionamento à flexão para a determinação das armaduras positivas e negativas. A norma também traz restrições atribuídas às aberturas em lajes e furos que podem eventualmente serem feitos nelas.

2.2 Estado limite de serviço (ELS)

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, o atendimento ao ELS diz respeito às flechas do elemento estrutural calculado, ou seja, sua deformação ao longo do tempo de acordo com o seu carregamento. O primeiro passo é verificar a flecha inicial da laje, que se refere à execução da laje ao período de desescoramento dela. A flecha inicial, segundo Pinheiro (2007), pode ser encontrada através da Equação 1.

$$f_0 = \frac{p^* \times l_y^4}{w_m \times E_{cs} \times h^3} \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que:

f_0 = flecha inicial (cm);

p^* = carga total corrigida (kN/cm²);

l_y = menor vão (cm);

w_m = Coeficiente tabelado de Hahn;

E_{cs} = módulo de elasticidade secante;

h = altura/espessura arbitrada inicialmente para a laje (cm).

O módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}) é dado pela Equação 2 a seguir.

$$E_{cs} = \alpha_i \times \alpha_e \times 571 \times \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto (kN/cm²);

α_i = valor tabelado segundo propriedade da resistência característica do concreto (ver Tabela 1);

α_e = valor tabelado e obtido através do agregado graúdo utilizado;

f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão (MPa).

Os valores de α_i podem ser vistos na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica do concreto à compressão, sendo granito o agregado graúdo, com E_{ci} e E_{cs} em GPa.

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci}	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs}	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,93	0,98	1,00	1,00

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118:2014.

Após calculada a flecha inicial, calcula-se a flecha diferida no tempo, que se dá, segundo a ABNT NBR 6118:2014, após o desescoramento da laje concretada, considerando a retirada das escoras aos 28 dias e uma flecha alcançada após 70 meses. Este valor deverá ser menor que a flecha admissível. A flecha final é dada pela Equação 3 a seguir.

$$f_{\infty} = 2,32 \times f_0 \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

f_{∞} = flecha final (cm);

f_0 = flecha inicial (cm).

Tendo a flecha final calculada, a normativa ABNT NBR 6118:2014 diz que esta deve ser comparada a flecha admissível, que é calculada, por sua vez, através da Equação 4.

$$\bar{f} = \frac{l_y}{250} \quad \text{Eq. [4]}$$

Em que:

\bar{f} = flecha admissível (cm);

f_0 = menor vão (cm).

Tendo $\bar{f} > f_{\infty}$, tem-se o ELS sendo atendido.

2.3 Análise das aberturas

Leonhardt e Mönnig (1978) tratam das aberturas em lajes em sua obra e afirmam que as armaduras interrompidas pela seção podem servir como a área de aço que deseja ser encontrada: basta dispor as barras que servirão de reforço de maneira que estas supram a área de aço interrompida anteriormente. Entretanto, os autores tratam deste método quando as dimensões da abertura não extrapolam um quinto do vão da laje. Para maiores dimensões, os autores trazem um método próprio de calcular a área de aço necessária.

Cardoso (2010) elaborou uma pesquisa onde são comparados os métodos de bielas e tirantes e o método empírico de Leonhardt e Mönnig. O autor concluiu que, através do método empírico, não se considera a altura da laje, o que traz outra necessidade: verificar através de alguma outra metodologia este ponto em específico. Além disso, o autor faz ressalvas ainda para as armaduras localizadas na parte superior da laje. Quando Cardoso trata

do método de bielas e tirantes, ele diz que, diferentemente do método empírico, aqui é levado em conta a altura da laje, mas não suas vinculações. Ademais, ainda é dito que o método pode ser de grande valia para ocasiões onde o esforço cortante não é elevado.

Aguiar (2018) fez um estudo também utilizando o método de bielas e tirantes para chegar a uma área de aço necessária para os reforços em torno das aberturas em diversos elementos estruturais, dentre eles, as lajes. O autor comenta também em suas conclusões sobre a eficácia de *softwares* como o TQS. Este programa, por sua vez, não consegue, de forma automatizada, detalhar de forma correta as armaduras necessárias para as regiões de descontinuidade.

Além destes estudos, pode-se evidenciar que outras normas internacionais tratam do tema. Ruiz, Hoang e Muttoni (2022) fizeram um estudo sobre as aberturas em elementos de concreto armado segundo o Eurocode 2. Os autores constataram que, em uma revisão sobre o que diz a norma, que para a análise de descontinuidades nas peças a serem analisadas, o método de bielas e tirantes se mostra viável. Eles dizem que esta é uma ferramenta válida para projetos de aberturas em vigas, por exemplo. Muito além, disseram que as formulações do método trazido pela norma são fáceis de utilizar.

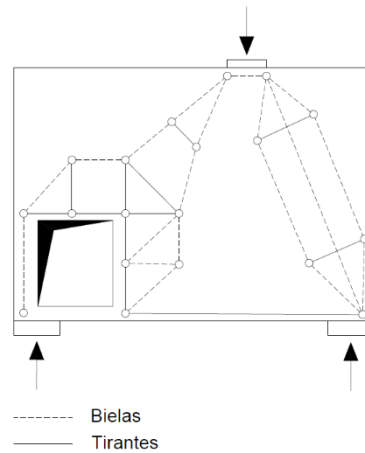
A norma americana ACI 318 (2019) trata de aberturas em alguns elementos de concreto armado, como em lajes, por exemplo. Na normativa foi possível verificar que ela possui vários tópicos sobre este assunto e que ela traz instruções de como a região deve ser verificada. A normativa fala, entre outras coisas, sobre a ancoragem de barras de aço, disposição destas barras de acordo com os momentos positivos e negativos e sobre a posição de barras, dizendo que estas colocadas na porção superior e inferior da laje são suficientes para resistir a momentos encontrados na região. A norma ainda traz, de forma ilustrativa, como a disposição das barras deve ser feita e suas extensões mínimas.

2.3.1 Método de bielas e tirantes

A ABNT NBR 6118:2014 recomenda a utilização do método das bielas e tirante para que se possa dimensionar a armadura em volta das aberturas realizadas em lajes. Este método é explicado por Fusco (2013) como a idealização de um modelo de treliças isostáticas que distribuem os esforços de tração e compressão em sua extensão.

De acordo com Fusco (2013), os tirantes são as partes das treliças que são tracionadas, enquanto as bielas são as partes comprimidas. O autor explica que se deve imaginar uma situação ideal de distribuição de esforços no elemento estrutural e a treliça deve ser desenhada de maneira a acompanhar a distribuição destes esforços. Esta idealização pode ser vista na Figura 1.

Figura 1. Idealização do modelo de bielas e tirantes.



Fonte: Adaptado de FUSCO (2013).

Como observado na Figura 1, as bielas são as barras comprimidas e os tirantes estão sendo tracionados. Segundo Fusco (2013), a modelagem da treliça deve ser feita levando em consideração o ponto de aplicação da(s) carga(s) e o(s) apoio(s). Esta força percorrerá toda a peça, inclusive o entorno da abertura, que também deve ser analisado como mostrado na Figura 1.

2.3.2 Determinação da armadura de reforço

A ABNT NBR 6118:2014 não comenta como deve-se proceder com as armaduras de reforço no entorno das aberturas, somente fala sobre a necessidade da presença delas. Nestas condições, Araújo (2014) recomenda a utilização da mesma área de aço descontinuada pela abertura. O comprimento das barras utilizadas para estes reforços é dado pela Equação 5.

$$c = f + 2 \times (h + l_b) \quad \text{Eq. [5]}$$

Em que:

c = comprimento total da barra (cm);

f = dimensão da face da abertura paralela à barra (cm);

h = altura total da laje (cm);

l_b = comprimento de ancoragem (cm).

Para que se possa determinar o comprimento de ancoragem básico, segundo a ABNT NBR 6118:2014, utiliza-se a Equação 6 a seguir.

$$l_{b,bas} = \frac{\phi}{4} \times \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \geq 25\phi \quad \text{Eq. [6]}$$

Em que:

$l_{b, bas}$ = comprimento de ancoragem (cm);
 \varnothing = diâmetro da armadura (cm)
 f_{yd} = resistência ao escoamento do aço de cálculo (MPa);
 f_{bd} = resistência de aderência de cálculo (MPa).

A ABNT NBR 6118:2014 traz consigo a equação para que se possa determinar a resistência de aderência de cálculo, que pode ser vista em seguida.

$$f_{bd} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times f_{ctd} \quad \text{Eq. [7]}$$

Em que:

$\eta_1 = 1,0$ para barras lisas;
 $\eta_1 = 1,4$ para barras entalhadas;
 $\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas;
 $\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência;
 $\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência;
 $\eta_3 = 1,0$ para diâmetros menores ou iguais a 32 mm;
 f_{ctd} = resistência de cálculo do concreto à tração direta (MPa).

Já para que se pudesse encontrar a resistência de cálculo do concreto à tração direta, fez-se uso da Equação 8, também trazida pela ABNT NBR 9118:2014.

$$f_{ctd} = \frac{0,7 \times 0,3}{1,4} \times \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad \text{Eq. [8]}$$

Em que:

f_{ctd} = resistência de cálculo do concreto à tração direta (MPa);
 f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto (MPa).

Tendo o comprimento básico de ancoragem calculado, utiliza-se este valor para chegar ao comprimento necessário de ancoragem, dado pela ABNT NBR 6118:2014 através da Equação 9. Esta equação é válida somente para barras com boa aderência, ou seja, quando a altura do elemento for menor ou igual a 30 cm.

$$l_{b, nec} = d + l_{b, bas} \quad \text{Eq. [9]}$$

Em que:

$l_{b, nec}$ = comprimento de ancoragem necessário (cm);
 d = altura útil da laje (cm);
 $l_{b, bas}$ = comprimento de ancoragem básico (cm).

Tendo estes valores, pode-se calcular o valor de ancoragem mínimo necessário. Este é dado pela ABNT NBR 6118:2014 de acordo com a Equação 10. Com isto, deve-se optar pelo maior resultado entre o comprimento de ancoragem mínimo necessário e o comprimento de ancoragem necessário.

$$l_{b,min} \geq \begin{cases} 0,3 \times l_{b,nec} \\ 10\phi \\ 10 \text{ cm} \end{cases} \quad \text{Eq. [10]}$$

Em que:

$l_{b,min}$ = comprimento de ancoragem mínimo necessário (cm).

Para verificar as áreas de aço para os tirantes, deve-se seguir a Equação 11 a seguir segundo a ABNT NBR 6118:2014.

$$A_s = \frac{F_{sd}}{f_{yd}} \quad \text{Eq. [11]}$$

Em que:

A_s = área de aço (cm²);

F_{sd} = força de tração determinada no tirante (kN);

f_{yd} = tensão de escoamento do aço (kN/cm²).

Para que se possa determinar a força atuante no tirante, pode-se fazer uso da equação de momento binário dita por Hibbeler (2010), como é visto na Equação 12 a seguir.

$$F_{sd} = \frac{M}{d} \quad \text{Eq. [12]}$$

Em que:

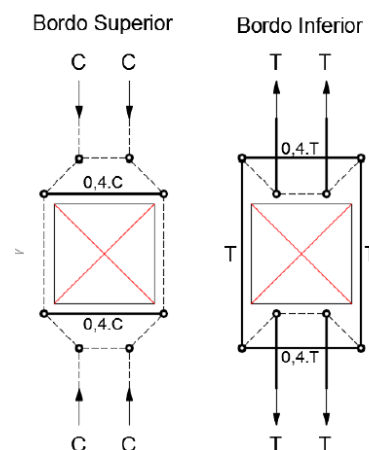
F_{sd} = força (kN);

M = momento atuante na laje (kNm);

d = altura da laje (m).

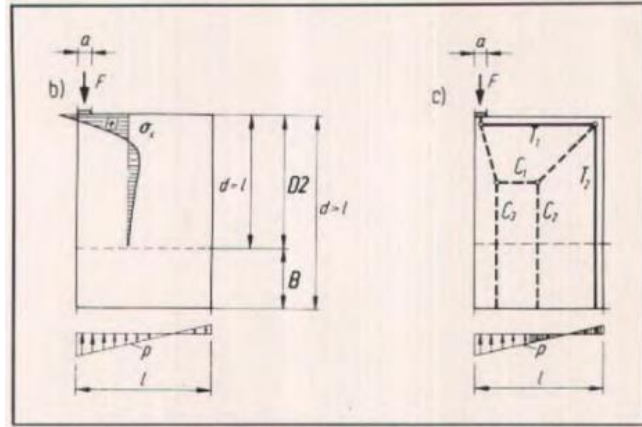
De acordo com Aguiar (2018), o modelo ideal de treliça para as aberturas localizadas no centro da laje é demonstrado na Figura 2. Esta idealização não pode ser utilizada para os vãos encontrados nas boras das lajes. Para estes, Schlaich, Schäfer e Jennewein (1978) trazem em seu artigo outra geometria, que pode ser observada na Figura 3.

Figura 2. Idealização de treliças para aberturas no centro da laje.



Fonte: Aguiar (2018).

Figura 3. Idealização de treliças para aberturas na borda da laje.



Fonte: Schlaich, Schäfer e Jennewein (1978).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os dados de projeto e o modo de obtenção de resultados que nortearam a pesquisa sobre as influências das aberturas em lajes maciças. São informadas também as propriedades dos materiais utilizados e as características das lajes maciças analisadas.

Para determinar as armaduras necessárias nesta laje, foi utilizada a ABNT NBR 6118:2014, que incorpora em seu método todas as fases de cálculo para obtenção dos resultados. Esta norma também compreende o cálculo das armaduras para as aberturas que foram feitas nessas lajes. A determinação das bitolas de aço utilizadas nas lajes foi calculada a partir do *software* TQS, assim como para a obtenção das flechas causadas nas lajes pelas aberturas e seu diferenciado posicionamento, através do método de “Grelhas Não-Lineares”. Já para o cálculo das armaduras de reforço, fez-se uso do método de bielas e tirantes. Este foi então comparado com o modelo proposto por Leonhardt e Mönning (1978), que consiste na interrupção da grelha positiva causada pelos vãos da abertura.

3.1 Dados de projeto

Para este estudo, adotou-se um concreto de classe C30, com resistência característica à compressão de 30 MPa. As armaduras tiveram um cobrimento mínimo estabelecido para uma região com classe de agressividade II (CAA-II), que se enquadra como uma área urbana de agressividade moderada. Para esta classe, se adota um cobrimento de 2,5 cm em lajes. O aço utilizado é de categoria CA-50, que contém uma resistência característica ao escoamento de 500 MPa.

3.2 Caracterização da laje

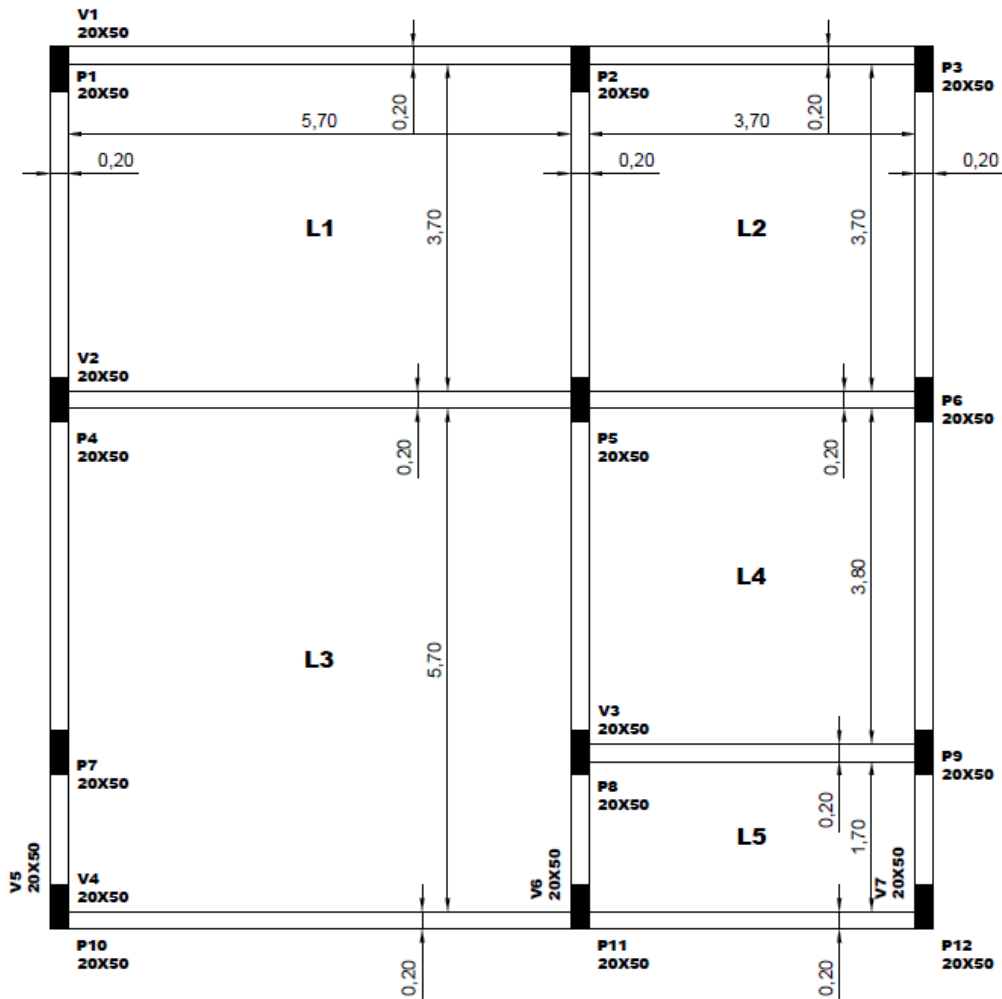
A laje tivera dimensões de comprimento, largura e altura padrão, adotando-se também uma peça armada em duas direções e apoiada em seus quatro bordos. A altura mínima exigida pela ABNT NBR 6118:2014 para estes elementos é de 7 cm para aquelas que não possuem balanço. Para este estudo, contudo, foi adotada uma altura de 12 cm.

Em suma, a laje adotada obteve dimensões de comprimento e largura iguais a 4 metros e espessura de 12 centímetros. A abertura adotada tem comprimento e largura iguais a 50 centímetros em um primeiro momento, e após foram modificados para 50 cm x 20 cm, variando estas medidas nos eixos x e y.

Os carregamentos adotados foram os dados pela ABNT NBR 6118:2014 para um edifício residencial onde o cômodo analisado é um dormitório com carga de revestimento de 100 kgf/m². De acordo com a ABNT NBR 6120:2019, a carga a ser adotada para esta situação é de 150 kgf/m².

Para a determinação da laje estudada, foi arbitrada uma planta baixa de uma residência e escolhido um dormitório que se encontra em um canto desta edificação, o qual se trata da laje 2 (L2), como visto na Figura 4. Esta laje conta com todos os quatro bordos apoiados e dois deles engastados.

Figura 4. Planta baixa da edificação.



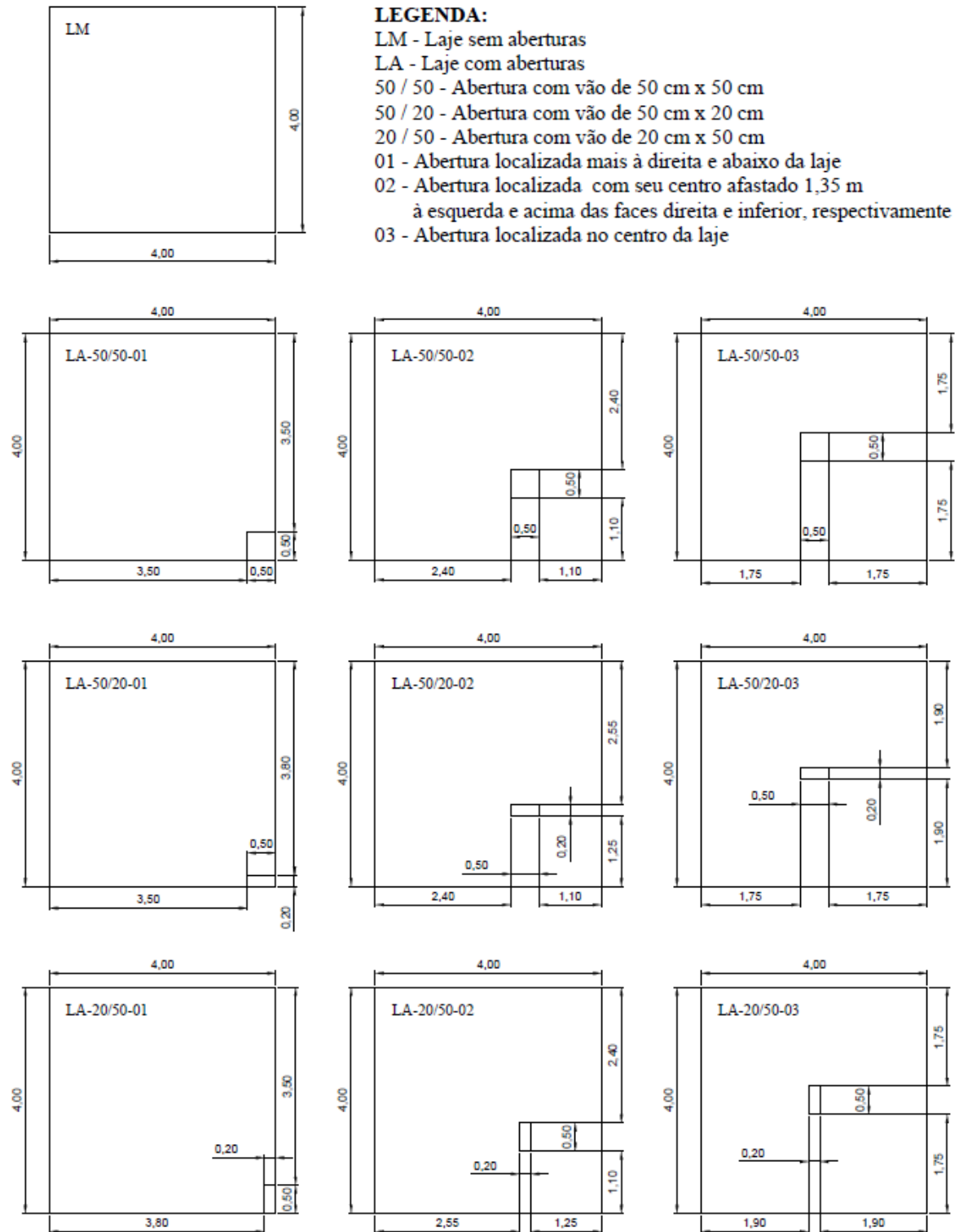
GEOMETRIA PAVIMENTO
SEM ESCALA

Fonte: O autor.

3.3 Matriz de análise

É apresentada uma matriz de análise na Figura 5, onde pode-se entender melhor quais foram os modelos de laje e de aberturas estudados. Ao todo, foram estudadas 10 diferentes situações que contemplam uma laje maciça sem nenhuma abertura e, após, 9 outras lajes com diferentes aberturas. Na primeira linha, tem-se 3 lajes com abertura de dimensões de 50 cm x 50 cm, variando sua posição desde o ponto mais abaixo e à direita até o centro do elemento estrutural. Nas segunda e terceira linhas, têm-se a mesma situação de posicionamentos, mas com diferentes dimensões de aberturas. Na primeira observam-se aberturas de 20 cm de largura e 50 cm de altura e na terceira a situação se inverte.

Figura 5. Matriz de análise.



MATRIZ DE ANÁLISE
SEM ESCALA

Fonte: O autor.

Inicialmente, todas as 10 lajes da matriz de análise foram submetidas ao *software* TQS. De lá, extraíram-se algumas informações, tais como: as armaduras que compõem a grelha positiva da laje em análise, a malha de armadura negativa desta laje, os momentos atuantes na região das aberturas propostas e as flechas obtidas pelo programa. Estas informações auxiliaram para que, após isto, se pudesse calcular a área de aço requerida no entorno das aberturas através dos métodos propostos e, então, se pudessem comparar os resultados entre eles. Para que fosse possível determinar a armadura através do método de bielas e tirantes, após processada a laje no sistema computacional, observou-se qual era o momento atuante naquela região. Esta informação foi trazida pelo sistema TQS. Com este dado, utilizou-se a Equação 12 para determinar a força atuante nos tirantes. Após, com o auxílio do *software* TQS, modelou-se a treliça idealizada para cada tipo de abertura (vide Figuras 2 e 3) para visualizar a força atuante no entorno da abertura. Tendo esta informação, fez-se uso da Equação 11 para determinar a área de aço trazida pela metodologia de bielas e tirantes.

Para confrontar esta informação, foi determinada a armadura de reforço das aberturas através do modelo empírico de Leonhardt e Mönning. Para esta metodologia, observou-se no programa computacional TQS a armadura trazida por ele (positiva e negativa) que havia sido interrompida na região das aberturas pelos vãos. Tendo esta informação, a área de aço a ser adotada deveria ser equivalente a interrompida. O detalhamento destas armaduras foi então feito com o resultado mais robusto dentre os trazidos pelas duas diferentes metodologias.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela metodologia inicialmente proposta.

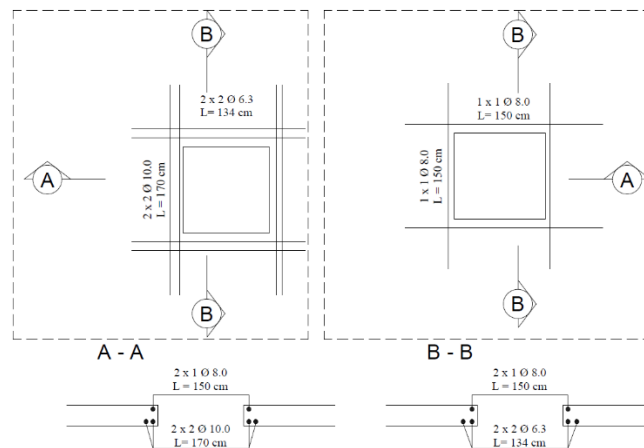
4.1 Armaduras obtidas para a laje LA-XX/XX-03

Por ser uma matriz de análise longa, estão representadas, nas figuras dos itens a seguir, em forma de detalhamento, as armaduras adotadas para as aberturas localizadas no centro da laje (LA-50/50-03, LA-50/20-03 e LA-20/50-03).

4.1.1 Armaduras obtidas para a laje LA-50/50-03

Esta, teoricamente, seria a abertura mais prejudicial à laje quanto ao atendimento dela ao ELS e também quanto a sua armadura de reforço: por ser a maior abertura, conta também com a maior interrupção da malha de aço positiva presente na laje e, por estar centrada no elemento estrutural, localiza-se na região onde são encontrados os maiores momentos fletores. O detalhamento da armadura de reforço no entorno desta abertura pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6. Armaduras de reforço para a laje LA-50/50-03 positivas e negativas, respectivamente.



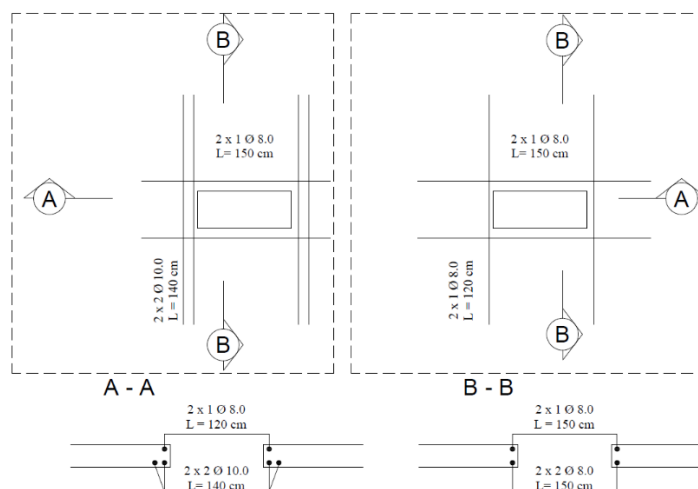
Fonte: O autor.

Para esta, a área de aço encontrada através do método de bielas e tirantes foi de $0,38 \text{ cm}^2$ no eixo y e de $0,37 \text{ cm}^2$ no eixo x, tanto para a armadura positiva, quanto para a negativa. Confrontando este resultado, o método empírico de Leonhardt e Mönning trouxe uma área de, aproximadamente, $3,20 \text{ cm}^2$ para a armadura positiva no eixo y e de $1,26 \text{ cm}^2$ para a armadura positiva no eixo x. Para a armadura negativa foi utilizado a mínima trazida pela ABNT NBR 6118:2014.

4.1.2 Armaduras obtidas para a laje LA-50/20-03

Esta laje conta com uma abertura reduzida se comparada ao caso anterior, porém trata-se também de um caso crítico por estar situada no centro da laje. O detalhamento da armadura de reforço no entorno desta abertura pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7. Armaduras de reforço para a laje LA-50/20-03 positivas e negativas, respectivamente.



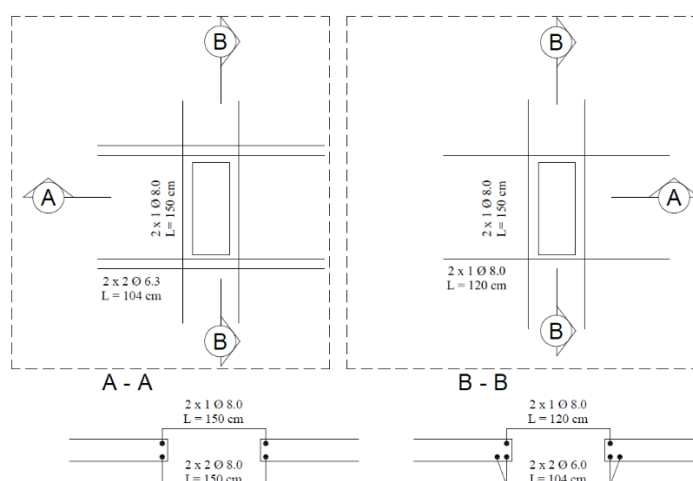
Fonte: O autor.

Para esta, a área de aço encontrada através do método de bielas e tirantes foi de 0,15 cm² no eixo y e de 0,32 cm² no eixo x, tanto para a armadura positiva, quanto para a negativa. Confrontando este resultado, o método empírico de Leonhardt e Mönning trouxe uma área de, aproximadamente, 3,20 cm² para a armadura positiva no eixo y e de 1,00 cm² para a armadura positiva no eixo x. Para a armadura negativa foi utilizado a mínima trazida pela ABNT NBR 6118:2014.

4.1.3 Armaduras obtidas para a laje LA-20/50-03

Esta abertura foi introduzida ao estudo para que houvesse uma comparação entre sua semelhante em termos de dimensões (LA-50/20-XX) e diferenciação em posicionamento nas coordenadas x e y. O detalhamento da armadura de reforço no entorno desta abertura pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8. Armaduras de reforço para a laje LA-20/50-03 positivas e negativas, respectivamente.



Fonte: O autor.

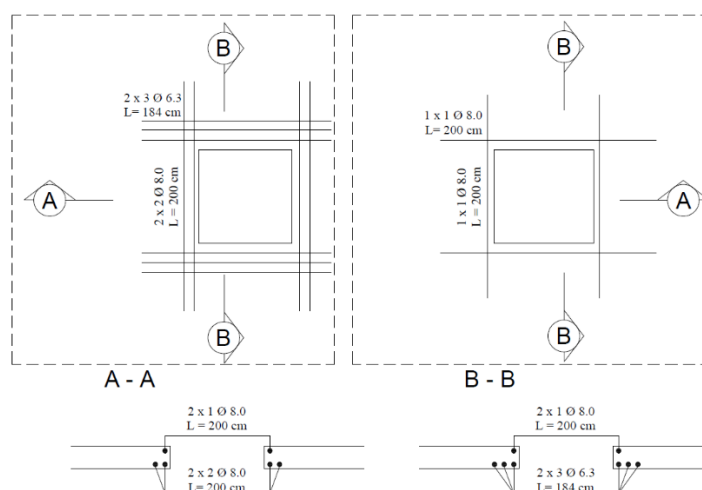
Para esta, a área de aço encontrada através do método de bielas e tirantes foi de 0,13 cm² no eixo y e de 0,35 cm² no eixo x, tanto para a armadura positiva, quanto para a negativa. Confrontando este resultado, o método empírico de Leonhardt e Mönning trouxe uma área de, aproximadamente, 1,00 cm² para a armadura positiva no eixo y e de 1,26 cm² para a armadura positiva no eixo x. Para a armadura negativa foi utilizado a mínima trazida pela ABNT NBR 6118:2014.

4.1.4 Armaduras obtidas para a laje LA-100/100-03

Como todas as lajes da matriz da análise repetiram o mesmo comportamento de apresentar uma área de aço muito reduzida quando calculada através do método de bielas e tirantes e outra superior quando determinadas pela metodologia de Leonhardt e Mönning,

pensou-se em introduzir uma abertura ainda maior a ser analisada. Esta teria dimensões de 100 cm x 100 cm localizada no centro da laje. Por ser uma abertura maior, imaginou-se que o resultado obtido pelo método de bielas e tirantes poderia ser maior ao verificado pela segunda metodologia, uma vez que o tamanho do vão é considerado para o cálculo da área de aço. É demonstrado na Figura 9 o detalhamento desta armadura.

Figura 9. Armaduras de reforço para a laje LA-100/100-03 positivas e negativas, respectivamente.



Fonte: O autor.

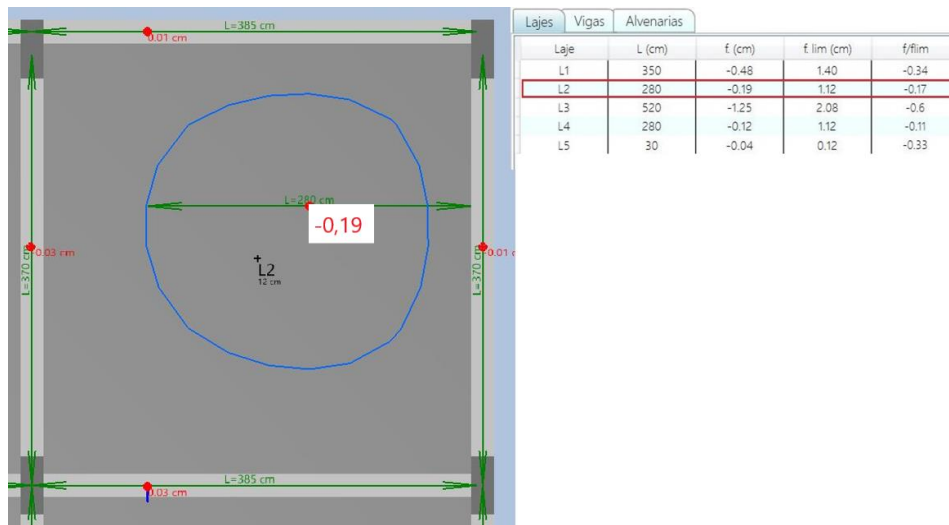
Embora os vãos tenham aumentado, a área de aço determinada pela metodologia de bielas e tirantes continuou sendo inferior a trazida pelo outro método. Para esta, a área de aço encontrada através do primeiro método foi de 0,74 cm² no eixo y e de 0,71 cm² no eixo x, tanto para a armadura positiva, quanto para a negativa. Confrontando este resultado, o método empírico de Leonhardt e Mönnig trouxe uma área de, aproximadamente, 2,00 cm² para a armadura positiva no eixo y e de 1,89 cm² para a armadura positiva no eixo x. Para a armadura negativa foi utilizado a mínima trazida pela ABNT NBR 6118:2014.

4.2 Flechas obtidas para as lajes LA-50/50-XX, LA-100/100-03 e para a laje sem aberturas

Por ser uma matriz de análise longa, estão representadas, nas figuras a seguir, as flechas trazidas pelo *software* TQS somente relativas às lajes LA-50/50-XX, LA-100/100-03 e LM. Inicialmente, observa-se a laje maciça sem qualquer abertura (Figura 10) e, posteriormente, as lajes com abertura de 50 x 50 cm em duas três diferentes posições (Figuras 11 e 12), para que se possa comparar os diferentes casos.

Nota-se, na Figura 10, a deflexão máxima alcançada na laje sem aberturas de 0,19 cm. A deflexão máxima que poderia ser alcançada, trazida pelo TQS, é de 1,12 cm.

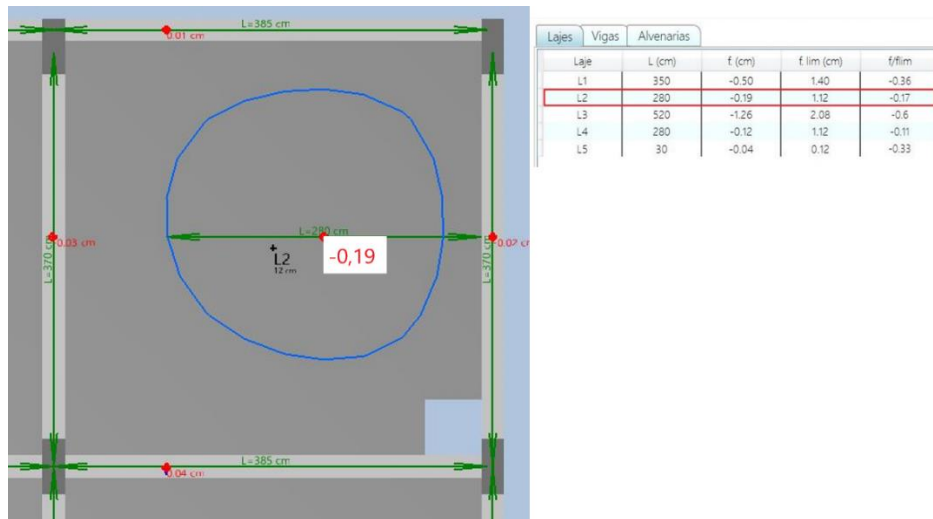
Figura 10. Flecha obtida para a laje LM.



Fonte: O autor.

Na Figura 11 é mostrada a deflexão observada na laje com uma abertura de 50 cm x 50 cm localizada no canto inferior direito. O deslocamento visto é de 0,19 cm, sendo o limite de 1,12 cm.

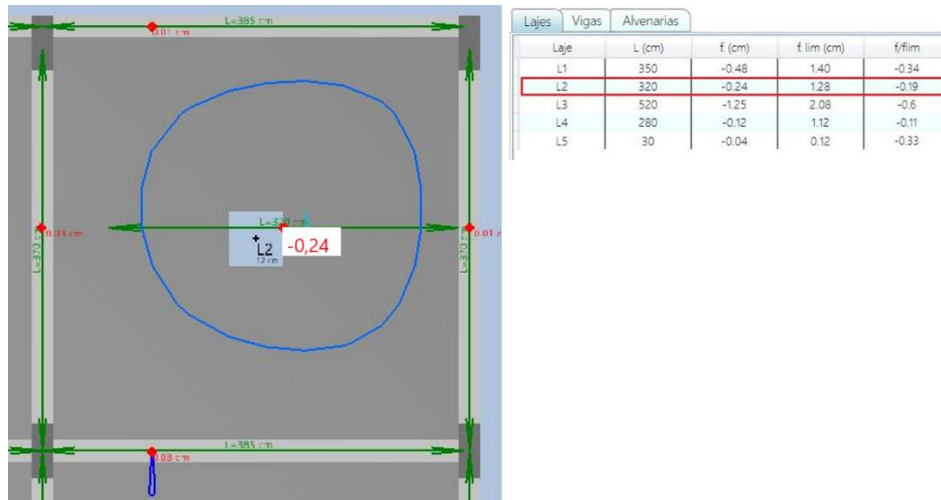
Figura 11. Flecha obtida para a laje LA-50/50-01.



Fonte: O autor.

Na Figura 12 é mostrada a deflexão observada na laje com uma abertura de 50 cm x 50 cm localizada no centro da laje. O deslocamento visto é de 0,24 cm, sendo o limite de 1,12 cm.

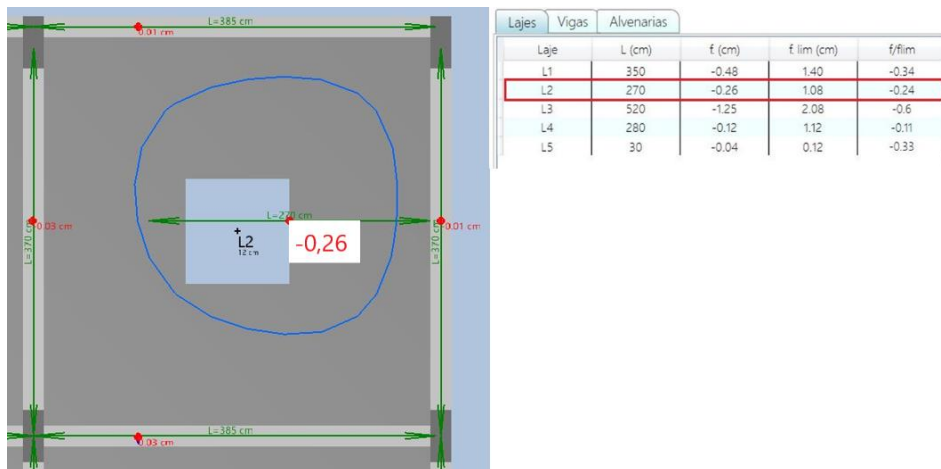
Figura 12. Flecha obtida para a laje LA-50/50-03.



Fonte: O autor.

Havendo a presença da laje extra à matriz de análise, com abertura de 100 cm x 100 cm, localizada no centro do elemento, ela também foi estudada quanto à sua flecha observada. O resultado obtido através do *software* TQS é mostrado na Figura 13.

Figura 13. Flecha obtida para a laje LA-100/100-03.



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES

Como pode-se observar em toda a matriz de análise, as aberturas impactaram de forma direta nas flechas observadas nas lajes quando estas foram comparadas com o elemento estrutural sem aberturas. Em alguns casos, como quando olha-se para a laje maciça sem aberturas e para a LA 50/50-01, viu-se a mesma deformação em ambos os casos, porém a localização da maior deformação muda, sendo que, na laje sem aberturas, esta é observada mais em direção ao bordo superior direito, onde a laje não possui continuidade, ou seja, não

é engastada. Já na sua semelhante com abertura, mesmo esta se mantendo a mesma, a deformação foi vista mais próxima a este vão aberto na laje, corroborando com a hipótese de que a abertura impacta de forma direta no estado limite de serviço. Nas demais lajes da matriz de análise, os resultados das flechas se mantiveram muito semelhantes a este comentado logo acima, mostrando resultados de deformação maiores quando a abertura é centralizada. Tendo isto em mente, pode-se afirmar que o maior impacto ao ELS deu-se quando a abertura é centralizada no elemento estrutural. Isto é minimizado quando ela foi posicionada em algum canto da laje.

Ainda pôde-se analisar a diferença máxima entre a situação mais conservadora (laje sem nenhuma abertura) e a situação mais crítica (laje com abertura de 100 cm x 100 cm localizada no centro) e seus resultados de flecha alcançada. Na primeira situação, observou-se uma deflexão máxima de 0,19 cm, enquanto na segunda subiu para 0,26 cm. Embora em ambas as situações a deformação esteja dentro dos máximos permitidos, foi claramente visto que o impacto causado pelo aumento e centralização da abertura foi significativo.

O TQS trouxe também os resultados para as grelhas de armadura positiva das lajes e as armaduras negativas destas. Pôde-se observar que os resultados exibidos pelo método de bielas e tirantes sempre foram inferiores à seção de aço interrompida pela abertura (método proposto por Leonhardt e Mönnig). Assim sendo, conclui-se que, nas situações onde o projetista deve analisar as armaduras em torno das aberturas por estas não poderem somente utilizar a armadura mínima estabelecida por norma, pode-se optar por armar a região com a área de aço interrompida por ela própria, uma vez que, se assim for feito, a quantidade de aço será maior do que o calculado através do método de bielas e tirantes, sendo esta uma metodologia mais conservadora.

6 REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Caio Cesar Pereira de. **Dimensionamento de estruturas especiais de concreto armado pelo método de bielas e tirantes**. 2018. 129 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Estados Unidos: ACI, 2019. 628 p.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 4 v. Rio Grande: Editora Dunas, 4. ed., 2014.
- ARAÚJO, J. M. **Projeto Estrutural de Edifícios de Concreto Armado**. Rio Grande: Editora Dunas, 3. ed., 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BASTOS, Paulo Sérgio. **Ancoragem e emenda de armaduras**. 2018. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2018.
- CARDOSO, Tobias Bezzi. **Dimensionamento de elementos fletidos em concreto armado com aberturas**: método empírico versus método das bielas e tirantes. 2010. 87 f. Trabalho de diplomação (graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FUSCO, Péricles Brasiliense. **Técnicas de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 2013.
- HIBBELER, Russel Charles. **Estática**: Mecânica para engenharia. São Paulo: Pearson, 2010.
- LEONHARDT, Fritz; MÖNNIG, Eduard. **Construções de concreto**. Rio de Janeiro: Interciência, 1977-1979.
- PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos.
- RUIZ, Miguel Fernández; HOANG, Linh Cao; MUTTONI, Aurelio. Stress fields and strut-and-tie models as a basic tool for design and verification in second generation of Eurocode 2. **Hormigón y Acero**. Disponível em <http://hormigonyacero.com/index.php/ache/article/view/3086/267>. Acesso em 08 de dezembro de 2022.
- SCHLAICH, Jörg; SCHÄFER, Kurt; JENNEWEIN, Mattias. Toward a Consistent Design of Structural Concrete. **PCI Journal**. mai. - jun. 1987. Disponível em https://www.pci.org/PCI_Docs/Publications/PCI%20Journal/1987/May-June/Toward%20a%20Consistent%20Design%20of%20Structural%20Concrete.pdf. Acesso em 07 de outubro de 2022.