



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO LEVI ROCHA LEÃO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS MOMENTOS FLETORES MÁXIMOS
JUNTO ÀS ABERTURAS QUE ATRAVESSAM LAJES MACIÇAS NA DIREÇÃO DE
SUA ESPESSURA**

FORTALEZA

2021

PEDRO LEVI ROCHA LEÃO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS MOMENTOS FLETORES MÁXIMOS JUNTO
ÀS ABERTURAS QUE ATRAVESSAM LAJES MACIÇAS NA DIREÇÃO DE SUA
ESPESSURA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Magnólia Maria Campelo Mota

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L477a Leão, Pedro Levi Rocha.
Análise do comportamento dos momentos fletores máximos junto às aberturas que atravessam lajes maciças na direção de sua espessura / Pedro Levi Rocha Leão. – 2021.
45 f. : il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Magnólia Maria Campelo Mota.
1. Aberturas em lajes. 2. Lajes maciças. 3. Analogia de grelhas. 4. TQS. 5. Vazios em lajes. I. Título.
CDD 620
-

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS MOMENTOS FLETORES MÁXIMOS JUNTO
ÀS ABERTURAS QUE ATRAVESSAM LAJES MACIÇAS NA DIREÇÃO DE SUA
ESPESSURA

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 23/03/2021

Banca Examinadora

Prof^ª. Dr^ª. Magnólia Maria Campêlo Mota (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Ícaro Manfrinni Rodrigues Sousa
Especialista em Estruturas de Concreto e Fundações

Prof. Ms. Hugo Campêlo Mota
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida e permanecer sempre em minha vida, mesmo nos momentos em que me distancio dEle.

À minha mãe, Eldenice, por ser, desde meus primeiros dias de idade, manifestação de Amor e Graça Divinos em minha vida, e por ter sido quem me ensinou o valor do compromisso com as responsabilidades, instruindo-me, desde bem cedo, a entregar as tarefas da escola com capricho e respeitando os prazos estipulados.

Ao meu pai, Alípio, por ser em minha vida um exemplo de ser humano, em quem procuro me espelhar para manifestar os valores de bondade, honestidade, integridade e humildade, e por sempre celebrar de forma inspiradora minhas conquistas na área acadêmica e profissional.

À minha irmã, Maria Alice, a quem amo muito, pelas conversas que temos em casa sobre temas variados, e com quem esporadicamente componho canções.

Aos meus tios, avós e primos, pois a família sempre foi e sempre será base importante em minha vida. Especialmente à minha avó Leônia, sem a qual a trajetória escolar e universitária de qualidade que tive não seria possível.

À minha namorada, Carol, que é meu porto seguro, ao lado de quem consigo deixar transparecer os meus fracassos e sentimentos, na certeza de que o amor verdadeiro e definitivo que tenho por ela é recíproco e para sempre.

Aos irmãos que a vida me deu, Marcos e Guga, por serem, desde a adolescência, meus melhores amigos, a quem confio meus mais profundos segredos e compartilho, há quase uma década, alguns dos melhores momentos de minha vida.

Aos amigos da faculdade, em especial aos integrantes do “Gloriosos”, nome do nosso grupo de whatsapp e time amador de *eSports*, com quem dividi tanto momentos de descontração, como as angústias e dificuldades enfrentadas no decorrer do curso de Engenharia Civil.

À minha amiga Luana, por ser companhia muito agradável, pelas conversas profundas que compartilhamos e pelas opiniões de cunho acadêmico e profissional prestadas durante o curso e a elaboração deste trabalho.

À professora Magnólia, pelas orientações prestadas e disponibilidade que sempre teve em me ajudar e acompanhar na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
<i>1.1.1 Objetivo geral</i>	11
<i>1.1.2 Objetivos específicos</i>	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Lajes maciças	12
2.2 Cálculo de lajes maciças	13
<i>2.2.1 Flechas</i>	15
2.3 Aberturas em lajes maciças	17
<i>2.3.1 Recomendações da NBR 6118</i>	18
<i>2.3.2 Recomendações de normas internacionais</i>	19
3 METODOLOGIA	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 Analogia de Grelhas	27
4.2 Método dos Elementos Finitos	37
4.3 Comparação dos métodos utilizados	38
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42

RESUMO

Lajes com aberturas são comuns em vários tipos de construções, seja para a passagem de tubulações em edifícios residenciais, possibilitando a instalação de equipamentos em fábricas ou permitindo ventilação e iluminação. Tendo em vista que a Norma Brasileira de projeto de estruturas de concreto permite, no item 13.2.5.2, desconsiderar o efeito de aberturas em lajes maciças de concreto que atendem a determinadas disposições, este trabalho consistiu na utilização da Analogia de Grelha e do Método dos Elementos Finitos para calcular os momentos fletores máximos em lajes maciças retangulares, com aberturas crescentes, visando a verificar como se dá o comportamento desses esforços à medida que a abertura aumenta em proporção. Nas referências bibliográficas é mostrado como normas internacionais abordam essa questão, sendo importante destacar que em nenhuma das estudadas apareceu qualquer determinação parecida com a da norma brasileira. As lajes foram modeladas e calculadas com o auxílio do *Software* de cálculo estrutural TQS, sendo uma delas verificada no MIDAS Civil, e todas apresentando tanto a condição engastada de apoio como simplesmente apoiada nos quatro bordos. Com isso, foi possível representar as mudanças que ocorrem nos momentos fletores máximos dessas lajes e fazer alguns comentários acerca do item em questão da NBR 6118 (2014).

Palavras-chave: Lajes maciças. Aberturas em lajes. Momento Fletor. Analogia de Grelhas. TQS. Vazios em lajes. Lajes de concreto. Concreto armado.

ABSTRACT

Openings in slabs are quite common in many kinds of constructions nowadays, either for the passage of pipes in residential buildings, to allow the installation of equipment in factories or to provide ventilation and illumination. Knowing that the Brazilian code of concrete structures design (NBR 6118:2014) allows, in item 13.2.5.2, to disregard the effect of openings in solid concrete slabs which are in accordance to specified terms, this work used the Grid Analogy and the Finite Element Method (FEM) to calculate the maximum bending moments in solid rectangular slabs, with growing openings, aiming to verify the behaviour of those internal forces with the increase of the opening size, as well as the possibility of existing a lack of security on said item. The literature review showed how international codes deal with that subject and in none of them a similar approach to the Brazilian code was observed. The slabs were modelled and calculated using the structural analysis software TQS, one of them also being calculated on MIDAS Civil, and all of them being simply supported as well as fixed on all sides. Based on that, it was possible to represent the changes that occur in the maximum bending moments of those slabs and to comment on said item of the Brazilian code.

Keywords: Solid slabs. Slab Openings. Bending moment. Grid Analogy. TQS. Concrete slabs. Reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Definição de placa.....	13
Figura 2	– Limites para deslocamentos em lajes.....	16
Figura 3	– Modelagem da laje L1 sem abertura no TQS.....	22
Figura 4	– Modelagem da laje L2 sem abertura no TQS.....	22
Figura 5	– Modelagem da laje L3 sem abertura no TQS.....	23
Figura 6	– Modelagem da laje L4 sem abertura no TQS.....	23
Figura 7	– Casos de vinculação das lajes.....	24
Figura 8	– Modelagem da laje L1 no MIDAS Civil.....	26
Figura 9	– Momentos fletores no Visualizador de Grelhas TQS.....	27
	–	

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Momentos fletores máximos nas lajes L1 simplesmente apoiadas (5m x 5m) – TQS	32
Gráfico 2 – Momentos fletores máximos nas lajes L2 simplesmente apoiadas (6m x 6m) – TQS	32
Gráfico 3 – Momentos fletores máximos nas lajes L3 simplesmente apoiadas (7m x 7m) – TQS	33
Gráfico 4 – Momentos fletores máximos nas lajes L4 simplesmente apoiadas (5m x 6m) – TQS	33
Gráfico 5 – Momentos fletores máximos nas lajes L1 engastadas (5m x 5m) – TQS	34
Gráfico 6 – Momentos fletores máximos nas lajes L2 engastadas (6m x 6m) – TQS	34
Gráfico 7 – Momentos fletores máximos nas lajes L3 engastadas (7m x 7m) – TQS	35
Gráfico 8 – Momentos fletores máximos nas lajes L4 engastadas (5m x 6m) – TQS	35
Gráfico 9 – M_n/M_0 nos quatro tipos de lajes simplesmente apoiadas	36
Gráfico 10 – M_n/M_0 nos quatro tipos de lajes engastadas	36
Gráfico 11 – Momentos fletores máximos - L1 simplesmente apoiada (5m x 5m) – MIDAS.....	38
Gráfico 12 – Comparação MIDAS x TQS – Momentos fletores máximos.....	39
Gráfico 13 – Comparação MIDAS X TQS - Razões M_n/M_0	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resultados da laje L1 simplesmente apoiada – TQS	28
Tabela 2	– Resultados da laje L2 simplesmente apoiada – TQS	28
Tabela 3	– Resultados da laje L3 simplesmente apoiada – TQS	29
Tabela 4	– Resultados da laje L4 simplesmente apoiada – TQS	29
Tabela 5	– Resultados da laje L1 engastada – TQS	30
Tabela 6	– Resultados da laje L2 engastada – TQS.....	30
Tabela 7	– Resultados da laje L3 engastada – TQS.....	31
Tabela 8	– Resultados da laje L4 engastada – TQS.....	31

1 INTRODUÇÃO

O sistema estrutural tradicional é composto por lajes, sobre as quais incide a maioria das cargas de uso de determinada estrutura, as quais são transferidas para as vigas, que, por sua vez, têm os pilares como elementos de apoio. Frequentemente faz-se necessária a execução de furos e aberturas nas lajes para permitir a passagem de tubulações, a utilização de iluminação e ventilação naturais e a visão de pavimentos inferiores (muito comum em *shopping centers*), além de possibilitar a instalação de equipamentos em construções industriais, dentre outros.

Sabe-se que a execução dessas aberturas em estruturas de concreto diminui a capacidade resistente da laje, especialmente para casos em que o vazio é centralizado, como concluíram Mahlis et. al (2018). Isso pode vir a ser causa de manifestações patológicas como fissuras, razão pela qual normalmente esses vazios são reforçados com maior densidade de armaduras ou com a colocação de vigas no seu entorno.

De acordo com a NBR 6118 (2014), no caso de a maior dimensão da abertura ser inferior a 10% da medida do menor vão, o vazio não necessita de verificação, desde que ele também esteja razoavelmente distante dos apoios teóricos, de demais aberturas adjacentes e a laje em questão seja bidirecional.

Mendes (2017) ao aplicar uma metodologia de dimensionamento de reforço com fibras de carbono para bordas de aberturas em lajes maciças de concreto armado, analisou os momentos fletores em lajes com vazios de variadas dimensões, mostrando que a resolução da Norma Brasileira supracitada necessita ser revisada.

Dessa forma, o presente trabalho buscou investigar o comportamento de algumas lajes com aberturas centralizadas no que diz respeito aos momentos fletores máximos, fazendo uso do *software* de cálculo estrutural TQS, com verificação de uma das lajes no MIDAS Civil.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento dos momentos fletores máximos em lajes maciças de concreto, armadas em duas direções, com aberturas crescentes, cujo lado variou de 2,5% a 50% do menor vão da laje, comparando os resultados obtidos com os das lajes de controle (sem aberturas) para detectar se há ou não diferenças significativas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir lajes com abertura, tanto engastadas como simplesmente apoiadas nos quatro bordos, armadas em duas direções, de acordo com o que a literatura aponta como mais crítico;
- Quantificar os momentos fletores máximos nas lajes em questão por meio da analogia de grelhas;
- Comparar os valores encontrados com os de lajes sem aberturas, verificando a existência ou não de diferenças significativas;
- Analisar o comportamento dos momentos fletores encontrados conforme o aumento das dimensões da abertura;
- Validar, em pelo menos uma das lajes, o comportamento obtido, por meio de outro método de cálculo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lajes maciças

As lajes são, do ponto de vista estrutural, placas de superfície plana em concreto ou outro material, sujeitas a ações normais ao próprio plano e cuja dimensão perpendicular a ele é muito menor que as demais (Carvalho e Filho, 2014).

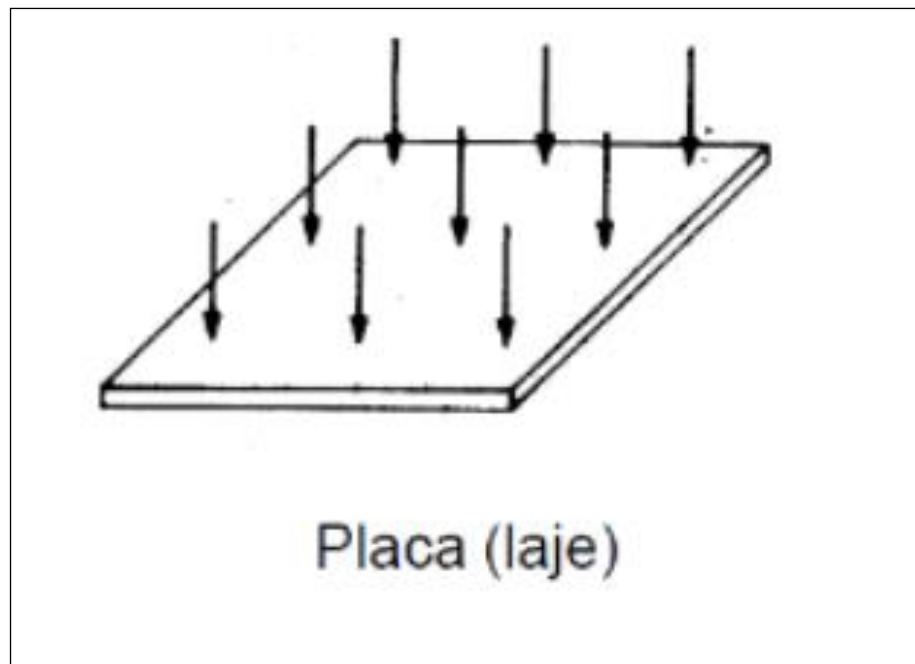
No que diz respeito às lajes maciças, ou seja, aquelas que têm toda a sua seção transversal formada por concreto e pelas armaduras, elas apresentam vantagens na facilidade de se colocarem tubulações e instalações elétricas, além da facilidade de cálculo e execução. É importante destacar, no entanto, que o gasto com fôrmas acaba por representar grande parte do custo final desse tipo de estrutura, o que pode ser minimizado com a repetição de pavimentos e o conseqüente reaproveitamento das fôrmas de pavimentos inferiores para os superiores.

Além disso, outro inconveniente da utilização de lajes maciças é a impossibilidade de se vencer vãos ou balanços muito grandes, visto que o aumento de sua espessura para torná-la mais resistente pode acabar acarretando um aumento de peso próprio tal que o cálculo chegue a dimensionamentos mais onerosos.

A Norma brasileira (NBR 6118:2014) indica, no item 14.2.4.1, espessuras mínimas a serem adotadas no dimensionamento de lajes maciças, levando em conta tanto as condições de apoio como a intensidade dos carregamentos acidentais e a existência ou não de balanço. Os valores variam de 7 cm para lajes de cobertura sem balanço, passando por 8 cm no caso de lajes de piso sem balanço e 10 cm para lajes em balanço.

Estruturalmente, as lajes maciças são modeladas conforme ilustra a figura 1, com cargas perpendiculares ao plano xy :

Figura 1 - Definição de placa



Fonte: <https://eduqc.com.br/concursos/engenharia/engenharia-civil-analise-estrutural/>

A NBR 6118 (2014) no item 14.7.3, indica que os elementos de placa podem ser analisados por qualquer método baseado na teoria da elasticidade, permitindo ainda, no item 14.7.5, que análises não lineares sejam utilizadas tanto para verificação do estado-limite último como para o estado-limite de serviço.

Quando a espessura da laje apresenta dimensão considerável em relação às demais, o cálculo deve ser feito utilizando modelos de placas espessas.

A maior parte das lajes apresenta formato retangular, de tal modo a apresentar um vão de maior dimensão (L_y), e um de menor (L_x). Quando a relação entre o maior e o menor vão (L_y/L_x) ultrapassa 2,0 costuma-se adotar a premissa de projeto de que aquela laje trabalha apenas na direção do menor vão, sendo necessária apenas uma armadura de distribuição na direção L_y . Quando ocorre o contrário, a laje recebe a classificação de bidirecional e deve, portanto, ser armada em ambas as direções (Carvalho e Filho, 2014).

2.2 Cálculo de lajes maciças

As lajes em concreto armado do tipo maciças são as mais antigas, porém ainda muito utilizadas atualmente, sendo muito comuns em edifícios no geral. Mesmo em edifícios

residenciais que adotam as lajes nervuradas, observam-se algumas lajes maciças em balanços nas varandas ou nas caixas de escada e elevador.

No passado, o cálculo de lajes era realizado com o auxílio de tabelas simplificadas baseadas na teoria da elasticidade, conforme propõem os métodos de Marcus e Czerny, nos quais a deformação das vigas que apoiam as lajes era desconsiderada, além do fato de a continuidade entre placas adjacentes ser tratada de forma simplificada, não havendo continuidade no caso de apoios simples, ou apenas realizando as compatibilizações de momentos no caso de apoios de terceiro grau, considerados fixos.

Atualmente, no entanto, o desenvolvimento de recursos computacionais permitiu um aprofundamento na análise de lajes, sendo a Analogia de Grelhas um método muito utilizado pelos principais *softwares* de cálculo e análise estrutural. Esse método consiste em dividir as lajes em faixas e substituí-las por barras coincidentes com seus respectivos eixos, formando, juntamente com as barras de vigas, uma grelha equivalente que representa o pavimento. O carregamento que incide na grelha é distribuído de maneira uniforme ao longo de cada barra ou aplicado diretamente em cada nó da grelha equivalente, dividindo-se entre as barras de maneira proporcional à sua área de influência.

Leite et al. (2017), ao compararem os resultados obtidos por meio dos métodos acima, verificaram resultados muito próximos utilizando Marcus e Czerny, porém com discrepâncias significativas quando esses resultados foram confrontados com os fornecidos pela Analogia de Grelhas. Os autores atribuíram isso ao fato de as vigas serem indeformáveis nos métodos simplificados.

De fato, Serpa et al. (2017) estabeleceram comparações entre o método de Marcus e a Analogia de grelhas considerando vigas de bordo de rigidezes baixas, intermediárias e elevadas, obtendo resultados cada vez mais próximos conforme as vigas tornavam-se mais rígidas.

Segundo Bueno (2013), os principais fatores que influenciam nos resultados obtidos pela Analogia de Grelhas são o espaçamento da malha e as rigidezes à torção e flexão das barras da grelha.

Nesse sentido, Stramandinoli (2003) verificou, ao comparar os resultados da Analogia de Grelhas com os fornecidos por métodos da Teoria da Elasticidade, que, para lajes maciças, a diminuição do lado da malha não implicou em resultados mais aproximados, embora isso pudesse ser alcançado modificando a relação entre a inércia à torção e a inércia à flexão (J/I). No caso das flechas, $J/I = 3$ foi a relação que mais aproximou a Analogia de Grelhas da

Teoria da Elasticidade, enquanto para os momentos fletores na menor direção da laje, isso ocorreu com $J/I = 2$.

Bueno (2013) mostrou ainda que o aumento da rigidez das vigas de bordo acarreta diminuição dos deslocamentos tanto das vigas como da laje em si, além de diminuir os momentos fletores positivos na laje e aumentar os negativos.

Outro método de cálculo bastante usado na atualidade é o Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual “requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir o integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume V_i).” (Azevedo, 2003). Ele tem aplicação em diversas áreas do conhecimento e se tornou muito popular, tanto como uma maneira mais rápida e prática de analisar elementos contínuos como sendo uma forma de calcular estruturas heterogêneas de geometria irregular e submetida a carregamentos de diversos tipos, como feito por Parisotto (2018).

As ideias iniciais do MEF começaram a ser desenvolvidas no fim da década de 60 e início da década de 70, porém foi com o advento dos microcomputadores na década de 90 que ele se popularizou e passou a ser utilizado pelos calculistas em geral, como o é até hoje.

2.2.1 Flechas

No contexto das lajes de concreto armado, flecha consiste no deslocamento máximo e perpendicular à espessura da laje, o qual ocorre influenciado por diversos fatores, tanto de natureza estrutural como o valor da carga aplicada, as propriedades do concreto utilizado e geometria da laje em questão como de caráter construtivo, destacando-se o tempo de remoção das escoras.

Os limites de flecha em lajes são citados na tabela 13.3 da NBR 6118 (2014) (Figura 2) e divididos basicamente em quatro tipos. São eles aceitabilidade sensorial (relacionado a deformações que não comprometem o funcionamento da estrutura, porém causam efeito visual perturbador e a vibrações excessivas), efeitos específicos (comprometem de alguma maneira o bom uso da edificação em questão), efeitos em elementos não estruturais (prejudicam de alguma forma a integridade de partes sem função estrutural tal como a alvenaria) e efeitos em elementos estruturais (deslocamentos de valor muito elevado, a ponto de invalidar as hipóteses adotadas no cálculo estrutural da laje).

Figura 2 – Limites para deslocamentos em lajes

Tabela 13.3 – Limites para deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350 + \text{contraflecha}^b$
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H/850^e$ entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$l/400^g$ e 15 mm

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

Figura 2 (continuação)

Tabela 13.3 (continuação)

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Efeitos em elementos não estruturais	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$\ell/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	$\ell/175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H/400$
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		
<p>^a As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.</p> <p>^b Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $\ell/350$.</p> <p>^c O vão ℓ deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.</p> <p>^d Rotação nos elementos que suportam paredes.</p> <p>^e H é a altura total do edifício e H_j o desnível entre dois pavimentos vizinhos.</p> <p>^f Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica ao deslocamento vertical relativo das extremidades de lintéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_j representa o comprimento do lintel.</p> <p>^g O valor ℓ refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.</p> <p>NOTAS</p> <p>1 Todos os valores-limites de deslocamentos supõem elementos de vão ℓ suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.</p> <p>2 Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor ℓ é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor.</p> <p>3 O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na Seção 11.</p> <p>4 Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.</p>				

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

A NBR 6118 (2014) divide ainda as flechas em imediatas (aquelas que ocorrem no momento da aplicação da carga no elemento estrutural) e diferidas (ocorrem ao longo do tempo quando a carga aplicada é de longa duração, devido à fluência do concreto), de modo que os limites acima estipulados devem ser obedecidos pela flecha total, que consiste na soma da flecha imediata com a diferida.

2.3 Aberturas em lajes maciças

Leonhardt e Mönnig (1978, p.106) citam que as aberturas impactam no comportamento resistente de lajes maciças de acordo com suas dimensões, posição e forma. De fato, Mahlis et al. (2018) demonstraram que a capacidade resistente das lajes é reduzida pela existência de abertura na região central da laje e Keyvani e Vaez (2019) identificaram um

aumento no fator de carga de colapso conforme a abertura realizada distanciava-se dos apoios e encaminhava-se para o centro do vão.

Com relação ao formato da abertura, Al-Sulayvani e Al-Talabani (2015), ao investigar o reforço de aberturas circulares, retangulares e quadradas com áreas semelhantes em lajes circulares submetidas a carregamentos cíclicos, apontaram aberturas circulares como sendo as menos resistentes à ruptura, enquanto as de abertura quadrada apresentaram maior resistência, embora a fissuração tenha sido iniciada primeiramente ao redor das aberturas quadradas e por último em torno das circulares.

As deflexões em lajes com aberturas também se revelam maiores quando comparadas a lajes sem aberturas, como demonstrado por Pitol (2017), que modelou, em posições variadas, aberturas quadradas de lado 100 mm em lajes também quadradas de 500 mm, 600 mm, 700 mm e 800 mm de lado, encontrando sempre deflexões maiores nas lajes dotadas de vazio em relação às comuns. Dentre as lajes com aberturas, aquelas cuja abertura encontrava-se no centro apresentaram os maiores deslocamentos em todos os casos.

2.3.1 Recomendações da NBR 6118

A Norma brasileira faz a seguinte recomendação, que vale para todas as lajes com aberturas:

No caso de aberturas em lajes, as condições seguintes devem ser respeitadas em qualquer situação,

obedecendo também ao disposto na Seção 13:

- a) a seção do concreto remanescente da parte central ou sobre o apoio da laje deve ser capaz de equilibrar os esforços no estado-limite último, correspondentes a essa seção sem aberturas;
- b) as seções das armaduras interrompidas devem ser substituídas por seções equivalentes de reforço, devidamente ancoradas;
- c) no caso de aberturas em regiões próximas a pilares, nas lajes lisas ou cogumelo, o modelo de cálculo deve prever o equilíbrio das forças cortantes atuantes nessas regiões. (NBR 6118:2014, p. 178)

Algumas lajes com aberturas são, no entanto, dispensadas da verificação de tensões e deformações, caso não sejam do tipo lisa ou cogumelo e as aberturas obedeçam a todas as disposições abaixo:

- a) As dimensões da abertura devem corresponder no máximo a 1/10 do vão menor (l_x) (ver Figura 13.1);
- b) A distância entre a face de uma abertura e o eixo teórico de apoio da laje deve ser igual ou maior que 1/4 do vão, na direção considerada; e;

c) A distância entre faces de aberturas adjacentes deve ser maior que a metade do menor vão. ((NBR 6118:2014, p. 76)

Pouco se fala na literatura sobre as possíveis razões para a existência dessas recomendações e o porquê da validade delas. Alguns trabalhos inclusive chegam a questionar brevemente sua adoção, como fez Silva (2017, p. 94) ao avaliar o comportamento de lajes com vários padrões de furo:

Independente da NBR 6118 de 2014 recomendar a dispensa da verificação de esforços para lajes com furos inferiores a determinados limites impostos por ela, é de grande importância que o engenheiro projetista sempre considere de forma cautelosa, os efeitos que essa abertura de furos, principalmente em relação à distribuição dos momentos ao longo de todo o comprimento, onde a abertura influencia constantemente o valor dos momentos, chegando a ser observados em alguns casos o dobro do momento em lajes sem furos.

Silva (2015, p. 91) também sinaliza que “é importante que o engenheiro projetista sempre avalie os efeitos da abertura na laje, sobretudo as deformações excessivas, o que levaria à fissuração de alvenarias próximas à abertura, por exemplo.”, embora em seu estudo de aberturas em lajes nervuradas tenha sido verificado que são desprezíveis os acréscimos de momento fletor e deformação provocados por uma abertura, em laje nervurada, respeitando as disposições do item 13.2.5.2 da NBR 6118 (2014).

2.3.2 Recomendações de normas internacionais

A questão da abertura de vazios em lajes maciças de concreto é um assunto abordado em diversas normas internacionais, embora de forma breve em algumas delas. Isso reforça a recorrência dessa questão, mostrando que ela não é uma necessidade exclusiva dos métodos construtivos brasileiros.

A norma técnica estadunidense de requerimentos para concreto estrutural recomenda a análise de toda e qualquer abertura. “Aberturas de qualquer tamanho serão permitidas nos sistemas de lajes se mostrado pela análise que todas as cargas e requisitos de capacidade de serviço, incluindo os limites de deflexão, são satisfeitos” (ACI 318-19, p. 103, tradução nossa).

A Sociedade Japonesa de Engenharia Civil, por sua vez, determina em seu código que:

Testes de verificação de carga ou análises de alta precisão devem ser conduzidos no que diz respeito a [...] zonas de aberturas [...] ou outras regiões para as quais a teoria de vigas ou placas não podem ser aplicadas, ou seja, as chamadas regiões de descontinuidade. Caso tais métodos especiais não sejam utilizados, a verificação pode ser feita por meio do método de bielas e tirantes. (JSCE-2007 nº 15, p. 154, tradução nossa).

A Canadian Standard Association, responsável pela norma canadense de projeto de estruturas de concreto, também trata sobre as aberturas em laje e, embora maior enfoque seja dado às lajes planas armadas em duas direções, no item 13.5.4 é dito que:

Aberturas de qualquer tamanho podem ser executadas em sistemas de lajes, caso seja mostrado pela análise que a resistência de cálculo seja pelo menos igual aos efeitos dos esforços de cálculo [...], e que todas as condições de serviço, incluindo os limites de deflexão, sejam obedecidas. (CSA A23.3-04, 2004, p. 83, tradução nossa).

Foram consultadas, ainda, as normas técnicas britânica, australiana e egípcia, no entanto em nenhuma delas há qualquer menção sobre aberturas em lajes maciças, embora na última a questão dos vazios em lajes seja abordada apenas para lajes planas, no que diz respeito aos cuidados com os esforços de cisalhamento.

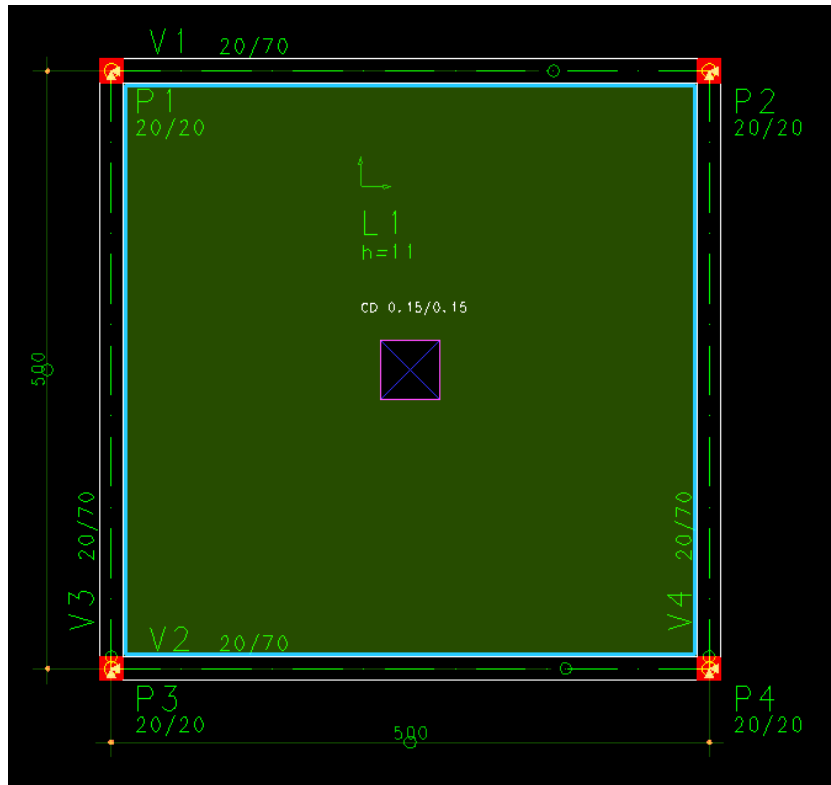
3 METODOLOGIA

A definição das lajes maciças analisadas deu-se de modo a contemplar casos variados e próximos aos limites adotados em situações reais de projeto. Dessa forma, foram analisadas lajes quadradas de 5 m (L1), 6 m (L2) e 7 m (L3) de lado, além de uma laje retangular de 6 m x 5 m (L4), com dimensão do lado das aberturas variando de zero (sem abertura) a 50% do vão paralelo mais próximo em todas elas. Destaca-se, ainda, que as aberturas foram todas posicionadas no centro das lajes, o que, segundo a literatura, é o pior caso.

Adotou-se uma resistência característica do concreto (f_{ck}) de 25 MPa, com classe de agressividade II e considerando rígido controle de qualidade do concreto, de acordo com o explicitado na Norma Brasileira. A espessura de cada grupo laje foi dimensionada de modo que a flecha total máxima da laje sem abertura respeitasse o Estado Limite de Serviço ($L/250$), ficando a laje L1 com 11 cm de espessura, a L2 com 14 cm, a L3 com 18 cm e L4 com 13 cm.

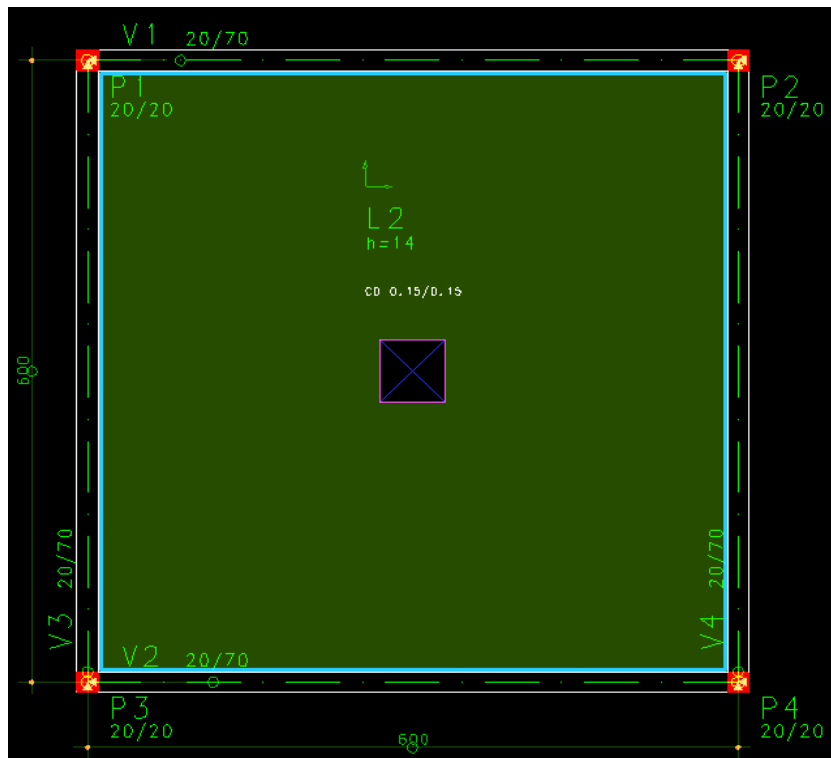
Todas as lajes descritas acima foram apoiadas em vigas de 20 cm de largura por 70 cm de altura, que por sua vez, distribuem o carregamento para pilares quadrados de canto com dimensão 20 cm por 20 cm. O carregamento adotado foi de 1,5 kN/m² tanto para as cargas de revestimento como para as acidentais, distribuído em toda a área da laje. As figuras 3 a 6 apresentam os quatro tipos de laje analisados no modelador do TQS:

Figura 3 – Modelagem estrutural da laje L1 com abertura 10%



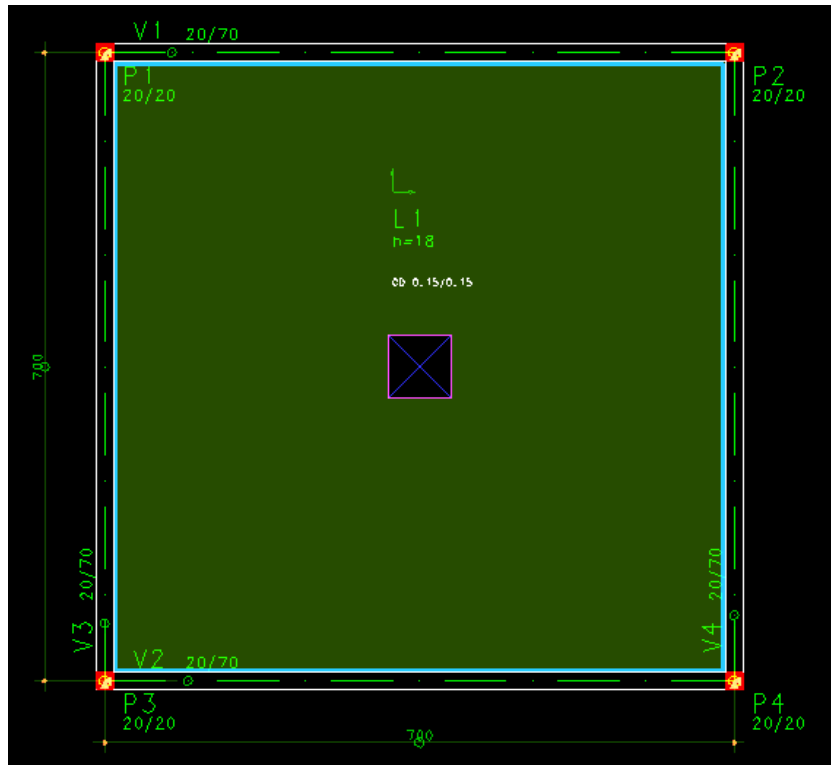
Fonte: Próprio autor

Figura 4 – Modelagem estrutural da laje L2 com abertura 10%



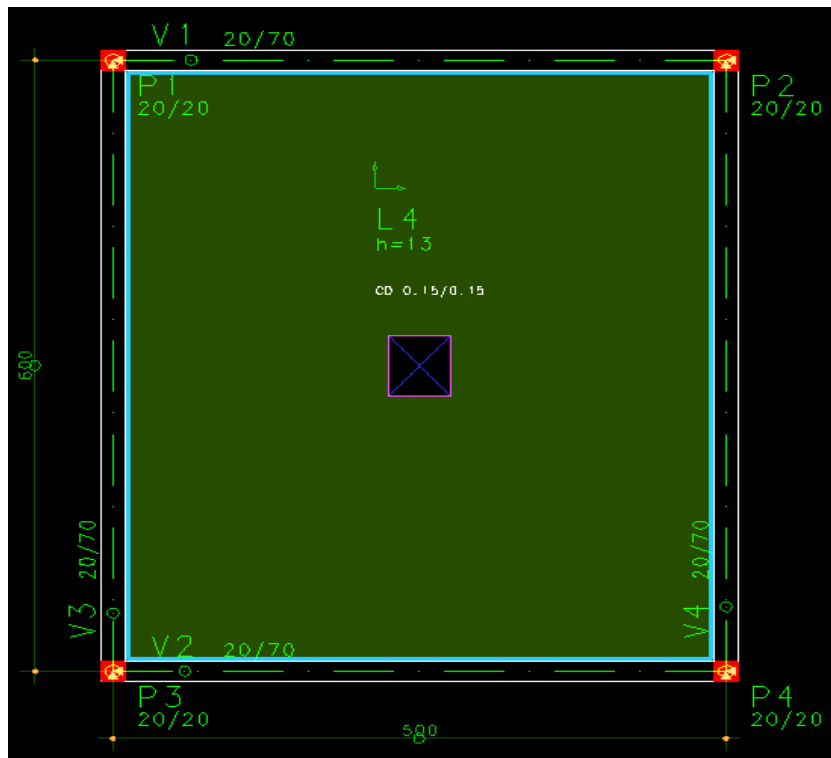
Fonte: Próprio autor

Figura 5 – Modelagem estrutural da laje L3 com abertura 10%



Fonte: Próprio autor










Figura 6 – Modelagem estrutural da laje L4 com abertura 10%



Fonte: Próprio autor

Além disso, as condições de apoio das lajes foram modeladas segundo os casos 1 e 6 de Marcus, ou seja, simplesmente apoiadas nos quatro apoios e com todos os lados engastados, conforme ilustrado na figura 7 a seguir:

Figura 7 – Casos de vinculação das lajes

Caso	Vinculação	Caso	Vinculação	Caso	Vinculação
1		2A		2B	
	Quatro bordas simplesmente apoiadas		Uma borda menor engastada		Uma borda maior engastada
3		4A		4B	
	Duas bordas adjacentes engastadas		Duas bordas menores engastadas		Duas bordas maiores engastadas
5A		5B		6	
	Uma borda maior apoiada		Uma borda menor apoiada		Quatro bordas engastadas

Fonte: PINHEIRO, 2007

O procedimento de cálculo envolvido neste trabalho aconteceu com o auxílio de dois *softwares* de cálculo estrutural: O TQS, o qual possibilitou o uso da Analogia de Grelhas, método que leva em conta a deformação das vigas que apoiam as lajes e modela o pavimento inteiro como um elemento conjunto, e o MIDAS Civil, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), discretizando a laje em elementos geométricos menores e calculando os esforços no interior de cada um desses elementos.

Nas lajes analisadas pela Analogia de Grelhas, adotou-se uma malha de 10 cm de lado, com utilização da análise de grelha não-linear e combinação quase permanente para obtenção das flechas, e o visualizador de grelhas e combinação normal para obtenção do momento fletor máximo no Estado Limite Último (ELU). Destaca-se que o valor das flechas

foi utilizado apenas para o dimensionamento, por tentativa, da espessura das lajes em questão, conforme mencionado no início deste capítulo.

Para a modelagem das lajes engastadas nos quatro bordos, foi necessária a alteração gráfica na própria grelha, visto que a opção de engastamento perfeito no modelador do TQS pareceu não ser suficiente, no caso de lajes isoladas, para trazer resultados condizentes com o que se espera de uma laje desse tipo, haja vista a ausência de momentos fletores negativos próximos aos apoios, os quais apareceram apenas após a inserção manual de restrição nos três eixos em cada ponto de encontro da malha da laje com as barras de viga.

Após a obtenção de todos os resultados, calcularam-se as razões M_n/M_0 , divisão do momento fletor máximo obtido em laje com abertura de n% (M_n) pelo momento fletor máximo na laje sem abertura (M_0). Para cada uma das lajes, essas razões foram colocadas em gráfico no eixo das ordenadas, sendo as porcentagens da abertura referentes a cada razão indicadas no eixo das abcissas. Além disso, gráficos mostrando os valores em si obtidos nas flechas e momentos fletores máximos com todas as aberturas foram traçados, com o objetivo de tornar possível a análise do comportamento das lajes conforme o aumento de tamanho da abertura existente em seu centro.

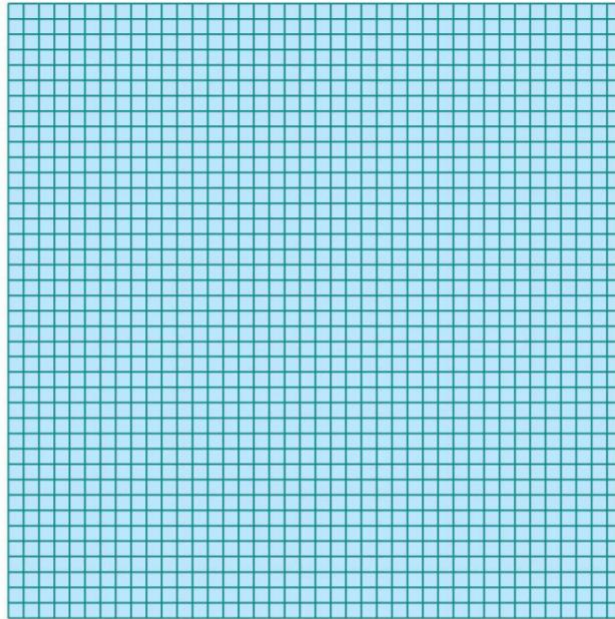
A análise pelo MEF (Método dos Elementos Finitos) também foi realizada, por meio do *Software* MIDAS Civil para a laje quadrada de lado cinco metros simplesmente apoiada nos quatro bordos como uma forma de verificar o comportamento obtido pelo TQS, já que a literatura traz o MEF como mais refinado, além de permitir uma análise mais isolada da laje em si, evitando a interferência de outros parâmetros advindos do restante do pórtico que influenciaram a análise pelo TQS, visto que apenas a laje, sem vigas ou pilares, foi modelada no MIDAS.

A malha adotada no MIDAS Civil foi quadrada com 12,5 cm de lado, visto que esse valor comporta um número inteiro de elementos quadrados dentro da laje modelada, de modo que uma quantidade inteira de elementos possa ser removida para formar as aberturas com mesmas dimensões das analisadas no TQS. A figura 8 mostra o modelo da laje do grupo L1 sem abertura modelada no MIDAS Civil.

Figura 8 – Modelagem da laje L1 no MIDAS Civil

Laje Maciça Quadrada sem Furo (5mx5m)

Malha de Elementos Finitos (12,5cmx12,5cm)



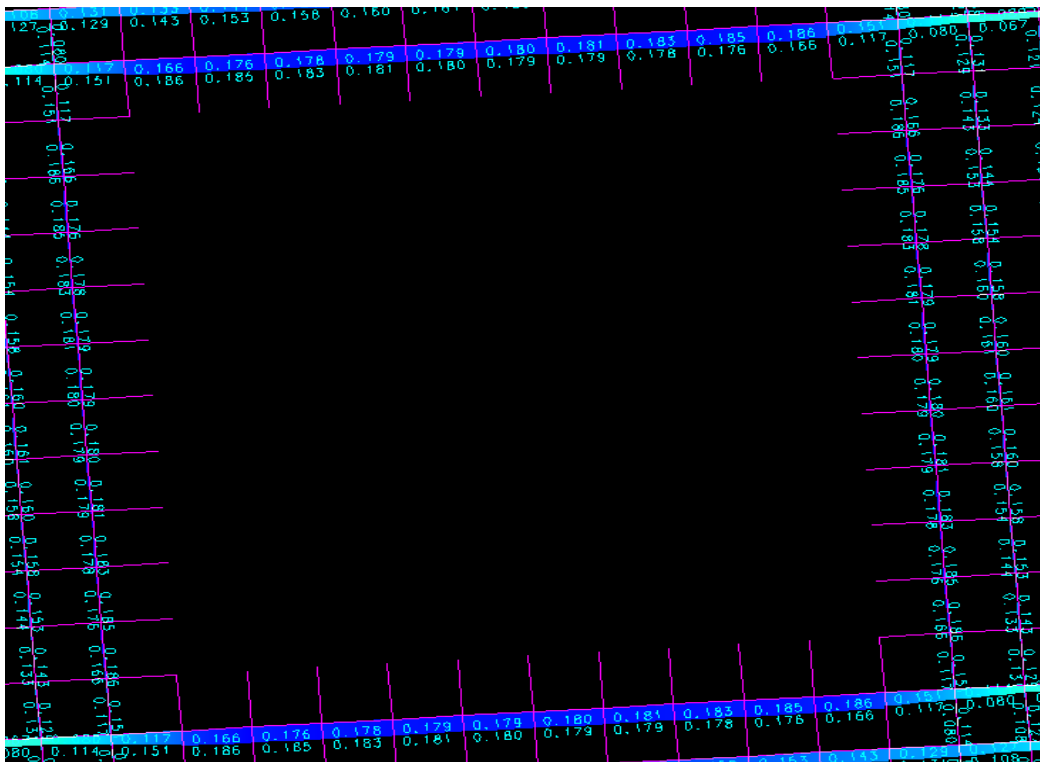
Fonte: Próprio autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Analogia de Grelhas

No que diz respeito à modelagem, o Método da Analogia de Grelhas pressupõe a interrupção de uma ou mais barras da grelha para que seja possível a inserção da abertura centralizada. Isso implicou na existência de barras de grelha em balanço próximas à abertura do furo, embora os Momentos Fletores na ponta dessas barras não sejam contabilizados, visto que para o método em questão, apenas foram gerados resultados nos nós, ou seja, quando houve cruzamento de duas barras. Isso fica mais claro quando se observa o visualizador de grelhas do TQS:

Figura 9 – Momentos fletores no Visualizador de Grelhas TQS



Fonte: Próprio Autor

Os resultados numéricos obtidos pelo método da Analogia de Grelhas para cada uma das lajes simplesmente apoiadas encontram-se tabelados a seguir, seguidos pelos das lajes engastadas:

Tabela 1 - Resultados da laje L1 simplesmente apoiada – TQS

Laje 5m x 5m (L1) - Simplesmente Apoiada			
	Abertura	Momento máximo (kNm)	Mn/M0
L1	0,0%	9,1	1,00
	2,5%	14,0	1,54
	5,0%	17,0	1,87
	7,5%	16,9	1,86
	10,0%	17,8	1,96
	12,5%	18,7	2,05
	15,0%	17,8	1,96
	17,5%	17,8	1,96
	20,0%	18,6	2,04
	25,0%	17,8	1,96
	30,0%	16,5	1,81
	35,0%	15,7	1,73
	40,0%	15,5	1,70
	45,0%	13,6	1,49
	50,0%	12,4	1,36

Fonte: Próprio autor

Tabela 2 - Resultados da laje L2 simplesmente apoiada – TQS

Laje 6m x 6m (L2) - Simplesmente Apoiada			
Caso	Abertura	Momento máximo (kNm)	Mn/M0
L2	0,0%	16,0	1,00
	2,5%	24,2	1,51
	5,0%	30,5	1,91
	7,5%	31,1	1,94
	10,0%	32,2	2,01
	12,5%	31,4	1,96
	15,0%	31,7	1,98
	17,5%	31,7	1,98
	20,0%	31,8	1,99
	25,0%	30,7	1,92
	30,0%	30,2	1,89
	35,0%	28,6	1,79
	40,0%	27,6	1,73
	45,0%	25,6	1,60
	50,0%	23,6	1,48

Fonte: Próprio autor

Tabela 3 - Resultados da laje L3 simplesmente apoiada – TQS

Laje 7m x 7m (L3) - Simplesmente Apoiada			
Caso	Abertura	Momento máximo (kNm)	Mn/M0
L3	0,0%	24,8	1,00
	2,5%	39,0	1,57
	5,0%	47,8	1,93
	7,5%	50,5	2,04
	10,0%	51,6	2,08
	12,5%	52,0	2,10
	15,0%	52,2	2,10
	17,5%	52,1	2,10
	20,0%	52,3	2,11
	25,0%	50,6	2,04
	30,0%	49,6	2,00
	35,0%	48,2	1,94
	40,0%	46,9	1,89
	45,0%	43,9	1,77
	50,0%	41,2	1,66

Fonte: Próprio autor

Tabela 4 - Resultados da laje L4 simplesmente apoiada – TQS

Laje 5m x 6m (L4) - Simplesmente Apoiada			
Caso	Abertura	Momento máximo (kNm)	Mn/M0
L4	0,0%	13,9	1,00
	2,5%	20,2	1,45
	5,0%	24,1	1,73
	7,5%	26,2	1,88
	10,0%	26,7	1,92
	12,5%	25,7	1,85
	15,0%	26,7	1,92
	17,5%	26,7	1,92
	20,0%	27,5	1,98
	25,0%	25,8	1,86
	30,0%	25,8	1,86
	35,0%	24,7	1,78
	40,0%	24,1	1,73
	45,0%	21,9	1,58
	50,0%	20,5	1,47

Fonte: Próprio autor

Tabela 5 - Resultados da laje L1 engastada – TQS

Laje 5m x 5m (L1) - Engastada			
Caso	Abertura	Momento máximo (kNm)	Mn/M0
L1	0	4,1	1,00
	2,5%	6,4	1,56
	5,0%	7,5	1,83
	7,5%	7,4	1,80
	10,0%	7,5	1,83
	12,5%	7,5	1,83
	15,0%	7,0	1,71
	17,5%	6,6	1,61
	20%	6,3	1,54
	25%	5,4	1,32
	30%	4,4	1,07
	35%	3,6	0,88
	40%	2,7	0,66
	45%	2,0	0,49
	50%	1,6	0,39

Fonte: Próprio autor

Tabela 6 - Resultados da laje L2 engastada – TQS

Laje 6m x 6m (L2) - Engastada			
Caso	Abertura	Momento máximo (kNm)	Mn/M0
L2	0	6,7	1,00
	2,5%	10,4	1,55
	5,0%	12,5	1,87
	7,5%	12,7	1,90
	10,0%	12,5	1,87
	12,5%	12,2	1,82
	15,0%	11,5	1,72
	17,5%	10,7	1,60
	20%	9,9	1,48
	25%	8,6	1,28
	30%	6,8	1,01
	35%	5,6	0,84
	40%	4,1	0,61
	45%	3,3	0,49
	50%	2,5	0,37

Fonte: Próprio autor

Tabela 7 - Resultados da laje L3 engastada – TQS

Laje 7m x 7m (L3) - Engastada			
Caso	Abertura	Momento máximo (kNm)	Mn/M0
L3	0,0%	10,5	1,00
	2,5%	16,4	1,56
	5,0%	19,8	1,89
	7,5%	20,3	1,93
	10,0%	20,0	1,90
	12,5%	19,2	1,83
	15,0%	18,1	1,72
	17,5%	16,9	1,61
	20,0%	15,6	1,49
	25,0%	13,7	1,30
	30,0%	11,0	1,05
	35,0%	8,4	0,80
	40,0%	6,3	0,60
	45,0%	5,1	0,49
	50,0%	3,7	0,35

Fonte: Próprio autor

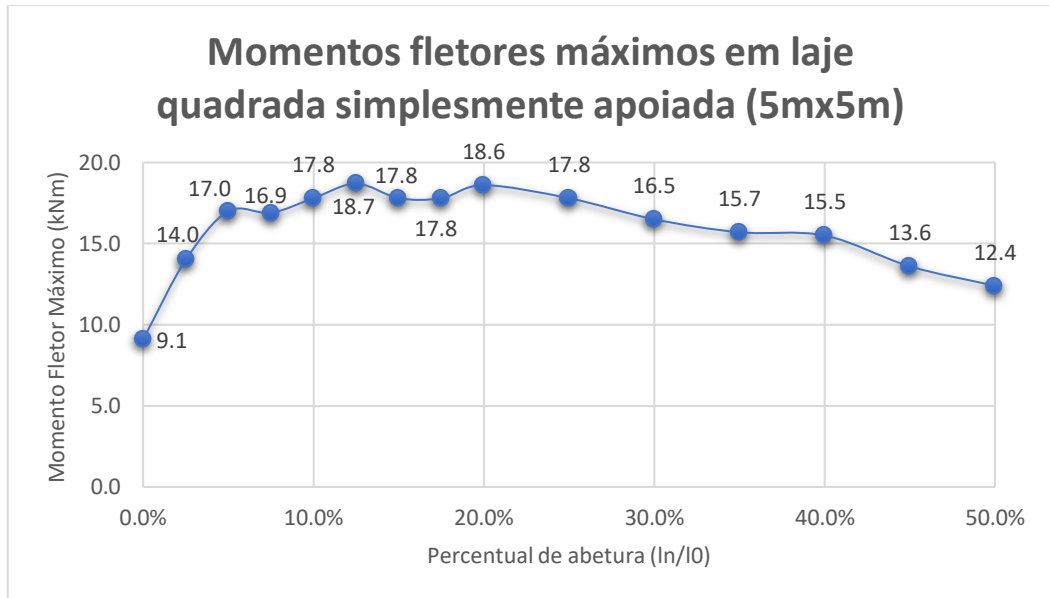
Tabela 8 - Resultados da laje L4 engastada – TQS

Laje 5m x 6m (L4) - Engastada			
Caso	Abertura	Momento máximo (kNm)	Mn/M0
L4	0%	6,3	1,00
	3%	9,0	1,43
	5%	10,5	1,67
	8%	11,2	1,78
	10%	11,0	1,75
	13%	10,2	1,62
	15%	10,2	1,62
	18%	9,5	1,51
	20%	9,1	1,44
	25%	7,6	1,21
	30%	6,6	1,05
	35%	5,7	0,90
	40%	4,4	0,70
	45%	3,7	0,59
	50%	2,7	0,43

Fonte: Próprio autor

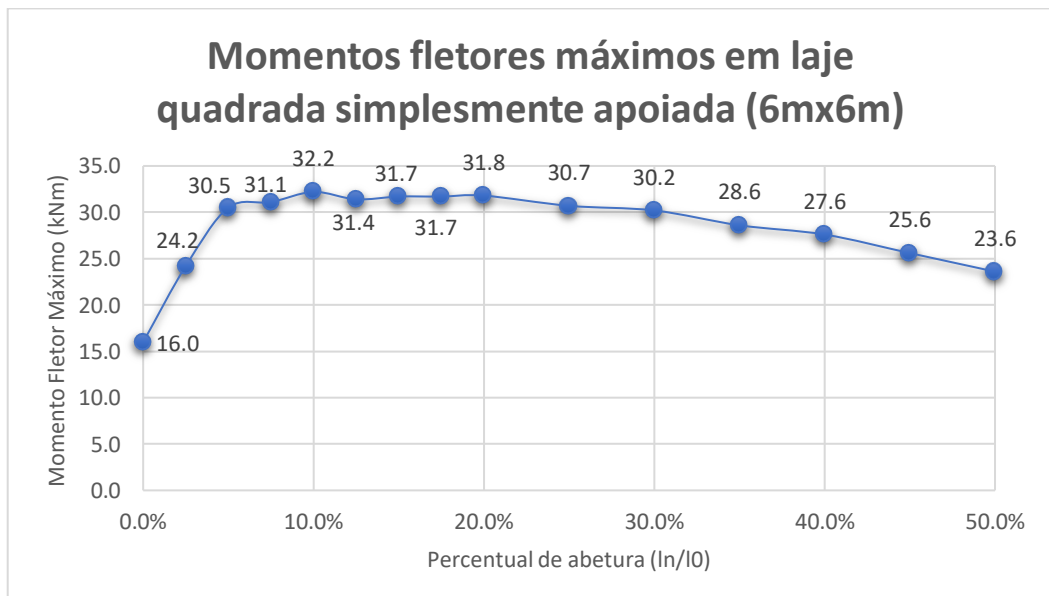
E a seguir, os gráficos relativos aos momentos fletores máximos em cada uma das lajes:

Gráfico 1 – Momentos fletores máximos nas lajes L1 simplesmente apoiadas (5m x 5m) - TQS



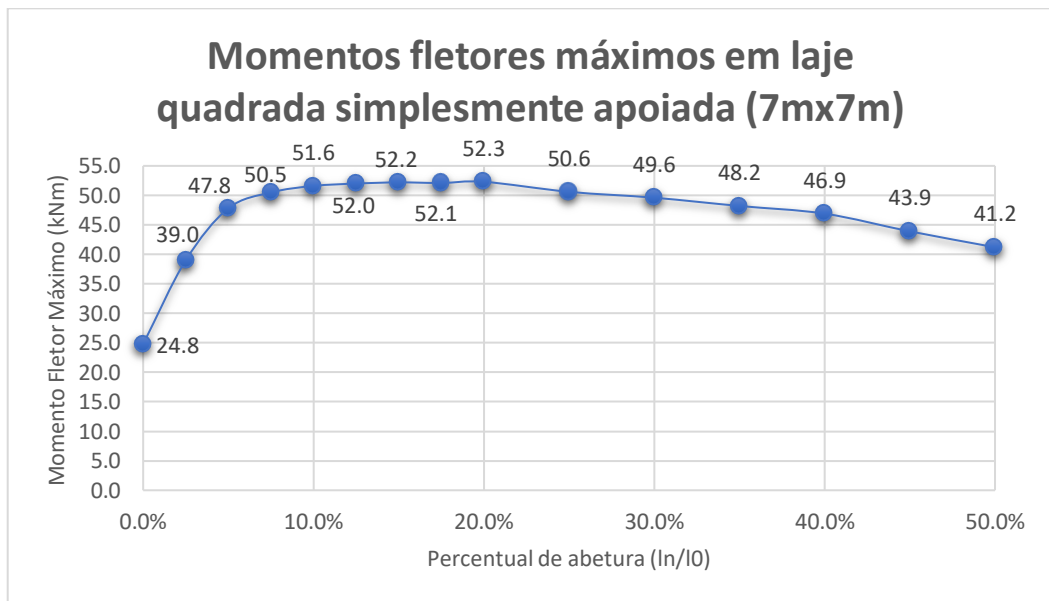
Fonte: Próprio autor

Gráfico 2 – Momentos fletores máximos nas lajes L2 simplesmente apoiadas (6m x 6m) - TQS



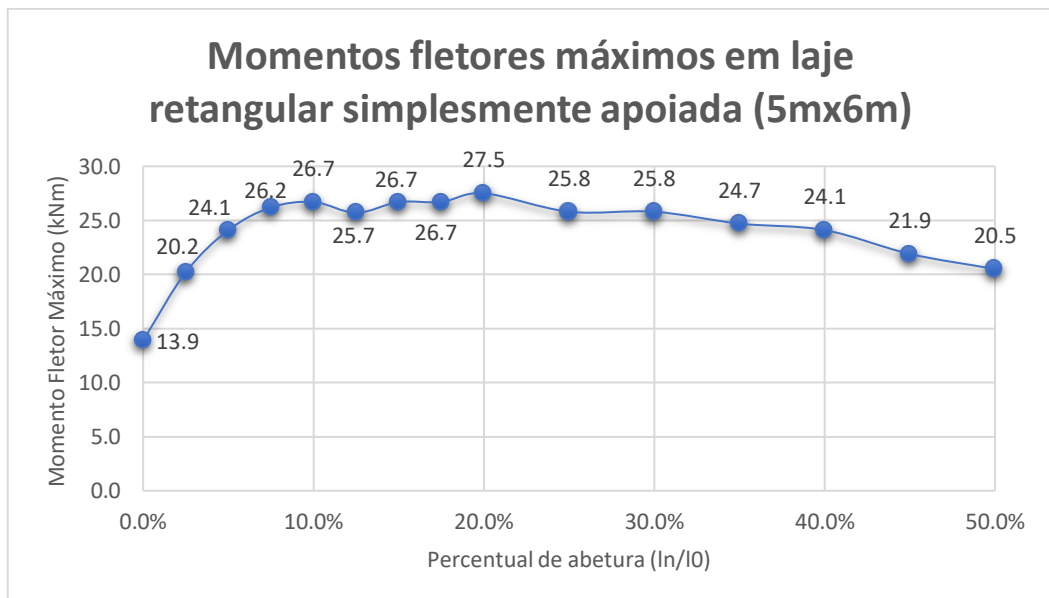
Fonte: Próprio autor

Gráfico 3 – Momentos fletores máximos nas lajes L3 simplesmente apoiadas (7m x 7m) - TQS



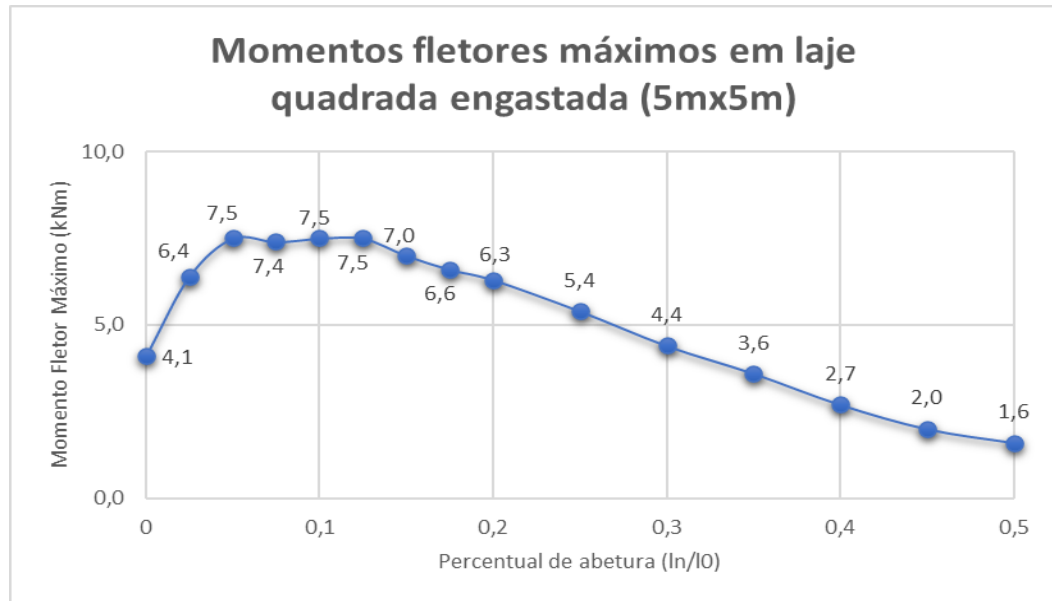
Fonte: Próprio autor

Gráfico 4 – Momentos fletores máximos nas lajes L4 simplesmente apoiadas (5m x 6m) - TQS



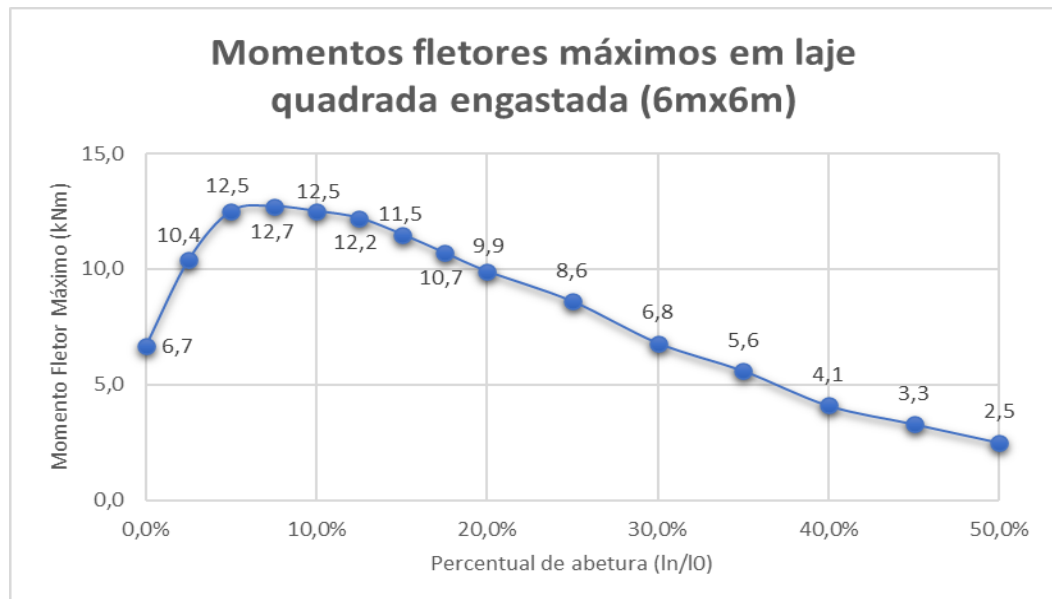
Fonte: Próprio autor

Gráfico 5 – Momentos fletores máximos nas lajes L1 engastadas (5m x 5m) - TQS



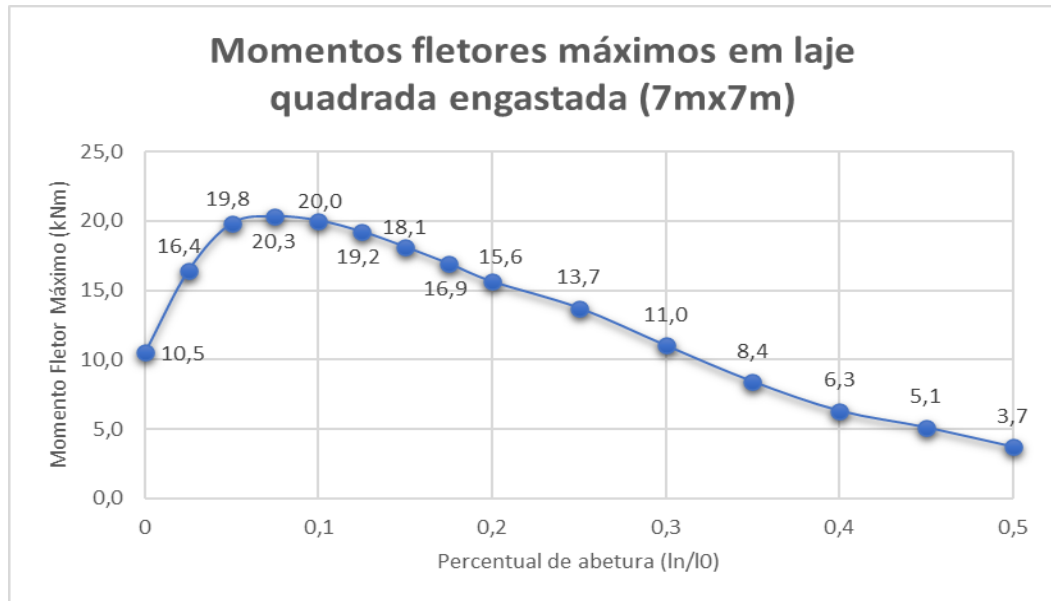
Fonte: Próprio autor

Gráfico 6 – Momentos fletores máximos nas lajes L2 engastadas (6m x 6m) - TQS



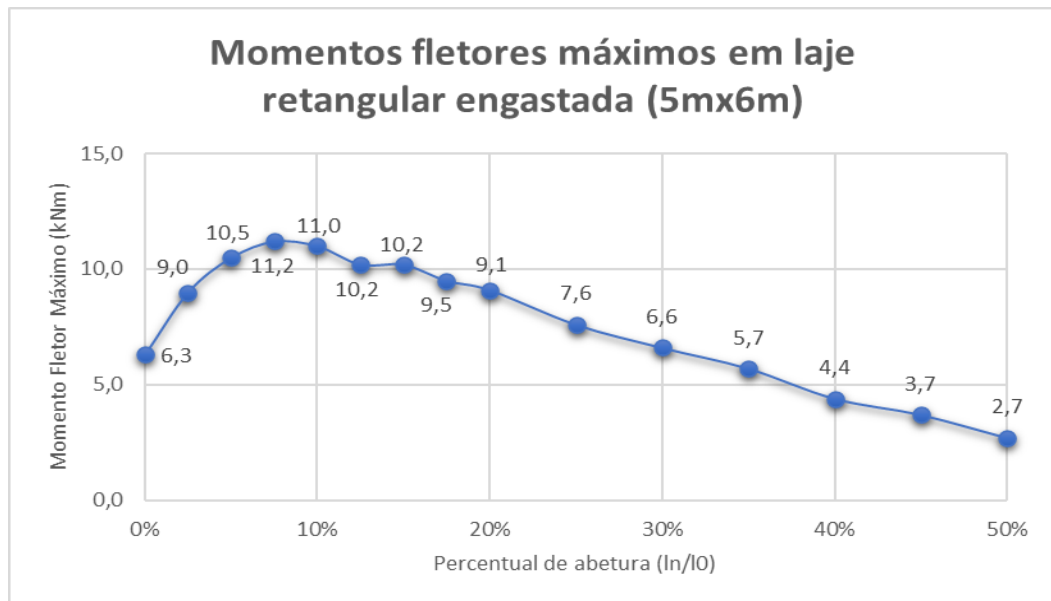
Fonte: Próprio autor

Gráfico 7 – Momentos fletores máximos nas lajes L3 engastadas (7m x 7m) - TQS



Fonte: Próprio autor

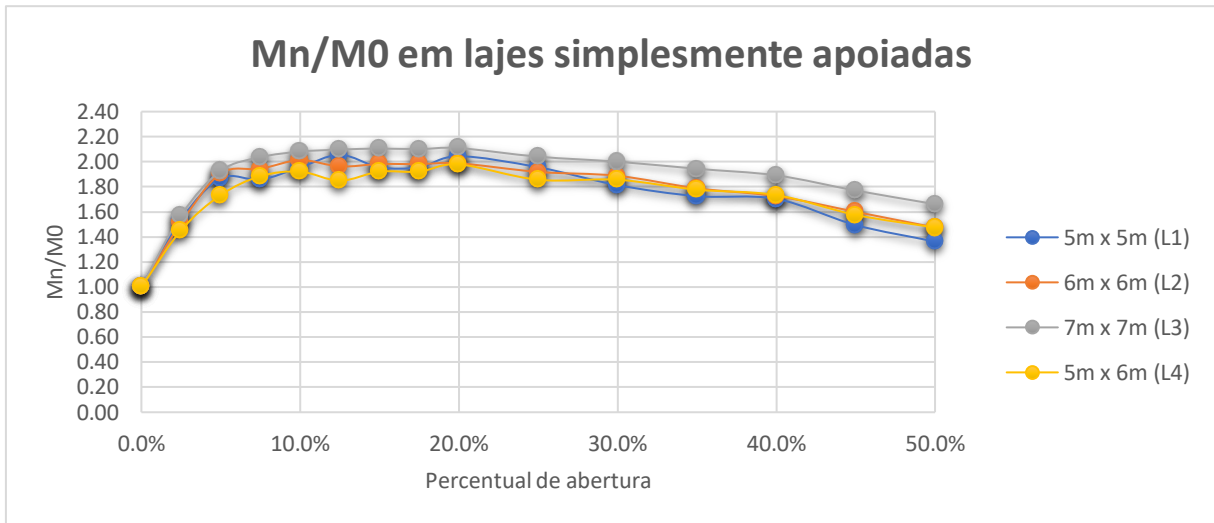
Gráfico 8 – Momentos fletores máximos nas lajes L4 engastadas (5m x 6m) - TQS



Fonte: Próprio autor

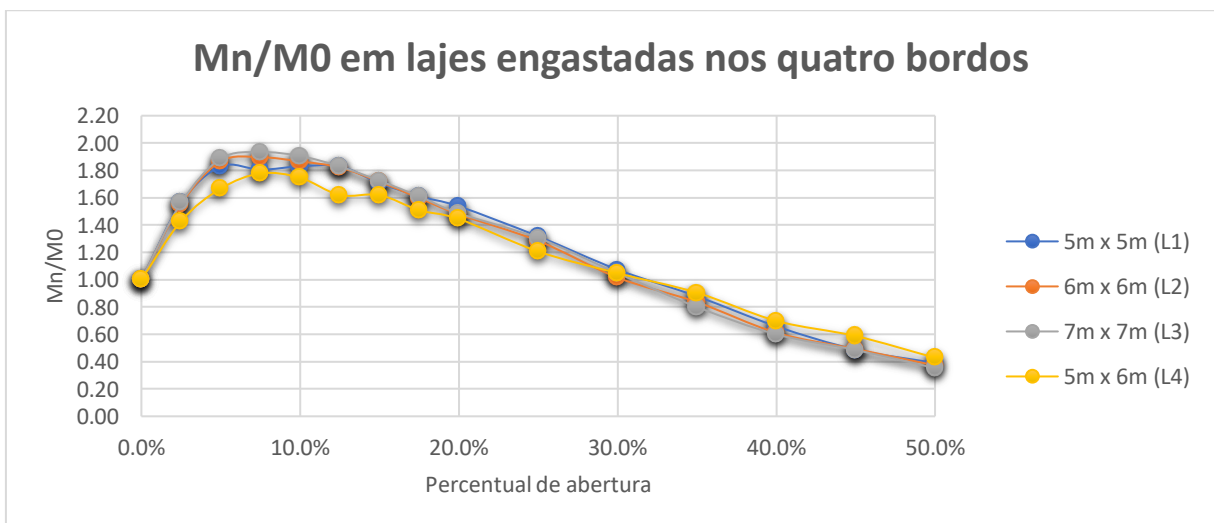
Percebe-se, por meio dos gráficos, que embora os valores numéricos tenham sido diferentes, o comportamento dos momentos fletores máximos em cada grupo de lajes foi parecido em ambas as condições de apoio analisadas.

Isso é constatado com mais facilidade quando são traçados os gráficos de ordenada M_n/M_0 :

Gráfico 9 – M_n/M_0 nos quatro tipos de laje simplesmente apoiadas

Fonte: Próprio autor

Observa-se, no gráfico acima, que a tendência de comportamento dos momentos fletores máximos mostrou-se bastante consistente em todas as lajes, com crescimentos expressivos até a abertura com lado igual a 10% do vão, chegando os valores em todas as lajes a quase dobrar quando comparados com os das lajes sem abertura. Daí em diante, existiu uma diminuição nas razões, porém a razão mínima encontrada continuou sendo 1,0, de modo que os momentos fletores máximos em todas as lajes com abertura superaram os das lajes sem abertura.

Gráfico 10 – M_n/M_0 nos quatro tipos de laje engastadas

Fonte: Próprio autor

No caso dos momentos fletores máximos em lajes com todos os bordos engastados, o comportamento também foi semelhante para os quatro tipos de laje e apresentou aumentos expressivos para o caso das aberturas menores, chegando ao pico nas lajes com abertura de lado igual a 7,5% do vão, onde os valores chegaram perto do dobro dos encontrados nas lajes sem abertura. Para os valores posteriores, a tendência foi de decréscimo, sendo importante destacar a ocorrência de valores similares aos das lajes sem abertura nas lajes com aberturas com lado de 30% do vão, e valores menores ainda para as de abertura com 35%, 40%, 45% e 50%.

Os resultados encontrados em relação aos momentos fletores, embora tenham sido diferentes em módulo dos encontrados por Mendes (2017), apresentaram o comportamento semelhante, no sentido de que aumentaram nas lajes de aberturas menores, atingindo o pico por volta de 10% no eixo X, e decaíram a partir daí segundo uma curva que se assemelhou a uma parábola assimétrica.

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que quando se faz uma abertura na laje, surgem concentrações de tensão em torno dessa abertura, como já é sabido pela literatura, a qual inclusive recomenda cuidados especiais para aberturas maiores. No entanto, à medida que a abertura na laje vai crescendo, aumenta também a porção de concreto e de carga distribuída retirada do sistema, de modo que chega a um ponto em que os esforços internos se tornam inferiores aos registrados nas lajes sem abertura. Como comentado por Enochsson et al. (2007), outra razão para isso pode ser o fato de que quanto maior o tamanho da abertura, mais a estrutura se aproxima de um sistema de quatro vigas, distanciando-se de um sistema de laje propriamente dito, o que aumenta a capacidade de carga e a resposta carga-deflexão.

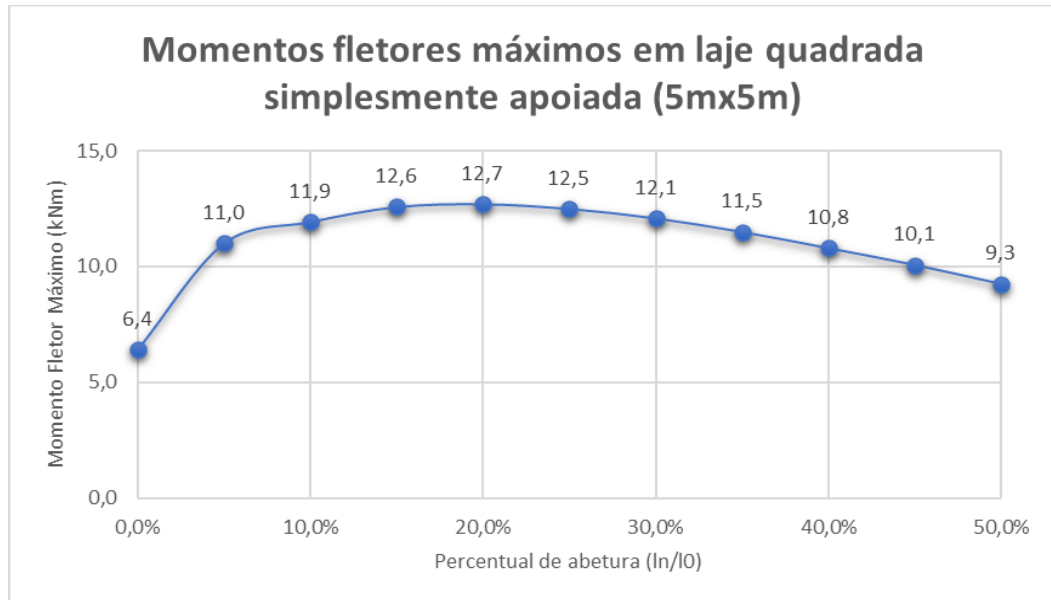
A Norma Brasileira NBR 6118 (2014) permite, no entanto, que seja dispensada a verificação em aberturas cujo lado é menor ou igual a 10% do menor vão da laje. Essa situação aconteceu em três dos quatro tipos de laje aqui estudados (L1, L2 e L3). Ressalta-se, no entanto, que os momentos fletores máximos observados, tanto para as lajes simplesmente apoiadas como para as lajes engastadas nos quatro bordos, superaram em quantidades muito significantes os encontrados nas lajes sem abertura (a menor diferença encontrada nos três tipos de lajes citados foi de 86% para mais, enquanto a maior chegou a atingir 108%).

Isso influenciaria especialmente no dimensionamento das armaduras, o qual leva em consideração justamente os momentos fletores máximos para determinar a área de aço necessária na seção de concreto da laje, podendo, portanto, haver um subdimensionamento dessas armaduras.

4.2 Método dos Elementos Finitos

Para o método dos elementos finitos com a malha quadrada de 12,5 cm de lado, os momentos apresentaram o seguinte comportamento:

Gráfico 11 – Momentos fletores máximos - L1 simplesmente apoiada (5m x 5m) - MIDAS



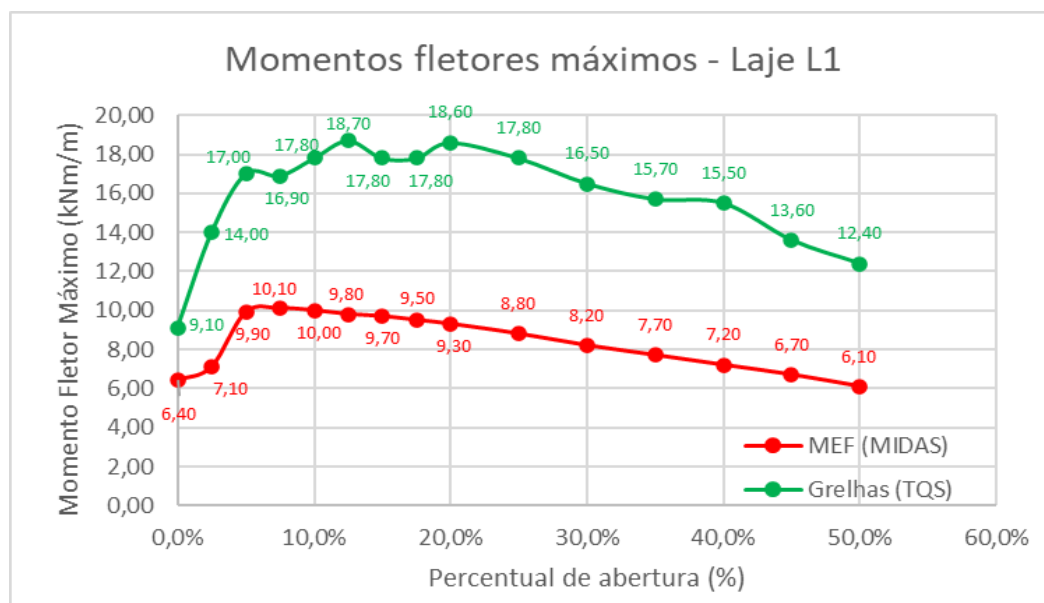
Fonte: Próprio autor

A tendência de aumento expressivo nas aberturas de menores dimensões também foi observada nos resultados do MEF, embora o pico de momentos em si não tenha ocorrido na abertura 10% e sim na de 20%, com os valores das aberturas maiores decaindo suavemente até a abertura de 50%. Destaca-se, ainda, que assim como observado na analogia de grelhas, os momentos fletores máximos nas lajes com aberturas menores (zero a 10%) mostraram-se mais sensíveis ao aumento das dimensões das aberturas quando comparado com os das demais.

4.3 Comparação dos métodos utilizados

O gráfico a seguir apresenta os resultados obtidos para momentos fletores máximos na laje quadrada de lado cinco metros simplesmente apoiada nos quatro bordos pela Analogia de Grelhas (TQS) e pelo Método dos Elementos Finitos (MIDAS):

Gráfico 12 – Comparação MIDAS x TQS – Momentos fletores máximos



Fonte: Próprio autor

Dado que as análises realizadas no TQS e no MIDAS se basearam em métodos de cálculo diferentes, já era esperado que houvesse divergência entre eles. No geral, tanto os Momentos Fletores como as deformações obtidas pelo primeiro tendem a ser maiores do que as obtidas pelo segundo, pelo fato de que o MEF não considera os efeitos da fissuração do concreto, o que já é feito de forma automática pela Analogia de Grelhas do TQS, como apontado por Fava e Neves (2018).

Neves (2010) ao comparar os dois métodos em questão também chegou à mesma conclusão, tanto para as deformações (“Da análise dos deslocamentos efectuada, verificou-se que o modelo de elementos de grelha é mais flexível.”) como para os Momentos Fletores:

Relativamente à análise dos momentos flectores pode-se concluir que o modelo de elementos de grelha obtém sempre valores maiores do que o modelo de elementos de laje, apesar de ambas as soluções estarem muito próximas. Esta conclusão vai de encontro às características de convergência de ambas as metodologias, isto porque no modelo de elementos de laje, que tem como base o MEF, a solução aproximada é inferior à solução exacta e no modelo de elementos de grelha, baseado na analogia de grelha, a solução é sempre superior à solução exacta.8

A diferença encontrada entre os métodos mostrou-se, no entanto, muito superior à esperada, na medida em que o TQS forneceu valores que chegaram a ser mais que o dobro dos encontrados no MIDAS nas aberturas de 20% em diante, enquanto Neves (2010) e Fava e Neves (2018) encontraram diferenças percentuais máximas por volta de 40%.

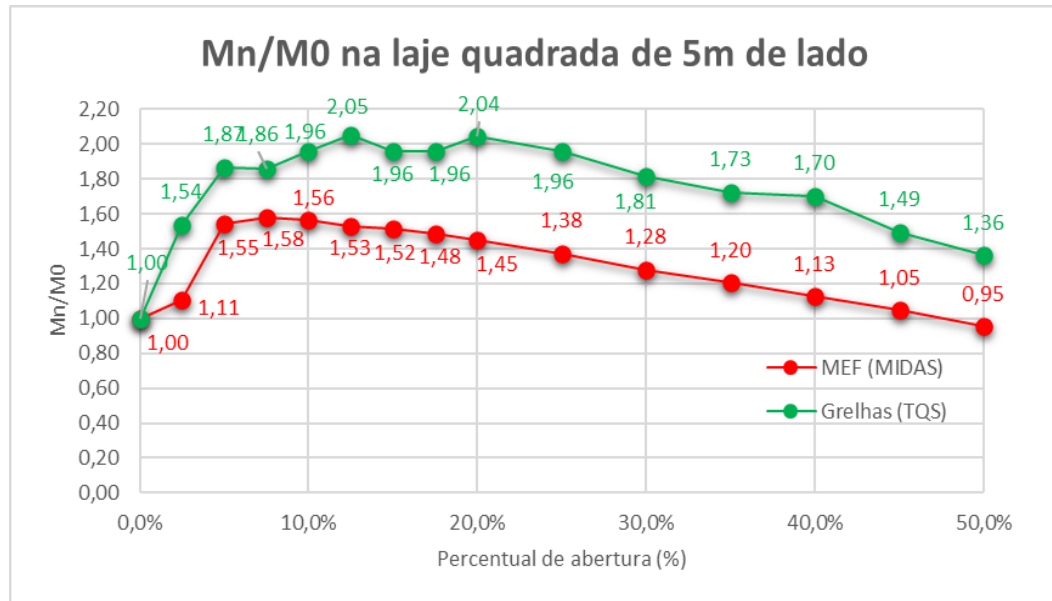
Isso pode ser explicado pelo fato de o TQS dividir a laje em faixas retangulares, de largura igual à medida configurada para o lado da malha, as quais apresentam um valor de Momento Fletor característico. No visualizador de grelhas, esses valores são apresentados, e o obtido para a faixa mais crítica consta como o Momento máximo da laje.

Esse Momento máximo, entretanto, não é o adotado para dimensionamento das armaduras de laje, justamente pela sua diferença expressiva em relação aos resultados obtidos nos métodos clássicos simplificados, já que isso implicaria em um superdimensionamento da laje. Em vez disso, o TQS adota um Momento médio, ponderando os valores de cada faixa, desde que ele não seja inferior a uma determinada porcentagem (definida pelo projetista) do Momento Máximo encontrado na faixa mais crítica. Quando essa condição não é satisfeita, a faixa em questão é isolada.

Como neste trabalho o objetivo foi avaliar o comportamento das lajes à medida que a abertura central aumentava de tamanho, depender dos valores de dimensionamento adotados pelo TQS traria inconsistências, visto que em alguns casos não houve faixa isolada e em outros houve, e, portanto, em alguns casos o valor máximo de dimensionamento adotado foi o da faixa isolada e em outros, o da média ponderada.

Utilizando os valores máximos de momento apresentados no visualizador de grelhas obteve-se uma consistência no comportamento, mesmo que os módulos em si dos Momentos tenham ficado bem acima do esperado. Isso foi mais bem observado quando se compararam as razões M_n/M_0 obtidas para cada abertura nos dois métodos, como mostra o gráfico a seguir:

Gráfico 13 – Comparação MIDAS X TQS - Razões Mn/M0



Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve o intuito de fazer uma análise do comportamento dos Momentos Fletores em lajes maciças de concreto armado dotadas de uma abertura centralizada conforme essa abertura tem suas dimensões aumentadas, utilizando, para isso, o *Software* TQS. Uma das lajes foi analisada também no MIDAS civil, para que se obtivesse uma confirmação do comportamento obtido pelo TQS em uma das lajes analisadas.

Observou-se, com isso, que logo nas aberturas menores, cujo lado está entre 5% e 10% do lado da laje, houve um crescimento expressivo do momento fletor máximo, quando este foi comparado ao encontrado na laje sem abertura, com valores em módulo chegando quase a dobrar. A partir daí, conforme as aberturas foram crescendo, os momentos foram diminuindo, tanto por conta da diminuição da carga aplicada no sistema, que diminui em razão da retirada de uma parte da laje, como pelo fato de o sistema se aproximar de um pórtico espacial de quatro vigas e quatro pilares.

Esse comportamento pode indicar a necessidade de uma reavaliação da disposição da NBR 6118 (2014) que permite que não sejam analisados os esforços em lajes com aberturas menores. Nesse sentido, sugere-se, para trabalhos futuros, uma análise no sentido de verificar as armaduras que devem ser adotadas nesse tipo de laje, para comprovar se realmente pode estar havendo subdimensionamento.

Além disso, destaca-se que os módulos de momento fletor em si foram muito superiores no visualizador de grelhas do TQS, quando comparados com os resultados do MIDAS Civil e do método simplificado (Czérny). Isso já foi tema de bastante discussão no passado e desde então o TQS passou a adotar, para o dimensionamento das armaduras, critérios que levam a um Momento de Dimensionamento, cujo módulo é mais próximo do resultado encontrado nos demais métodos.

REFERÊNCIAS

AL-SULAYVANI, B. J., AL-TALABANI, D. N. Strengthening and repair of circular RC slabs with openings using CFRP strips under repeated loading. **Construction and Building Materials**. Mosul, v. 84, p. 73-83, jun. 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 318**: Building Code Requirements For Structural Concrete, Estados Unidos, 2019.

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

AUSTRALIAN STANDARDS. **AS 3600:2018**. Concrete Structures, Sydney, 2018.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8110-1: 1997**. Structural use of concrete – Part 1: Code of practice for design and construction, Londres, 1997.

BUENO, J. F.; **Influência da flexibilidade de vigas de apoio no projeto de lajes maciças de concreto armado**. 2013. 196 f. Monografia (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

CANADIAN STANDARD ASSOCIATION. **A23.3-04**. Design of concrete structures, Canadá, 2004.

CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014**. 4. Ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 415 p.

ENOCHSSON, O.; LUNDQVIST, J.; TALJSTEN. B.; RUSINOWSKI, P.; OLOFSSON, T. CFRP strengthened openings in two-way concrete slabs – An experimental and numerical study. **Construction and Building Materials**. Lulea, v. 21, p. 810-826, abr. 2007.

FAVA, G. C.; NEVES, L. R. **Análise numérica comparativa entre o Método dos Elementos Finitos e o Método das Grelhas na análise estrutural do elemento laje – Estudo de caso**.

2018. 61 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil). Departamento de áreas acadêmicas, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Aparecida de Goiânia, 2018.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE Guidelines for concrete N° 15**. Standard specifications for concrete structures - “Design”, Japão, 2007.

KEYVANI, S., VAEZ, S. R. H. Using DLO Procedure to Investigate The Effect of Openings on Ultimate Loads and Collapse Pattern of Slabs. **Structures**, Qom, v. 20, p. 717-727, ago. 2019.

LEITE, I. C. S., SILVEIRA, D. P., AGUIAR, L. E. A., SILVA, J. E. M. Análise comparativa entre os métodos de Czerny, Marcus e Grelha para o cálculo de lajes maciças. **Projectus**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 4, p. 114-121. 2017.

LEONHARDT, F.; MONNING, E. **Construções de concreto**: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado. Tradução de José de Moura Villas Boas. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1978, v.3.

MAHLIS, M.; SHOEIB, A. E.; SHERIF A., The Effect of Cutting Openings on the Behavior of Two-Way Solid Loaded Slabs. **Structures**, Cairo, v. 16, p. 137-149, nov. 2018.

MENDES, R. T., **Reforço de borda de aberturas em lajes de concreto armado utilizando fibra de carbono**. 2017. 58 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MINISTRY OF HOUSING, UTILITIES AND URBAN COMMUNITIES. **ECP 203-2007**. Egyptian code for design and construction of concrete structures, Egito, 2007.

NEVES, L. F. C. S. **Comparação de modelos de grelha e de elementos finitos de laje na modelação de estruturas de edifícios de betão armado**. 2010. 86 f. Monografia (Mestrado em Engenharia Militar). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Academia Militar, Lisboa, 2010.

PARISOTTO, M.; **Elaboração de um software para determinação via método dos elementos finitos de cargas de ruptura de placas e lajes em flexão.** 2018. 96 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Porto Alegre, 2018.

PINHEIRO, Libânio Miranda. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios.** 2007. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PITOL, A. F., **Análise comparativa das deformações imediatas de lajes maciças em concreto armado com e sem abertura.** 2017. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.

SERPA, V. C., CORREIA, V. L., ROSA, R. S., PUEL, A. **Análise de lajes de concreto armado: Comparativo entre método de Marcus e Analogia de Grelha** *In:* Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul, 2017, Santa Catarina. Anais... Santa Catarina: IFSC, 2017. p. 713-719.

SILVA, G. V. M., **Estudo de distribuição de esforços em lajes nervuradas com aberturas através da analogia de grelha.** 2015. 94 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SILVA, L. F. F., **Análise da distribuição de esforços em lajes nervuradas com aberturas através do método das placas.** 2017. 97 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

STRAMANDINOLI, J. S. B.; **Contribuições à análise de lajes nervuradas por analogia de grelhas.** 2003. 179 f. Monografia (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.