



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



LUIZ FERNANDO FÉLIX DA SILVA

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS EM LAJES
NERVURADAS COM ABERTURAS ATRAVÉS DO MÉTODO DAS
PLACAS**

Uberlândia
Julho 2017

LUIZ FERNANDO FÉLIX DA SILVA

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS EM LAJES NERVURADAS
COM ABERTURAS ATRAVES DO MÉTODO DAS PLACAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção de título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera

Uberlândia
Julho 2017

LUIZ FERNANDO FÉLIX DA SILVA

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS EM LAJES NERVURADAS
COM ABERTURAS ATRAVES DO MÉTODO DAS PLACAS**

Aprovado em 02/08/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera

Prof. Dr. Antônio Carlos dos Santos

Prof. Dr. Gerson Moacyr Sisniegas Alva

*Dedico este trabalho à minha mãe Marli, ao meu pai
José Luiz e à minha vó Ana Pereira (in memoriam).
Por serem tudo de mais precioso em minha vida.*

AGRADECIMENTOS

À Deus em primeiro lugar por sempre me guiar e abençoar meus caminhos.

À Nossa Senhora da Abadia por me acolher, me ouvir e estar sempre presente na minha vida.

Aos meus pais, que mesmo ausentes se fizeram presentes durante essa jornada.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera, pela orientação, apoio e atenção dedicada.

À Cinthya Gomes, da SAE – Sistemas de Análise Estrutural Ltda., por disponibilizar a senha da versão trial do *Programa STRAP*, para estar realizando as análises deste estudo.

Ao meu namorado, Igor, pelo seu companheirismo, amor, atenção, amizade, preocupação e principalmente paciência durante todo o processo.

À secretaria da FECIV – UFU, em especial, à Jerônima por ser mais que uma secretária de curso, uma amiga que me acompanhou durante todos os anos de graduação.

Agradeço à minha família e aos meus amigos, pelo amor, paciência e compreensão que neles sempre encontrei, sobretudo durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho consiste no estudo da distribuição de esforços em lajes nervuradas com distribuição de aberturas ao longo de todo seu comprimento através do método de placas em regime elástico. Na revisão bibliográfica são apresentadas as aplicações destinadas a este tipo de estrutura, além das características das lajes nervuradas, métodos de análise e as recomendações normativas para análise e dimensionamento estrutural. Foram utilizadas 3 dimensões de lajes, nas quais se aplicaram 3 condições diferentes de aberturas: simétricas, assimétricas e aleatórios, último caso foram considerados como aberturas críticas. No total, 12 lajes com diferentes tamanhos e locações de aberturas são analisadas. Os carregamentos considerados são o peso próprio da estrutura, a carga permanente e a carga acidental uniformemente distribuída. Utilizando o programa computacional STRAP são obtidos os esforços e deslocamentos da estrutura e assim comparados os comportamentos das variadas lajes. São apresentados gráficos de incrementos, resultantes do comportamento de cada laje específica. As análises são feitas por meio da comparação entre os momentos fletores e deslocamentos verticais da faixa de nervuras coincidentes de todas as lajes estudadas. Os resultados obtidos indicam que a quantidade e posição dos furos influencia consideravelmente a distribuição de esforços ao longo da laje e na deformação da mesma.

ABSTRACT

This study consists in the analysis of the stress distribution in ribbed slabs with openings along their entire length through the elastic regime plate's method. In the bibliographic review the applications for this type of structure are presented, besides the characteristics of the ribbed slabs, methods of analysis and the normative recommendations for analysis and structural dimensioning. Three different slab sizes were used, in which 3 different conditions of holes were applied: symmetrical, asymmetrical and random, considered as critical holes conditions in the study. In total, 12 slabs with different sizes and locations of holes are analyzed. The loads considered are the specific weight of the structure, the permanent load and the uniformly distributed accidental load. Using the computational program STRAP, the stresses and displacements of the structure are obtained, thus comparing the behaviors of the various slabs. Graphs of increments are presented, resulted from the behavior of each specific slab. The analysis are performed by the comparison between the bending moments and vertical displacements of the set of coincident ribs of all the studied slabs. The results indicate that the number and position of the holes considerably influence the distribution of loads along the slab and its deformation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PRÉDIO DA FAU - SP.....	6
FIGURA 2: CONSTRUÇÃO RESIDENCIAL DE LAJE NERVURADA COM ABERTURAS NA MESA.....	7
FIGURA 3: ILUMINAÇÃO NATURAL EM LAJES RESIDENCIAIS.	7
FIGURA 4: AUDITÓRIO DO MUBE – MUSEU BRASILEIRO DA ESCULTURA EM SÃO PAULO.	7
FIGURA 5: LAJE COM NERVURA APARENTE E LAJE COM PREENCHIMENTO DOS VAZIOS.	9
FIGURA 6: LAJE NERVURADA PATENTEADA POR WILKINSON, NA INGLATERRA, EM 1854.	9
FIGURA 7: EXEMPLO DE LAJE UNIDIRECIONAL FIGURA 8: EXEMPLO DE LAJE BIDIRECIONAL	11
FIGURA 9: DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO CONCRETO.....	17
FIGURA 10: DIMENSÕES LÍMITES PARA DISPENSA DE VERIFICAÇÕES EM LAJES.	25
FIGURA 11: LAJE MACIÇA APOIADA EM UMA ÚNICA DIREÇÃO COM ABERTURA.	26
FIGURA 12: MODELO DE DISPOSIÇÃO DE ARMADURA EM LAJES APOIADAS EM UMA DIREÇÃO.	26
FIGURA 13: ESQUEMA DE FAIXAS PARA DISPOSIÇÃO DE ARMADURAS ADICIONAIS EM LAJES APOIADAS EM UMA DIREÇÃO.....	27
FIGURA 14: ESQUEMA DE DECOMPOSIÇÃO DE LAJES APOIADAS EM DUAS DIREÇÕES.	28
FIGURA 15: LAJE TIPO 01.....	31
FIGURA 16: GEOMETRIA DA LAJE NERVURADA ADOTADA COMO BASE PARA O TIPO 02.....	31
FIGURA 17: GEOMETRIA DA LAJE NERVURADA ADOTADA COMO BASE PARA O TIPO 03.....	31
FIGURA 18: MENU DE GEOMETRIA DO STRAP.	34
FIGURA 19: MENU "BARRAS".....	35
FIGURA 20: BARRAS - PROPRIEDADES.....	36
FIGURA 21: BARRA- OPÇÕES ADICIONAIS.....	36
FIGURA 22: ELEMENTOS - PARÂMETROS	37
FIGURA 23: ELEMENTOS - EXEMPLO DE PROPRIEDADES	37
FIGURA 24: ESQUEMA DE CARGAS SOBREPOSTAS	38
FIGURA 25: CARGAS - PESO PRÓPRIO.	39
FIGURA 26: CARGAS - INFORMAÇÃO PESO PRÓPRIO	39
FIGURA 27: CARGAS - DEFINIÇÃO DE COEFICIENTES NAS COMBINAÇÕES.....	40
FIGURA 28: CARGAS - ABA PRINCIPAL	40
FIGURA 29: RESULTADOS GRÁFICOS.....	41
FIGURA 30: CORREÇÕES NAS PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS.	43
FIGURA 31: ESQUEMA DE ESCOLHA DA FAIXA DE ANÁLISE DE RESULTADOS.	44
FIGURA 32: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 01 SEM FURO	45
FIGURA 33: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 01 SEM FURO	46
FIGURA 34: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 01 SEM FURO	46
FIGURA 35: RELAÇÃO ENTRE MOMENTOS FLETORES EM X NAS LAJES TIPO 01.....	47
FIGURA 36: RELAÇÃO ENTRE MOMENTOS FLETORES EM Y NAS LAJES TIPO 01.....	48
FIGURA 37: RELAÇÃO ENTRE OS DESLOCAMENTOS NAS LAJES TIPO 01	49
FIGURA 38: FLECHAS DAS LAJES TIPO 01.....	49
FIGURA 39: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 01 COM FUROS SIMÉTRICOS	50
FIGURA 40: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 01 COM FUROS SIMÉTRICOS	50
FIGURA 41: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 01 COM FUROS SIMÉTRICOS	51
FIGURA 42: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 01 COM FUROS ASSIMÉTRICOS	52
FIGURA 43: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 01 COM FUROS ASSIMÉTRICOS	52
FIGURA 44: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 01 COM FUROS ASSIMÉTRICOS	53
FIGURA 45: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 01 COM FUROS CRÍTICOS.....	54
FIGURA 46: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 01 COM FUROS CRÍTICOS.....	54
FIGURA 47: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 01 COM FUROS CRÍTICOS.....	55
FIGURA 48: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 02 SEM FURO	56
FIGURA 49: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 02 SEM FURO	57
FIGURA 50: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 02 SEM FURO	57

FIGURA 51: RELAÇÃO ENTRE MOMENTOS FLETORES EM X NAS LAJES TIPO 02.....	58
FIGURA 52: RELAÇÃO ENTRE MOMENTOS FLETORES EM Y NAS LAJES TIPO 02.....	59
FIGURA 53: RELAÇÃO ENTRE OS DESLOCAMENTOS NAS LAJES TIPO 02	59
FIGURA 54: FLECHAS DAS LAJES TIPO 02.....	60
FIGURA 55: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 02 COM FUROS SIMÉTRICOS	61
FIGURA 56: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 02 COM FUROS SIMÉTRICOS	61
FIGURA 57: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 02 COM FUROS CRÍTICOS.....	62
FIGURA 58: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 02 COM FUROS ASSIMÉTRICOS	63
FIGURA 59: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 01 COM FUROS ASSIMÉTRICOS	63
FIGURA 60: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 02 COM FUROS ASSIMÉTRICOS	64
FIGURA 61: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 02 COM FUROS CRÍTICOS.....	65
FIGURA 62: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 02 COM FUROS CRÍTICOS.....	65
FIGURA 63: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 02 COM FUROS CRÍTICOS.....	66
FIGURA 64: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 03 SEM FURO	67
FIGURA 65: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 03 SEM FURO	68
FIGURA 66: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 03 SEM FURO	68
FIGURA 67: RELAÇÃO ENTRE MOMENTOS FLETORES EM X NAS LAJES TIPO 03.....	69
FIGURA 68: RELAÇÃO ENTRE MOMENTOS FLETORES EM Y NAS LAJES TIPO 03.....	70
FIGURA 69: RELAÇÃO ENTRE OS DESLOCAMENTOS NAS LAJES TIPO 03	71
FIGURA 70: FLECHAS DAS LAJES TIPO 03.....	71
FIGURA 71: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 03 COM FUROS SIMÉTRICOS	72
FIGURA 72: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 03 COM FUROS SIMÉTRICOS	72
FIGURA 73: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 03 COM FUROS SIMÉTRICOS	73
FIGURA 74: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 03 COM FUROS ASSIMÉTRICOS	74
FIGURA 75: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 03 COM FUROS ASSIMÉTRICOS	74
FIGURA 76: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 03 COM FUROS ASSIMÉTRICOS	75
FIGURA 77: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM X NA LAJE TIPO 03 COM FUROS CRÍTICOS.....	76
FIGURA 78: DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS EM Y NA LAJE TIPO 03 COM FUROS CRÍTICOS.....	76
FIGURA 79: DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA LAJE TIPO 03 COM FUROS CRÍTICOS.....	77
FIGURA 80: MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO X DAS LAJES SEM FURO TIPO 01, 02 E 03	81
FIGURA 81: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO M_x NAS LAJES SEM FURO.....	81
FIGURA 82: MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO X DAS LAJES COM FURO SIMÉTRICOS TIPO 01, 02 E 03.....	82
FIGURA 83: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO M_x NAS LAJES COM FUROS SIMÉTRICOS	82
FIGURA 84: MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO X DAS LAJES COM FURO ASSIMÉTRICOS TIPO 01, 02 E 03.....	83
FIGURA 85: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO M_x NAS LAJES COM FUROS ASSIMÉTRICOS	83
FIGURA 86: MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO X DAS LAJES COM FUROS CRÍTICOS TIPO 01, 02 E 03	84
FIGURA 87: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO M_x NAS LAJES COM FUROS CRÍTICOS	84
FIGURA 88: MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO Y DAS LAJES SEM FURO TIPO 01, 02 E 03	85
FIGURA 89: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO M_y NAS LAJES SEM FURO.....	85
FIGURA 90: MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO Y DAS LAJES COM FUROS SIMÉTRICOS TIPO 01, 02 E 03.....	86
FIGURA 91: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO M_y NAS LAJES COM FUROS SIMÉTRICOS	86
FIGURA 92: MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO Y DAS LAJES COM FUROS ASSIMÉTRICOS TIPO 01, 02 E 03.....	87
FIGURA 93: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO M_y NAS LAJES COM FUROS ASSIMÉTRICOS	87
FIGURA 94: MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO Y DAS LAJES COM FUROS CRÍTICOS TIPO 01, 02 E 03	88
FIGURA 95: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO M_y NAS LAJES COM FUROS CRÍTICOS	88
FIGURA 96: DESLOCAMENTOS DAS LAJES SEM FURO TIPO 01, 02 E 03	89
FIGURA 97: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO DESLOCAMENTO NAS LAJES SEM FURO	89
FIGURA 98: DESLOCAMENTO DAS LAJES COM FUROS SIMÉTRICOS TIPO 01, 02 E 03.....	90

FIGURA 99: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO DESLOCAMENTO NAS LAJES COM FURO SIMÉTRICOS	90
FIGURA 100: DESLOCAMENTOS DAS LAJES COM FUROS ASSIMÉTRICOS TIPO 01, 02 E 03.....	91
FIGURA 101: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO DESLOCAMENTO NAS LAJES COM FUROS ASSIMÉTRICOS	91
FIGURA 102: DESLOCAMENTOS DAS LAJES COM FUROS CRÍTICOS TIPO 01, 02 E 03.....	92
FIGURA 103: ESQUEMA DE VISUALIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO DESLOCAMENTO NAS LAJES COM FUROS CRÍTICOS.....	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	3
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	3
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA.....	3
2.3 DELIMITAÇÕES	3
2.4 LIMITAÇÕES.....	3
3 LUZ NATURAL.....	5
4 ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO – LAJES	8
4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE LAJES NERVURADAS	8
4.2 CARGAS E COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	13
4.3 ESFORÇOS SOLICITANTES	Erro! Indicador não definido.
5 ANÁLISE ESTRUTURAL.....	15
5.1 CONSIDERAÇÕES PARA O ESTADO-LIMITE ÚLTIMO	15
5.2 CONSIDERAÇÕES PARA O ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO	18
5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE PLACAS EM REGIME ELÁSTICO LINEAR.....	21
6 CONSIDERAÇÕES SOBRE ABERTURAS EM LAJES.....	24
6.1 LAJES MACIÇAS APOIADAS EM UMA DIREÇÃO COM ABERTURAS	25
6.2 LAJES MACIÇAS APOIADAS EM DUAS DIREÇÕES COM ABERTURAS.....	27
7 GEOMETRIA DAS LAJES ANALISADAS	29
8 PROGRAMA STRAP.....	34
9 AJUSTES DOS MODELOS.....	42
10 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	44
10.1 LAJE TIPO 01 SEM FURO.....	45
10.1.1 LAJE TIPO 01 COM FUROS SIMÉTRICOS	50
10.1.2 LAJE TIPO 01 COM FUROS ASSIMÉTRICOS.....	52
10.1.3 LAJE TIPO 01 COM FUROS CRÍTICOS.....	54
10.2 LAJE TIPO 02 SEM FURO.....	56
10.2.1 LAJE TIPO 02 COM FUROS SIMÉTRICOS	61
10.2.2 LAJE TIPO 02 COM FUROS ASSIMÉTRICOS.....	63
10.2.3 LAJE TIPO 02 COM FUROS CRÍTICOS.....	65
10.3 LAJE TIPO 03 SEM FURO.....	67
10.3.1 LAJE TIPO 03 COM FUROS SIMÉTRICOS	72
10.3.2 LAJE TIPO 03 COM FUROS ASSIMÉTRICOS.....	74

10.3.3 LAJE TIPO 03 COM FUIROS CRÍTICOS.....	76
10.4 COMPARAÇÕES.....	80
10.4.1 MOMENTOS FLETORES NA DIREÇÃO X.....	81
10.4.2 MOMENTOS FLETORES NA DIREÇÃO Y.....	85
10.4.3 DESLOCAMENTOS.....	89
11 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Fundamentado por FACHINI (2005) a indústria da construção civil vem sofrendo mudanças cruciais, provocadas principalmente pelo crescimento da competição, redução da disponibilidade de recursos financeiros para as obras e diminuição do poder aquisitivo por parte dos clientes finais.

A construção civil se ampliou consideravelmente nos últimos anos, uma progressão a qual deve ser mantida, acrescentando novas técnicas e materiais a fim de melhorar o desempenho, gerando maior funcionalidade e ao mesmo tempo reduzindo gastos e diminuindo o impacto ambiental. De acordo com COSTA (1997) a evolução do processo construtivo começa pela qualidade dos projetos, e entre os projetos elaborados para a construção civil, destaca-se o estrutural.

É importante reintegrar a necessidade de estudos comparativos entre diferentes tipos de estruturas e métodos construtivos para que se tenha a possibilidade da escolha mais viável da estrutura para conquanto seus diferentes fins. Atualmente, existem vários sistemas estruturais de lajes de concreto armado como por exemplo as lajes maciças, as lajes nervuradas (pré-fabricadas ou moldadas “*in-loco*”), as protendidas, as lajes mistas dentre outras. Além disso, é válido acrescentar que cada qual possui sua especificidade de aplicação com vantagens e desvantagens.

Neste trabalho, a atenção será convergida para o estudo de incrementar alternativas para utilização de iluminação natural, através de aberturas em lajes nervuradas de concreto armado, com o objetivo de incorporar ao estudo o efeito de sustentabilidade e construção sustentável em obras que requeiram ou estejam dispostas a utilizar este recurso.

A execução de lajes nervuradas remota a meados do século XIX, quando projetistas de estruturas perceberam que em lajes maciças, o concreto poderia ser subtraído nas zonas tracionadas, e substituído por materiais inertes e mais leves, como por exemplo, blocos cerâmicos e EPS.

A importância da capacidade de aproveitamento da luz natural vai muito além da economia gerada pela redução no consumo de energia com iluminação artificial. Segundo o arquiteto Dilmas BERTOLOTTI (2016) alguns recursos que colaboram para

o melhor aproveitamento da iluminação natural, podem aumentar o custo da obra e, por isso, alguns construtores e empreendedores evitam essas soluções. Porém, esse valor é muito pequeno em relação ao custo total da construção, estimado entre 1% e 2% dos gastos totais. Além disso, esse investimento é compensado no decorrer do tempo, principalmente com a economia de energia gerada durante toda a vida útil da edificação.

Segundo CORRÊA (2009) a incorporação de práticas de sustentabilidade na construção civil é uma tendência no mercado. Sua adoção é “um caminho sem volta”, pois diferentes agentes, como governos, consumidores, investidores e associações, alertam, estimulam e pressionam o setor da construção a incorporar essas práticas em suas atividades. Ainda cita que a base para a sustentabilidade na construção é alinhar ganhos ambientais e sociais com os econômicos, daí a necessidade e importância de inovações.

Num país em pleno desenvolvimento como o Brasil, onde o setor da construção civil experimenta um momento histórico de crescimento, é bastante importante buscar por soluções que possibilitem a otimização nas obras de engenharia através dos conhecimentos técnicos aplicados à escolha de sistemas estruturais e ao dimensionamento ótimo de estruturas.

VIANNA e GONÇALVES (2001) fundamentam a essência deste trabalho quando apontam em seus estudos que edifícios de uso não residencial é projetado levando em consideração o aproveitamento da luz natural em conjunto com o sistema de iluminação artificial eficientemente dimensionado, pode obter uma economia no consumo de energia elétrica variando em torno de 30 a 70%.

Neste trabalho será analisada a influência de aberturas na região da mesa de lajes nervuradas com objetivo de atribuir a ela uma capacidade de permitir a passagem da luz solar do ambiente externo para o interno. Uma análise concisa na distribuição dos esforços através do método de placas em regime elástico junto com o programa STRAP.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do presente trabalho serão descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: Como a distribuição de aberturas afeta o comportamento da distribuição de esforços em lajes nervuradas?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo principal deste trabalho é analisar a distribuição de esforços de flexão e deslocamentos em lajes nervuradas com aberturas através do método de placas.

2.3 DELIMITAÇÕES

O trabalho se delimita à análise de lajes nervuradas com aberturas que estejam em conformidade com os requisitos de dimensionamento da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

2.4 LIMITAÇÕES

As limitações impostas no trabalho são apresentadas a seguir:

- a) Todas as lajes serão simplesmente apoiadas em todos os bordos;
- b) A análise será através dos pressupostos do método de placas em regime elástico linear;
- c) O estudo do comportamento da distribuição de esforços utilizará apenas o programa STRAP;
- d) Os carregamentos serão estáticos e distribuídos sobre a superfície das lajes;
- e) Será considerado somente o regime elásticos de deformações;

- f) Serão analisados apenas os esforços de flexão na direção x e y e os deslocamentos verticais.

2.5 CRONOLOGIA

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a baixo e descritas nos próximos capítulos:

- a) Revisão bibliográfica;
- b) Definição do método de placas;
- c) Definição da geometria e das aberturas nas lajes;
- d) Modelagem estrutural no programa;
- e) Resultados e análises;
- f) Considerações finais.

3 IMPORTÂNCIA DA ILUMINAÇÃO NATURAL

O estudo se inicia com a percepção da necessidade dos impactos da exposição à luz natural em seres vivos. Visto o proveito de abordar os benefícios e efeitos para a existência da vida na Terra, de onde todas as formas de vida do planeta necessitam de forma direta ou indireta destes efeitos para sobrevivência, além da manutenção da temperatura ambiente, a incidência dos raios solares proporcionam alguns processos químicos importantes, como a produção de vitamina D, liberação de hormônios e desenvolvimento da capacidade natural da visão, além da função de regular o ritmo biológico.

De pose do cenário midiático em vista direta é interessante notar o alto grau de divulgação dos perigos da excessiva exposição à luz solar, que em contrapartida, os danos da pouca exposição são constantemente esquecidos. Observando o panorama da evolução humana, a luz natural tem sua, majoritária, parcela de contribuição, incluindo os raios UV (energia eletromagnética emitida pelo sol), os quais, mesmo com toda preocupação exposta pela mídia sobre a degradação constante da camada de ozônio, não desliga o fato de que a fisiologia humana deriva de certa quantidade de exposição aos raios.

Inegável que a exposição demasiada à luz solar, especificamente aos raios UV, causa danos, entretanto, já existem evidências que a exposição moderada é benéfica. Segundo Baker *et al* (2002), estão abertos à interpretação e não são conclusivos, mas certamente dão algum crédito à ampla e divulgada crença de que a luz do sol é um importante fator para promover não só a boa saúde como a sensação de bem-estar e conforto ao ser humano.

GARROCHO (2005) aponta em seus estudos uma condição totalmente imersa neste contraste de influência da luz solar, conhecida como Desordem Emocional Sazonal (*Seasonal Affective Disorder* – SAD), onde afirma que, pessoas que passam períodos de tempos em ambientes com iluminação e climatização artificial, sentem de alguma forma, oscilações de humor ou comportamento.

Conquanto a discussão permanecer em pauta, os efeitos prejudiciais e benefícios da luz natural estão intimamente ligados, fazendo com que fiquem um em função do outro, ou

seja, é fatigante conseguir qualquer benefício do sol sem, ao mesmo tempo, se expor aos prejuízos por ele causados.

Uma técnica bastante conhecida por atribuir que a luz natural penetre no ambiente através de pequenas ou grandes aberturas criadas na cobertura de uma edificação é denominada, iluminação zenital. Onde seu uso gera uma maior homogeneidade de distribuição da luz natural em relação à iluminação lateral e, principalmente permite maiores níveis de iluminância¹ sobre o plano de trabalho.

GARROCHO (2005) alerta sobre o controle da utilização da Iluminação zenital frente a fatores como: clima local, condições de céu, o índice de nebulosidade, a luminância, a iluminância, a tipologia e o formato zenital.

Em construções de uso principalmente diário e integral, o gasto com consumo de energia elétrica para iluminação e climatização parece ser indeclinável. Partindo desta premissa, acredita que há ações que podem ser caracterizadas como intervenções inteligentes visando o aproveitamento de recursos naturais, no caso em abundância no externo da construção, introduzindo o conceito de aberturas zenitais, uma vez que ofereçam a quantidade e qualidade de luz necessária, dentro dos exigidos em norma para condições climáticas onde são projetados.

Alguns exemplos podem ser listados para melhor compreensão do discutido, notando tipologias distintas de aplicação como museus, prédios, bibliotecas, residências, escritórios dentre outros.

Figura 1: Prédio da FAU - SP.



¹ **Iluminância:** Limite da razão do fluxo luminoso recebido pela superfície em torno de um ponto considerado, para a área da superfície quando esta tende a zero. (ABNT, NBR 5413/92)

Fonte: arquiteturaurbanismotodos.org.br (2017).

Figura 2: Construção residencial de laje nervurada com aberturas na mesa.



Fonte: projetos.habitissimo.com.br(2017).

Figura 3: Iluminação natural em lajes residenciais.



Fonte: projetos.habitissimo.com.br (2017).

Figura 4: Auditório do MUBE – Museu Brasileiro da Escultura em São Paulo.



Fonte: <http://www.macamp.com.br> (2017).

4 ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO – LAJES

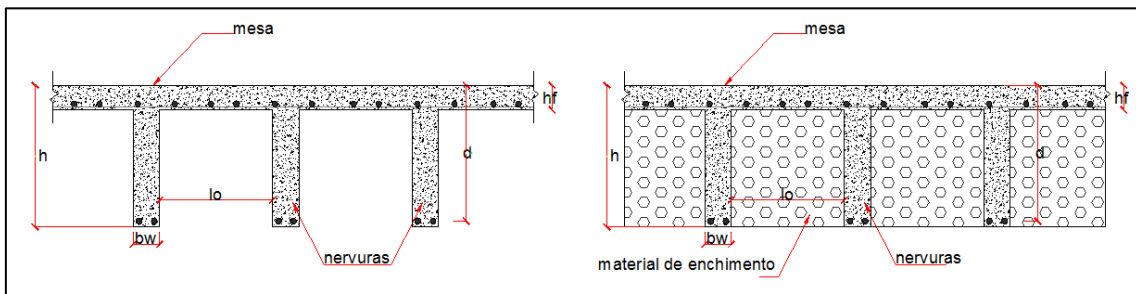
O objetivo deste capítulo será apresentar os conceitos teóricos sobre o sistema de lajes nervuradas visando descrever os critérios para definição dos principais elementos constituintes deste sistema. Sucintamente, a abordagem será direcionada para o cálculo de cargas e combinações para o dimensionamento da estrutura.

Na seção de análise estrutural será visualizada a obtenção dos resultados encontrados após submeter as estruturas em situações de serviço problematizadas neste estudo em questão. Tomando como cuidado o acréscimo das recomendações previstas na norma NBR 6118 de 2014 para o dimensionamento estrutural para o estado-limite de serviço (ELS).

4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE LAJES NERVURADAS

De acordo com a Norma Brasileira Registrada NBR 6118/2014 – Projeto de Estruturas de Concreto, as lajes nervuradas são aquelas que apresentam nervuras na zona de tração para momentos positivos. As nervuras podem ficar aparentes ou os vazios podem ser preenchidos com material não estrutural de peso próprio reduzido, a fim de tornar plana a superfície inferior da laje (vide Figura 5).

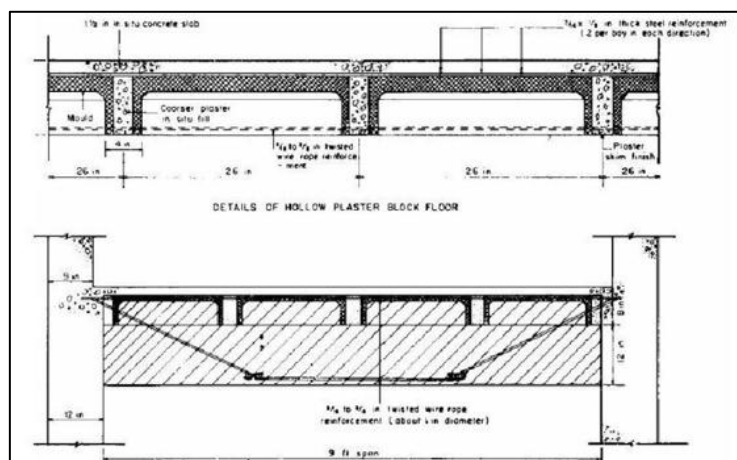
Figura 5: Laje com nervura aparente e laje com preenchimento dos vazios.



Fonte: Autor (2017).

Originadas em 1854, conforme LIMA *et al.* (2002), quando um comerciante inglês chamado William Boutland Wilkinson fabricante de gesso e cimento obteve a patente de um sistema que já demonstrava o domínio dos princípios básicos de funcionamento do concreto armado ao dispor barras de aço nas regiões que se obtinha tração nas vigas. Logo, notando que a rigidez da laje podia ser aumentada por meio da inserção de vazios utilizando-se moldes de gesso regularmente espaçados e separados por nervuras, local onde as barras de aço eram colocadas na sua porção inferior no meio do vão e subiam para a parte superior da viga nas proximidades dos apoios. A laje em estudo tinha um vão de aproximadamente 4m em cada direção, além de uma malha de barras de aço na parte inferior da camada de concreto de 4 cm de espessura que tinha a função de cobrir as nervuras, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Laje nervurada patenteada por Wilkinson, na Inglaterra, em 1854.



Fonte: Lima et al (2002).

Esse sistema é considerado uma evolução natural das lajes maciças, pois resulta da eliminação da maior parte do concreto abaixo da linha neutra, o que permite o aumento econômico da espessura total das lajes pela criação de vazios em um padrão rítmico de arranjo ou com a utilização de material inerte, o qual não colabora com a resistência da laje. Obtendo além da economia de concreto, um alívio do peso próprio e um aproveitamento otimizado dos materiais, ou seja, o concreto responsável pelos esforços de compressão e a armadura pelos esforços de tração.

Sobre a altura total deste sistema de lajes, é geralmente superior àquela exigida pela laje maciça com mesmas condições de carregamento e geometria, pelo fato de apresentar menor resistência à torção, decorrente do número de vazios entre nervuras, logo, espessuras maiores são adotadas visando o aumento da rigidez da estrutura.

ARAUJO (2014) aponta que as lajes nervuradas geralmente são utilizadas para vãos superiores a 8m, caso em que a solução de placas maciças torna-se antieconômica e desvantajosa.

As lajes nervuradas podem conter nervuras em uma direção, chamadas de unidirecionais, ou em duas direções, conhecidas como bidirecionais. Nos dois tipos expostos as nervuras são paralelas entre si e normalmente equidistantes umas às outras. CARVALHO e PINHEIRO (2013) apontam a relação entre o maior e o menor vão for inferior a 2, deve-se utilizar o sistema nervurado nas duas direções, o que resulta em uma melhor distribuição das solicitações e em menores deslocamentos e esforços. As Figuras 7 e 8 representam exemplos de laje unidirecional e laje bidirecional respectivamente.

$\lambda < 2$ - Bidirecional

$\lambda > 2$ – Unidirecional

Figura 7: Exemplo de laje unidirecional



Fonte: APS Tecnologi (2017)

Figura 8: Exemplo de laje bidirecional



Fonte: ATEX Brasil (2017)

A geometria deste segmento de laje de concreto armado, como largura e espaçamento das nervuras e espessura de mesa, é definida de acordo com catálogos técnicos de empresas fornecedoras de cubetas além das fornecedoras do sistema de escoramento. Esses catálogos citados possuem, na maioria das vezes, informações completas como propriedades de flexão e peso próprio, tais informações que serão de grande valia no pré-dimensionamento de cargas, análise estrutural e dimensionamento das armaduras necessárias para que a estrutura atenda aos requisitos de bom desempenho e segurança previstos na norma brasileira regulamentadora (NBR 6118).

A NBR 6118 de 2014 aponta algumas condições para o dimensionamento da mesa e das nervuras, conforme indicadas a seguir.

- a) quando não houver tubulações embutidas, a mesa deve ter espessura maior ou igual a $1/15$ da separação entre faces das nervuras. Exige-se ainda espessura mínima de 4 cm;
- b) quando houver tubulações embutidas com diâmetro Φ menor ou igual a 10mm, a mesa deve ter no mínimo 5 cm de espessura. Caso haja tubulações com diâmetro Φ maior que 10mm, a espessura mínima da mesa deve ser $4\text{ cm} + \Phi$, ou $4\text{ cm} + 2\Phi$ no caso de haver sobreposição destas tubulações.
- c) a espessura das nervuras deve ser maior que 5cm.
- d) não podem ser dimensionadas armaduras de compressão para nervuras com espessura inferior a 8cm.

Quando abordada sobre as condições para as verificações de flexão da mesa e cisalhamento das nervuras, a norma descreve com os itens abaixo:

- a) a verificação de flexão da mesa é desnecessária quando a distância entre os eixos das nervuras for menor que 65cm. Neste caso, podem ser utilizados os critérios de laje para verificação de cisalhamento das nervuras;
- b) a flexão da mesa deve ser verificada para espaçamento entre os eixos das nervuras entre 65cm e 110cm. Deve-se ainda verificar as nervuras ao cisalhamento como vigas, ou como lajes quando o espaçamento entre eixos for menor que 90cm e a largura média das nervuras for maior que 12cm;
- c) quando a distância entre os eixos das nervuras for maior que 110 cm, deve-se projetar a mesa considerando-a como laje maciça apoiada em uma grelha de vigas.

Após a definição das características geométricas da laje, serão analisadas as cargas devido ao peso próprio, as cargas variáveis e outras cargas permanentes quando em serviço, as quais são encontradas e mensuradas em função das exigências da edificação analisada.

A seguir serão estruturadas de forma sequencial, e sugeridas pela norma brasileira vigente, os procedimentos para a determinação das cargas e combinações de ações que a estrutura estará sujeita.

4.2 AÇÕES E CARREGAMENTOS

Visando o dimensionamento das peças estruturais em análise neste estudo, as ações podem ser caracterizadas por qualquer conjunto de influência que é capaz de gerar tensões, reações e deformações em uma estrutura. São classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais.

As ações permanentes são caracterizadas por ocorrerem ao longo de toda vida útil com valores quase que constantes. Alguns autores a subdividem em diretas e indiretas, uma vez que a direta engloba o peso próprio, peso dos elementos construtivos fixos e empuxos permanentes. A indireta fica com a parcela da retração e fluência do concreto, deslocamentos de apoios, imperfeições geométricas e etc.

As ações variáveis são definidas por atuarem com valores constantemente variáveis ao longo de toda vida útil da estrutura. Também subdivididas em diretas e indiretas. Diretas são as cargas acidentais previstas para o uso, como a ação do vento e ação da água, já as indiretas neste caso, são compostas pela variação uniforme e não uniforme da temperatura e ações dinâmicas.

Ações excepcionais são identificadas por aquelas com pequena probabilidade de ocorrência, ainda que em pequenos intervalos de tempo, como por exemplo os abalos sísmicos. A norma brasileira vigente aponta que, o projeto de estrutura sujeito a situações excepcionais de carregamento, deve-se considerar valores definidos em função de cada caso separadamente.

O valor da ação permanente é calculado pela somatória da influência de todos os elementos estruturais presentes na estrutura, normalmente em lajes de concreto armado, por exemplo, se tem o peso específico da laje em si, do material de enchimento, do contra piso, do piso e do forro, todos os acréscimos estruturais quando houver.

Já as ações variáveis podem ser visualizadas, como carga acidental em função do uso da estrutura. A Norma Brasileira Regulamentadora 6120 aponta valores de cargas acidentais em função do uso como visto na Tabela 1.

Tabela 1: Valores de cargas acidentais (q).

LOCAL		CARGA (Kn/m ²)
EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro.	1,5
	Despensa, área de serviço e lavanderia.	2
ESCOLAS	Anfiteatros, corredor e sala de aula	3
	Demais salas.	2
ESCRITÓRIOS	Salas de uso geral e banheiros	2
GARAGENS E ESTACIONAMENTOS	Para veículos de passageiros ou semelhantes, com carga máxima de 25 kN por veículo.	3

Fonte: Adaptado da NBR 6120.

Logo, os carregamentos são nada mais que, combinações das ações que podem atuar na estrutura e devem ser obtidos considerando os efeitos mais desfavoráveis das ações sobre a mesma. Portanto, para o estado-limite de serviço deve ser verificado para combinações de serviço assim apresentadas na seção 5.2.

5 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural entra no estudo com o objetivo de determinar o comportamento da estrutura quando aplicados diferentes tipos de carregamento. É neste ponto que se estuda os efeitos das solicitações previamente consideradas e calculadas, estimando como as ações se distribuirão nos elementos estruturais para obter os esforços internos que se baseiam o dimensionamento e as verificações de segurança pertinentes. Logo, são os resultados apresentados neste estudo que vão ser decisivos para o bom desempenho das estruturas.

A distribuição de esforços se dá através do modelo estrutural, pertencendo ao engenheiro calculista definir e adequá-lo para análise. A partir deste modelo, se busca reproduzir o comportamento real da estrutura quando sujeita aos carregamentos considerados no projeto.

Os esforços calculados na etapa de análise estrutural são utilizados para o dimensionamento dos elementos, com intenção de que resistam às solicitações em serviço. Para tanto, deve-se distribuir a armadura nas peças estruturais da melhor maneira possível, a fim de assegurar o bom desempenho da edificação.

CARVALHO e PINHEIRO (2013) apontam que o cálculo da armadura longitudinal e de cisalhamento devem seguir as recomendações normativas para estado-limite último de flexão, além da verificação de deformações excessivas e de abertura de fissuras deve atender às condições previstas para o estado-limite de serviço.

5.1 CONSIDERAÇÕES PARA O ESTADO-LIMITE ÚLTIMO

Intimamente correlacionado com o esgotamento da capacidade resistente dos elementos estruturais, esse estado é caracterizado pela ruptura ou paralisação do uso da estrutura. A NBR 6118, 2014, aponta que a segurança da estrutura deve ser sempre colocada em pauta e verificada em relação aos seguintes estados limites últimos:

- a) estado limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;

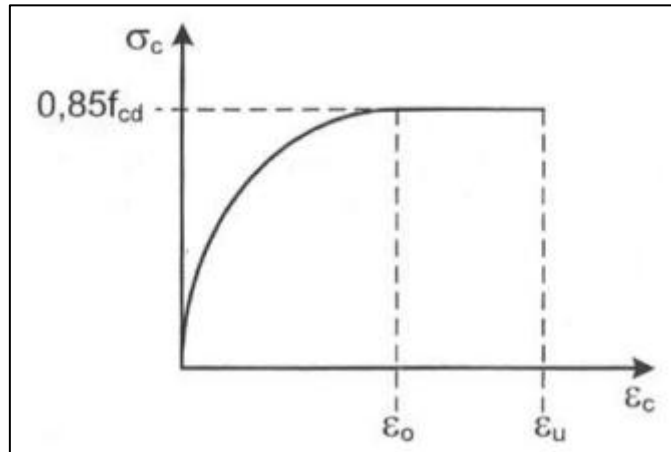
- b) estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica definida na seção 14, e admitindo-se, em geral, as verificações separadas das solicitações normais e tangenciais; todavia, quando a interação entre elas for importante, ela estará explicitamente indicada na Norma;
- c) estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- d) estado limite último provocado por solicitações dinâmicas;
- e) estado limite último de colapso progressivo;
- f) outros estados limites últimos que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.

Os esforços resistentes em lajes devem ser superiores aos esforços solicitantes de projeto obtidos na análise estrutural e são trabalhados admitindo as seguintes prerrogativas expostas na NBR 6118 (2014):

- a) após a deformação, a seção transversal do elemento se mantém plana, implicando em uma distribuição linear das deformações ao longo da seção;
- b) a deformação do concreto deve ser a mesma das barras passivas envolvidas, pois admite-se aderência perfeita entre o concreto e o aço.
- c) no estado limite último, os esforços resistentes de tração no concreto devem ser desprezados.

As tensões de compressão que estarão atuando no concreto podem ser encontradas, para efeitos de dimensionamento, através do diagrama de tensão-deformação do concreto exposto na Figura 9.

Figura 9: Diagrama tensão-deformação do concreto.



Fonte: Araújo (2014).

De acordo com a NBR 6118, o trecho curvo do diagrama parábola-retângulo que corresponde a tensão de compressão no concreto pode ser calculada através da Equação 01.

$$\sigma_c = 0,85 \cdot f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^n \right] \quad (01)$$

Onde:

σ_c é a tensão de compressão no concreto, em kN/cm²;

f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto, em kN/cm²;

ϵ_c é a deformação específica do concreto;

ϵ_o é a deformação específica do concreto no início do patamar plástico;

n é o expoente da parábola, adimensional.

O expoente n é igual a 2 para concretos com resistências à compressão inferiores a 50MPa, por sua vez, quando a resistência tiver entre 50 MPa e 90MPa o n é calculado através da Equação 02, exposta a seguir.

$$n = 1,4 + 23,4 \left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 \quad (02)$$

Portanto as deformações específicas no começo do patamar plástico e na ruptura são influenciadas pelo f_{ck} do concreto. Quando menores de 50MPa, ϵ_o é igual a 2,0‰ e ϵ_u é igual a 3,5‰. Logo, para resistências entre 50 e 90MPa as deformações podem ser encontradas pelas Equações 03 e 04 expostas a seguir.

$$\epsilon_o = 2,0\text{‰} + 0,085 \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53} \quad (03)$$

$$\epsilon_u = 2,6\text{‰} + 35,00 \cdot \left(\frac{90-f_{ck}}{100}\right)^4 \quad (04)$$

Onde:

ϵ_o é a deformação específica do concreto no início do patamar plástico;

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto, em MPa;

ϵ_u é a deformação específica do concreto na ruptura.

5.2 CONSIDERAÇÕES PARA O ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO

Estados-limites de serviço são aqueles relacionados ao conforto do usuário e a durabilidade, aparência e boa utilização da estrutura, seja em relação aos usuários, ou em relação as máquinas e equipamentos que serão suportados pela estrutura (NBR 6118, 2014, p. 55). Logo, ligados ao desempenho da peça estrutural ao longo de sua vida útil, quando submetida ao fator das cargas de serviço, a norma aponta requisitos mínimos a serem respeitados para a verificação de deformações excessivas (flechas), aberturas de fissuras e vibrações.

A NBR 6118, 2014 cita que a verificação dos valores limites de deformações conforme o Tabela 2 em sequência, deve ser feita através de modelos que considerem a rigidez efetiva das seções do elemento estrutural, ou seja, levem em consideração a presença da armadura, da presença de fissuras no concreto ao longo dessa armadura e as deformações em função da vida útil.

Tabela 2: Limites para deslocamentos

TIPO DE EFEITO	RAZÃO DA LIMITAÇÃO	EXEMPLO	DESLOC A CONSIDERAR	DESLO C LIMIT E
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais.	Total	1/250
	Outro	Vibrações sentidas no piso.	Devido a cargas acidentais	1/350
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	1/250
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimento.	Após a construção da parede	1/500 ou 10 mm
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos.	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenação	H/400

Fonte: Adaptado da NBR 6118, 2014.

A norma ainda aponta que a deformação real da estrutura estará em função do processo construtivo, assim como das propriedades dos materiais no momento que forem submetidos às solicitações.

Para o estado-limite de serviço essa verificação de segurança é feita em função das combinações de serviços, as quais são classificadas de acordo com a ordem de grandeza da permanência na estrutura em combinações raras, frequentes e quase permanentes.

Combinações raras de serviço são destinadas para as ações que podem atuar no máximo algumas vezes durante o período de vida da estrutura, normalmente utilizadas para a verificação do estado-limite de formação de fissuras e de descompressão. A ação variável principais F_{q1} é tomada com seu valor característico $F_{qk,1}$ e todas as outras ações são tomadas com seus valores frequentes $\psi_1.F_{qk}$, como apresentado na Tabela 3.

Combinações frequentes de serviço, normalmente utilizadas para verificação de abertura de fissura, logo são caracterizadas por aquelas ações que se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura, ou atuantes por mais de 5% da vida da construção. A ação principal F_{q1} é tomada com seu valor frequente $\psi_1.F_{qk,1}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\psi_2.F_{qk}$, formulação apresentada na Tabela 3.

Por fim a combinação quase-permanente de serviço são utilizadas para a verificação do estado-limite de deformação excessivas, foco do estudo em discussão. Nela todas as

ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_2.F_{qk}$, uma vez que as ações podem estar atuando durante grande parte do período de vida da estrutura, ou menos da metade da vida da construção, formulação apresentada na Tabela 3 e valores de coeficientes ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 apresentados na Tabela 4.

Tabela 3: Formulação de combinações de ações do estado-limite de serviço.

COMBINAÇÃO	FORMULAÇÃO
Combinação rara de serviço	$F_{d,ser} = \sum_1^m F_{gk,i} + F_{qk,1} + \sum_2^n \psi_{1,j}.F_{qk,j}$
Combinação frequente de serviço	$F_{d,ser} = \sum_1^m F_{gk,i} + \psi_{1,j}.F_{qk,1} + \sum_2^n \psi_{2,j}.F_{qk,j}$
Combinação quase permanente	$F_{d,ser} = \sum_1^m F_{gk,i} + \sum_1^n \psi_{2,j}.F_{qk,j}$

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4: Valores dos coeficientes ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 .

AÇÕES		ψ_0	ψ_1	ψ_2
CARGAS ACIDENTAIS DE EDIFÍCIOS	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas.	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou elevada concentração de pessoas.	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
VENTO	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
TEMPERATURA	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local.	0,6	0,5	0,3

Fonte: Adaptado da NBR 6118, 2014.

5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE PLACAS EM REGIME ELÁSTICO LINEAR

As placas são elementos estruturais limitados por duas superfícies planas paralelamente dispostas entre si com uma espessura, relativamente, pequena em relação as outras dimensões e portanto, em estruturas de concreto armado as lajes são consideradas como placas.

Quando submetidas a solicitações, as placas deformam-se e como por consequência seus pontos são deslocados. As análises para este comportamento levaram a formulações que hoje são conhecidas por teoria de placas aplicadas dentro do regime elástico. As placas, normalmente são divididas em 3 casos: placas finas com pequenas flechas, placas finas com grandes flechas e placas grossas as quais possuem suas propriedades de flexão em função de sua espessura.

CUNHA e SOUZA (1994) afirmam que para o dimensionamento de placa em regime elástico, além da contribuição para o estudo numérico, sob a teoria de placas finas com pequenas deflexões, as seguintes hipóteses descritas por KIRCHHOFF podem ser respeitadas e aplicadas:

- a) o material que constitui a estrutura é homogêneo, isotrópico e obedece à Lei de Hooke;
- b) a espessura da placa é pequena em relação às outras dimensões;
- c) as rotações da superfície média deformada são pequenas em relação à unidade;
- d) normais ao plano médio antes da deformação permanecem normais à superfície média após a flexão da placa, ou seja, deformações devidas ao esforço cortante são desprezadas;
- e) as tensões normais ao plano médio da placa podem ser desprezadas.

Com base nas hipóteses de KIRCHHOFF e as relações da teoria da elasticidade, se pode deduzir a equação diferencial das placas (Equação 05), as quais são utilizadas para análise de lajes maciças.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = - \frac{q}{D} \quad (05)$$

Onde:

D é a rigidez à flexão;

q é a carga uniformemente distribuída na placa;

x e y são as coordenadas de um ponto genérico da placa;

w é o deslocamento transversal de um ponto da placa.

O desenvolvimento da Equação 05 a cima citada, pode ser visto no estudo de TIMOSHENKO e WOINOWSKY-KRIEGER (1959). Logo a rigidez à flexão (D) pode ser calculada através da Equação 06:

$$D = E \cdot h^3 / 12(1 - \nu^2) \quad (06)$$

Onde:

E é módulo de elasticidade;

h a espessura da placa;

ν = coeficiente de Poisson, adimensional.

É possível encontrar utilizando a equação diferencial das placas (Equação 05), os deslocamentos da laje que atendam ao mesmo tempo a equação de equilíbrio e as condições de contorno, uma vez que as condições de contorno dependem dos tipos de apoios. Assim, por exemplo ao se tratar de uma borda reta paralela ao eixo y, ter-se-á em função das condições desta borda em questão.

Existem outros tipos de bordas que podem ser condicionadas e consideradas dentro deste modelo, como as bordas engastadas, onde se anula os deslocamentos e rotações, bordas simplesmente apoiadas, onde se anula os deslocamentos e o momento e borda livre.

PINHEIRO (1988) coloca em seu estudo a não facilidade de encontrar analiticamente uma função $w(x,y)$ que satisfaça a Equação 05 e as condições de contorno, para uma suposta laje submetida a um certo carregamento $p(x,y)$. Por este motivo, é comum recorrer a soluções aproximadas onde se obtém w como uma soma de funções elementares que satisfaçam às condições de contorno. Alguns exemplos de aplicação e utilização desta solução de aproximação podem ser encontrados nos estudos de alguns autores como MONTANARI (1969), MARTINELLI e SAVASSI (1986).

Para CUNHA (1994) a desvantagem dos processos aproximados deve-se à obtenção apenas dos esforços máximos que ocorrem na laje, ao contrário da teoria de placas, que possibilita o cálculo dos esforços e flechas em qualquer ponto da estrutura.

6 CONSIDERAÇÕES SOBRE ABERTURAS EM LAJES

Em frente a essa abordagem, LEONHARDT e MÖNNING (1978) apresentam métodos práticos para cálculo de esforços em lajes de concreto armado retangulares apoiadas em uma ou duas direções com presença de aberturas.

CARVALHO e PINHEIRO (20013) afirmam o conceito de que os furos ou aberturas em lajes, posicionados em qualquer lugar, resultam na origem de concentrações de tensões que podem ser prejudiciais ao funcionamento da estrutura. Ressaltando a macro diferença entre furos e aberturas sendo o primeiro caracterizado por pequenas dimensões em relação ao elemento visto como um todo. Já ao contrário de aberturas, as quais se definem com dimensões consideráveis em relação ao mesmo.

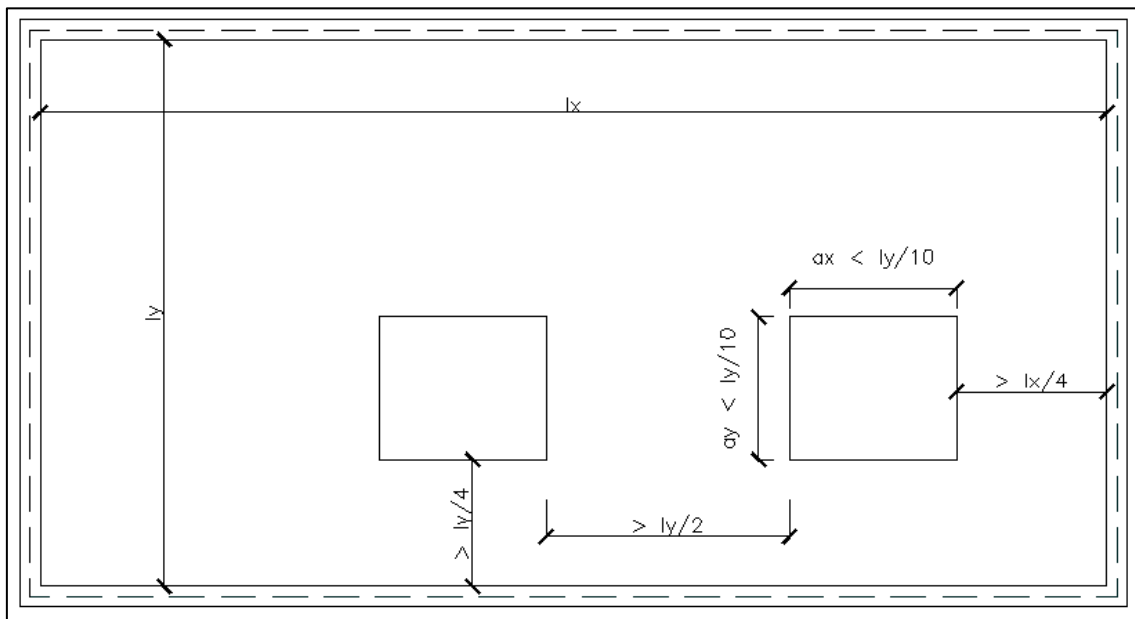
A NBR 6118:2014, recomenda algumas condições para casos de aberturas em lajes:

- a) os esforços calculados no ESTADO-LIMITE ÚLTIMO para a laje sem aberturas devem ser resistidos pela seção remanescente do concreto, seja na parte central ou sobre os apoios da laje;
- b) devem ser projetados reforços e a ancoragem destes para as armaduras cujas seção são interrompidos devido às aberturas.

A norma ainda recomenda alguns critérios que permitem a dispensa de verificação dos elementos estruturais com presença de furos e aberturas, citadas e ilustradas para melhor compreensão a seguir.

- a) as dimensões da abertura devem corresponder a, no máximo, $1/10$ do menor vão da laje;
- b) a distância mínima entre o bordo da laje e a face da abertura deve ser, no mínimo, de $1/4$ do vão na direção considerada;
- c) a distância entre as faces de aberturas adjacentes deve ser maior que $1/2$ do menor vão da laje.

Figura 10: Dimensões limites para dispensa de verificações em lajes.



Fonte: Autor (2017)

LEONHARDT e MÖNNING (1978) apresentam formas, tamanhos e posições de aberturas e como estes fatores influenciam no comportamento resistente de lajes retangulares e com aberturas. Lajes maciças apoiadas em uma direção com aberturas e lajes maciças apoiadas em duas direções com aberturas, esses dois métodos são apresentados e descritos a seguir.

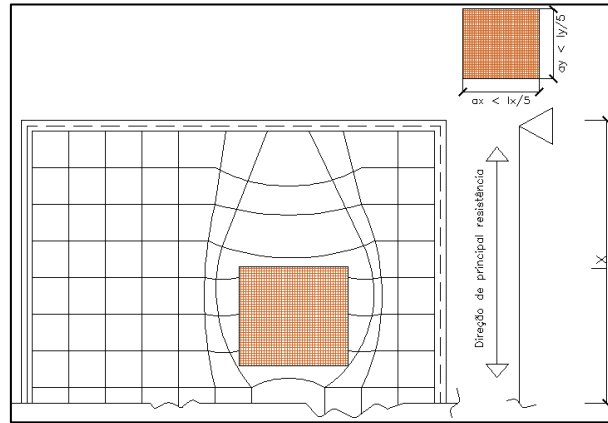
6.1 LAJES MACIÇAS APOIADAS EM UMA DIREÇÃO COM ABERTURAS

Os autores apresentam dispensa de verificação de esforços para aberturas com dimensões inferiores a $1/5$ do vão em lajes apoiadas em uma direção e sugerem que a armadura dimensionada seja disposta de forma concentrada nos bordos da abertura, nota-se na Figura 11 o comportamento da armadura com o acréscimo de aberturas ao longo do comprimento da laje e na Figura 12 a armadura introduzida como forma de reforço às demais.

Análises realizadas pelos autores apontam que os picos de tensão que surgem nos cantos, são em função do efeito de entalhe, os quais levam ao surgimento de fissuras,

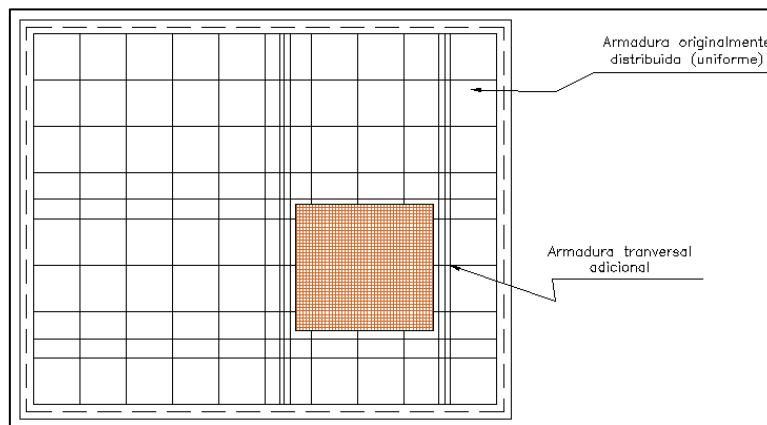
que são mantidas com pequena abertura, por meio de uma armadura extra na direção transversal ou, ainda, por uma armadura com certa inclinação.

Figura 11: Laje maciça apoiada em uma única direção com abertura.



Fonte: Adaptado do Livro de LEONHARDT e MÖNNING (1978).

Figura 12: Modelo de disposição de armadura em lajes apoiadas em uma direção.

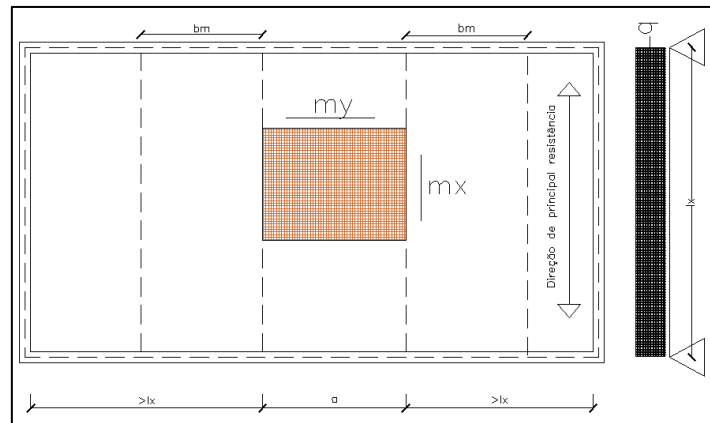


Fonte: Adaptado do Livro de LEONHARDT e MÖNNING (1978).

Agora para as lajes apoiadas em uma direção com aberturas retangular e com dimensões superiores a $lx/5$ ou $ly/5$, STIGLAT e WIPPEL (1973 apud LEONHARDT e MÖNNING, 1978) discutem métodos para dimensionar esta estrutura, em torno dos bordos das aberturas, ou seja, as faixas resistentes nas quais deverão ser dispostas as armaduras adicionais de reforço, como podem ser visualizadas na Figura 13.

Este método pode ser observado pelo esquema representado a seguir, os representativos de obtenção das larguras resistentes para cálculo de momentos, que serão utilizados para encontrar as armaduras adicionais. Os vãos, as dimensões da abertura e as cargas solicitantes uniformemente distribuídas são tratadas como variáveis de cálculo.

Figura 13: Esquema de faixas para disposição de armaduras adicionais em lajes apoiadas em uma direção.



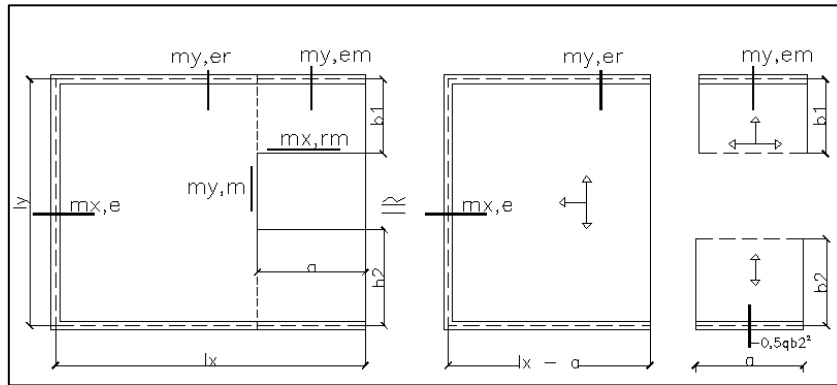
Fonte: Adaptado do Livro de LEONHARDT e MÖNNING (1978).

6.2 LAJES MACIÇAS APOIADAS EM DUAS DIREÇÕES COM ABERTURAS

Tomando como referência no assunto LEONHARDT e MÖNNING (1978), lajes com aberturas em duas direções podem ser decompostas em lajes apoiadas em três lados, logo viabilizando obter os esforços solicitantes com uma margem de segurança maior ao passo que as condições de contorno sejam bem dimensionadas. Essa abordagem é, pelos autores, melhor que a abordagem da divisão da laje em faixas resistentes, mesmo que ambas as abordagens resultem em um comportamento resistente seguro.

Os momentos fletores indicados na Figura 14 a seguir podem ser obtidos por meio das fórmulas semelhantes a aquelas utilizadas para lajes apoiadas em uma única direção, portando as mesmas variáveis de cálculo.

Figura 14: Esquema de decomposição de lajes apoiadas em duas direções.



Fonte: Adaptado do Livro de LEONHARDT e MÖNNING (1978).

7 GEOMETRIA DAS LAJES ANALISADAS

Neste capítulo é descrito os critérios de projeto que levaram ao dimensionamento das lajes objetos de estudo neste estudo. Além da geometria, as posições das aberturas e as disposições ao longo das estruturas com suas respectivas dimensões.

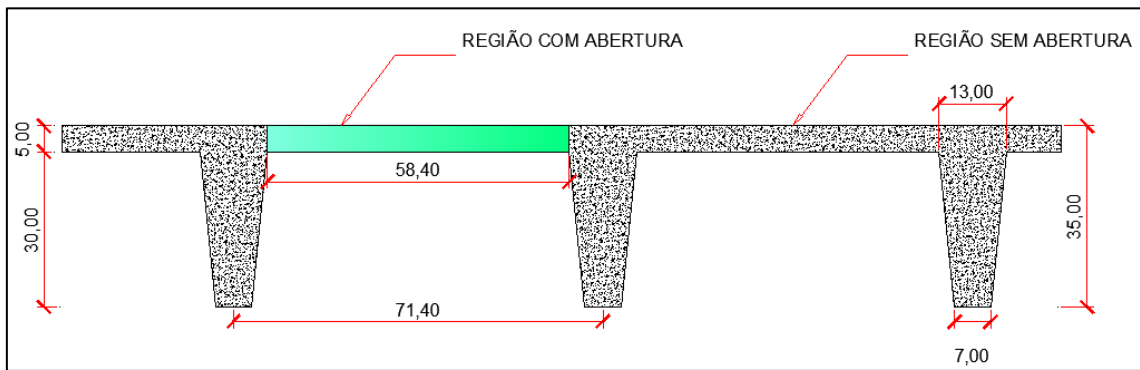
A princípio, as características geométricas da laje nervurada sem furos foram definidas em conformidade com os valores mínimos exigidos na norma regulamentadora brasileira, NBR 6118, a qual dispõe das seguintes exigências:

A espessura da mesa, quando não existirem tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre as faces das nervuras (l_0) e não menor que 4 cm. O valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser 5 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10mm. Para tubulações com diâmetro maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de $4 \text{ cm} + \text{DN}$, ou $4\text{cm} + 2.\text{DN}$ no caso de haver cruzamento destas tubulações. A espessura das nervuras não pode ser inferior a 5 cm. Nervuras com espessura menor que 8 cm não pode conter armadura de compressão. (NBR 6118, p. 74, 2014)

Diante disso, três dimensões distintas foram pré-definidas para o estudo, vãos de 30mx10m, 20mx10m e 10mx10m com espaçamentos entre faces de nervuras, de seção retangular, 71,4 cm. A altura das nervuras e a espessura da mesa são 30 cm e 5 cm, respectivamente, finalizando a estrutura com 35 cm de altura.

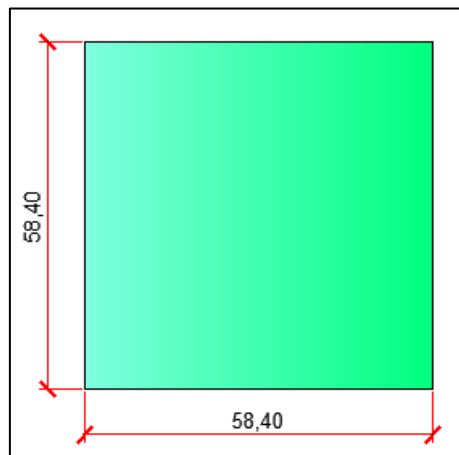
A representação esquemática da geometria das vigas T e dos furos pode ser observada nas Figuras 15 e 16.

Figura 15: Esquema da seção típica da laje



Fonte: Autor (2017)

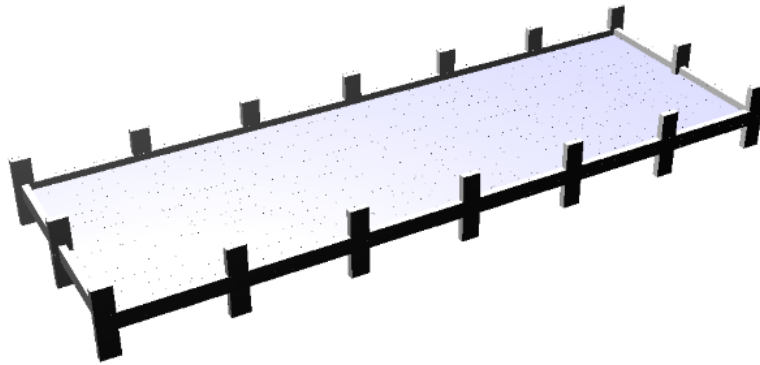
Figura 16: Geometria da abertura



Fonte: Autor (2017)

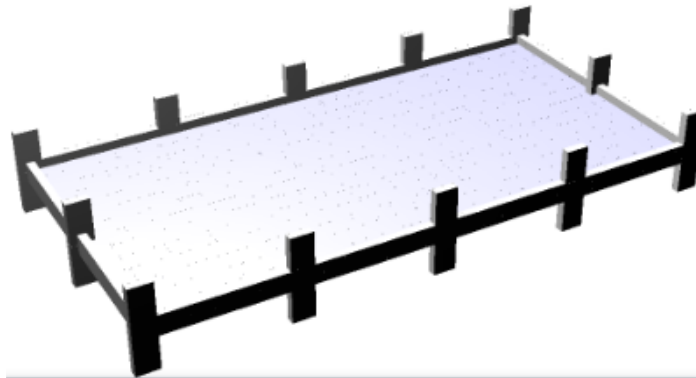
Foram acrescentados pilares a cada 5m de 0,30mx0,80m e vigas de 0,30mx0,70m ao longo de todos os bordos da laje. Representações das lajes sem furos podem ser visualizadas nas Figuras 17, 18 e 19 a seguir.

Figura 17: Laje TIPO 01.



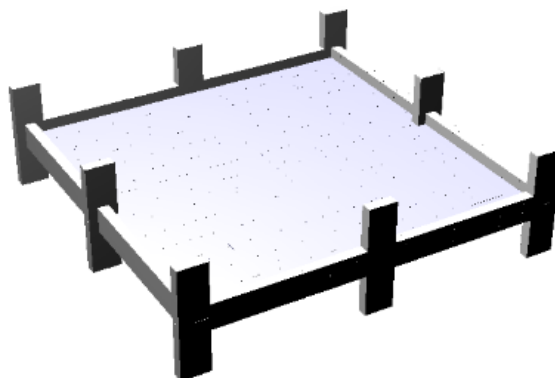
Fonte: Autor (2017)

Figura 18: Geometria da laje nervurada adotada como base para o TIPO 02.



Fonte: Autor (2017).

Figura 19: Geometria da laje nervurada adotada como base para o TIPO 03.



Fonte: Autor (2017).

Além das cargas em função ao peso próprio da estrutura em questão, foi levado em consideração a carga permanente que será composta pela argamassa de regularização, piso e contrapiso, adotado como 1kN/m².

Além destas, foi considerada uma carga acidental uniformemente distribuída igual a 3,0 kN/m², valor indicado pela Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 6120 de 1980, para garagens, conforme pode ser visualizado pela Tabela 5.


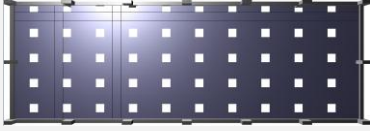
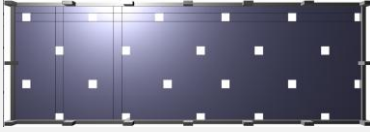
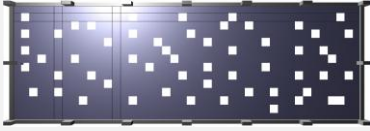
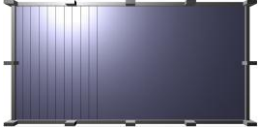
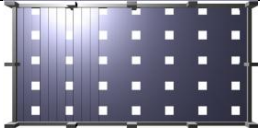
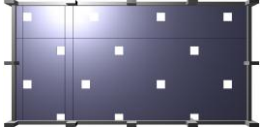
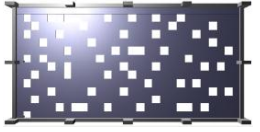




Tabela 5: Indicação para valores mínimos de cargas verticais.

LOCAL		CARGA [Kn/m ²]
Bibliotecas	Sala de leitura	2
	Sala para depósito de livros	1,5
Bancos	Escritórios e banheiros	2
	Salas de diretorias	1,5
Corredores	Com acesso ao público	3
	Sem acesso ao público	2
Escolas	Anfiteatro com assentos fixos, corredor e sala de aula	3
	Outras salas.	2
Terraços	Sem acesso ao público	2
	Com acesso ao público	3
	Inacessível a pessoas	0,5
Garagens	Para veículos de passageiros ou semelhantes com carga máxima de 25kN por veículo.	3

Fonte: Adaptado da NBR 6120, 1980.

Em seguida, foram confeccionadas as lajes que serão analisadas no estudo, foram 3 diferentes dimensões com 3 diferentes disposições de aberturas. Os casos estão alinhados na tabela 6 a seguir.

Tabela 6: Lajes do estudo.

LAJE TIPO	DISPOSIÇÃO DOS FUROS	ESQUEMA DA LAJE	GEOMETRIA DA LAJE	
1	SEM FURO		30,00	10,00
1	SIMÉTRICOS		30,00	10,00
1	ASSIMÉTRICOS		30,00	10,00
1	CRÍTICO		30,00	10,00
2	SEM FURO		20,00	10,00
2	SIMÉTRICOS		20,00	10,00
2	ASSIMÉTRICOS		20,00	10,00
2	CRÍTICO		20,00	10,00
9	SEM FURO		10,00	10,00
10	SIMÉTRICOS		10,00	10,00
11	ASSIMÉTRICOS		10,00	10,00
12	CRÍTICO		10,00	10,00

Fonte: Autor (2017).

8 PROGRAMA STRAP

Visando o preparo do modelo computacional, o projetista deve utilizar elemento unindo nós no espaço tridimensional (SAE INFORMÁTICA, 2011). O programa STRAP utiliza dois tipos de objetos, as barras e os elementos. As barras são caracterizadas por ser elementos unidirecionais, as quais são consideradas para modelar estruturas que podem ser modeladas por representação unifilar, como no caso das vigas e pilares. Já por outro lado os elementos são estruturas bidirecionais, os quais formam superfícies e malhas que são utilizados para modelar superfícies como lajes, cascas e muros.

Dentro do programa existe a possibilidade introduzir um modelo *.DXF e configurar para os padrões, medidas e *layers* do STRAP, uma vez adicionado o modelo a opção “grelha” é definida e por consequência fornecendo o espaçamento entre as barras da estrutura. O programa então solicita que o usuário informe as propriedades geométricas da estrutura, assim como as propriedades físicas, como rigidez a flexão e à torção das barras, as quais devem ser analisadas anteriormente para a calibração da mesma.

No menu do programa, de forma intuitiva se nota a descrição de todos os elementos que se pode adicionar a estrutura (vide Figura 20), mesmo sem importar o. DXF é possível criar a estrutura partindo da criação e locação dos nós principais.

Figura 20: Menu de GEOMETRIA do STRAP.

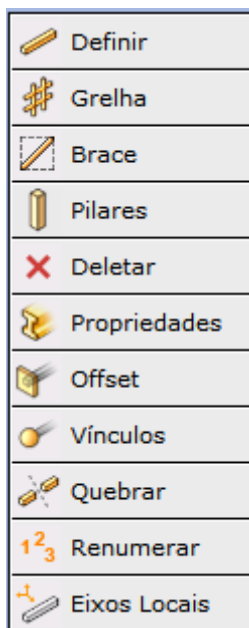
Nós
Apoios
Barras
Elementos
Molas
Sólidos
Paredes
Cópia
Estágios
Submodelos

Fonte: Autor (2017).

É através do menu “Apoios”, existente no módulo de geometria, que o usuário pode definir os apoios indeslocáveis, restringindo qualquer grau de liberdade (translação ou rotação), e associar estes apoios à nós selecionados.

No menu “Barras” é onde o usuário pode definir elementos de barra, especificando a localização, propriedades, material, eixos locais, orientação, vínculos, offsets dentre outros, como pode ser notado na Figura 21.

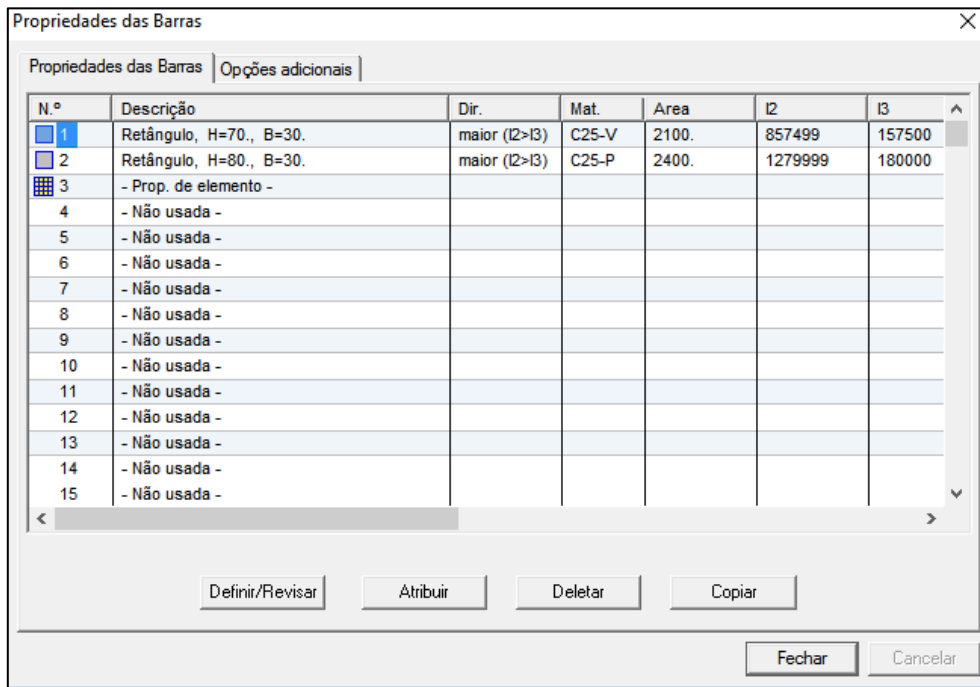
Figura 21: Menu "Barras"



Fonte: Autor (2017)

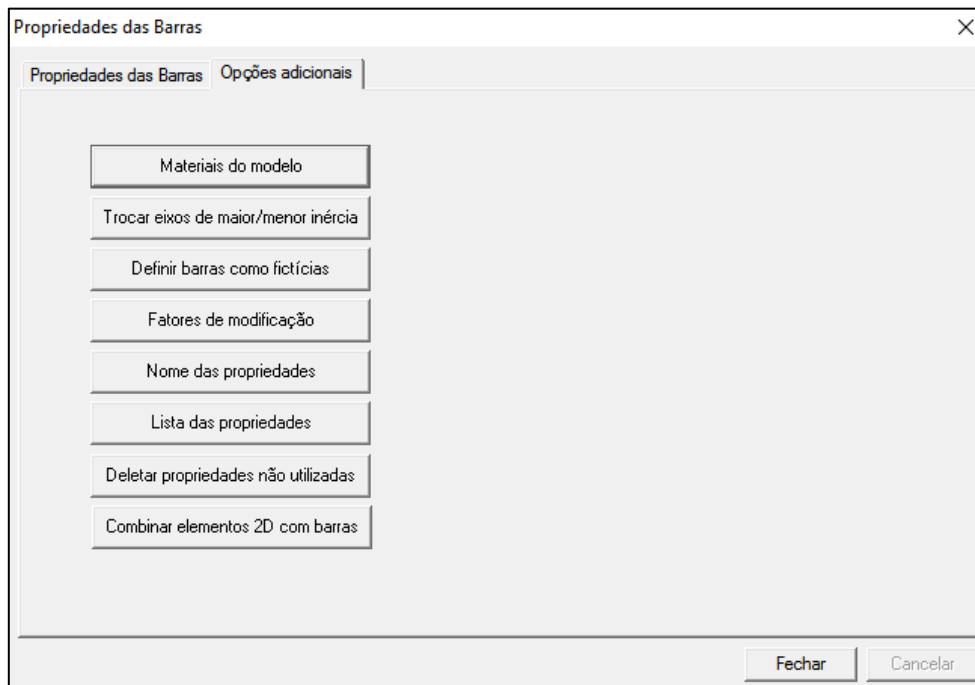
Em propriedades o programa gera ao usuário possibilidades de entrar com o material específico, em cada barra criada, que deseja estudar, no caso do estudo, as barras são compostas pelas vigas (V) e pelos pilares (P) (vide Figura 22). Importante atentar que, neste passo que o cálculo de calibração do modelo é respeitado, ou seja, uma vez calculados eles são acrescentados na propriedade, em opções adicionais, materiais do modelo (Figura 23) e por fim gerando as diferenças de propriedades dos elementos que compõe a estrutura.

Figura 22: Barras - Propriedades



Fonte: Autor (2017)

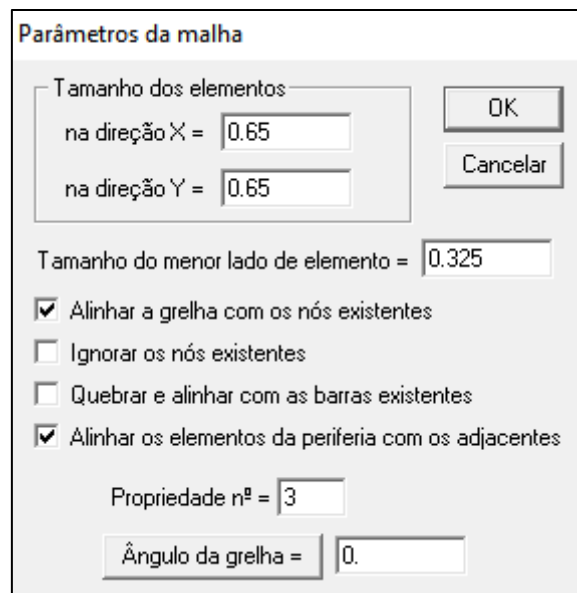
Figura 23: Barra- opções adicionais



Fonte: Autor (2017)

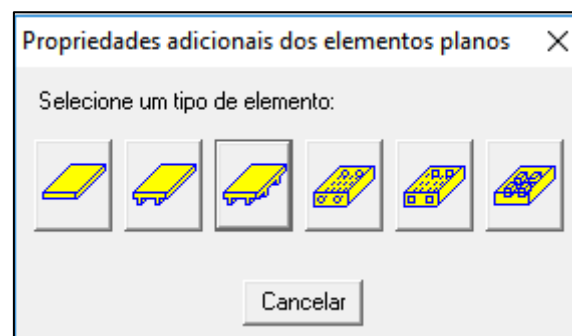
Por fim, no menu “Elementos” através do comando de geração automática de malha, o usuário orienta o programa especificando o contorno, o tamanho dos elementos, o tipo de malha, o tipo de estrutura que deseja dentre outras características como pode ser visto na Figura 24 e apresentado na Figura 25 onde o programa permite acrescentar as características geométricas da laje estudada, ou seja, locais específicos para acrescentar valores das medias das nervuras como o b_1 , b_2 , d , t_h e h , que são as dimensões da face inferior e superior da nervura, distancia interna entre nervuras, altura da mesa e altura total da laje.

Figura 24: Elementos - parâmetros



Fonte: Autor (2017)

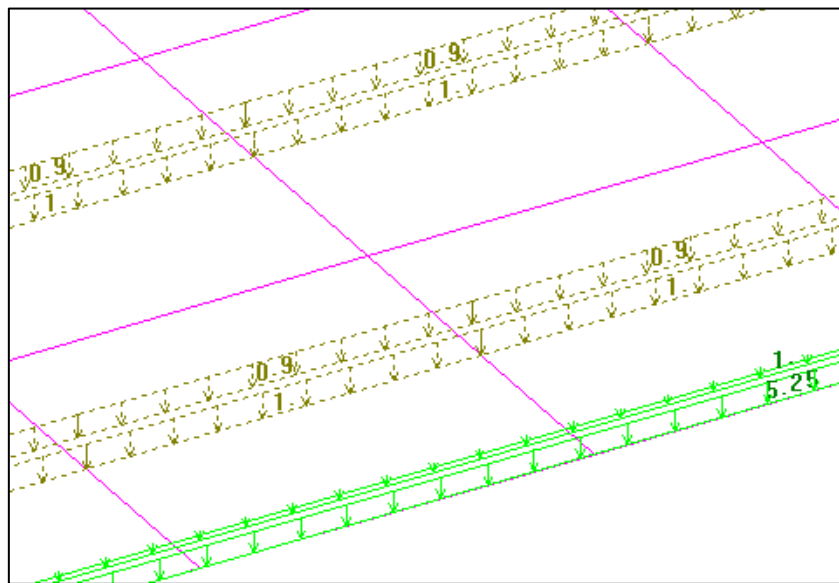
Figura 25: Elementos - exemplo de propriedades



Fonte: Autor (2017)

Ao passo que a “Geometria” da estrutura esteja alinhada e fechada se entra na aba “Cargas”, onde o programa é capaz de resolver modelos que contenham vários carregamentos e cada carregamento pode ser composto por cargas nodais, cargas em barras, pressões nos elementos, recalques de apoio, cargas térmicas e cargas globais. As cargas são mostradas graficamente sobrepostas na geometria ao passo que vão sendo definidas, como apontado na Figura 26.

Figura 26: Esquema de cargas sobrepostas



Fonte: Autor (2017).

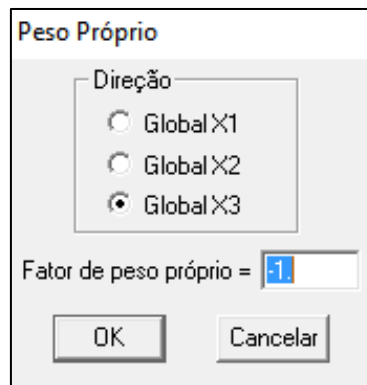
Ao optar por adicionar uma nova carga na geometria o programa abre uma nova aba de comandos específicos para entrar com as informações desta carga. Como por exemplo a aplicação do peso próprio em todos os elementos e barras do modelo, ao definir na aba de comandos, uma janela de opção é fornecida (Figura 27) e logo em seguida, o programa abre novamente outra aba para especificar a direção e o fator de peso próprio, no caso de sinal negativo, o valor tende a ir no sentido adotado na escolha da direção, como representado na Figura 28.

Figura 27: Cargas - Peso próprio.



Fonte: Autor (2017).

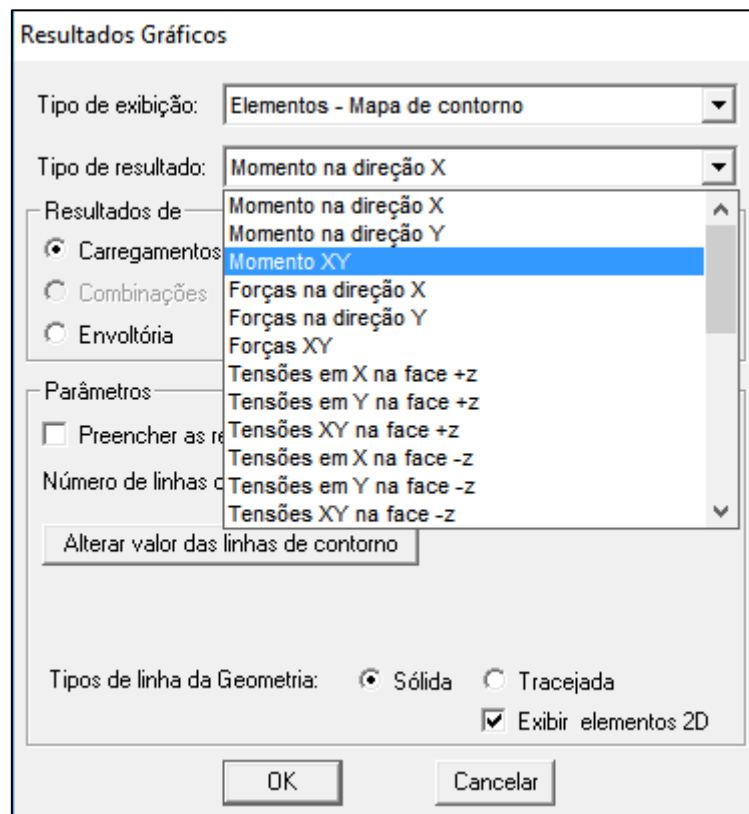
Figura 28: Cargas - Informação peso próprio



Fonte: Autor (2017).

Como se fosse definir outra carga, após acrescentar todas as cargas de carácter permanente, peso próprio e accidental faz-se a combinação destas para os objetivos do estudo. No caso em específico, a combinação característica onde temos todas as cargas com seus valores reais, sem interferências de coeficientes majorados ou minorados, o programa apresenta a opção de entrar com os valores dos coeficientes, dependendo da combinação que deseja trabalhar, opção visualizada na Figura 29.

Figura 31: Resultados Gráficos



Fonte: Autor (2017).

9 AJUSTES DOS MODELOS

Em frente às diferenças entre os métodos discutidos no estudo, ambos apresentam seus parâmetros relevantes para a solução dos problemas. Visando a convergência entre os resultados, é necessário realizar o ajuste destes parâmetros e adequá-los para o refinamento ideal dos métodos.

De posse da NBR 6118/2014, foram calculados todos os módulos de elasticidade secante à serem utilizados nas análises elásticas do modelo do estudo. Uma vez que, se iniciou considerando o cálculo do módulo de deformação tangencial inicial cordal seguindo a Equação 13, lembrado que o concreto do estudo corresponde ao C25.

$$E_{ci} = \alpha_e 5600 f_{ck}^{1/2} \quad (13)$$

$$\alpha_e = 1,20 \text{ (basalto)}$$

$$E_{ci} = 33600,0 \text{ Mpa}$$

Logo, o módulo de elasticidade secante a ser utilizado é calculado pela Equação 14:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (14)$$

$$\alpha_i = 0,86 \text{ (c25)}$$

$$E_{cs} = 0,86 \times 33600,0$$

$$E_{ci} = 28896,0 \text{ Mpa}$$

Por fim, corrigindo os valores do módulo de elasticidade em função da utilização da estrutura a ser especificado, temos os coeficientes de ajustes, apontados no estudo de RAMALHO (2013) dispostos na Tabela 7 e logo em sequência os resultados obtidos corrigidos do módulo de elasticidade em função dos elementos estruturais, Tabela 8.

Tabela 7: Coeficientes de correção dos módulos de elasticidade secante.

ESTRUTURA	VALOR
Laje	0,60
Viga	0,50
Pilar	0,80

Fonte: Adaptado de RAMALHO (2009).

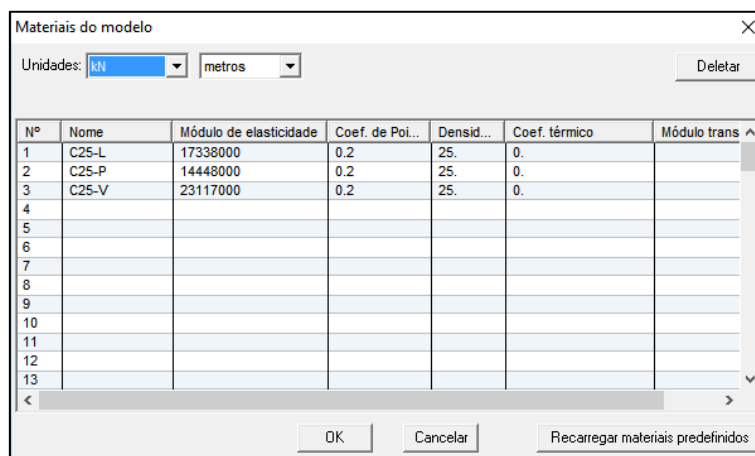
Tabela 8: Valores corrigidos do módulo de elasticidade em função da estrutura.

ESTRUTURA	$E_{cs, corrigido}$
Laje	17338 MPa
Viga	14448 Mpa
Pilar	23117 MPa

Fonte: DELALIBERA, R.G (2017).

Portanto, as propriedades foram alocadas no programa dentro da aba “Geometria” uma vez que ainda esteve na concepção da mesma, adicionando um novo material criado pelo usuário. Atentando ao valor do coeficiente de Poisson (ν) tomado como igual a 0,2, disposto de acordo com a Figura 32 logo a seguir.

Figura 32: Correções nas propriedades dos elementos estruturais.

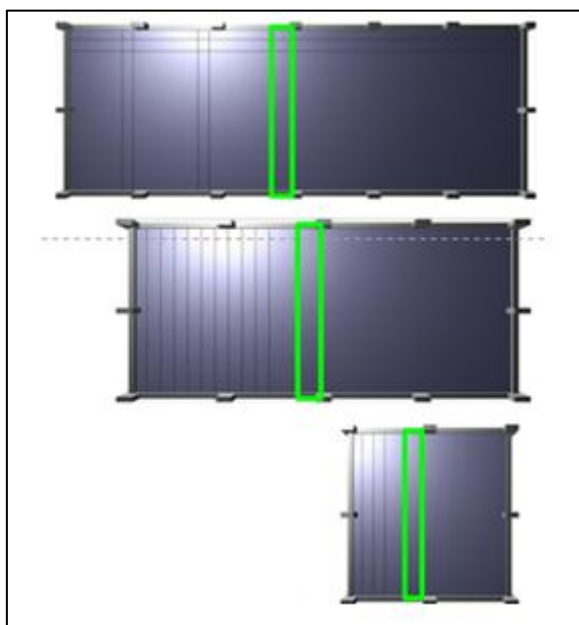


Fonte: Autor (2017).

10 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos na análise dos casos descritos por meio do programa computacional STRAP. Foram realizadas comparações ao longo de uma faixa de análise comum entre todas as lajes do estudo como pode ser encontrado na Figura 33. Os esforços aqui analisados e apresentados serão os momentos fletores na direção x, na direção y e os deslocamentos verticais.

Figura 33: Esquema de escolha da faixa de análise de resultados.



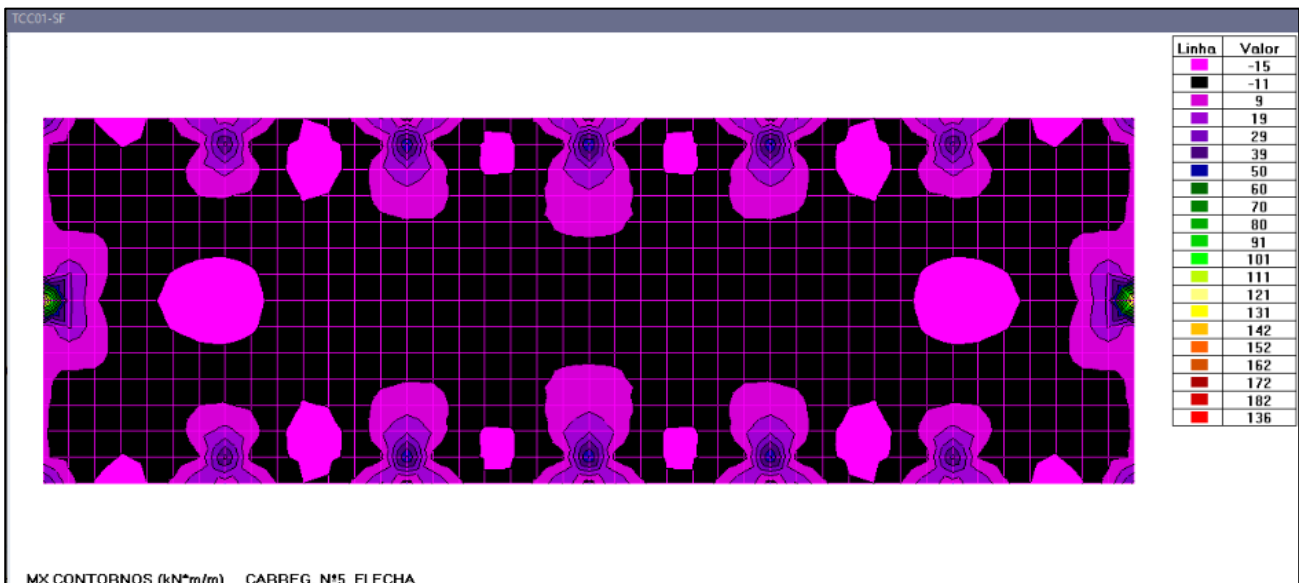
Fonte: Autor (2017)

10.1 LAJE TIPO 01 SEM FURO

A laje tipo 01 adotada neste estudo representa a laje de 30,0x10,0 metros, foi desenhada no AutoCad e modelada no STRAP utilizando as ferramentas disponíveis, foram extraídos os momentos fletores em x e em y e os deslocamentos ao longo da direção comum de todos as lajes.

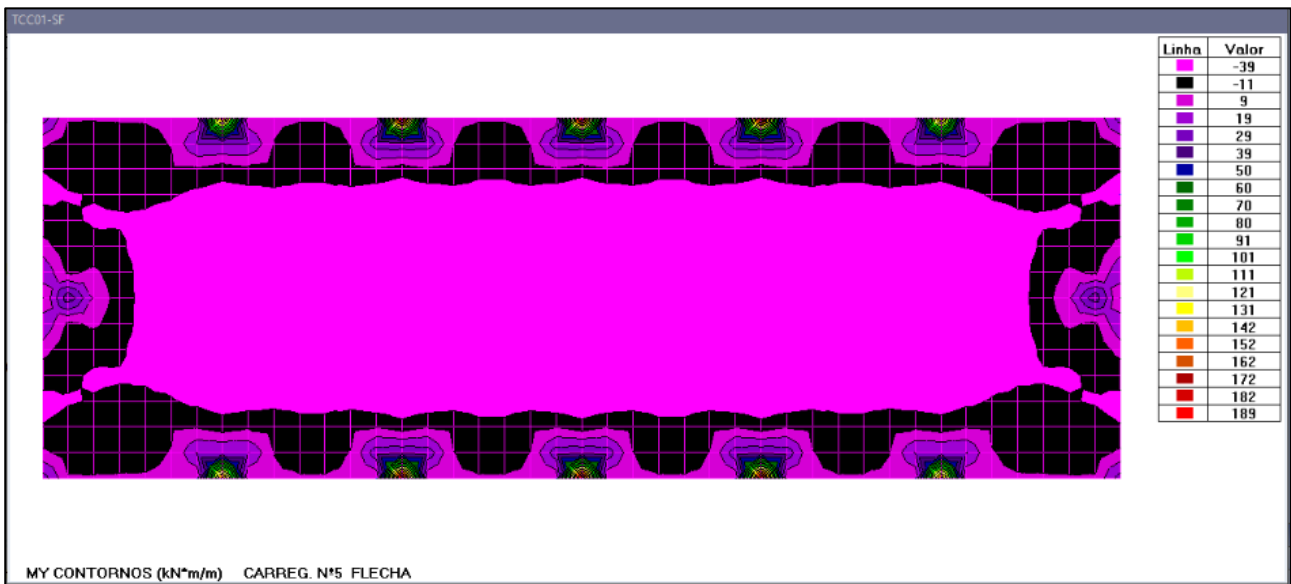
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 15,00 kN.m/m e 39,00 kN.m/m, respectivamente, e a sua posição é indicada na Figura 34 e 35, onde pode ser visualizado a distribuição de momentos em x e y. A flecha máxima é igual a 2,17cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 36.

Figura 34: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 01 sem furo



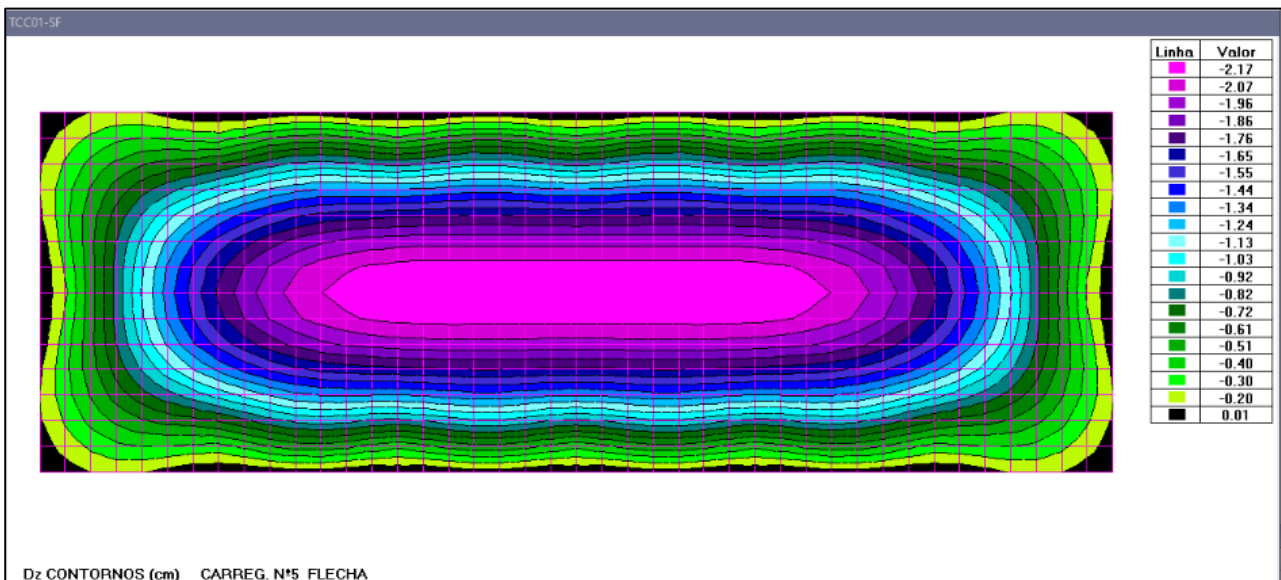
Fonte: Autor (2017)

Figura 35: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 01 sem furo



Fonte: Autor (2017)

Figura 36: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 01 sem furo



Fonte: Autor (2017)

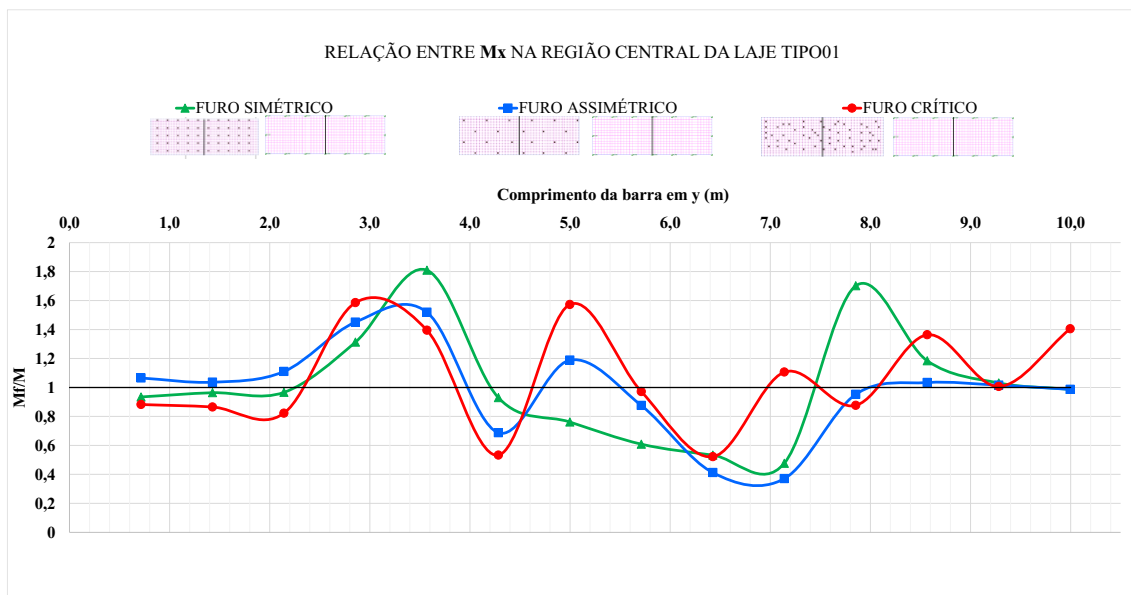
Em sequência, as lajes nervuradas com as aberturas foram modeladas no STRAP, e assim como na laje sem furo, os momentos fletores e deslocamentos foram extraídos. Estes valores foram divididos pelos momentos e deslocamento da laje sem abertura, em nervuras comuns das lajes, e foram obtidos os incrementos nos esforços e nos

deslocamentos que ocorrem em função da abertura de furos em posições simétricas, assimétricas e completamente aleatórios, denominados, críticos.

Os resultados obtidos estão descritos a seguir, de acordo com a posições de aberturas dos furos na laje. Nos gráficos apresentados, M_f e F_f estão indicando os momentos e deslocamentos na laje com os furos acrescentados, enquanto M e F são os momentos e deslocamentos na laje sem furo.

A relação entre os momentos em x nas lajes tipo 01 é visualizada a partir da Figura 37, onde é possível observar que os momentos apresentam, de certa forma, uma regularidade no início do comprimento e assim que os furos vão tomando conta da laje os momentos apresentam inconstância, observando locais onde o momento aumenta em relação à laje sem furo, próximo dos valores entre 2,0 a 4,0 m, além de indicar a diminuição de momentos em 4m e de 6,0 a 7,5m.

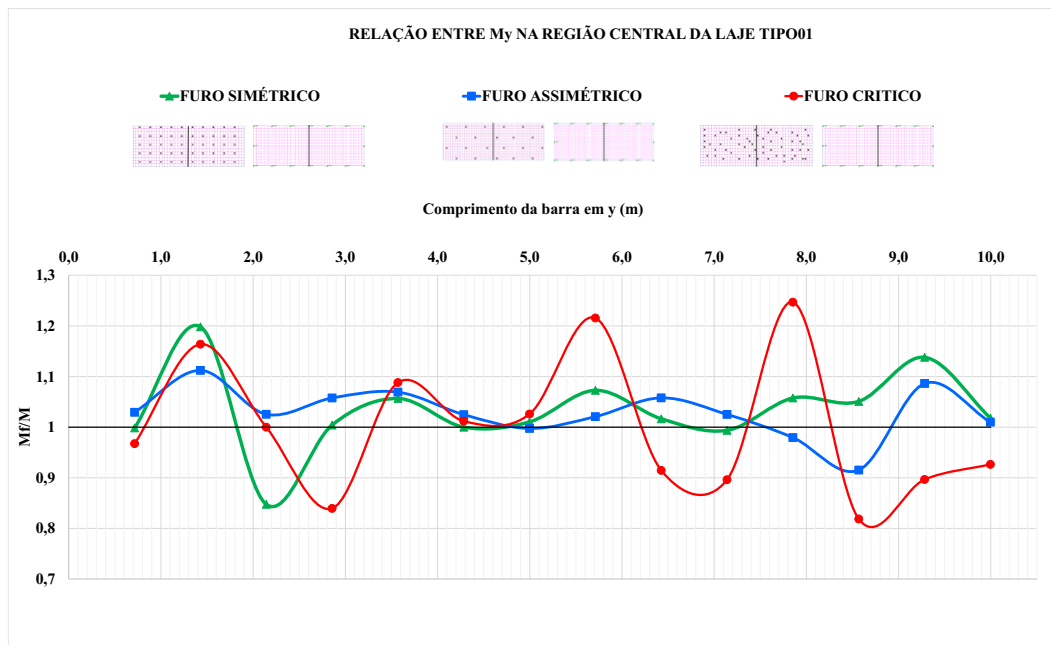
Figura 37: Relação entre momentos fletores em x nas lajes tipo 01



Fonte: Autor (2017)

A relação entre os momentos na direção y, conclui-se que os incrementos maiores são presenciados na laje submetida aos furos críticos, logo, apresentando momentos 1,25 maiores que os momentos da laje sem furo. Ao passo que as lajes com furos simétricos e assimétricos apresentam incrementos de pequena ordem numérica.

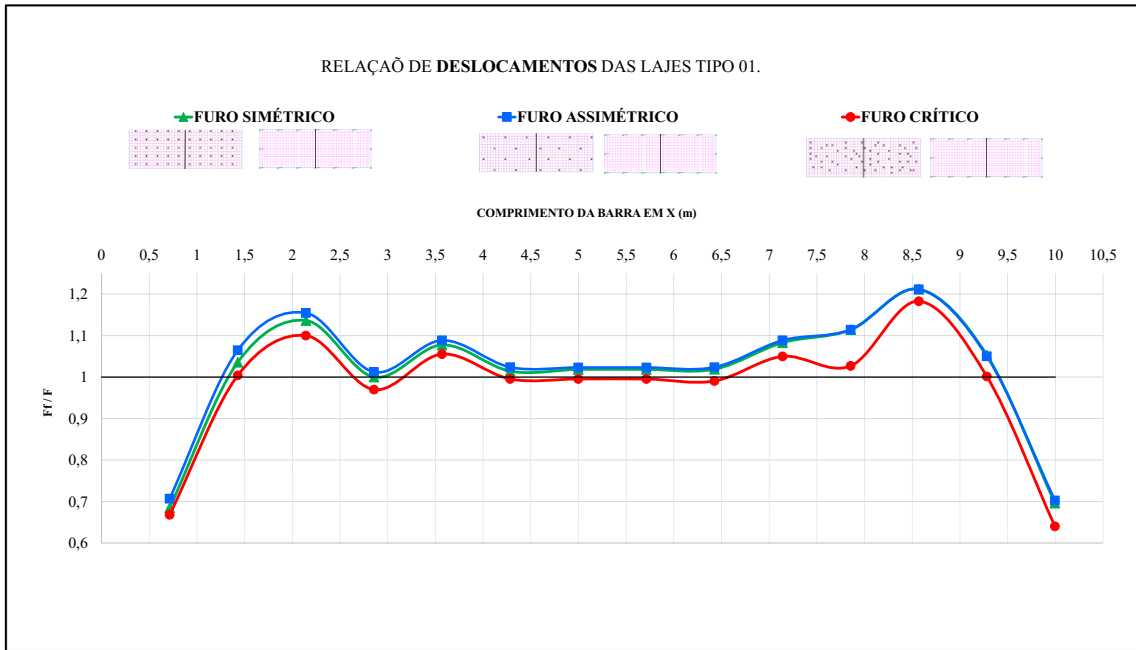
Figura 38: Relação entre momentos fletores em y nas lajes tipo 01



Fonte: Autor (2017)

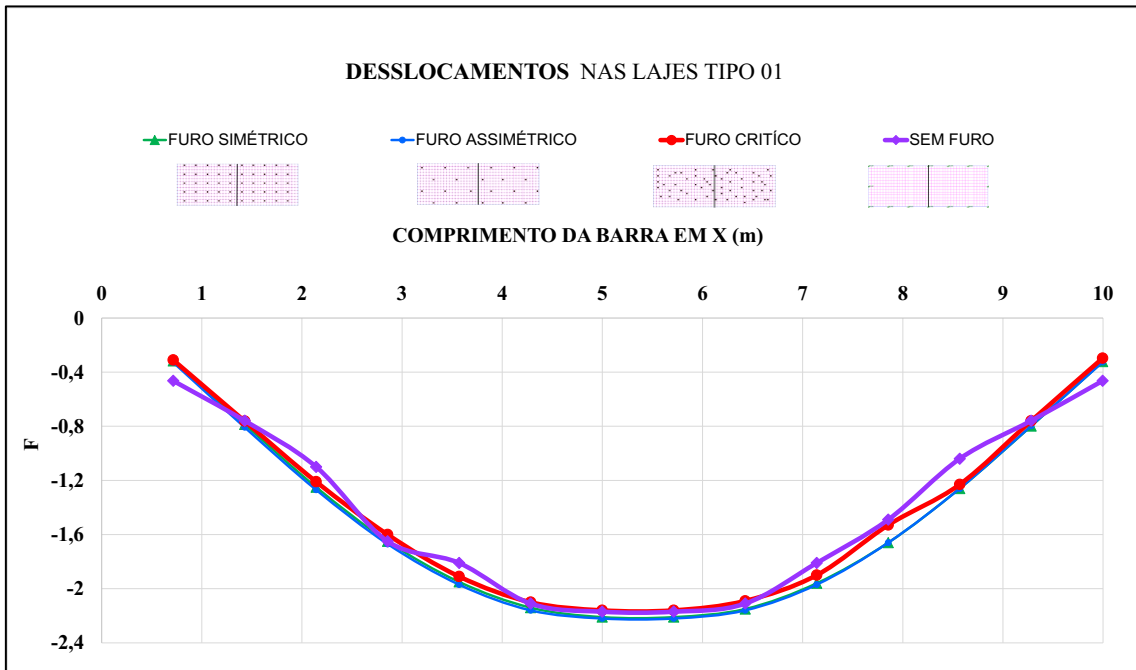
A relação entre os deslocamentos é um ponto importante para a visualização dos resultados, onde se conclui observando nas Figuras 39 e 40 que os furos não impactam tanto quanto os esforços de flexão.

Figura 39: Relação entre os deslocamentos nas lajes tipo 01



Fonte: Autor (2017)

Figura 40: Flechas das lajes tipo 01

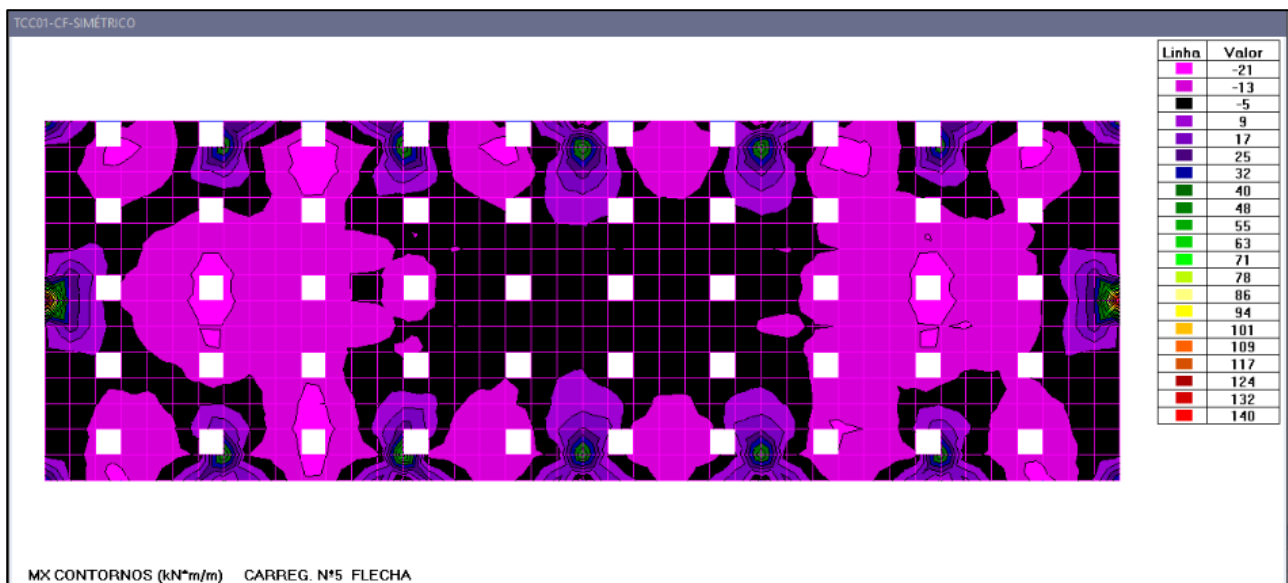


Fonte: Autor (2017)

10.1.1 LAJE TIPO 01 COM FUROS SIMÉTRICOS

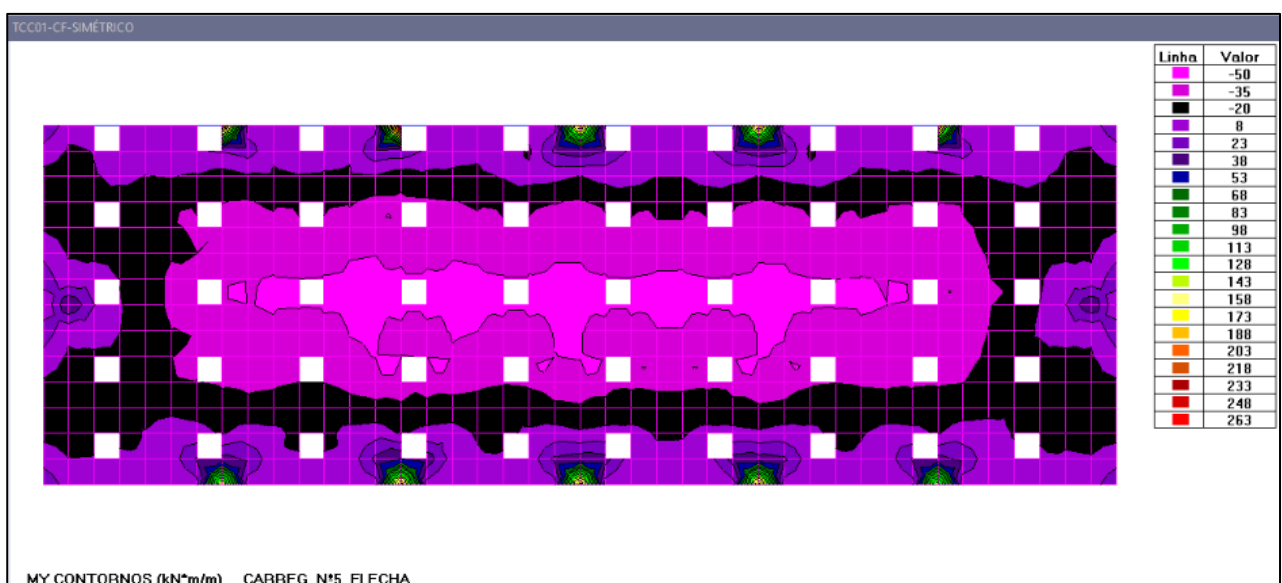
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 21 kN.m/m e 50 kN.m/m, respectivamente, e a distribuição dos momentos estão indicados nas Figuras 41 e 42. A flecha máxima é igual a 2,34cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 43.

Figura 41: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 01 com furos simétricos



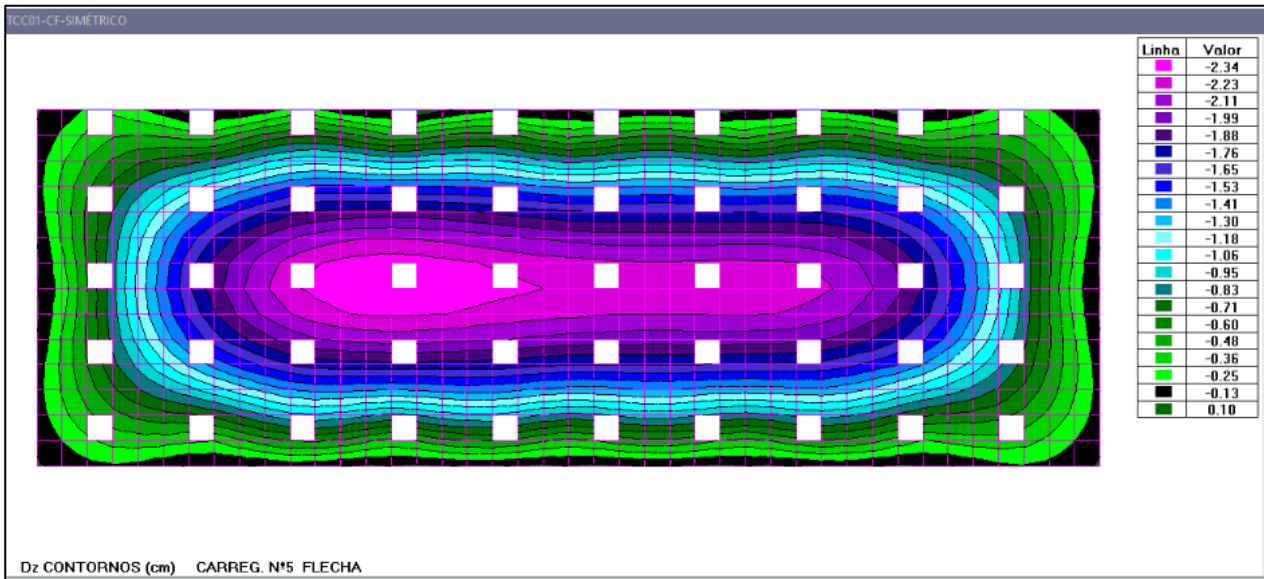
Fonte: Autor (2017)

Figura 42: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 01 com furos simétricos



Fonte: Autor (2017)

Figura 43: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 01 com furos simétricos

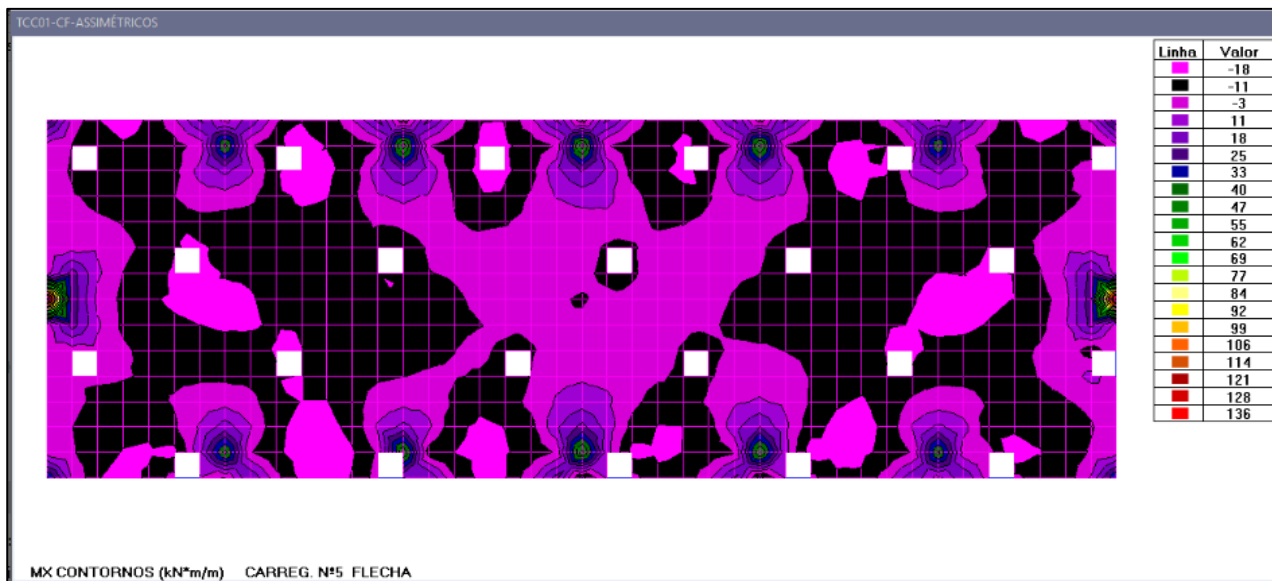


Fonte: Autor (2017)

10.1.2 LAJE TIPO 01 COM FUROS ASSIMÉTRICOS

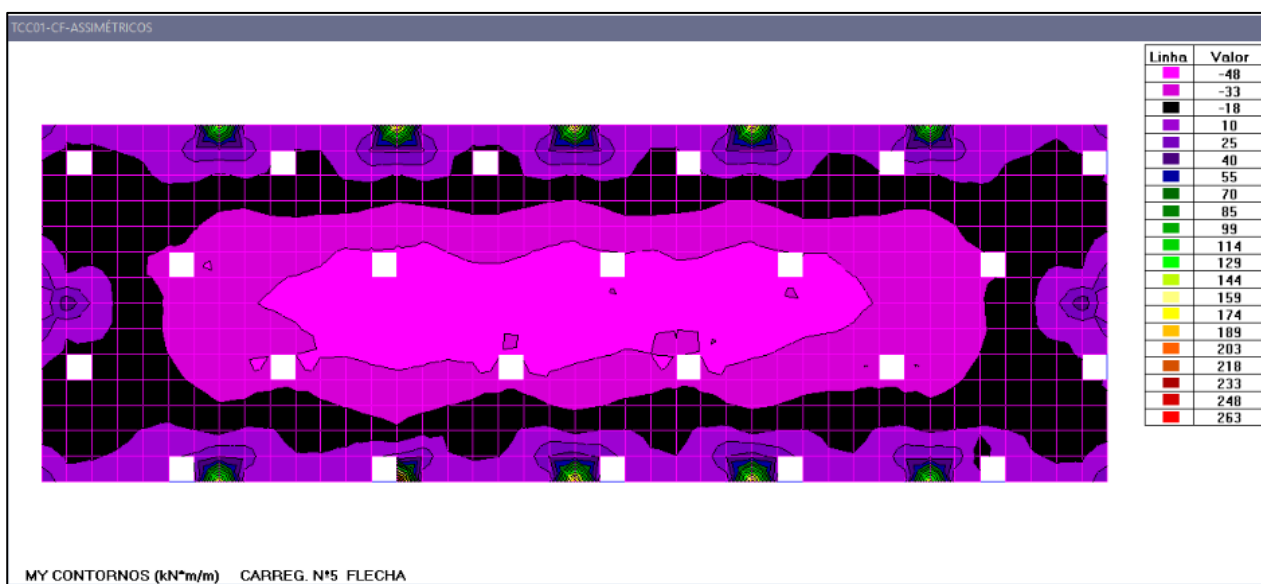
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 18 kN.m/m e 48 kN.m/m, respectivamente, e a distribuição dos momentos estão indicados nas Figuras 44 e 45. A flecha máxima é igual a 2,29cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 46.

Figura 44: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 01 com furos assimétricos



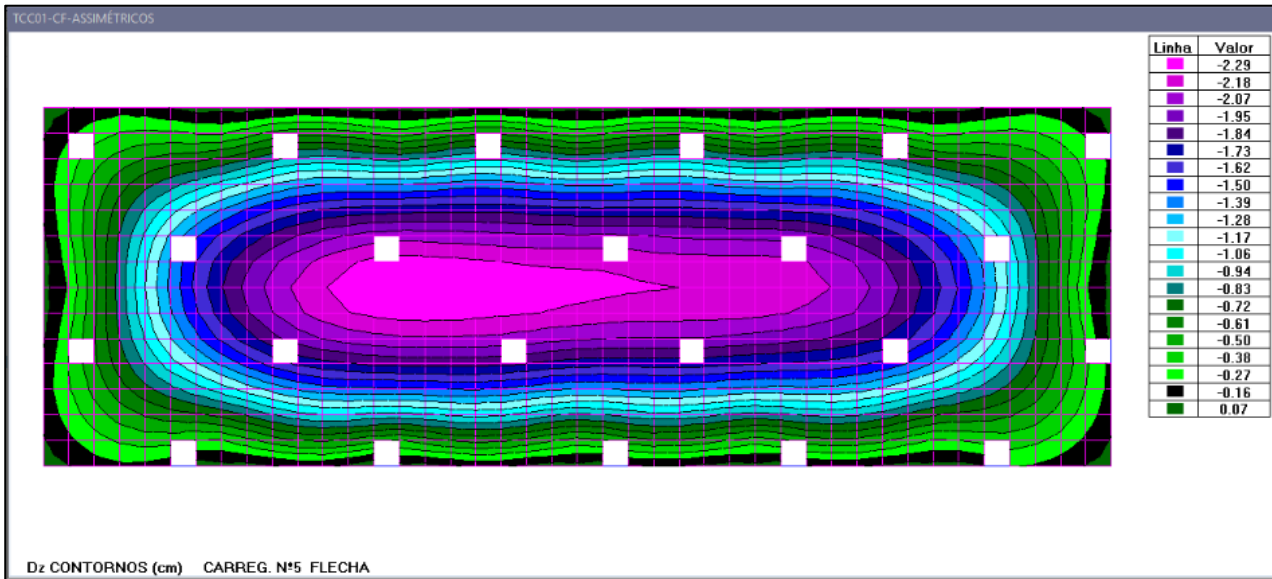
Fonte: Autor (2017)

Figura 45: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 01 com furos assimétricos



Fonte: Autor (2017)

Figura 46: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 01 com furos assimétricos

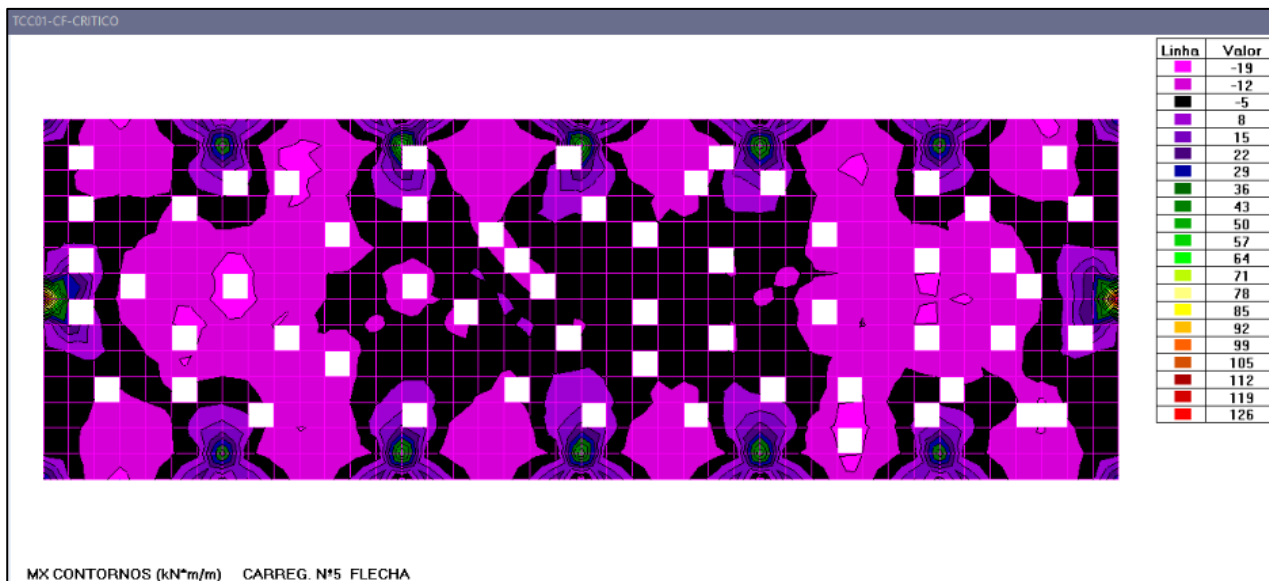


Fonte: Autor (2017)

10.1.3 LAJE TIPO 01 COM FUROS CRÍTICOS

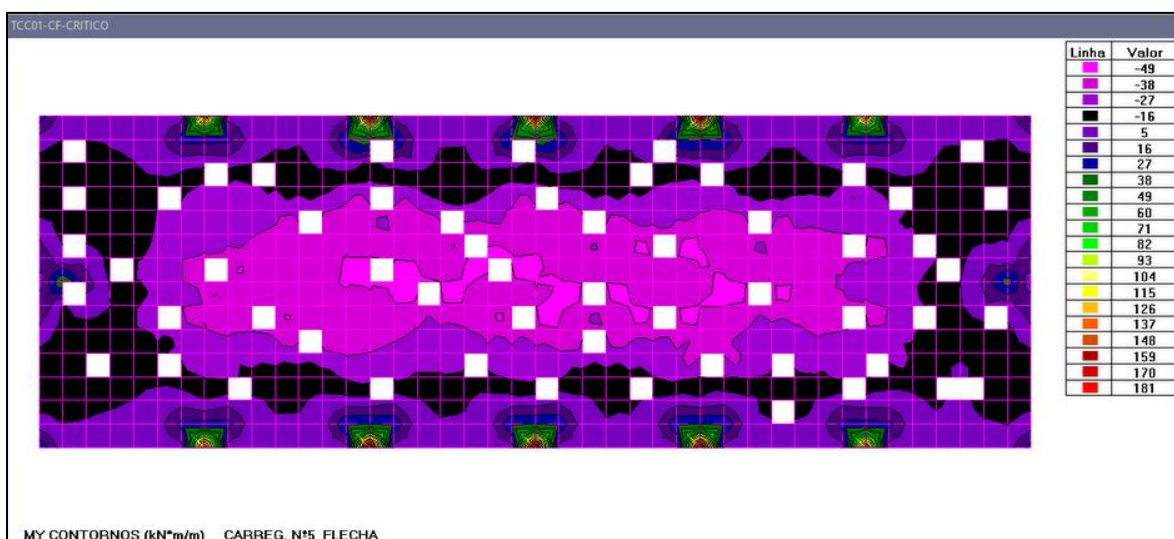
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 19 kN.m/m e 49 kN.m/m, respectivamente, e a distribuição dos momentos estão indicados nas Figuras 47 e 48. A flecha máxima é igual a 2,19cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 49.

Figura 47: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 01 com furos críticos



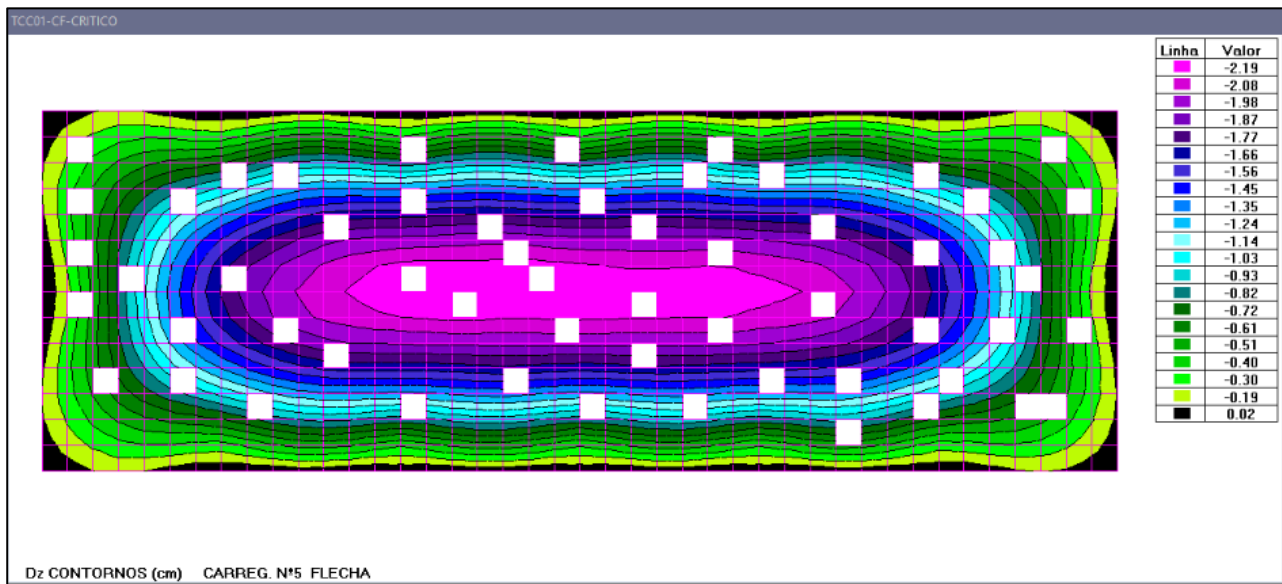
Fonte: Autor (2017)

Figura 48: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 01 com furos críticos



Fonte: Autor (2017)

Figura 49: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 01 com furos críticos



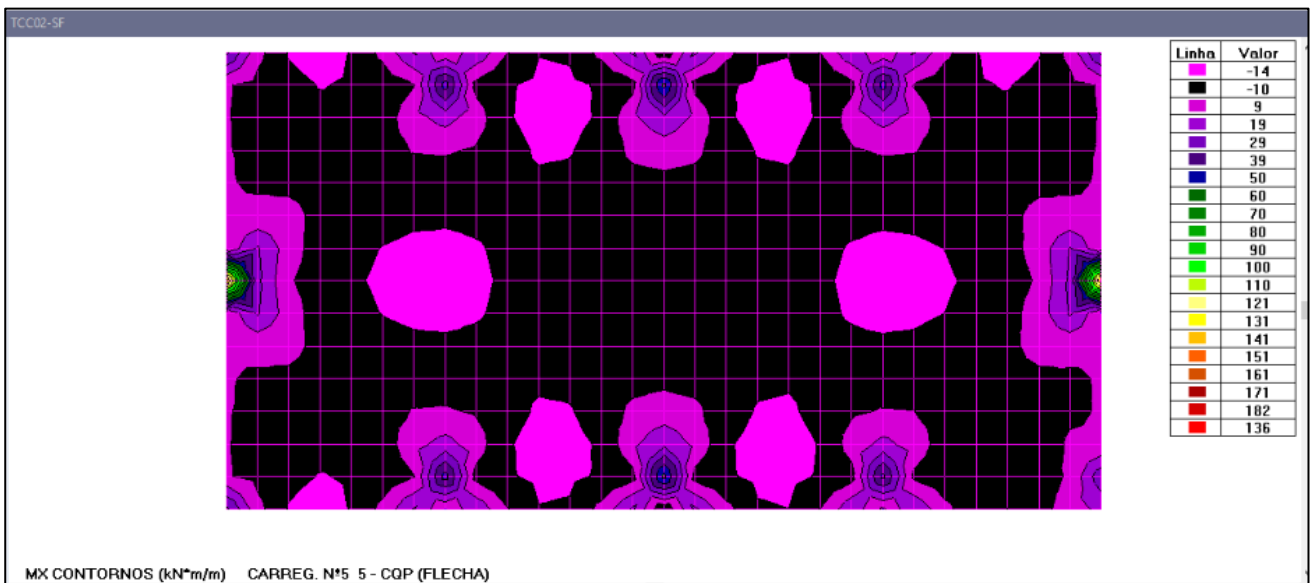
Fonte: Autor (2017)

10.2 LAJE TIPO 02 SEM FURO

A laje tipo 02 adotada neste estudo representa a laje de 20,0x10,0 metros, foi desenhada no AutoCad e modelada no STRAP utilizando as ferramentas disponíveis, foram extraídos os momentos fletores em x e em y e os deslocamentos ao longo da direção comum de todos as lajes.

Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 14,00 kN.m/m e 39,00 kN.m/m, respectivamente, e a sua posição é indicada na Figura 50 e 51, onde pode ser visualizado a distribuição de momentos em x e y. A flecha máxima é igual a 2,15cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 52.

Figura 50: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 02 sem furo



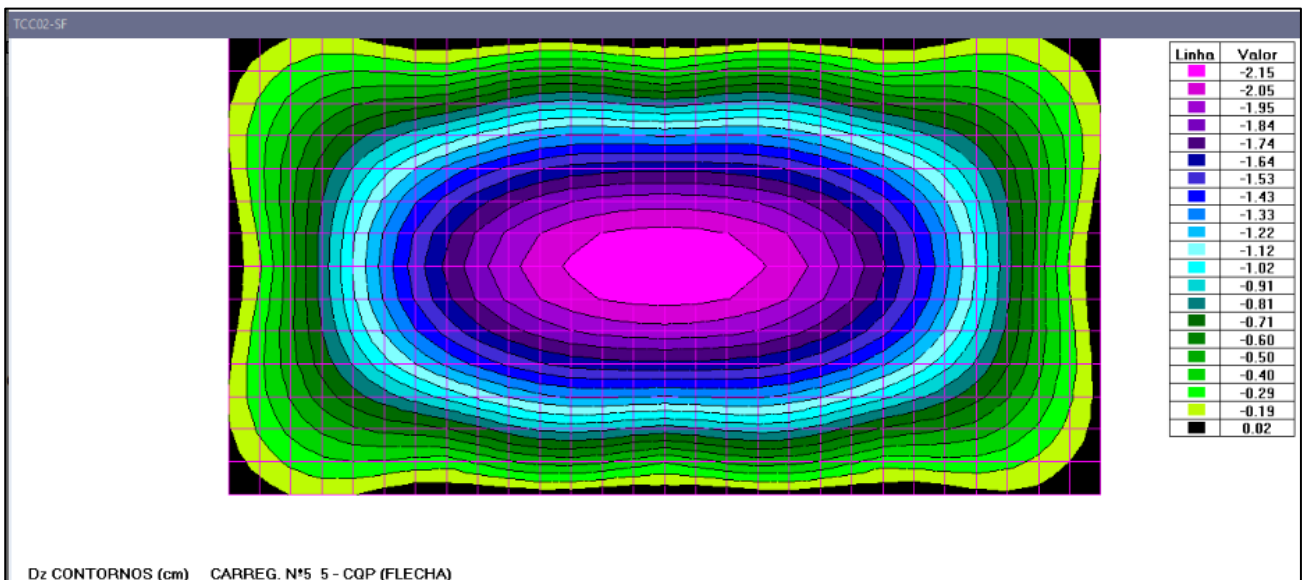
Fonte: Autor (2017)

Figura 51: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 02 sem furo



Fonte: Autor (2017)

Figura 52: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 02 sem furo



Fonte: Autor (2017)

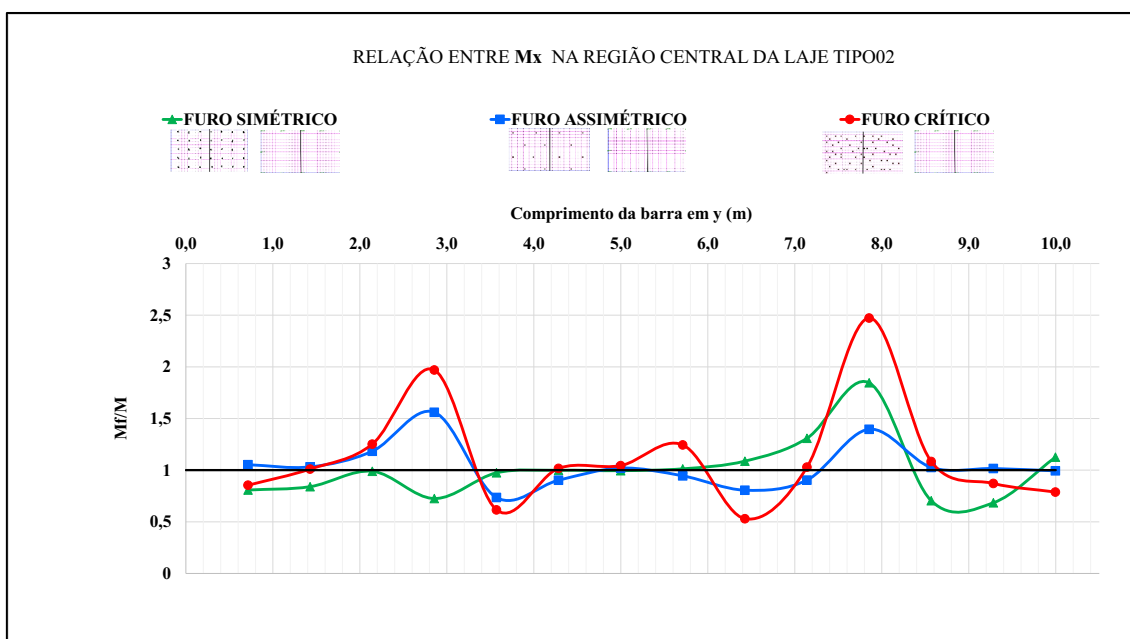
Em sequência, as lajes nervuradas tipo 02 com as aberturas foram modeladas no STRAP, e assim como na laje sem furo, os momentos fletores e deslocamentos foram extraídos. Estes valores foram divididos pelos momentos e flechas da laje sem abertura, em placas correspondentes da laje, e foram obtidos os incrementos nos esforços e nos

deslocamentos que ocorrem em função da abertura de furos em posições simétricas, assimétricas e completamente aleatórios, denominados, críticos.

Os resultados obtidos estão descritos a seguir, de acordo com a posições de aberturas dos furos na laje. Nos gráficos apresentados, M_f e F_f estão indicando os momentos e deslocamentos na laje com os furos acrescentados, enquanto M e F são os momentos e deslocamentos na laje sem furo.

A relação entre os momentos em x nas lajes tipo 02 é visualizada a partir da Figura 53, onde é possível concluir que os momentos apresentam uma irregularidade ocasionada pela presença de furos em locais específicos, logo, voltando a análise das posições dos furos da laje crítica, se nota que eles interferem diretamente na elevação de momentos ao longo do comprimento, como pode ser visto nos incrementos de 1,96 e 2,47 nos comprimentos 2,8m e 7,8m respectivamente.

Figura 53: Relação entre momentos fletores em x nas lajes tipo 02

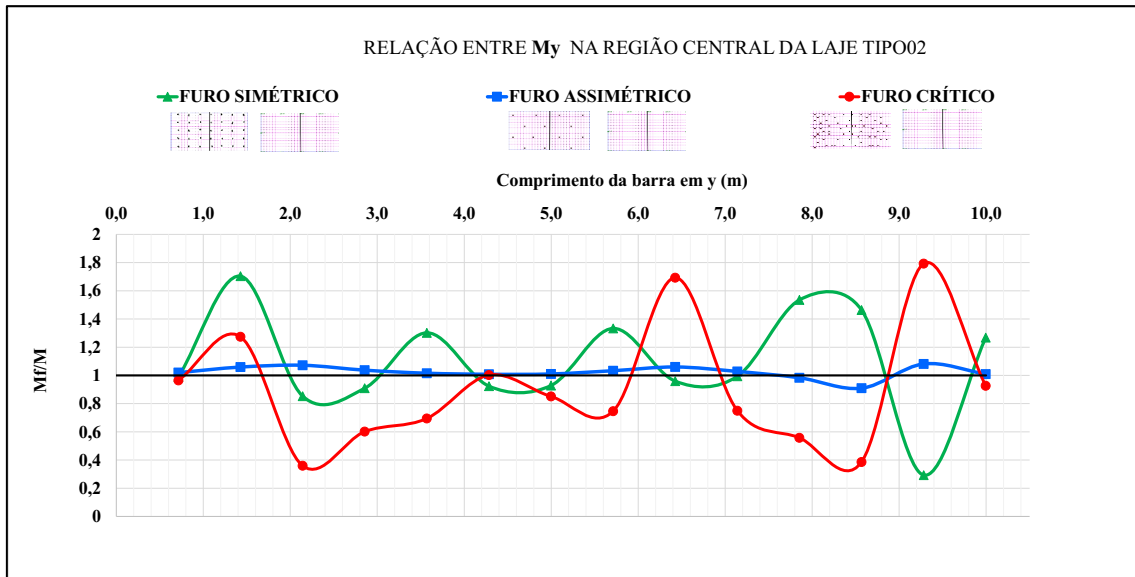


Fonte: Autor (2017)

Já a relação dos momentos na direção y é totalmente influenciado pela presença de furos ao longo do comprimento, visto que, na laje que foram alocados furos em posições assimétricas não sofreu maiores alterações devido à faixa de nervuras adotada para análise, por outro lado, nas lajes com furos em posições simétricas e críticas, a posição

do furo resultou em elevações, ao longo do comprimento da faixa, como pode ser visualizado na Figura 54.

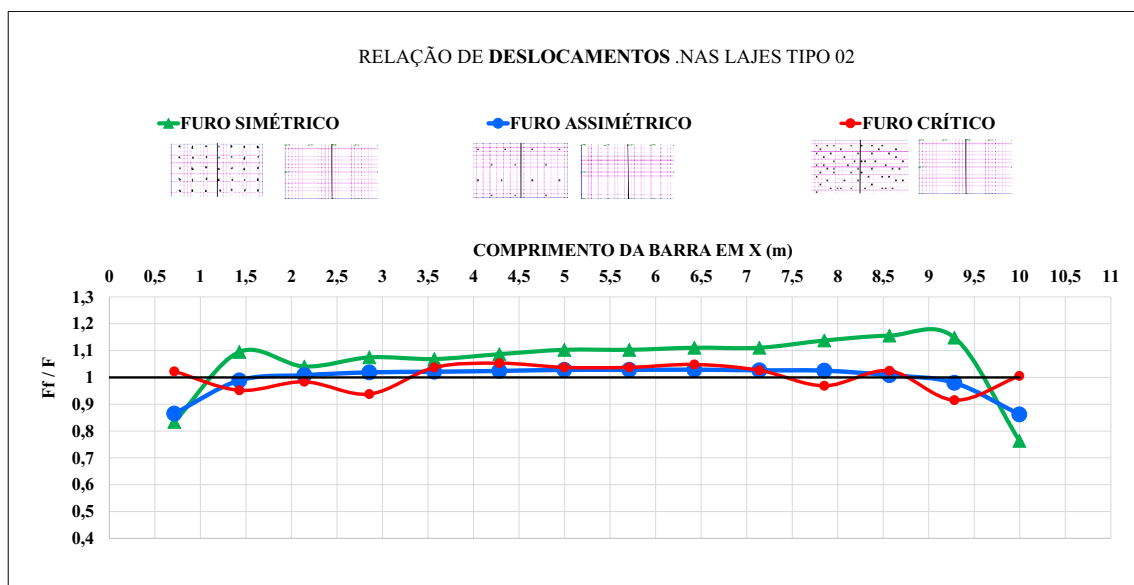
Figura 54: Relação entre momentos fletores em y nas lajes tipo 02



Fonte: Autor (2017)

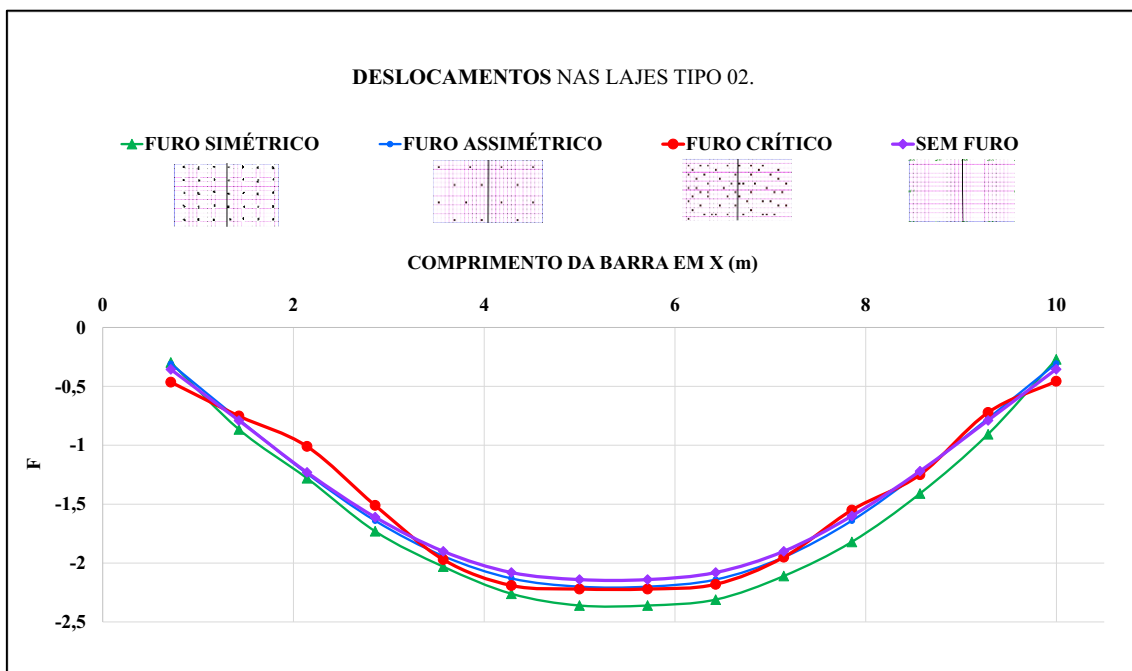
Novamente a relação dos deslocamentos, as lajes com furos simétricos e assimétricos apresentam valores maiores, constantemente, ao longo do comprimento, enquanto a laje submetida a furos críticos apresentam menores deslocamentos no início do comprimento, devido à locação aleatória de furos.

Figura 55: Relação entre os deslocamentos nas lajes tipo 02



Fonte: Autor (2017)

Figura 56: Flechas das lajes tipo 02

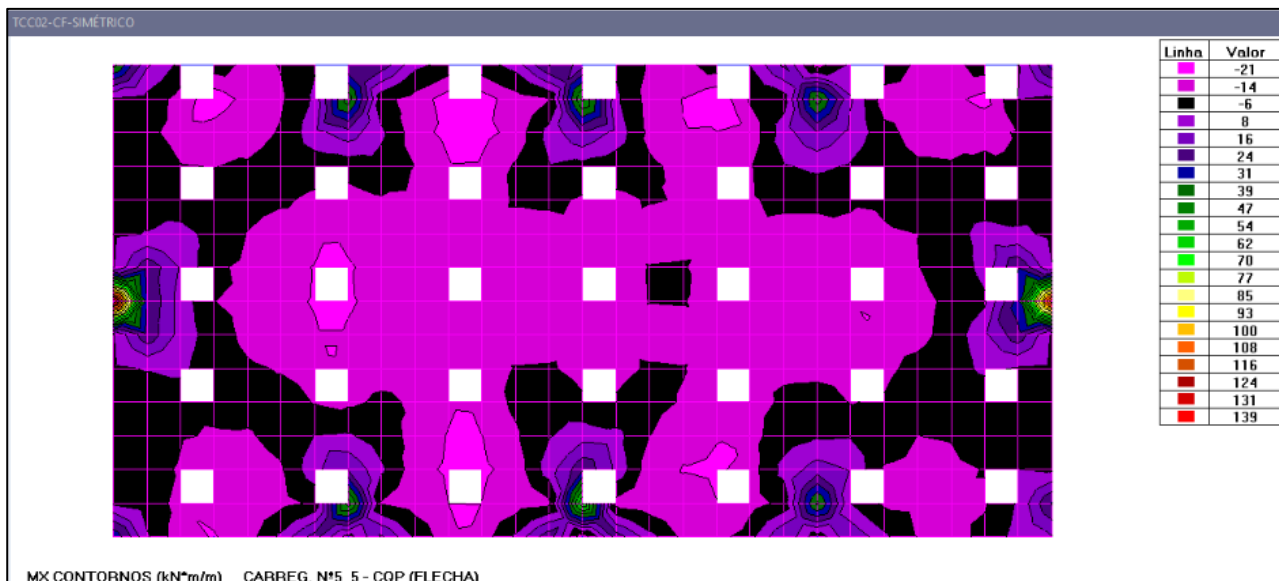


Fonte: Autor (2017)

10.2.1 LAJE TIPO 02 COM FUROS SIMÉTRICOS

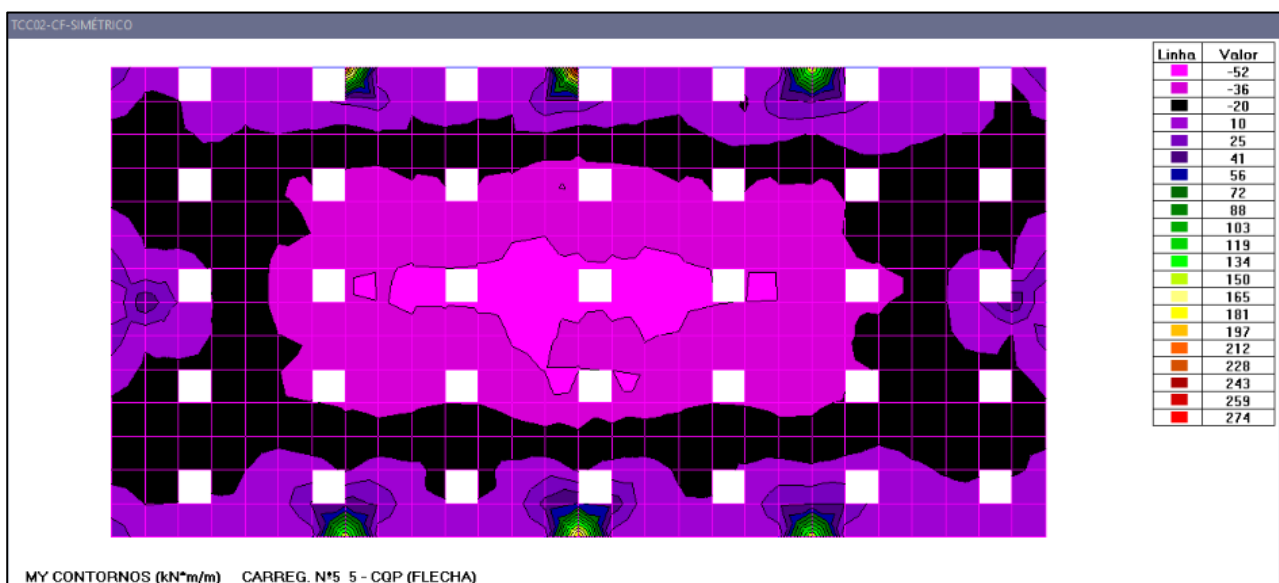
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 21 kN.m/m e 52 kN.m/m, respectivamente, e a distribuição dos momentos estão indicados nas Figuras 57 e 58. A flecha máxima é igual a 2,34cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 59.

Figura 57: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 02 com furos simétricos



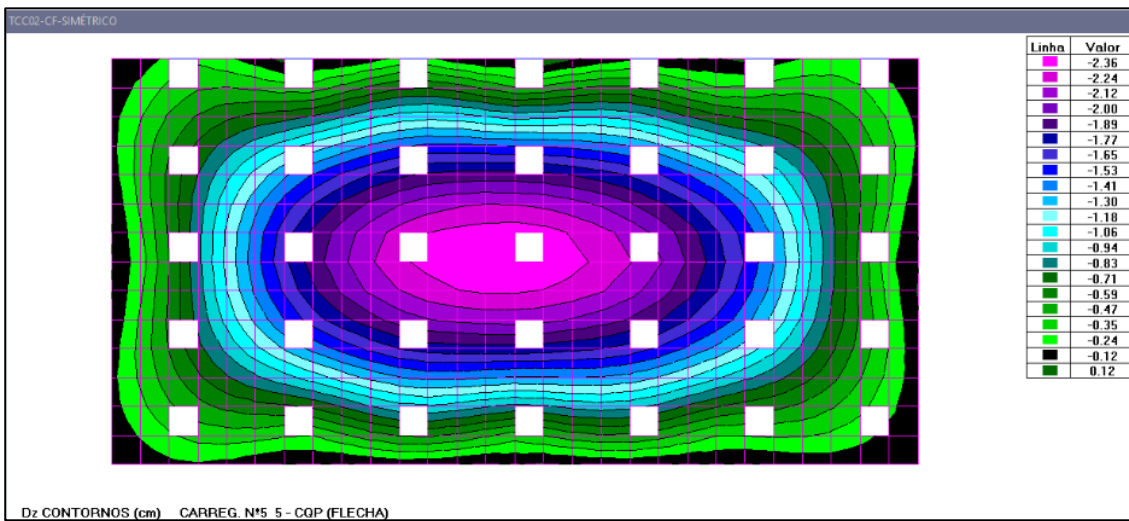
Fonte: Autor (2017)

Figura 58: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 02 com furos simétricos



Fonte: Autor (2017)

Figura 59: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 02 com furos críticos

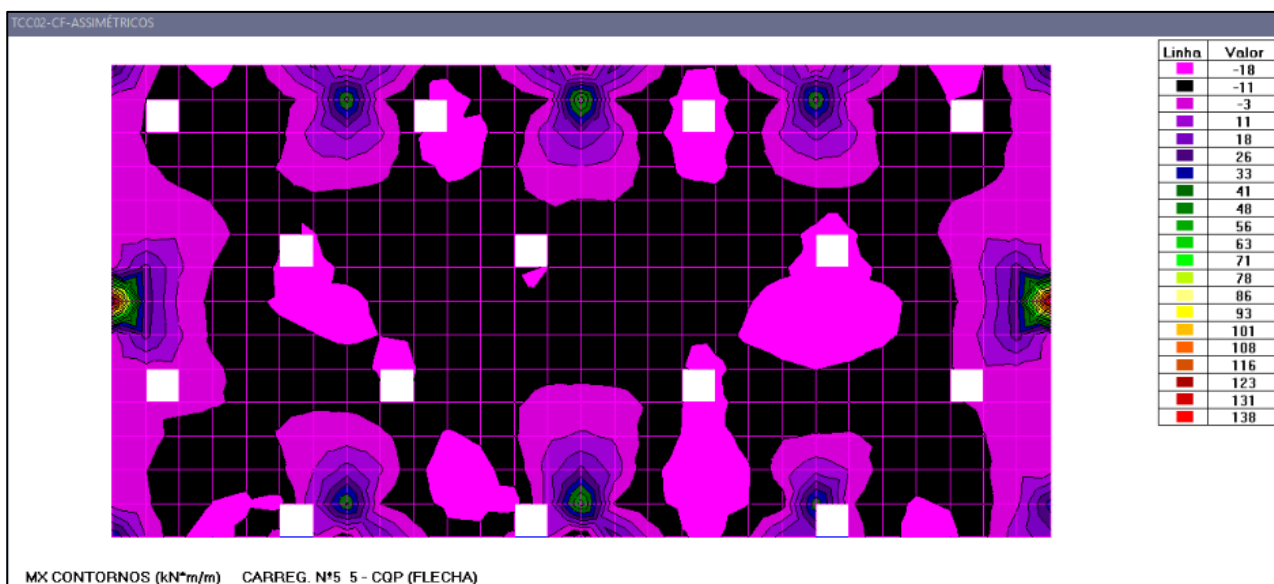


Fonte: Autor (2017)

10.2.2 LAJE TIPO 02 COM FUROS ASSIMÉTRICOS

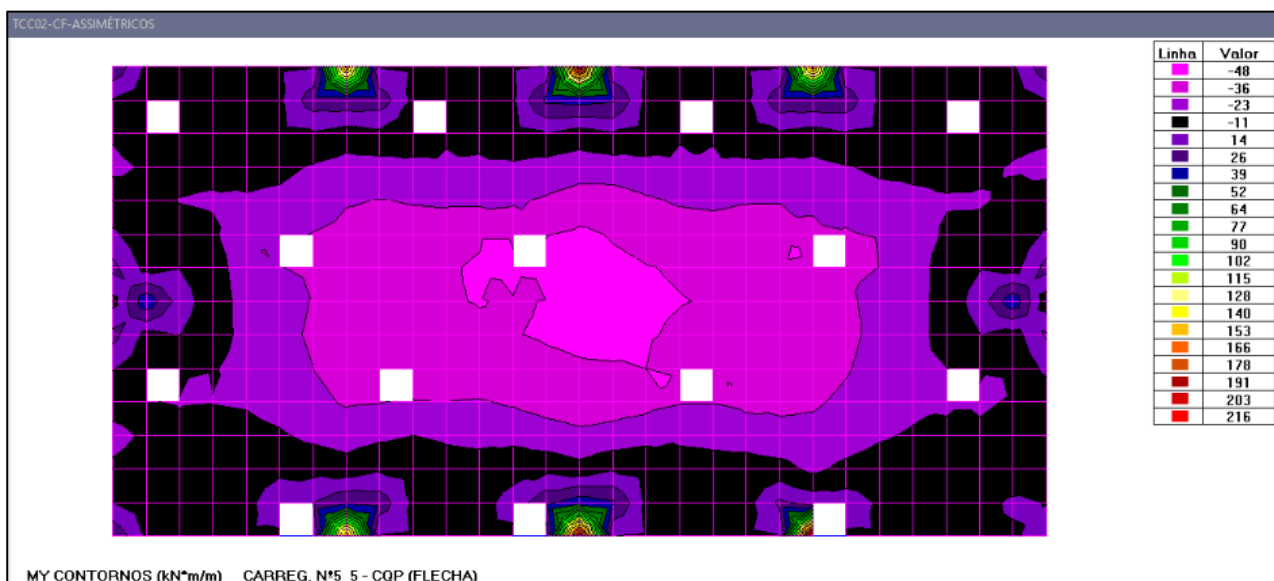
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 18 kN.m/m e 48 kN.m/m, respectivamente, e a distribuição dos momentos estão indicados nas Figuras 60 e 61. A flecha máxima é igual a 2,20cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 62.

Figura 60: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 02 com furos assimétricos



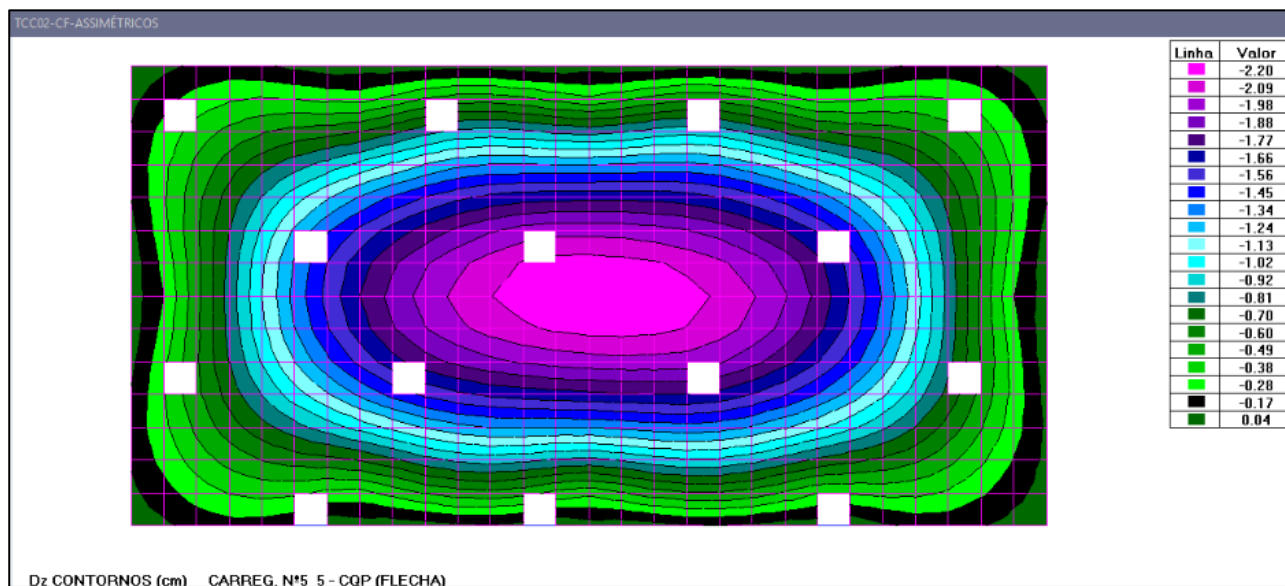
Fonte: Autor (2017)

Figura 61: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 01 com furos assimétricos



Fonte: Autor (2017)

Figura 62: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 02 com furos assimétricos

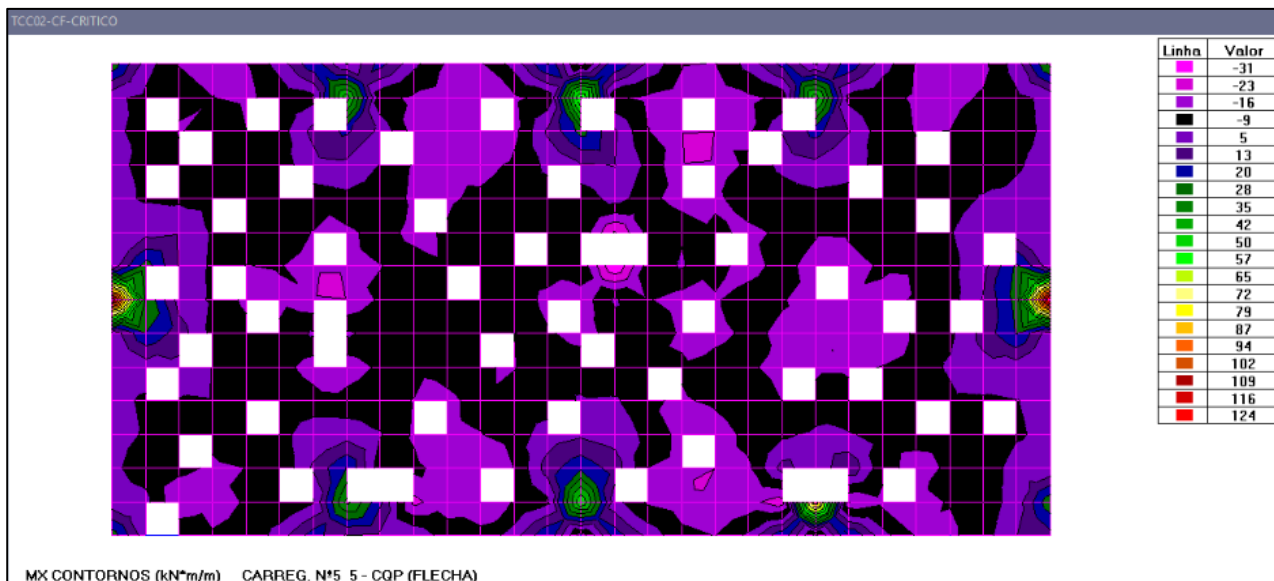


Fonte: Autor (2017)

10.2.3 LAJE TIPO 02 COM FUROS CRÍTICOS

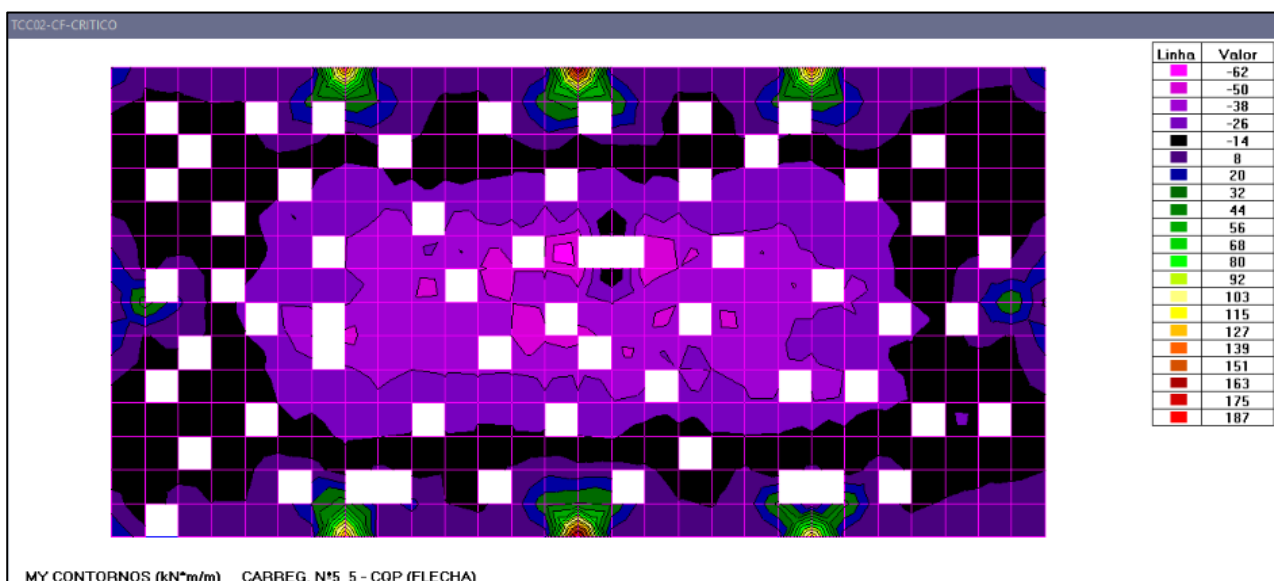
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 31 kN.m/m e 62 kN.m/m, respectivamente, e a distribuição dos momentos estão indicados nas Figuras 63 e 64. A flecha máxima é igual a 2,22cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 65.

Figura 63: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 02 com furos críticos



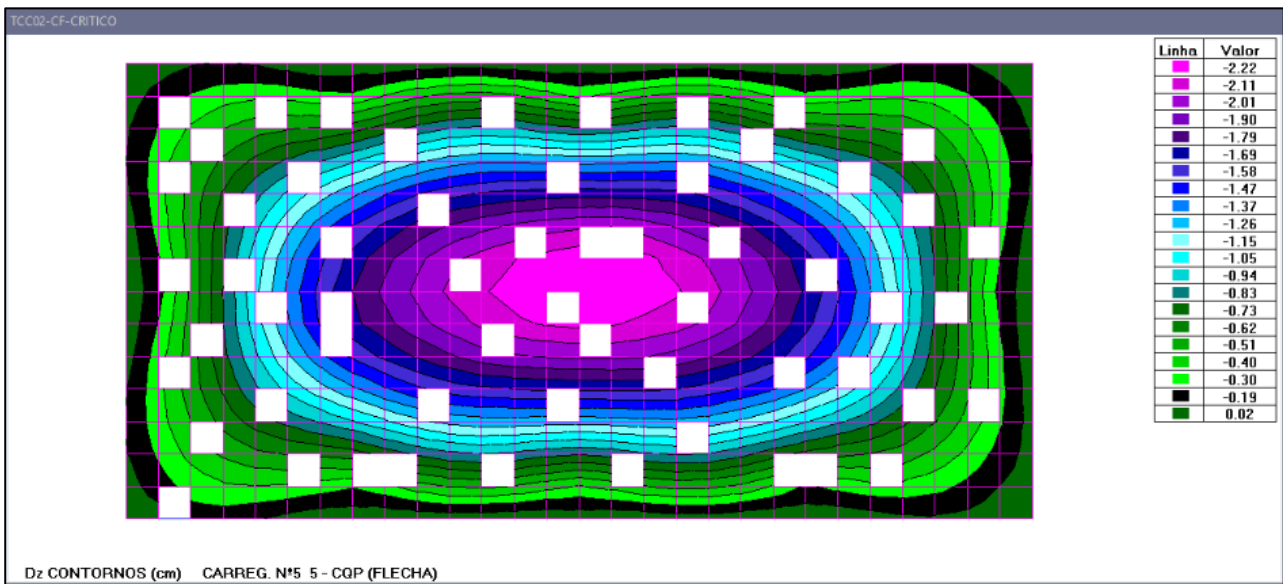
Fonte: Autor (2017)

Figura 64: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 02 com furos críticos



Fonte: Autor (2017)

Figura 65: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 02 com furos críticos



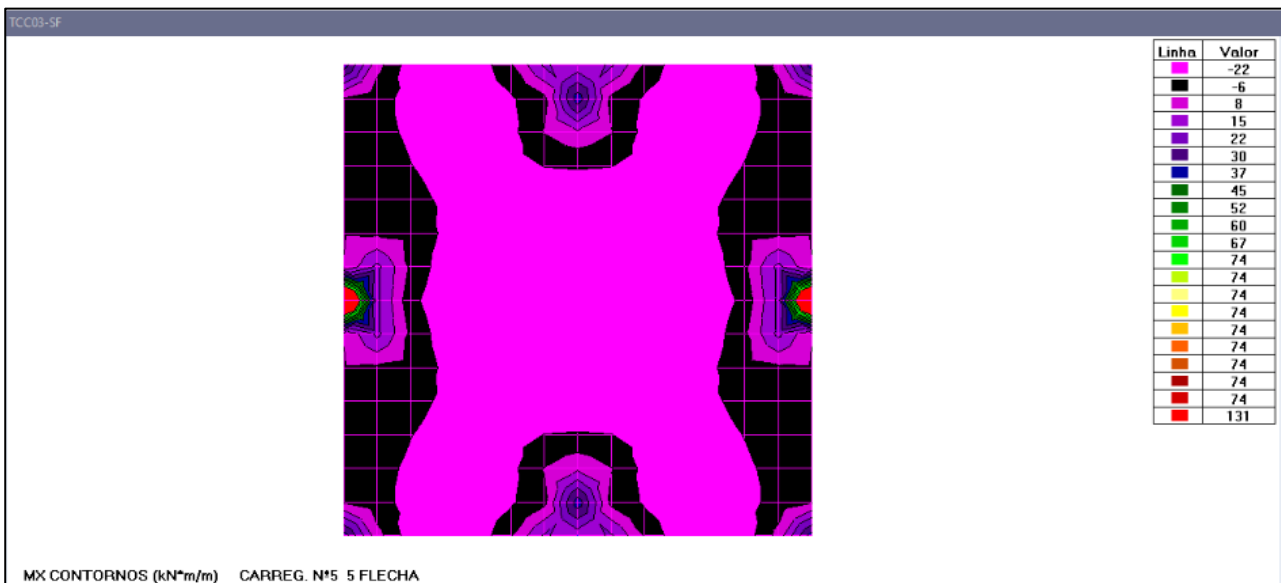
Fonte: Autor (2017)

10.3 LAJE TIPO 03 SEM FURO

A laje tipo 03 adotada neste estudo representa a laje de 10,0x10,0 metros, foi desenhada no AutoCad e modelada no STRAP utilizando as ferramentas disponíveis, foram extraídos os momentos fletores em x e em y e os deslocamentos ao longo da direção comum de todos as lajes.

Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 22,20 kN.m/m e 22,89 kN.m/m, respectivamente, e a sua posição é indicada na Figura 66 e 67, onde pode ser visualizado a distribuição de momentos em x e y. A flecha máxima é igual a 1,18cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 68.

Figura 66: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 03 sem furo



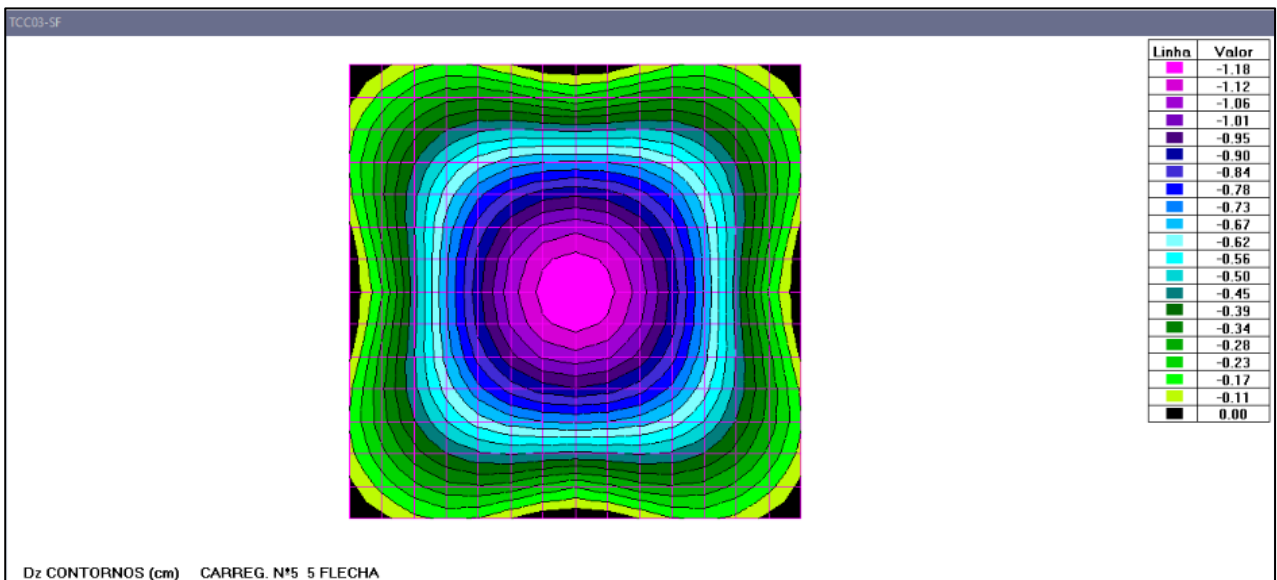
Fonte: Autor (2017)

Figura 67: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 03 sem furo



Fonte: Autor (2017)

Figura 68: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 03 sem furo



Fonte: Autor (2017)

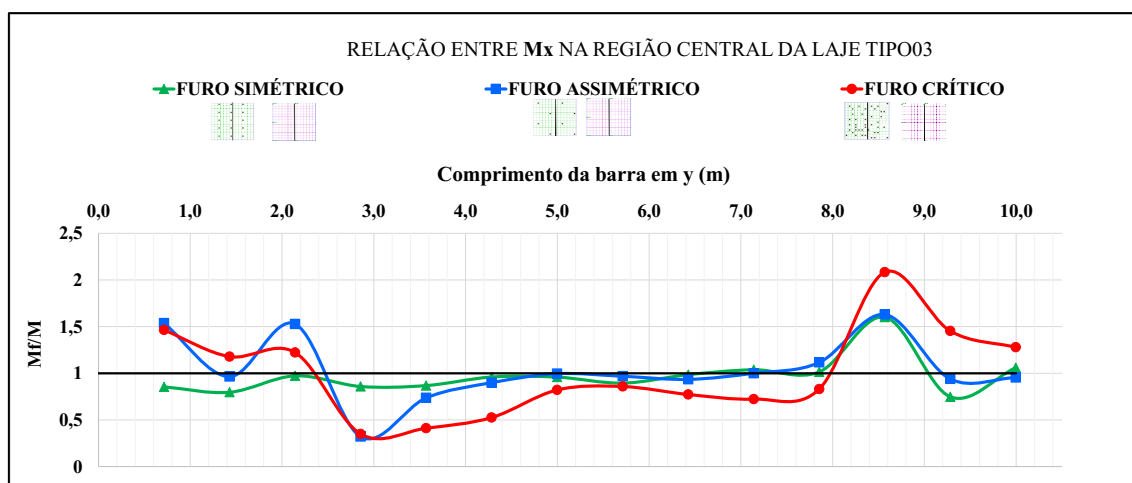
Em sequência, as lajes nervuradas tipo 03 com as aberturas foram modeladas no STRAP, e assim como na laje sem furo, os momentos fletores e deslocamentos foram extraídos. Estes valores foram divididos pelos momentos e flechas da laje sem abertura, em placas correspondentes da laje, e foram obtidos os incrementos nos esforços e nos

deslocamentos que ocorrem em função da abertura de furos em posições simétricas, assimétricas e completamente aleatórios, denominados, críticos.

Os resultados obtidos estão descritos a seguir, de acordo com a posições de aberturas dos furos na laje. Nos gráficos apresentados, M_f e F_f estão indicando os momentos e deslocamentos na laje com os furos acrescentados, enquanto M e F são os momentos e deslocamentos na laje sem furo.

As relações entre momentos na direção x das lajes tipo 03 apresentem diminuição de valores entre 2,0m a 8,0m das três situações de furos do estudo, incrementos máximos na ordem de 2,0 (furo crítico), 1,62 (furo assimétrico) e 1,60 (furo simétrico) ao longo do comprimento 8,50m como apresentado na Figura 69.

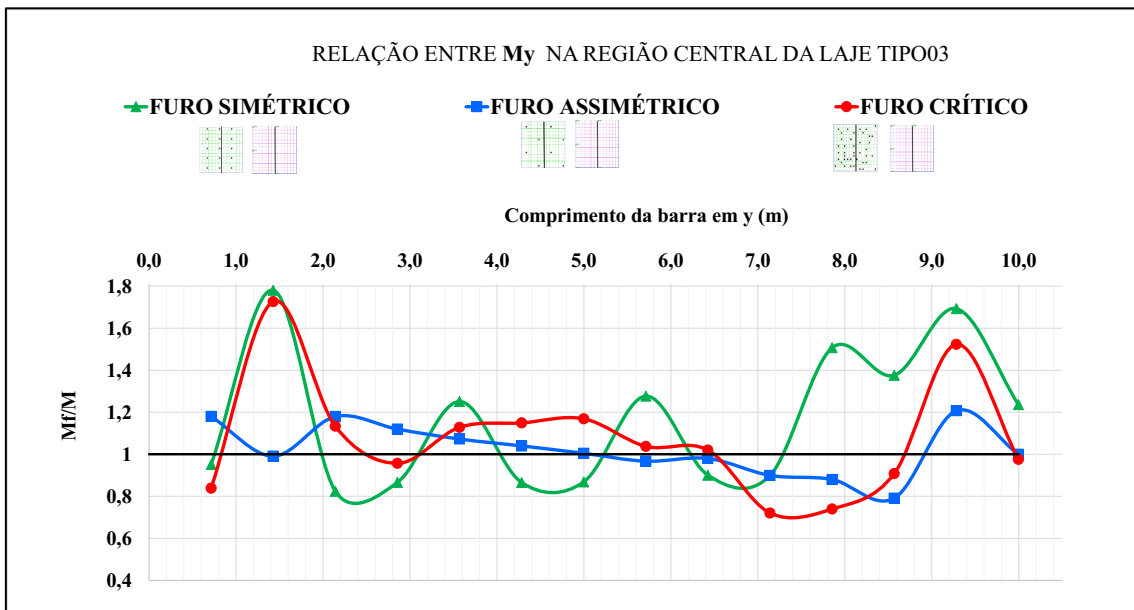
Figura 69: Relação entre momentos fletores em x nas lajes tipo 03



Fonte: Autor (2017)

A relação dos momentos na direção y das lajes tipo 03 apresentam ordens de incrementos menores que a relação dos momentos na direção x, 1,78 na laje de furo simétrico em 1,5m e de 1,72 para a laje de furo crítico na mesma posição. Em relação a laje com furo assimétricos, as análises mostram que o aumento do momento se deu até os primeiros 5,0m do comprimento, apresentando uma diminuição no trecho seguinte. Pode ser visualizada na Figura 70.

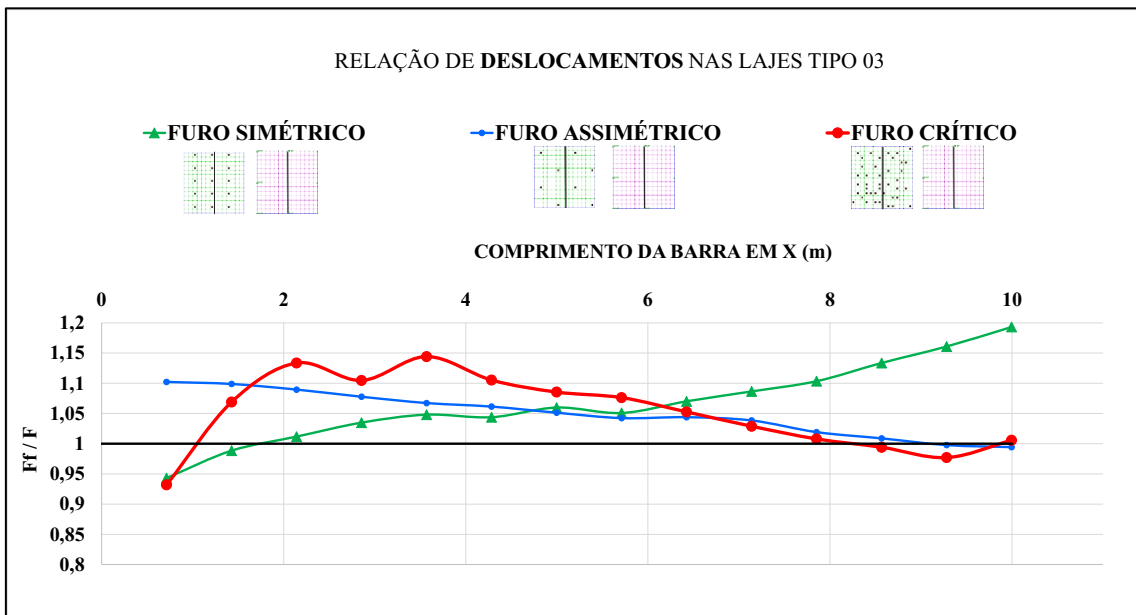
Figura 70: Relação entre momentos fletores em y nas lajes tipo 03



Fonte: Autor (2017)

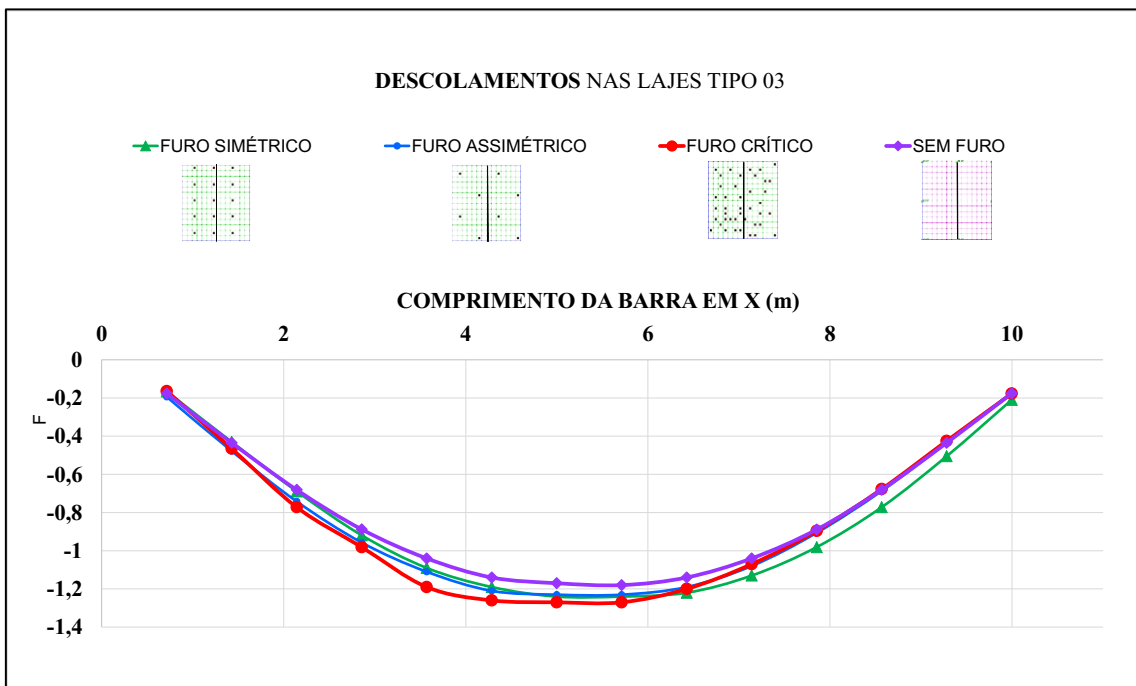
Em relação aos deslocamentos verticais, as análises mostram que a quantidade de furos não interfere diretamente no aumento do deslocamento e sim a posição dos furos. As maiores proporções são verificadas nas lajes com furos simétricos, os quais estão dispostos ao longo da faixa em análise, em que as flechas são 1,2 maiores que a laje sem furo. Analisando a laje com furos críticos as flechas apresentam flechas máximas na ordem de 1,14 maiores que a sem furo em alguns pontos. Relação apresentada na Figura 71 e o comportamento de cada tipo furo na Figura 72.

Figura 71: Relação entre os deslocamentos nas lajes tipo 03



Fonte: Autor (2017)

Figura 72: Flechas das lajes tipo 03

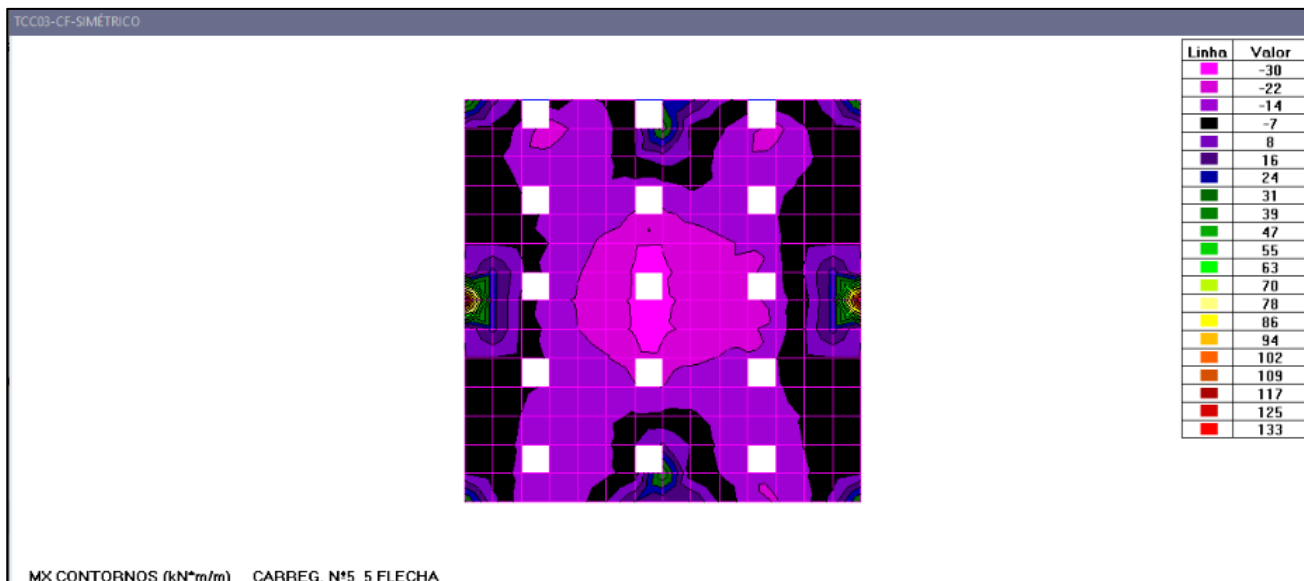


Fonte: Autor (2017)

10.3.1 LAJE TIPO 03 COM FUROS SIMÉTRICOS

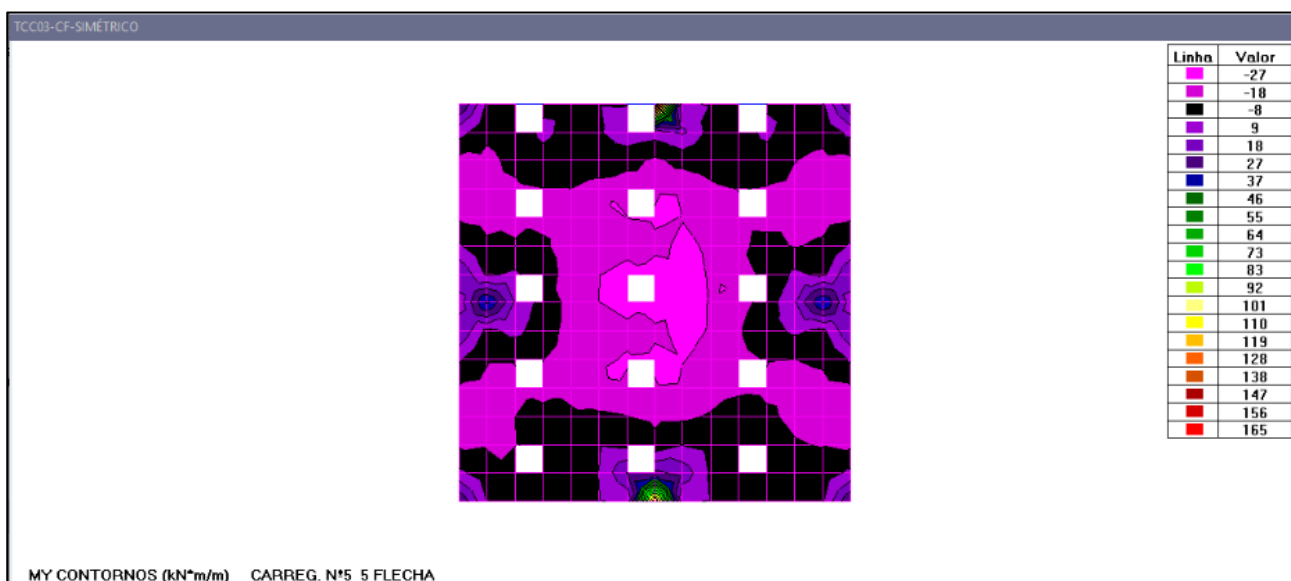
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 30 kN.m/m e 27 kN.m/m, respectivamente, e a distribuição dos momentos estão indicados nas Figuras 73 e 74. A flecha máxima é igual a 1,24cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 75.

Figura 73: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 03 com furos simétricos



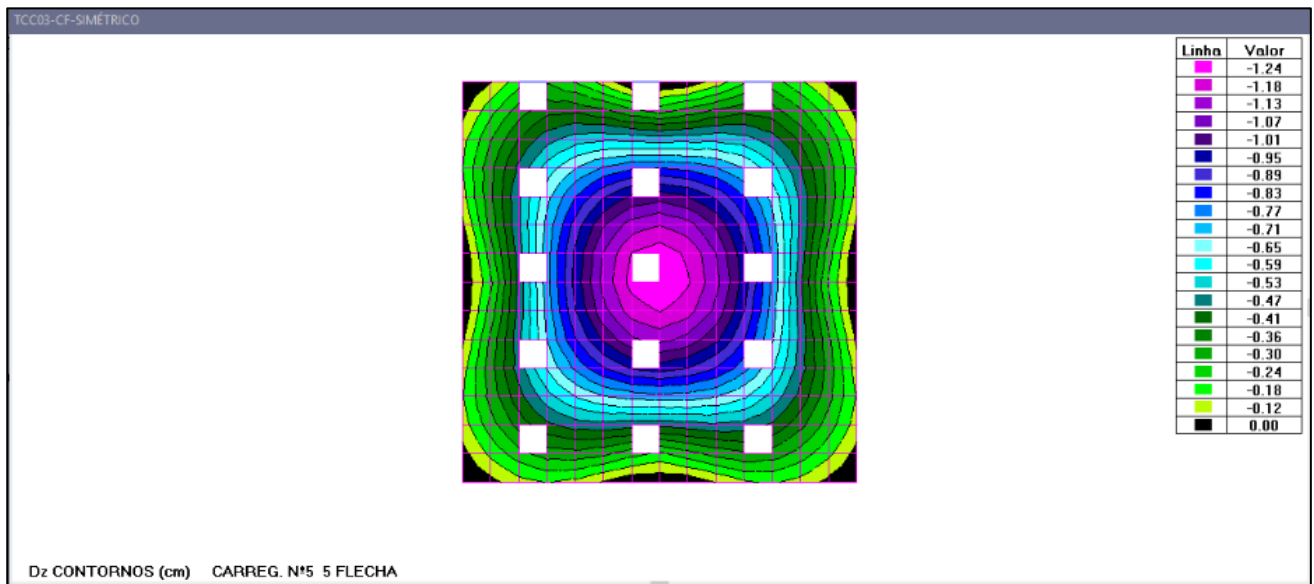
Fonte: Autor (2017)

Figura 74: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 03 com furos simétricos



Fonte: Autor (2017)

Figura 75: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 03 com furos simétricos

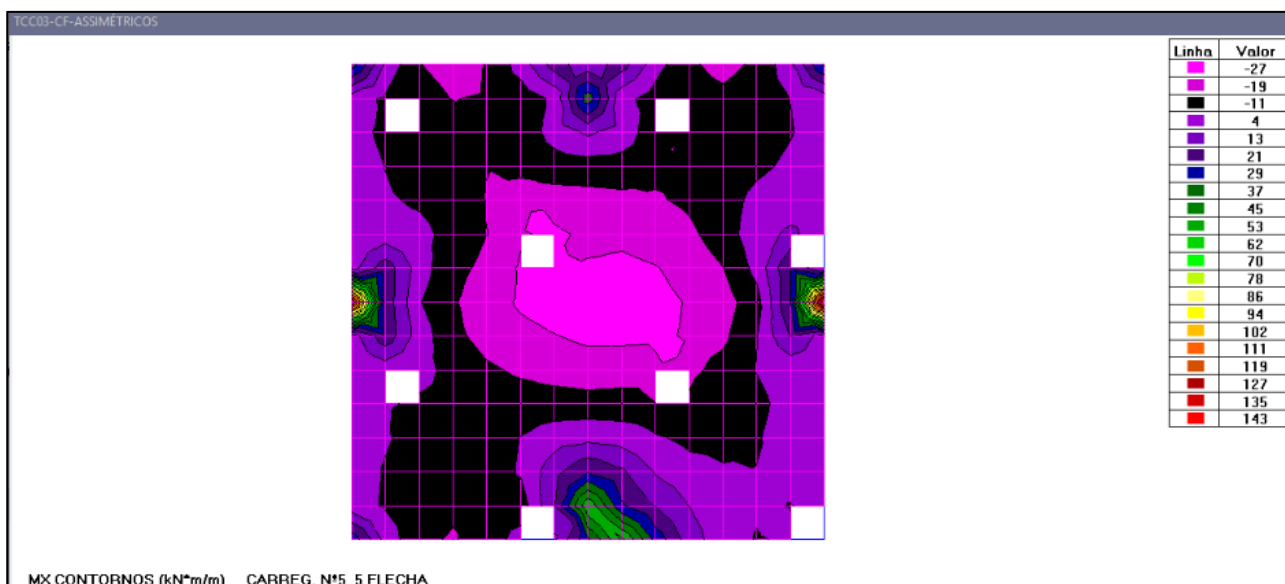


Fonte: Autor (2017)

10.3.2 LAJE TIPO 03 COM FUROS ASSIMÉTRICOS

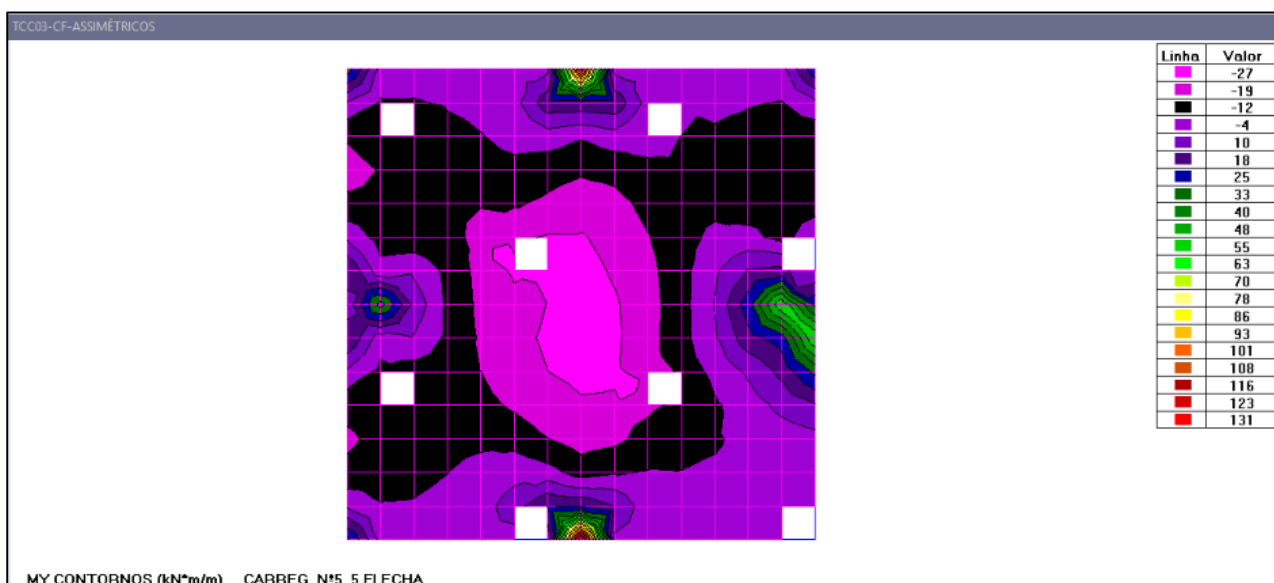
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 27 kN.m/m e 27 kN.m/m, respectivamente, e a distribuição dos momentos estão indicados nas Figuras 76 e 77. A flecha máxima é igual a 1,95cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 78.

Figura 76: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 03 com furos assimétricos



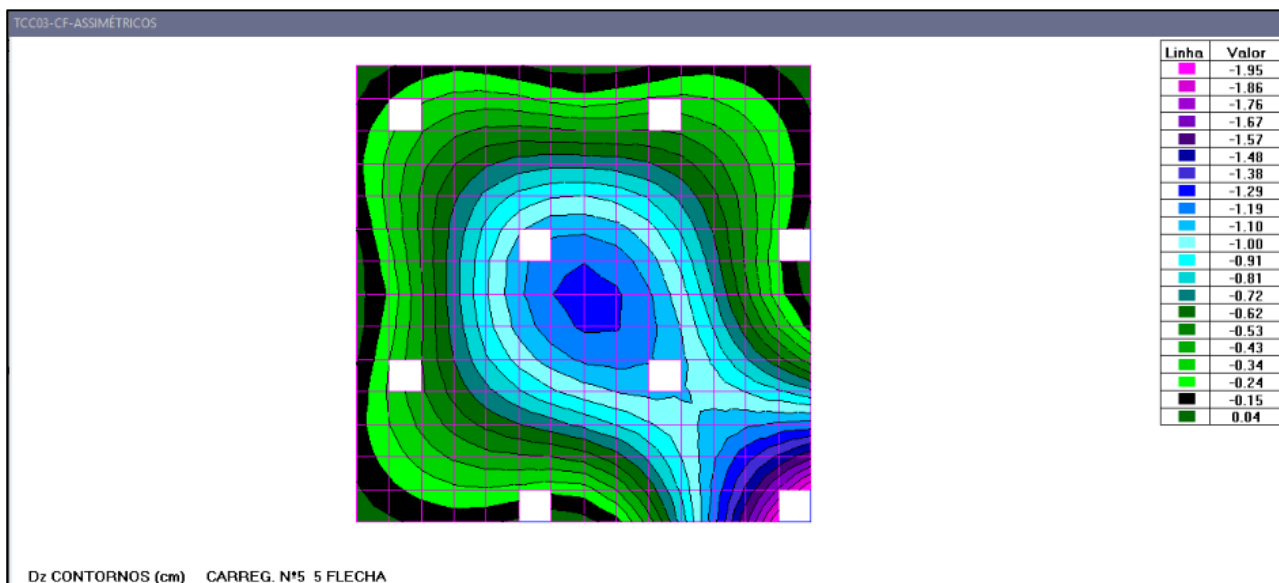
Fonte: Autor (2017)

Figura 77: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 03 com furos assimétricos



Fonte: Autor (2017)

Figura 78: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 03 com furos assimétricos

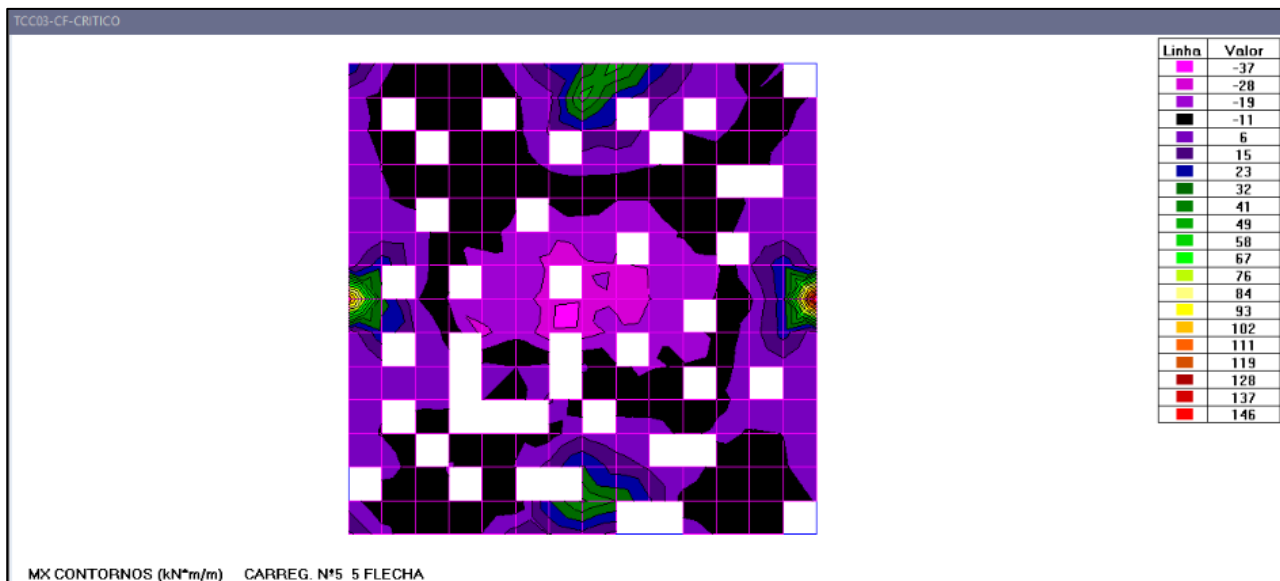


Fonte: Autor (2017)

10.3.3 LAJE TIPO 03 COM FUROS CRÍTICOS

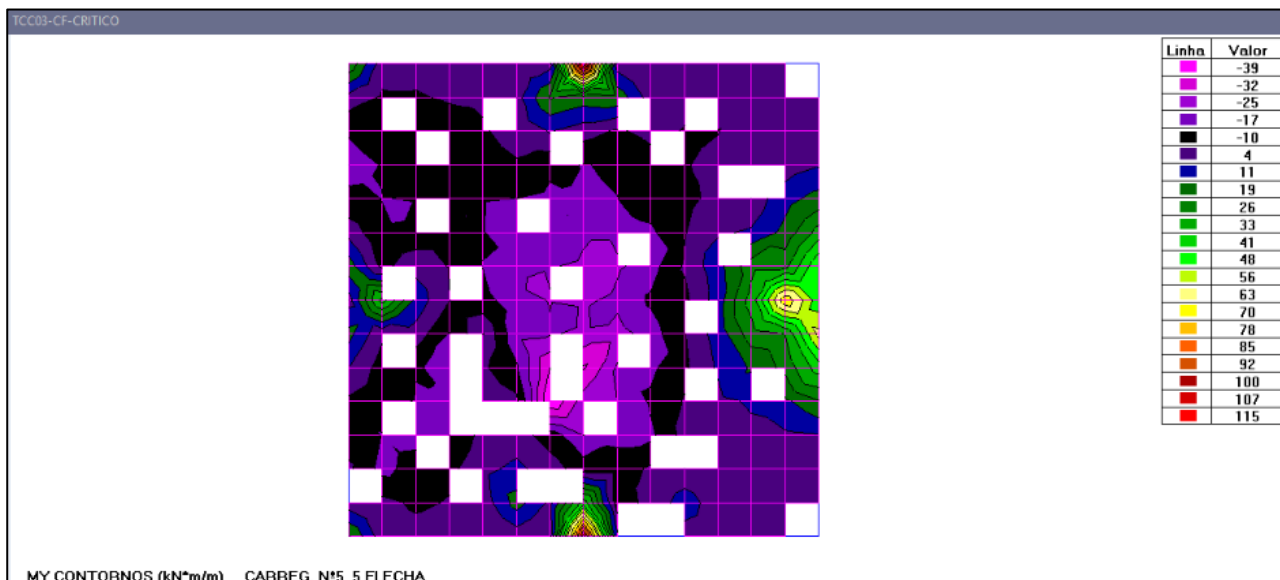
Os momentos fletores máximos nas direções x e y são iguais a 37 kN.m/m e 39 kN.m/m, respectivamente, e a distribuição dos momentos estão indicados nas Figuras 79 e 80. A flecha máxima é igual a 2,10cm, e a distribuição sobre a laje está indicada na Figura 81.

Figura 79: Distribuição dos momentos em x na laje tipo 03 com furos críticos



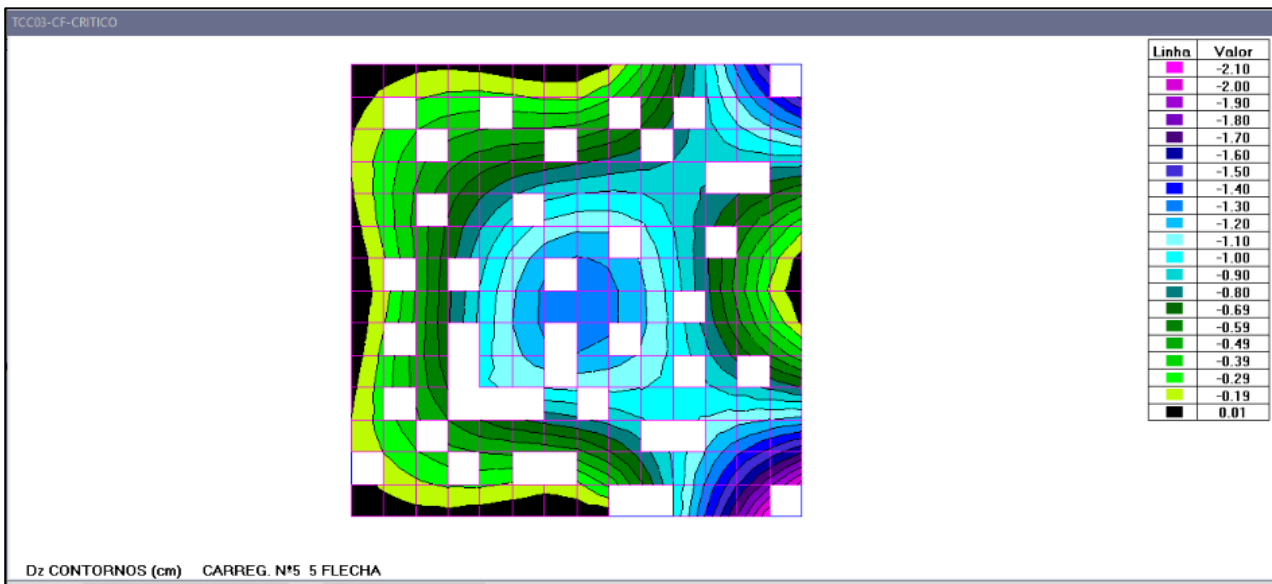
Fonte: Autor (2017)

Figura 80: Distribuição dos momentos em y na laje tipo 03 com furos críticos



Fonte: Autor (2017)

Figura 81: Distribuição dos deslocamentos na laje tipo 03 com furos críticos



Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 09 a seguir indica as razões máximas verificadas nos esforços de flexão e nos deslocamentos verticais das lajes estudadas.

Tabela 9: Razões máximas nos momentos fletores e flechas.

TIPO	FURO	Mx (N.m/m)	Razão máxima momento em x	My (N.m/m)	Razão máxima momento em y	FLECHA (cm)	Razão máxima flecha
01	Sem Furo	0,724	1,80	11,6	1,19	1,04	1,21
	Simétrico	1,31		13,9		1,26	
01	Sem Furo	0,724	1,52	11,6	1,11	1,04	1,21
	Assimétrico	1,10		12,9		1,26	
01	Sem Furo	2,75	1,58	38,5	1,21	1,04	1,18
	Crítico	4,36		46,8		1,23	
02	Sem Furo	0,558	1,84	13,5	1,70	1,22	1,25
	Simétrico	1,03		23,0		1,41	
02	Sem Furo	0,528	1,56	13,5	1,08	2,14	1,03
	Assimétrico	0,824		14,6		2,20	
02	Sem Furo	0,558	2,47	13,5	1,79	2,08	1,04
	Crítico	1,38		24,2		2,18	
03	Sem Furo	1,08	1,60	5,6	1,78	0,176	1,19
	Simétrico	1,73		9,97		0,21	
03	Sem Furo	15,1	1,53	5,6	1,20	0,176	1,10
	Assimétrico	23,2		6,76		0,194	
03	Sem Furo	1,08	2,08	5,60	1,72	1,04	1,14
	Crítico	2,25		9,67		1,19	

Fonte: Autor (2017)

Na laje tipo 01 os resultados indicam que os maiores incrementos nos esforços a flexão ocorrem para os valores na direção de x, onde a laje com furos simétricos apresenta momentos fletores aproximadamente 1,8 vezes maiores que na faixa de análise da laje

sem furo. Nos momentos na direção y, a laje com furo crítico resulta em valores 1,2 maiores que na laje sem furo.

Em relação aos valores das flechas, as análises mostram que as lajes com furo simétrico e assimétrico apresentam incrementos nos seus deslocamentos na ordem de 1,21 maiores que a laje sem furo.

Já nas lajes tipo 02 com furo crítico, os resultados dos momentos na direção x são 2,47 vezes maiores que os resultados da laje sem furo. Conforme os resultados encontrados a diminuição da dimensão da laje, acarretou ao aumento da razão entre os momentos, apresentando maiores incrementos no momento em direção x em comparação com os incrementos para momento em x das lajes tipo 01. Para os momentos na direção y, os incrementos apresentaram valores de até 1,79 vezes maiores que os da laje sem furo.

Em relação as flechas, os resultados obtidos demonstram comportamentos semelhantes ao da laje sem furo, à medida que o incremento de maior valor foi de 1,25, 1,03 e 1,04 respectivamente.

Para as lajes tipo 03 os momentos na direção x apresentaram valores 1,52 vezes maiores que a laje sem furo, apontando na laje com furo crítico momentos 2,08 vezes maior. Na direção y os resultados apontaram ser de até 1,78 vezes maiores.

Para as flechas, as relações de incrementos foram de até 1,19 vezes maiores, indicando que em lajes de pequenas dimensões a inclusão de furos não resultam em maiores flechas.

10.4 COMPARAÇÕES

Nesta seção será apresentado os resultados comparativos entre os momentos fletores nas direções x e y e o deslocamento dos três tipos de laje (01, 02 e 03) separadas pelos tipos de furos que foram submetidas.

Será abordado primeiramente, as comparações entre momentos fletores na direção x que estão na faixa adotada, e indicada na legenda dos gráficos, para análise, obtendo 4 gráficos:

- Momentos fletores na direção x das lajes sem furo tipo 01, 02 e 03.
- Momentos fletores na direção x das lajes com furos simétricos tipo 01, 02 e 03.
- Momentos fletores na direção x das lajes com furos assimétricos tipo 01, 02 e 03.
- Momentos fletores na direção x das lajes com furos críticos tipo 01, 02 e 03.

Logo, entra na etapa de comparação entre os momentos fletores na direção y que estão na faixa adotada, e indicada na legenda dos gráficos, para análise, obtendo 4 gráficos:

- Momentos fletores na direção y das lajes sem furo tipo 01, 02 e 03.
- Momentos fletores na direção y das lajes com furos simétricos tipo 01, 02 e 03.
- Momentos fletores na direção y das lajes com furos assimétricos tipo 01, 02 e 03.
- Momentos fletores na direção y das lajes com furos críticos tipo 01, 02 e 03.

E por fim, a visualização dos resultados encontrados, para o deslocamento resultante da atribuição das cargas consideradas, na faixa adotada, e indicada na legenda dos gráficos, para análise, obtendo 4 gráficos:

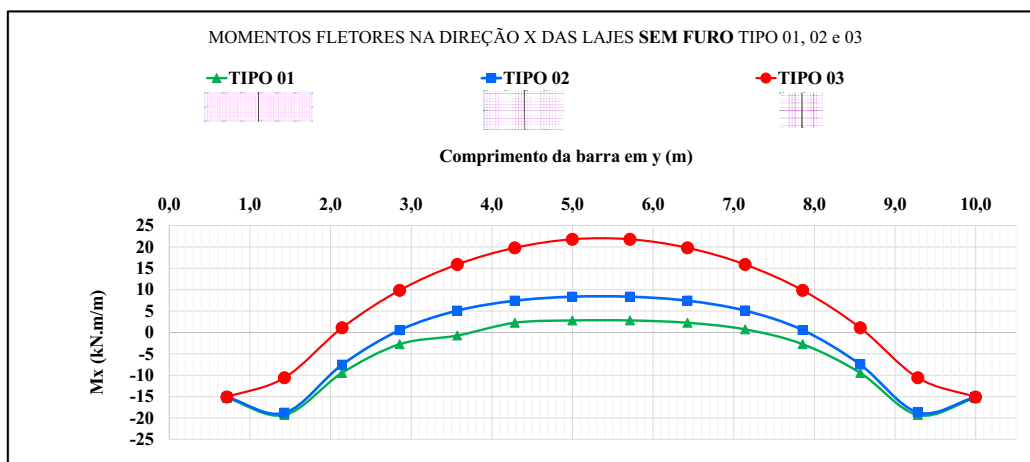
- Deslocamentos das lajes sem furo tipo 01, 02 e 03.
- Deslocamentos das lajes com furos simétricos tipo 01, 02 e 03.
- Deslocamentos das lajes com furos assimétricos tipo 01, 02 e 03.
- Deslocamentos das lajes com furos críticos tipo 01, 02 e 03.

10.4.1 MOMENTOS FLETORES NA DIREÇÃO X

Os resultados aqui apresentados, representa a relação do momento fletor na direção x, onde inicialmente se pode verificar as intensidades dos momentos que a faixa adotada de nervuras, está submetida.

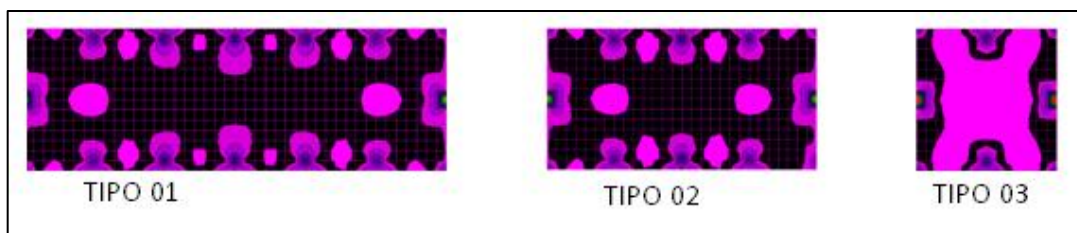
Nas lajes sem furo, nota-se que a laje tipo 03 está submetida aos maiores momentos na direção x, como indicado na Figura 82, apresentando 21,8 kN.m/m, 99% do seu valor de momento máximo. Este comportamento se dá por consequência da dimensão simétrica da laje, logo, seus maiores momentos se encontram no centro geométrico da mesma. Conclui-se que, na faixa central simétrica de nervuras adotada, a laje tipo 01 apresenta 18,7% do seu momento fletor máximo na direção x e a laje tipo 02 apresenta 59,7% do seu momento máximo, ao passo que nas lajes tipo 01 e 02, os momentos mais críticos são dispersos do seu centro geométrico, como pode ser notado no esquema da Figura 83.

Figura 82: Momento fletor na direção x das lajes sem furo tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

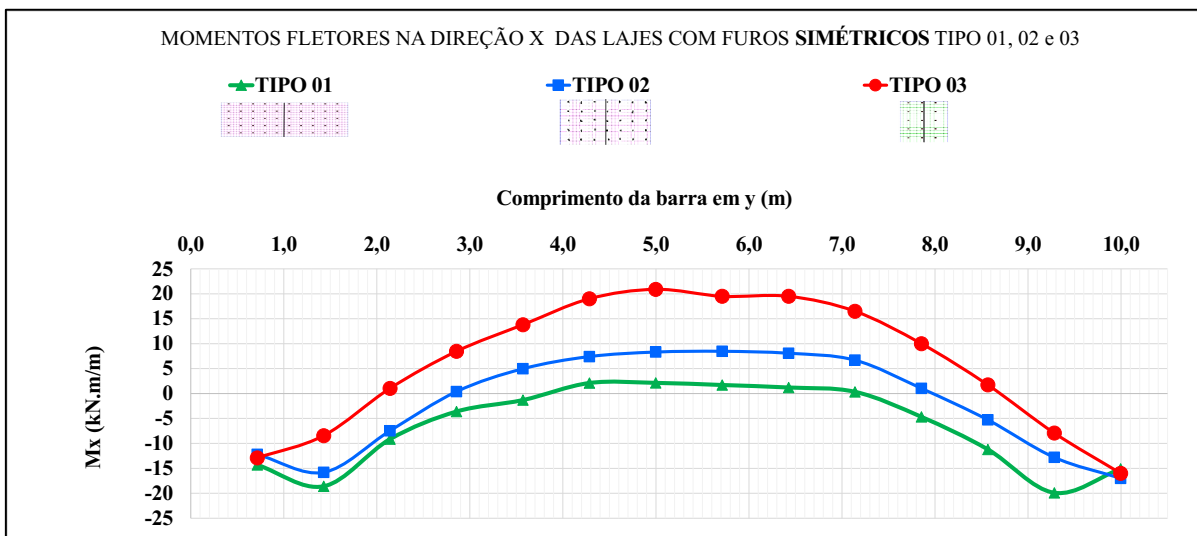
Figura 83: Esquema de visualização do comportamento do Mx nas lajes sem furo



Fonte: Autor (2017)

Logo, nas lajes com furos posicionados simetricamente, a laje tipo 03 ainda apresenta maiores momentos em relação a laje tipo 01 e 02, como pode ser visto na Figura 84, porém observa uma diminuição de 30% na intensidade do momento máximo da laje tipo 03, o qual era de 99% na laje sem furo. Nas lajes tipo 01 e 02, observa-se uma diminuição da intensidade, sendo representados por 10,2% e 39,6% respectivamente, de seus valores máximos. Observa-se no esquema da Figura 85 um início de distribuição dos momentos ao longo do centro da laje em função da introdução dos furos.

Figura 84: Momento fletor na direção x das lajes com furo simétricos tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

Figura 85: Esquema de visualização do comportamento do Mx nas lajes com furos simétricos

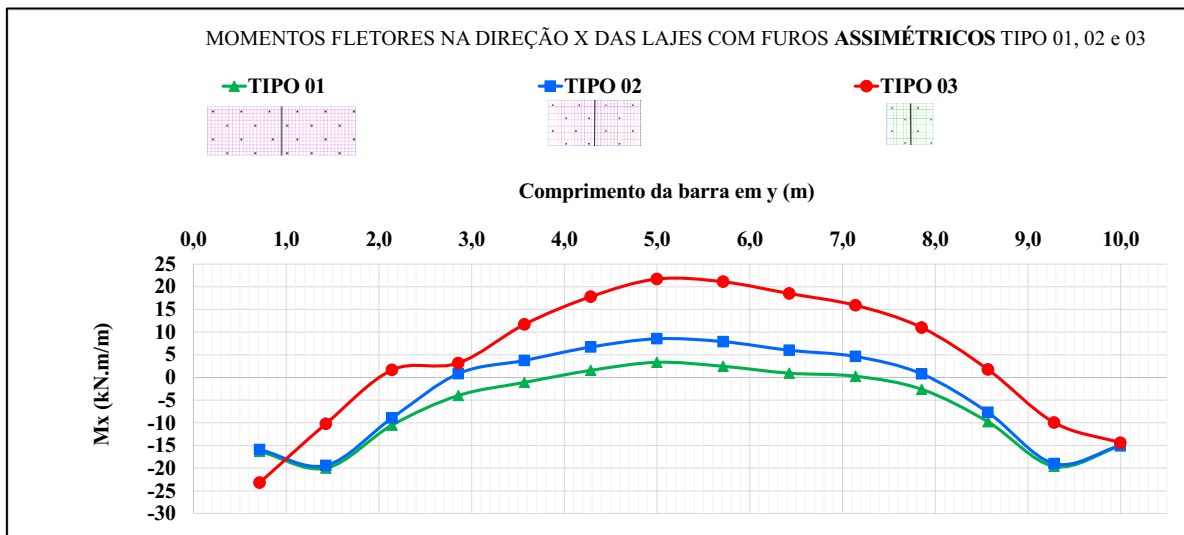


Fonte: Autor (2017)

Na análise da Figura 86, conclui-se que na faixa de nervuras centrais das lajes o momento fletor na direção x é representado por 18,5%, 47,5% e 80,4% dos seus

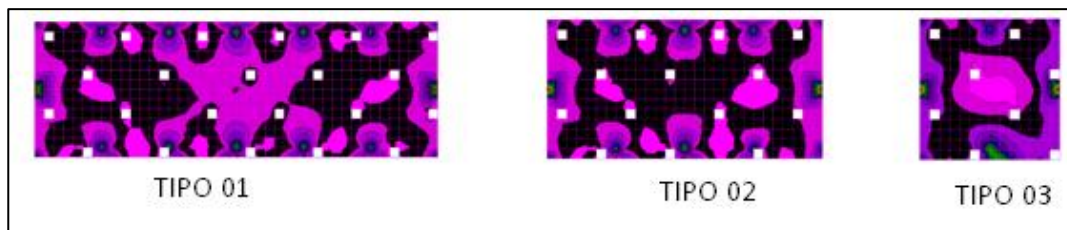
momentos fletores máximos, respectivamente. Apresentando essas alterações nos comportamentos da distribuição de momento na Figura 87.

Figura 86: Momento fletor na direção x das lajes com furo assimétricos tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

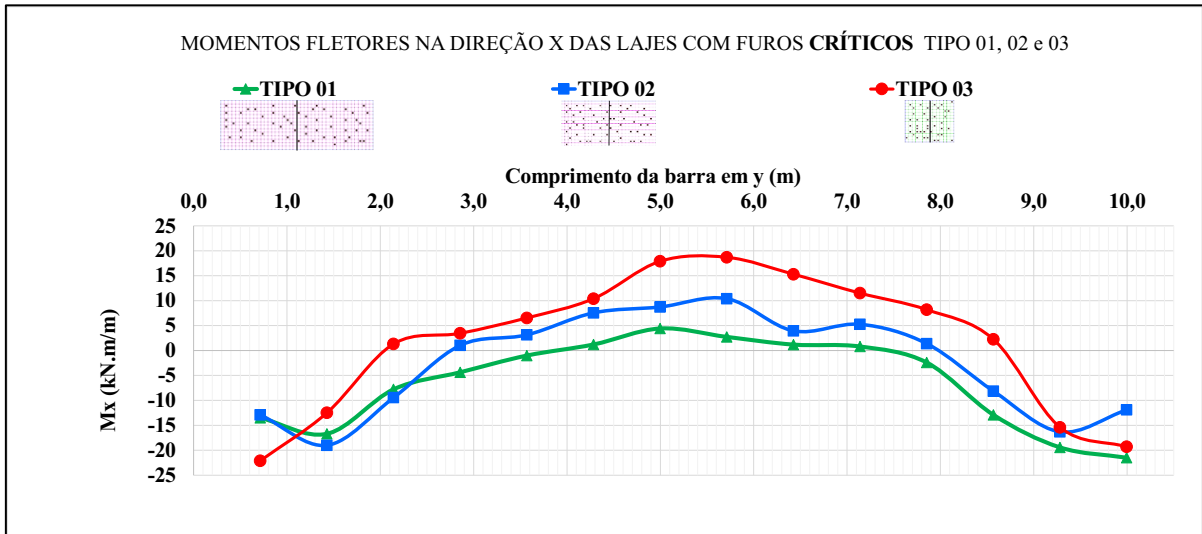
Figura 87: Esquema de visualização do comportamento do Mx nas lajes com furos assimétricos



Fonte: Autor (2017)

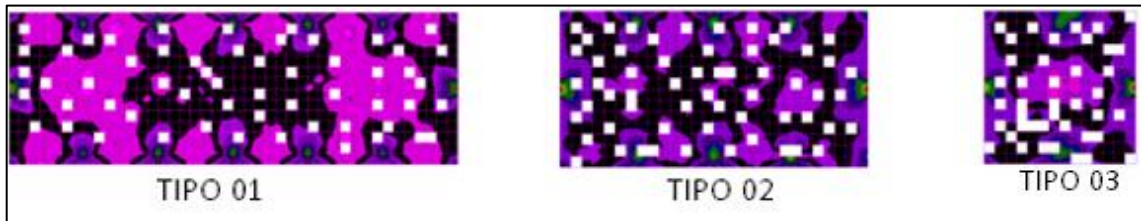
Em relação aos furos críticos, apresentam uma distribuição de momentos na faixa de nervuras analisadas em ordens menores que as constatadas nos casos anteriores. Exibindo uma 23%, 33% e 50,5% de seus momentos máximos. Os comportamentos das lajes tipo 02 e 03 passam a ter o mesmo comportamento devido à quantidade de furos presentes, como mostrado na Figura 88.

Figura 88: Momento fletor na direção x das lajes com furos críticos tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

Figura 89: Esquema de visualização do comportamento do Mx nas lajes com furos críticos



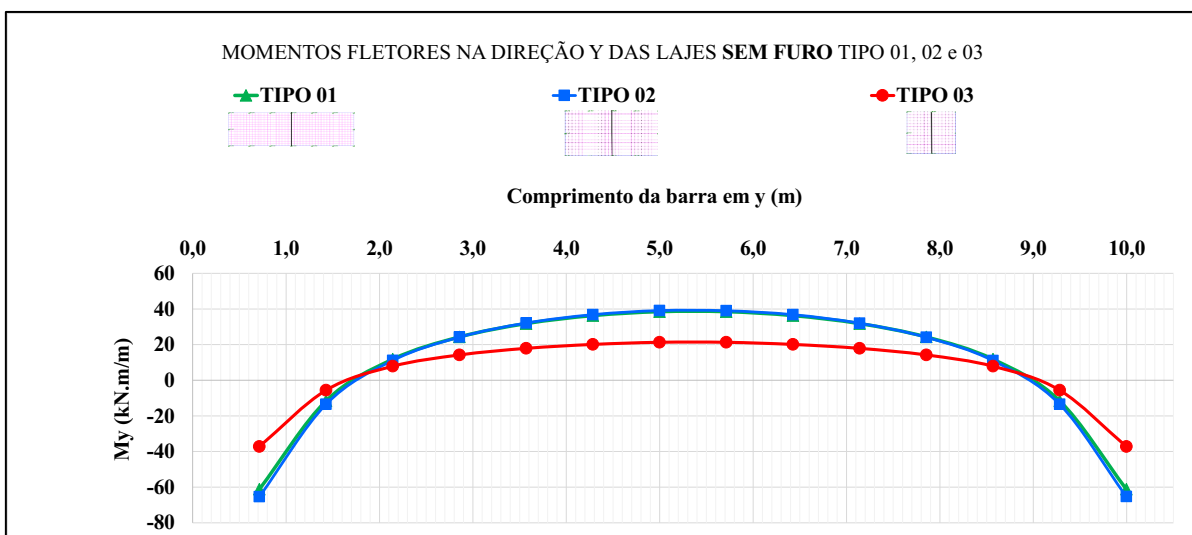
Fonte: Autor (2017)

10.4.2 MOMENTOS FLETORES NA DIREÇÃO Y

Os resultados aqui apresentados, representa a relação do momento fletor na direção y, onde inicialmente se pode verificar as intensidades dos momentos que a faixa adotada, está submetida.

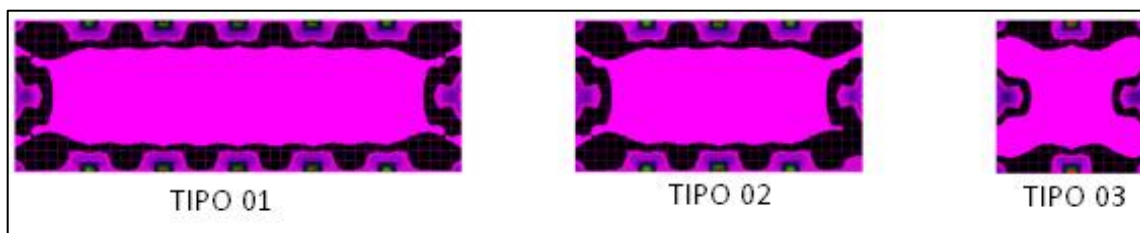
Nas lajes sem furo, nota-se, ao contrário dos momentos na direção x, que a laje tipo 01 e 02 apresentam intensidades maiores que a laje do tipo 03, valores máximos próximos de 38 e 39 kN.m/m no centro da barra, visualizado na Figura 90, enquanto na laje tipo 03 o valor chega a ser 21,3 kN.m/m, ou seja, aproximadamente 45,5% inferior. Conclui-se que todas as lajes apresentam seus momentos acima de 97% de seus momentos máximos. A representação do comportamento dos momentos, para melhor interpretação, segue na Figura 91.

Figura 90: Momento fletor na direção y das lajes sem furo tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

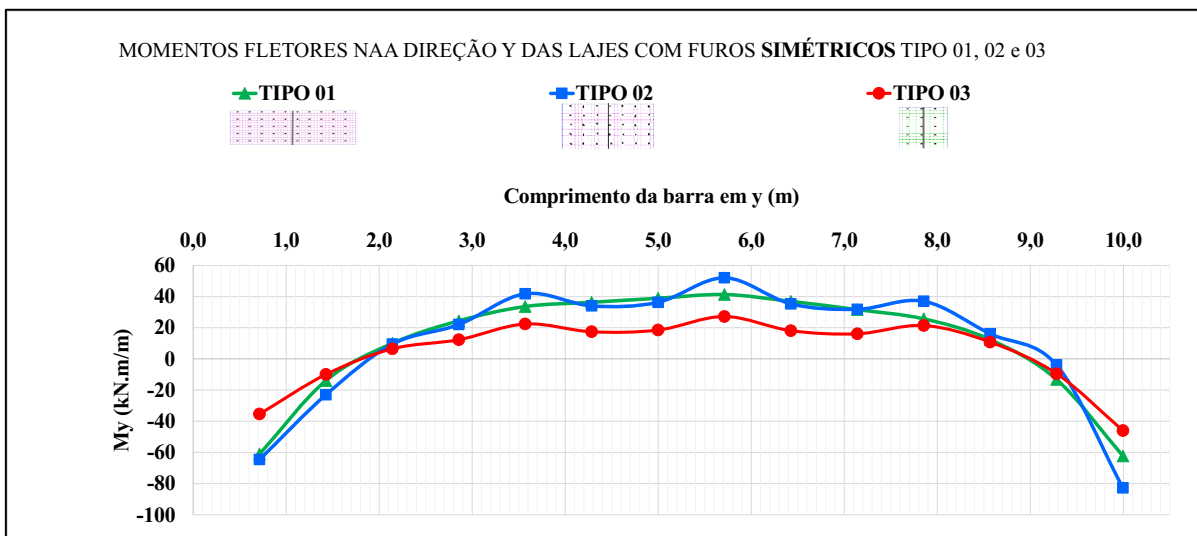
Figura 91: Esquema de visualização do comportamento do My nas lajes sem furo



Fonte: Autor (2017)

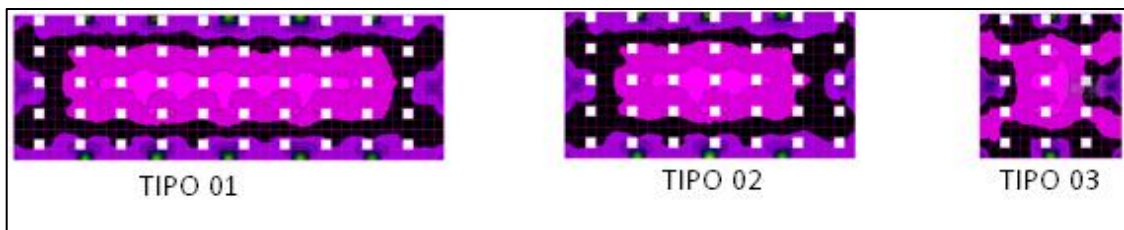
Para as lajes com furos em posições simétricas, os momentos na direção y apresentaram um comportamento com poucas variações, mantendo próximos os resultados. Foi observado que existiu uma variação constante de aproximadamente 20% entre a laje tipo 01 com a laje tipo 02 nos comprimentos 3,5m e 7,8m, além de apresentar uma variação em torno de 34% entre a laje tipo 01 e laje tipo 03 nos mesmos comprimentos. Os resultados são apresentados na Figura 92 e o esquema de distribuição para os furos simétricos do momento na direção y na Figura 91.

Figura 92: Momento fletor na direção y das lajes com furos simétricos tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

Figura 93: Esquema de visualização do comportamento do My nas lajes com furos simétricos

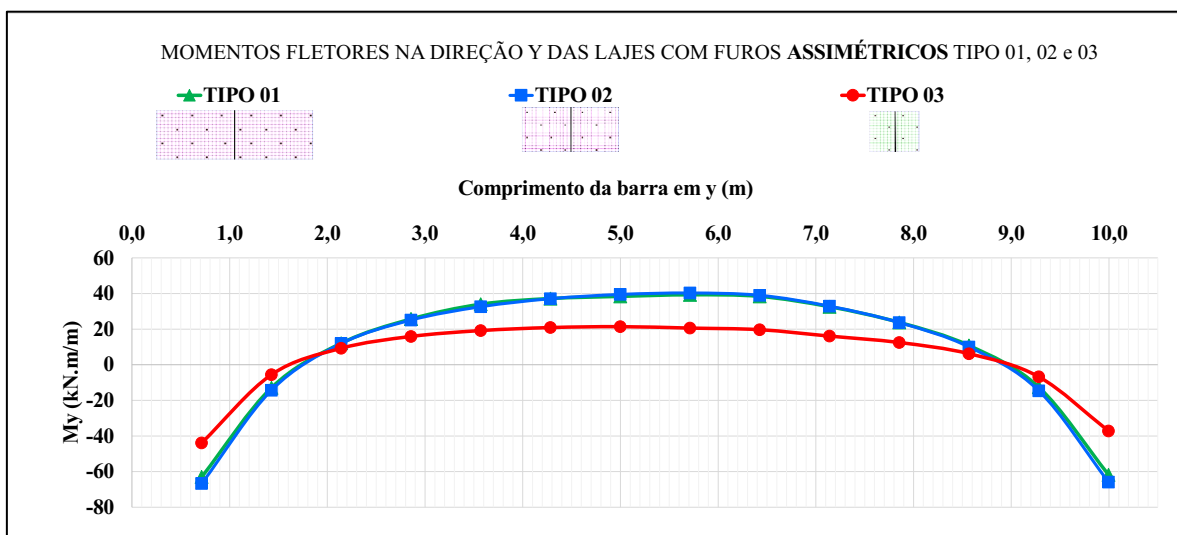


Fonte: Autor (2017)

Nas lajes com furos em posição assimétrica, os resultados apresentam 84% dos valores de seus momentos máximos na faixa adotada para análise, como pode ser visualizado na

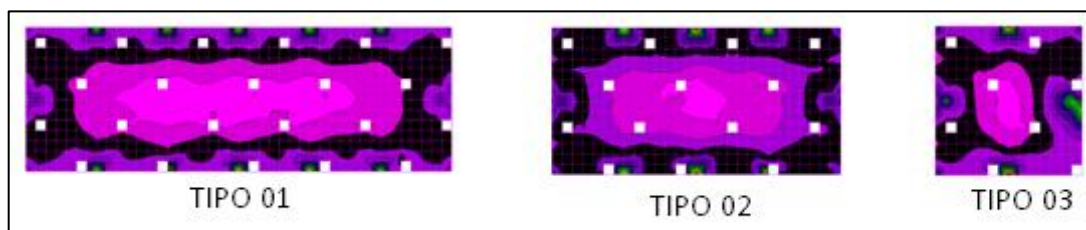
Figura 94. Porém é observado na Figura 95 um comportamento mais distribuído dos momentos ao longo das lajes tipo 02 e 03.

Figura 94: Momento fletor na direção y das lajes com furos assimétricos tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

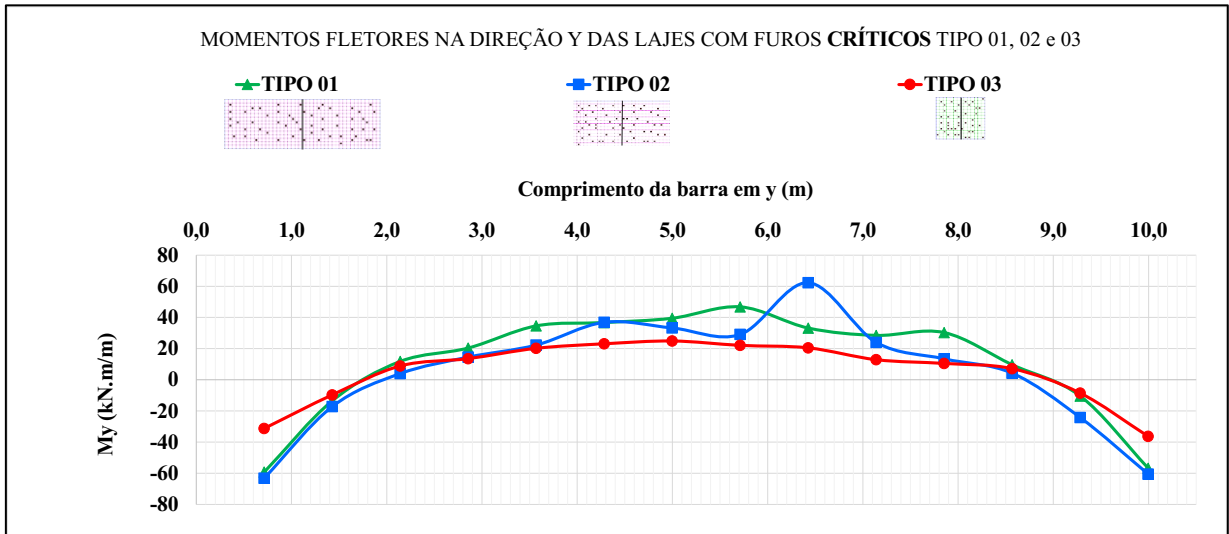
Figura 95: Esquema de visualização do comportamento do My nas lajes com furos assimétricos



Fonte: Autor (2017)

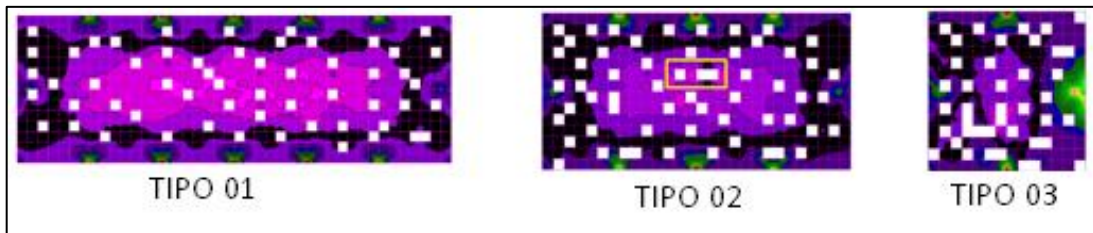
Por fim, nas lajes com furos críticos notou uma uniformidade nos resultados ao longo do comprimento total da barra adotada como padrão de análise, admitindo valores acima de 95% de seus valores máximos de momento. Um aumento no valor da laje do tipo 02 em 6,2m se deu por conta da não regularidade na locação dos furos de posição crítica, logo, constatou a presença de 2 (dois) furos seguidos acarretando ao pico observado na Figura 96. Também pode se verificar observando a distribuição de momentos na Figura 97.

Figura 96: Momento fletor na direção y das lajes com furos críticos tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

Figura 97: Esquema de visualização do comportamento do My nas lajes com furos críticos



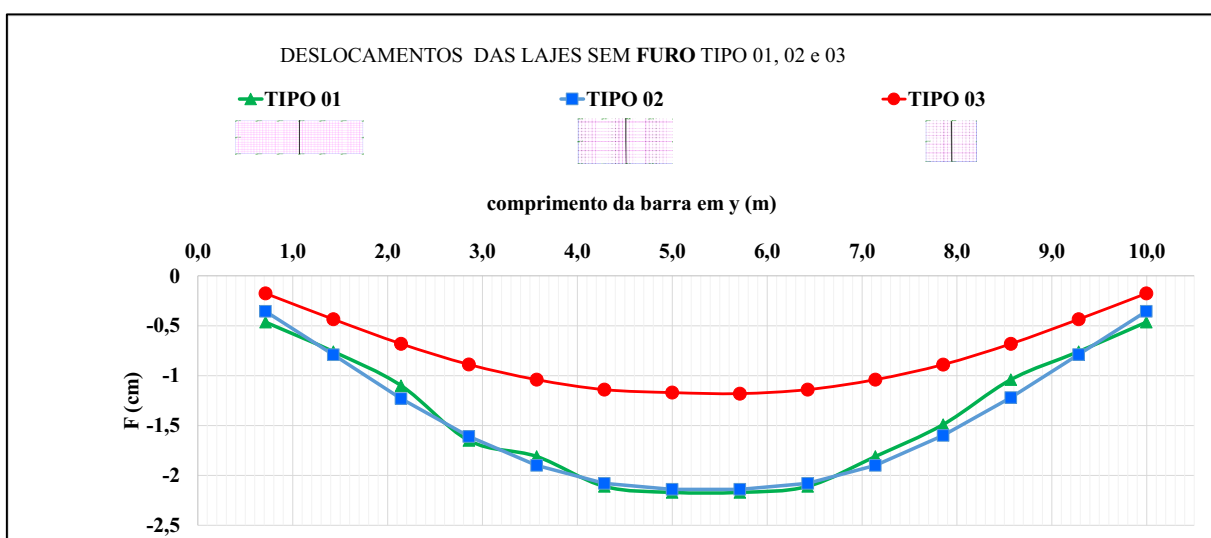
Fonte: Autor (2017)

10.4.3 DESLOCAMENTOS

Os resultados aqui apresentados representa a relação dos deslocamentos, onde inicialmente se pode visualizar a intensidade das flechas na faixa adotada para análise está submetida.

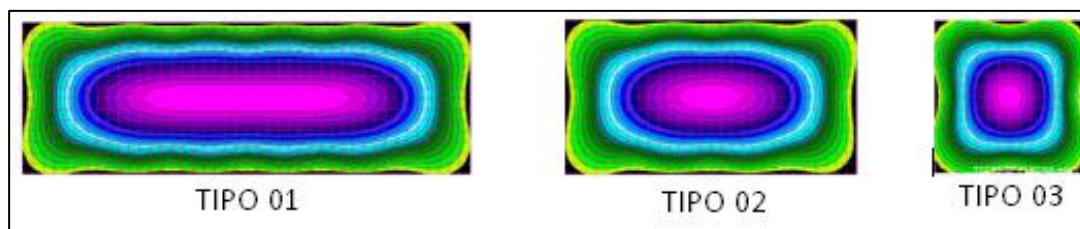
Primeiramente, a laje sem furo tipo 03 foi analisada e apresentou deformação máxima de 1,17cm, enquanto a laje tipo 01 e tipo 02 apresentaram 2,17 e 2,14cm, respectivamente, podendo ser visualizado na Figura 98 e na Figura 99 a distribuição do deslocamento ao longo de cada laje.

Figura 98: Deslocamentos das lajes sem furo tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

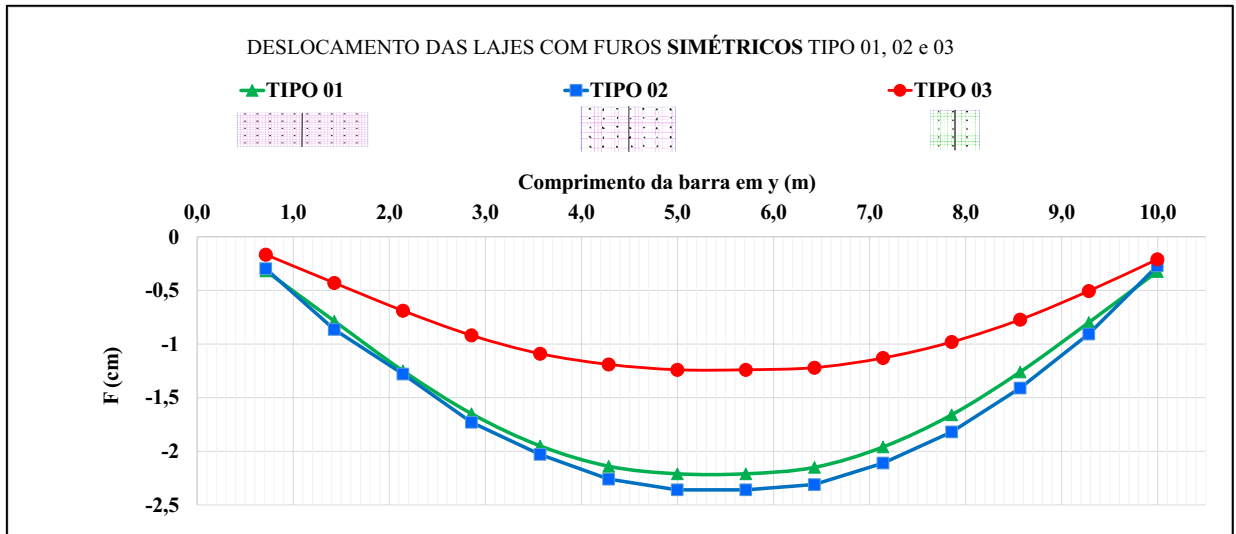
Figura 99: Esquema de visualização do comportamento do deslocamento nas lajes sem furo



Fonte: Autor (2017)

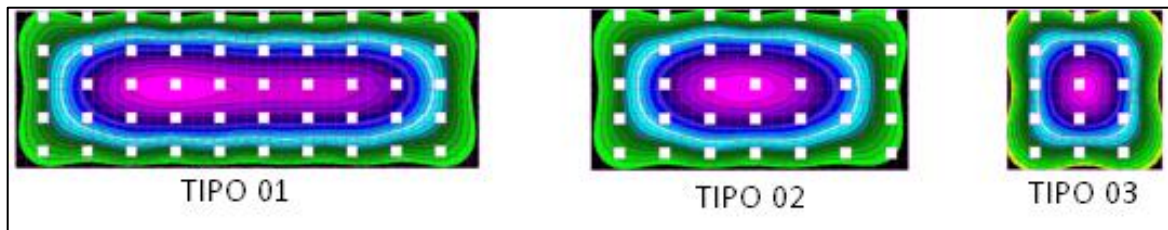
Nas lajes com furos simétricos o comportamento e a uniformidade das lajes se mantiveram similares com o comportamento das lajes sem furo, porém houve um acréscimo de 1,8% no deslocamento da laje tipo 01, 9,3% na laje tipo 02 e 5,6% na laje tipo 03. Apresentando 2,21cm, 2,36cm e 1,24 cm de deslocamento respectivamente, observado na Figura 100. A distribuição dos deslocamentos é observada na Figura 101.

Figura 100: Deslocamento das lajes com furos simétricos tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

Figura 101: Esquema de visualização do comportamento do deslocamento nas lajes com furo simétricos

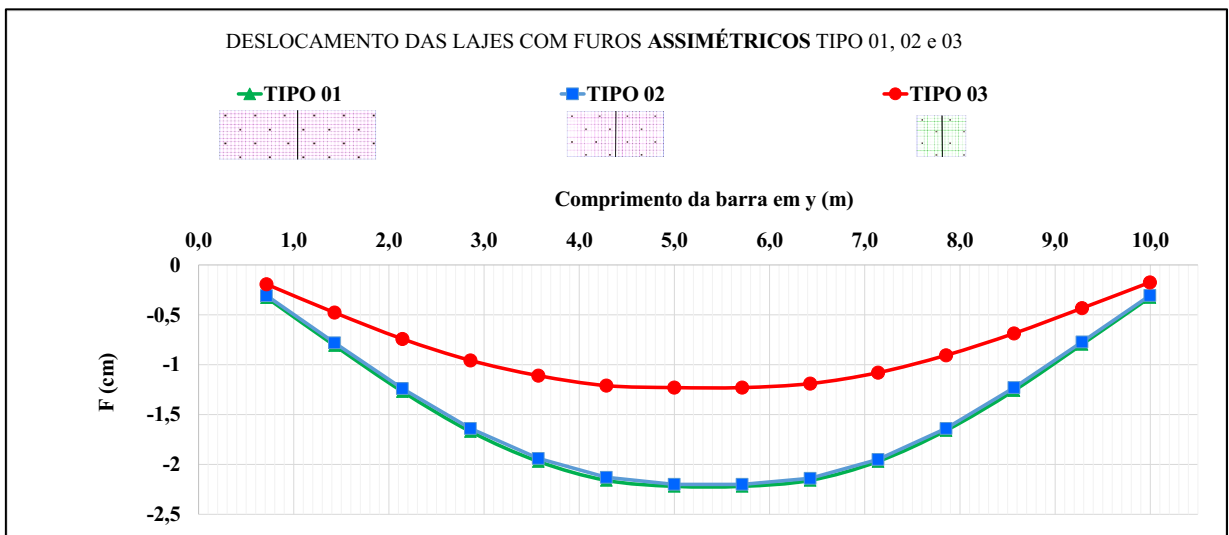


Fonte: Autor (2017)

Nas lajes com furos assimétricos o comportamento e uniformidade das lajes se mantiveram similares com o comportamento das lajes sem furo, porém houve um acréscimo de menor proporção em relação às lajes com furos simétrico, apresentando 1,8% para a laje tipo 01, 2,7% para o tipo 02 e 4,9% no tipo 03, o que representa em deslocamentos máximos de 2,21cm, 2,20cm e 1,23cm, respectivamente observadas na Figura 102.

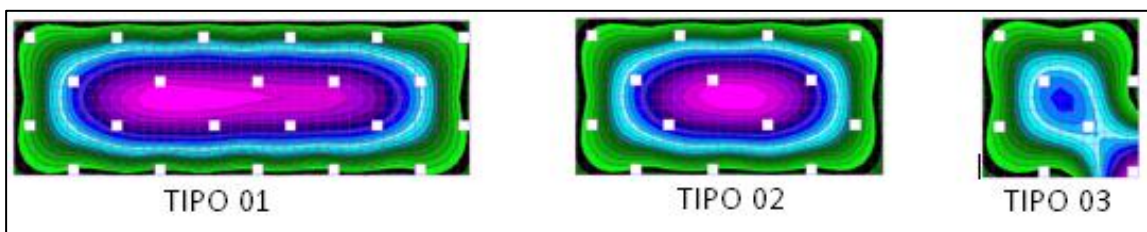
É interessante observar que a distribuição do deslocamento da laje tipo 03 começa a escoar do centro geométrico, levando sua flecha máxima em função da distribuição dos furos, indicado na Figura 103.

Figura 102: Deslocamentos das lajes com furos assimétricos tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

Figura 103: Esquema de visualização do comportamento do deslocamento nas lajes com furos assimétricos



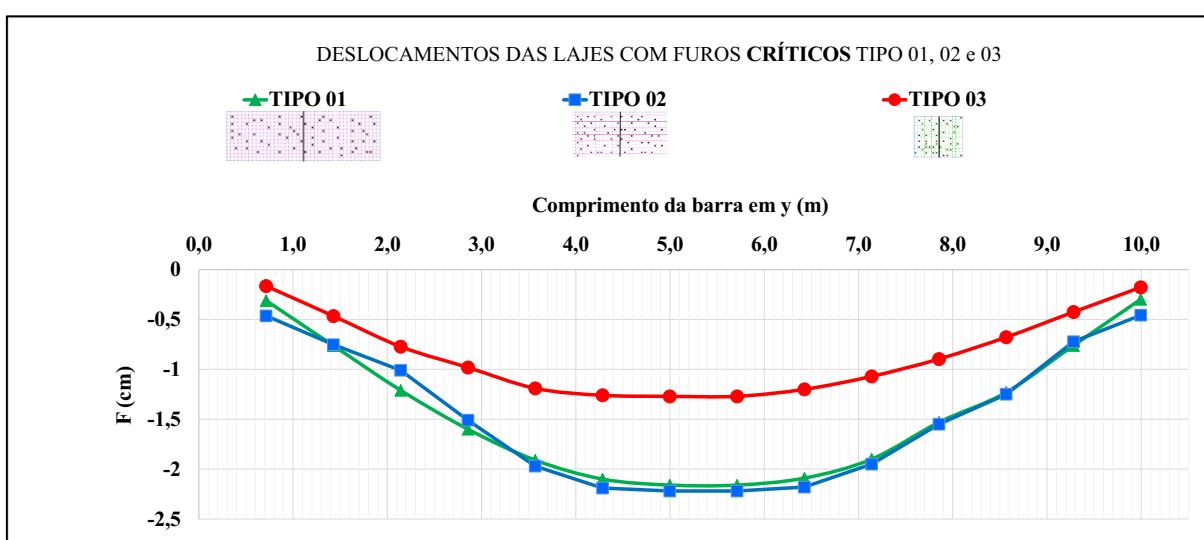
Fonte: Autor (2017)

Por fim, nas lajes com furos críticos o comportamento apresentou as menores porcentagens em relação à laje sem furo, indicando que, a presença de furos em grandes quantidades não interfere diretamente no deslocamento das peças estruturais em estudo.

Analiticamente a laje com furo crítico apresentou o acréscimo de 0,8%, 3,6% e 7,9% nas lajes tipo 01, 02 e 03 respectivamente. Onde os deslocamentos máximos são na ordem de 2,18cm, 2,22cm e 1,27cm para a laje tipo 01, 02 e 03.

Novamente, vale a atenção para o comportamento do deslocamento da laje tipo 03, por apresentar um escoamento fora do seu eixo geométrico ao passo que as demais mantêm o comportamento em todos os acréscimos de furos.

Figura 104: Deslocamentos das lajes com furos críticos tipo 01, 02 e 03



Fonte: Autor (2017)

Figura 105: Esquema de visualização do comportamento do deslocamento nas lajes com furos críticos



Fonte: Autor (2017)

A Tabela 10 apresentada a seguir indica os valores proporcionais de momentos e deslocamentos máximos encontrados na faixa de nervuras adotada em relação aos seus momentos e deslocamentos máximos distribuídos ao longo de toda a extensão das lajes.

Tabela 10: Porcentagem de valores máximos localizados na faixa de nervuras em análise.

MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO X				
TIPO	FURO	Valor máximo na faixa adotada [kN.m/m]	Valor máximo [kN.m/m]	Valor proporcional
01	SEM FURO	2,81	15,00	18,7%
02	SEM FURO	8,36	14,00	59,7%
03	SEM FURO	22,00	22,00	100%
01	SIMÉTRICO	2,14	21,00	10,2%
02	SIMÉTRICO	8,32	21,00	39,6%
03	SIMÉTRICO	20,90	30,00	69,6%
01	ASSIMÉTRICO	3,34	18,00	18,5%
02	ASSIMÉTRICO	8,53	18,00	46,4%
03	ASSIMÉTRICO	21,70	27,00	80,4%
01	CRITICO	4,42	19,00	23,3%
02	CRITICO	10,40	31,00	33,6%
03	CRITICO	18,70	37,00	50,5%
MOMENTO FLETOR NA DIREÇÃO Y				
TIPO	FURO	Valor máximo na faixa adotada [kN.m/m]	Valor máximo [kN.m/m]	Valor proporcional
01	SEM FURO	38,50	39,00	99,9%
02	SEM FURO	39,00	39,00	100%
03	SEM FURO	22,00	22,00	100%
01	SIMÉTRICO	41,30	50,00	82,6%
02	SIMÉTRICO	52,00	52,00	100%
03	SIMÉTRICO	27,00	27,00	100%
01	ASSIMÉTRICO	39,30	48,00	81,8%
02	ASSIMÉTRICO	40,30	48,00	83,9%
03	ASSIMÉTRICO	21,40	27,00	79,2%
01	CRITICO	46,80	49,00	95,5%
02	CRITICO	61,90	62,00	99,8%
03	CRITICO	24,90	39,00	63,8%
DESLOCAMENTOS				
TIPO	FURO	Valor máximo na faixa adotada [kN.m/m]	Valor máximo [kN.m/m]	Valor proporcional
01	SEM FURO	2,17	2,17	100%
02	SEM FURO	2,14	2,15	99,5%
03	SEM FURO	1,17	1,18	99,1%
01	SIMÉTRICO	2,21	2,34	94,4%
02	SIMÉTRICO	2,34	2,34	100%
03	SIMÉTRICO	1,24	1,24	100%
01	ASSIMÉTRICO	2,22	2,29	96,9%
02	ASSIMÉTRICO	2,20	2,20	100%
03	ASSIMÉTRICO	1,23	1,95	63,1%
01	CRITICO	2,16	2,19	98,6%
02	CRITICO	2,22	2,22	100%
03	CRITICO	1,27	2,10	60,4%

Fonte: Autor (2017)

11 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise e verificação das solicitações em lajes com furos é imprescindível. Através dos resultados obtidos neste estudo permitem concluir que a distribuição de esforços se altera significativamente com o acréscimo de furos, majorando momentos e deslocamentos verticais nas lajes.

Para as lajes tipo 01, no caso mais crítico, as lajes com furos simétricos apresentaram momentos fletores na direção x maiores que aqueles encontrados na laje sem furo, enquanto para os momentos na direção y as lajes com disposição de furos críticos apresentaram valores de maior proporção. Os resultados mais críticos para a laje tipo 01 em relação ao deslocamento vertical se deu nas lajes com furos simétricos e assimétricos, influenciando na conclusão que o aumento na quantidade de furos não interfere no comportamento dos deslocamentos da laje.

Para as lajes tipo 02 em ambas as direções de momentos apresentaram valores maiores que os obtidos na laje tipo 01. Já para as lajes do tipo 03, o caso de maior ordem, se deu também nas lajes com furo críticos obtendo o dobro dos resultados encontrados na laje sem furos. Em relação às flechas o aumento não apresentou muita diferença entre as lajes estudadas.

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.

Na revisão bibliográfica constatou que os casos de lajes com aberturas de furos se restringem muito tanto para o tipo de laje quanto ao número e disposição dos furos nela alocados. Em soma, conclui-se que a análise de lajes nervuradas é submetida a uma série de simplificações, geralmente, voltados para a laje maciça, o que justifica a realização deste trabalho. A medida que as lajes nervuradas têm sido cada vez mais utilizadas na construção civil, sendo assim, importante aumentar o leque de conhecimento sobre este tipo de estrutura.

Em estudos futuros sugere-se que, as lajes nervuradas com aberturas de furos ao longo de seu comprimento sejam analisadas com maior precisão, correlacionando a área de abertura com a

área bruta de concreto presente na estrutura. Análises experimentais através de outros métodos, como a analogia de grelhas.

12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014a. v.1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.

ATEX BRASIL. **Laje nervurada**. Lagoa Santa, [2014]. Disponível em:

<<http://www.atex.com.br/LajeNervurada>>. Acesso em: 09 mai. 2017.

APS TECNOLOGIA. **Tecnologias**. Cuiabá, [2014]. Disponível em:

<<http://apstecnologia.eng.br/formas.php>>. Acesso em: 15 mai 2017.

BERTOLOTI, C.A., **A iluminação natural colabora para o desempenho e economia das edificações**. 2016. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/iluminacao-natural-colabora-para-o-desempenho-e-a-economia-das-edificacoes_10561_0_1>. Acesso em: 29 nov. 2016.

BERTOLOTI, D., **Iluminação natural em projetos de escolas**: uma proposta de metodologia para melhorar a qualidade de iluminação e conservar energia. 2007. Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo-USP. 2007.

CORRÊA, L.R. **Sustentabilidade na construção civil**. Monografia – Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia de Materiais e construção, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 70p. 2009.

COSTA, O.V. **Estudo de alternativas de projetos estruturais em concreto armado para uma mesma edificação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 1997.

CARVALHO, R. C. **Análise não linear-de pavimentos de edifícios de concreto através da analogia de grelha**. 1994. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de engenharia de São Carlos, 1992.

CARVALHO, R.C.; PINHEIRO, L.M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.

CUNHA, A. J. P. da; SOUZA, V. C. M. de. **Lajes em concreto armado e protendido**. 1. ed. Niterói: EDUFF, 1994.

DIAS, R. H. **Análise numérica de pavimentos de edifícios em lajes nervuradas**. 2003. 455 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DUARTE, H.; DIONGO, J.S. **Lajes esconsas de pavimentos de edifícios: análise comparativa entre a técnica da analogia de grelha e o método dos elementos finitos**. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28., 1997, São Carlos. **Anais...** São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC – USP, 1997. p.1227-1235.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.

GARROCHO, J.S, **Luz natural e projeto de arquitetura: Estratégias para Iluminação Zenital em centros de compras**. 2005. 117p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

HAMBLY, E. C. **Bridge deck behaviour**. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1991.

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.

LIMA, E.L.; BALAT, V.H.; BISSIO, J. F. Hormigón armado: notas sobre su evolución y la de su teoría. In: SEMINÁRIO SOBRE FUNDAMENTOS DE LA RESISTENCIA DE MATERIALES, [2002?], La Plata. **Anais...** La Plata. Disponível em:

< <http://www.ing.unlp.edu.ar/construcciones/hormigon/ejercicios/Sem-ha-1.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2017.

OLIVEIRA, R.S.;ARAÚJO, D.L.;RAMALHO, M.A. Avaliação da deformação de lajes nervuradas considerando a não linearidade física: comparação entre valores teóricos e experimentais. **e-Artigo ABECE**, São Paulo, ago. 2000.

RAMALHO, M. A. Estudo numérico da influência de flanges no comportamento de paredes de alvenaria sujeitas a ações horizontais. **Engineering structures**, v. 56, p. 207-217. 2013.

TIMOSHENKO, S. P.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. **Theory of plates and shells**. 2nd ed. Auckland: McGraw-Hill, 1959.