



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

PEDRO AFONSO DA COSTA NUNES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS LAJES MACIÇAS, NERVURADAS E
TRELIÇADAS.**

PAU DOS FERROS - RN

2023

PEDRO AFONSO DA COSTA NUNES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS LAJES MACIÇAS, NERVURADAS E
TRELIÇADAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
Campus Pau dos Ferros, como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Henrique
Borges de Oliveira

PAU DOS FERROS - RN

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

NN972 NUNES, PEDRO AFONSO DA COSTA.
a ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS LAJES MACIÇAS,
NERVURADAS E TRELIÇADAS. / PEDRO AFONSO DA COSTA
NUNES. - 2023.
42 f. : il.

Orientador: LEONARDO HENRIQUE BORGES DE
OLIVEIRA.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2023.

1. Lajes. 2. Deslocamentos . 3. Fissuração. 4.
Analogia à Grelha. 5. Análise não linear. I.
OLIVEIRA, LEONARDO HENRIQUE BORGES DE , orient.
II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PEDRO AFONSO DA COSTA NUNES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS LAJES MACIÇAS, NERVURADAS E
TRELIÇADAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
Campus Pau dos Ferros, como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Defendida em: 9 / 10/ 2023.

BANCA EXAMINADORA

Orientador, Prof. Dr. Leonado Henrique Borges de Oliveira
Presidente

Breno Eduardo Carlos, Eng. Civil
Membro Examinador

Karina Estrela Egídio, Eng. Civil
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família por não ter medido esforços, me incentivado e apoiado durante toda essa trajetória acadêmica, aos quais sempre reconheceram a importância pela busca do conhecimento. Mesmo em frente às dificuldades, nunca deixaram que eu desistisse, com muita paciência, dedicação e esforços cedidos.

Aos meus colegas, que nesta jornada devotaram companheirismo e confiança, foram presentes compartilhado conhecimentos e ideias, assim, crescemos juntos.

Ao professor e orientador deste trabalho, Leonardo Henrique Borges de Oliveira, pelo compartilhamento de seus conhecimentos, pela paciência e atenção prestada.

Agradeço a Banca Examinadora, por estarem a disposição e contribuírem para esse momento ímpar.

A todos os professores desta instituição que contribuíram para minha formação com conselhos e conhecimentos transmitidos nas disciplinas. sem vocês o conhecimento não seria o mesmo.

Tenha coragem de seguir o que seu coração e sua intuição dizem. Eles já sabem o que você realmente deseja. Todo o resto é secundário.

Steve Jobs

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico permite a comparação técnico-financeira na utilização dos diferentes tipos de lajes, dentre as que mais se destacam: lajes maciças, lajes nervuradas e lajes treliçadas. Assim sendo, para as referidas estruturas tendo como objetivo, por conseguinte, realizar um estudo paramétrico para essas técnicas construtivas, por meio da ferramenta TQS, a fim de comparar, pelo Método de Analogia à Grelha, dados de deslocamentos e fissurações para a análise não linear destas estruturas. Neste sentido, foram desenvolvidos 12 modelos para análise: 3 lajes maciças, 3 lajes treliçadas com enchimento em Poliestireno Expandido, 3 lajes com enchimento cerâmico e 3 lajes nervuradas. Com isso, objetiva-se verificar a influência de parâmetros como a rigidez dos elementos e as características dos materiais que podem influenciar nas funcionabilidades destes elementos estruturais. Além disto, o presente trabalho apresenta uma ampla revisão bibliográfica a fim de validar e exemplificar os comportamentos para as referidas estruturas. Todos os tipos de lajes foram submetidos a ciclos de cargas que permitiu observar o comportamento quanto as deformações, o qual confirmou a elevada resistência das lajes maciças pertinente aos deslocamentos e fissurações.

Palavras-chave: Lajes. Deslocamentos. Fissuração. Analogia à Grelha. Análise não linear.

ABSTRACT

Technological development allows technical-financial comparison in the use of different types of slabs, among the most prominent: solid slabs, ribbed slabs and lattice slabs. Therefore, for the aforementioned structures, the objective is to carry out a parametric study for these construction techniques, using the TQS tool, in order to compare, using the Grid Analogy Method, data on displacements and cracks for analysis. linearity of these structures. In this sense, 12 models were developed for analysis: 3 solid slabs, 3 lattice slabs with Expanded Polystyrene filling, 3 slabs with ceramic filling and 3 ribbed slabs. With this, the objective is to verify the influence of parameters such as the stiffness of the elements and the characteristics of the materials that can influence the functionality of these structural elements. Furthermore, the present work presents a broad literature review in order to validate and exemplify the behaviors for the aforementioned structures. All types of slabs were subjected to load cycles that allowed the observation of deformation behavior, which confirmed the high resistance of solid slabs to displacements and cracks.

Keywords: Slabs. Displacements. Cracking. Grid analogy. Nonlinear analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vãos efetivos	17
Figura 2 – Elementos que compõem uma laje maciça	18
Figura 3 - Elementos que compõem uma laje nervurada	19
Figura 4 - Elementos que compõem uma treliça	21
Figura 5 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho	26
Figura 6 - Laje nervurada de seção retangular	27
Figura 7 - Planta de fôrma para laje nervurada	28
Figura 8 - Laje treliçada retangular em EPS unidirecional	28
Figura 9 - Planta de fôrma para laje treliçada com EPS	29
Figura 10 - Laje treliçada retangular com enchimento em bloco cerâmico	29
Figura 11 - Planta de fôrma para laje treliçada com enchimento cerâmico	30
Figura 12 - Limites para deslocamentos (NBR 6118/2023).....	31
Figura 13 - Deslocamento para as lajes no incremento 1, análise não linear	32
Figura 14 - Deslocamento para as lajes no incremento final, análise não linear.....	32
Figura 15 - Curvas de deslocamento para análise não linear modelo 6 x 6	34
Figura 16 - Curvas de deslocamento para análise não linear modelo 6 x 9	35
Figura 17 - Comparativo entre fissuras no modelo 6 x 6 para análise não linear	37
Figura 18 - Comparativo entre fissuras no modelo 6 x 9 para análise não linear	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os deslocamentos na análise não linear para os modelos 6 x 6 33

Tabela 2 - Comparativo entre os deslocamentos na análise não linear para os modelos 6 x 9 35

Tabela 3 - Comparativo entre as fissurações na análise não linear para os modelos 6 x 6 36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Concreto Armado
Dr	Doutor
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EPS	Poliestireno Expandido
NBR	Norma Brasileira
I	Inércia

LISTA DE SÍMBOLOS

@	Arroba
©	Copyright
®	Marca registrada
%	Porcentagem
\$	Cifrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Geral	15
2.2 Específicos.....	15
3 REVISÃO TEÓRICA	16
3.1 Lajes de Concreto Armado	16
3.1.1 Classificação quanto a direção	17
3.3 LAJES MACIÇAS	18
3.4 LAJES NERVURADAS	19
3.5 LAJES TRELIÇADAS.....	20
3.6 MÉTODO DE ANÁLISE DO TQS (ANALOGIA A GRELHA)	21
3.6.1. ANALOGIA A GRELHA LINEAR	21
3.6.2 ANALOGIA A GRELHA NÃO LINEAR.....	22
3.7 AÇÕES	22
3.7.1 AÇÕES PERMANENTES	23
3.7.2 AÇÕES VARIÁVEIS	23
3.7.3 AÇÕES EXCEPCIONAIS	23
3.8 ESTADOS LIMITES	24
3.8.1 ESTADO LIMITE ÚLTIMO	24
3.8.2 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO	24
3.9 COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	25
3.9.1 COMBINAÇÕES ULTIMAS	25
3.9.2 COMBINAÇÕES DE SERVIÇO.....	25
4. METODOLOGIA.....	26
4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1 ANÁLISE NÃO LINEAR.....	30
5.1.1 DESLOCAMENTOS NÃO LINEAR.....	31
5.1.2 FISSURAÇÃO PARA ANÁLISE NÃO LINEAR NOS MODELOS.....	36
6. CONCLUSÃO.....	39
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

Mediante o terceiro milênio é nítida a relação de cuidado referente ao avanço da globalização, em que a pauta dos recursos naturais é posta em primeiro plano. Neste sentido a construção civil detém grande influência na economia atual, exercendo papel importante no meio social e comercial. A maximização dos projetos de engenharia visa a relação custo x benefício, contribuindo para a redução de insumos e, conseqüentemente, redução do preço de uma obra.

No Brasil, a construção civil cresceu 74,25% nos últimos 20 anos conforme dados de uma pesquisa divulgada pelo SINDUSCON-MG (2014). Diante disso, é possível apontar benefícios para sociedade em geral, como o aumento do emprego formal, o crescimento da renda familiar, maior concorrência entre instituições financeiras, maior oferta de crédito imobiliário e redução nas taxas de juros (QUIMICRYL, 2022).

Neste sentido, os profissionais da construção civil para se destacar em meio ao mercado, devem apresentar soluções e alternativas que sejam viáveis economicamente. Além disso, devem garantir a segurança, preservando a qualidade e as exigências impostas pelos projetos, que, por sua vez, estão cada vez mais desafiadores. A exemplo, estruturas em balanço, estruturas com grandes vãos e dificuldades impostas pela própria natureza.

Nesta perspectiva, o concreto armado é a prática mais utilizada no meio construtivo. Seus dois componentes, o concreto e o aço, garantem a resistência dos elementos estruturais tanto à compressão quanto à tração (ADORNA et al., 2021). Santos (2017) ressalta que um sistema estrutural é um conjunto de elementos interconectados de modo a formar um todo organizado, cujo objetivo é suportar os carregamentos que incidem sobre a estrutura e conduzi-los de forma segura para o solo.

Normalmente os elementos estruturais que constituem um sistema estrutural são lajes, vigas, pilares e fundações. Neste sistema, os esforços atuantes nas lajes são transmitidos para as vigas, que por sua vez, tem como função transmitir os mesmos esforços para os pilares, que os encaminham para a fundação esses esforços. (AMORIM 2022 apud OLIVEIRA et al., 2020).

É sabido que o dimensionamento adequado de um projeto estrutural que além de garantir segurança, impacta na redução de custos da obra, sendo a laje o elemento que demanda um maior consumo de concreto, entre seus pares. Assim, faz-se necessário a utilização de meios tecnológicos, como os softwares que proporcionam maior eficiência no desenvolvimento de projetos.

Neste sentido a utilização de processos computacionais, otimiza a peça ou estrutura, reduzindo o seu peso ou volume, diminuindo seu custo final e economizando material para produção. Desse modo, gera resultados oportunos, como a redução de custos e o aperfeiçoamento da produtividade, agregando valor às suas ofertas e ganhando vantagem competitiva.

Diante deste contexto, este trabalho aborda um estudo entre lajes maciças, treliçadas e nervuradas com auxílio da ferramenta TQS, a fim de realizar uma análise comparativa quanto aos deslocamentos e fissuras, para o comportamento não linear destas estruturas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

✓ Comparar as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, analisadas por métodos analíticos e pela analogia de grelha proposta pelo software TQS v22.6 em relação aos deslocamentos e fissuração para a análise não linear.

2.2 Específicos

✓ Conduzir um estudo paramétrico quanto a geometria de lajes maciças, nervuradas e treliçadas;

✓ Comparar o comportamento entre as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, ambas com as mesmas dimensões.

✓ Comparar o comportamento de lajes maciças com lajes treliçadas, ambas com as mesmas dimensões

✓ Avaliar as deslocabilidades entre estes diferentes tipos de lajes.

✓ Verificar o processo de fissuração entre estes diferentes tipos de lajes.

3 REVISÃO TEÓRICA

3.1 Lajes de Concreto Armado

De acordo com Cunha e Souza (1994), no sistema construtivo convencional, composto por laje, vigas e pilares, o qual as lajes têm função transmitir as cargas, aplicadas diretamente nos pisos, para as vigas que as suportam. Além disso realiza o contraventamento das estruturas, funcionando como diafragmas rígidos distribuindo as cargas horizontais atuantes nas estruturas de contraventamento.

Segundo Bastos (2021), as lajes destinam-se a receber a maioria das cargas aplicadas em uma edificação, normalmente de pessoas, móveis, máquinas e equipamentos, paredes, veículos, e os mais variados tipos de cargas que podem existir em função da finalidade arquitetônica do espaço que a laje faz parte. Suas cargas, habitualmente perpendiculares a seu plano podem ser distribuídas na área, linearmente ou em forças concentradas, ficando a critério da análise do responsável técnico.

De modo geral, as lajes têm uma dupla função estrutural, uma vez que funcionam como placas, ao suportarem as cargas verticais aplicadas ao longo dos pisos, e como chapas, ao se constituírem em diafragmas rígidos horizontais que distribuem pelas as vigas da estrutura as forças horizontais atuantes (LOPES, 2015)

Conforme Lopes (2015) afirma que o grande desenvolvimento das tecnologias na área de informática vem propiciando cada vez melhores condições para analisar estruturas de alta complexidade através de programas comerciais utilizados para o cálculo estrutural, tornando o dimensionamento mais produtivas e econômicas.

Nesta perspectiva, Lopes (2015) ainda afirma que para se vencer grandes vãos, a utilização de lajes maciças pode ser pouco econômica, pois a espessura necessária da laje para atender aos estados limites últimos e de utilização certamente será elevada. Em contrapartida, Vieira e Oliveira (2018) afirmam que a laje nervurada e a laje treliçada com uso de EPS quando comparadas com a laje maciça apresentam algumas vantagens que são significativas para o projeto, como a inércia e peso próprio relativamente menor.

3.1.1 Classificação quanto a direção

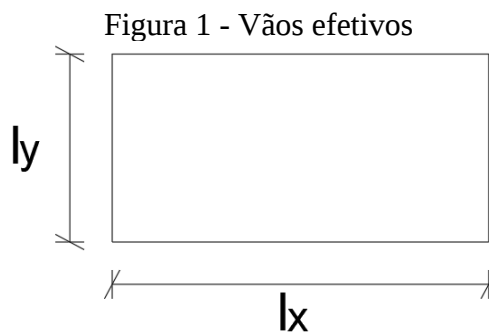
Uma classificação muito importante das lajes de concreto armado é aquela referente à direção ou direções da armadura principal, havendo dois casos: laje armada em uma direção e laje armada em duas direções (LOPES, 2015).

Neste sentido, as lajes armadas em duas direções se apresentam quando a relação do vão efetivo de maior lado (convencionado l_y), sobre o vão efetivo de menor lado (convencionado l_x) tem valor menor que 2. Caso a relação dos vãos seja superior a 2, é designado como laje unidirecional.

A partir dos vãos efetivos destas estruturas, a Equação 1, representa esta razão de cálculo:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \quad (1)$$

Logo, a Figura 1 expõe a definição dos vãos quanto a l_y e l_x .



Fonte: Autor (2023)

Segundo Porto e Fernandes (2015) o cálculo de lajes armadas em uma única direção respeita fielmente o comportamento de vigas com espessura de 100 cm, portanto, o dimensionamento de elementos com $l_y/l_x < 0,5$ ou $l_y/l_x > 2$ é relativamente de fácil compreensão. A vista disso, para o efeito de cálculo de l_y e l_x , considera-se as distâncias de eixo a eixo dos apoios.

Neste sentido, os esforços solicitantes de maior magnitude ocorrem segundo a direção do menor vão, chamada direção principal. Na outra direção, chamada secundária, os esforços solicitantes são menores, e por isso são comumente desprezados nos cálculos (BASTOS, 2013).

Para o cálculo de lajes bidirecionais, a magnitude dos momentos M_x e M_y está condicionada à relação entre os vãos l_x e l_y e essa relação não é de fácil mensuração analítica (PORTO; FERNANDES, 2015). Neste sentido, seus cálculos são determinados por diferentes

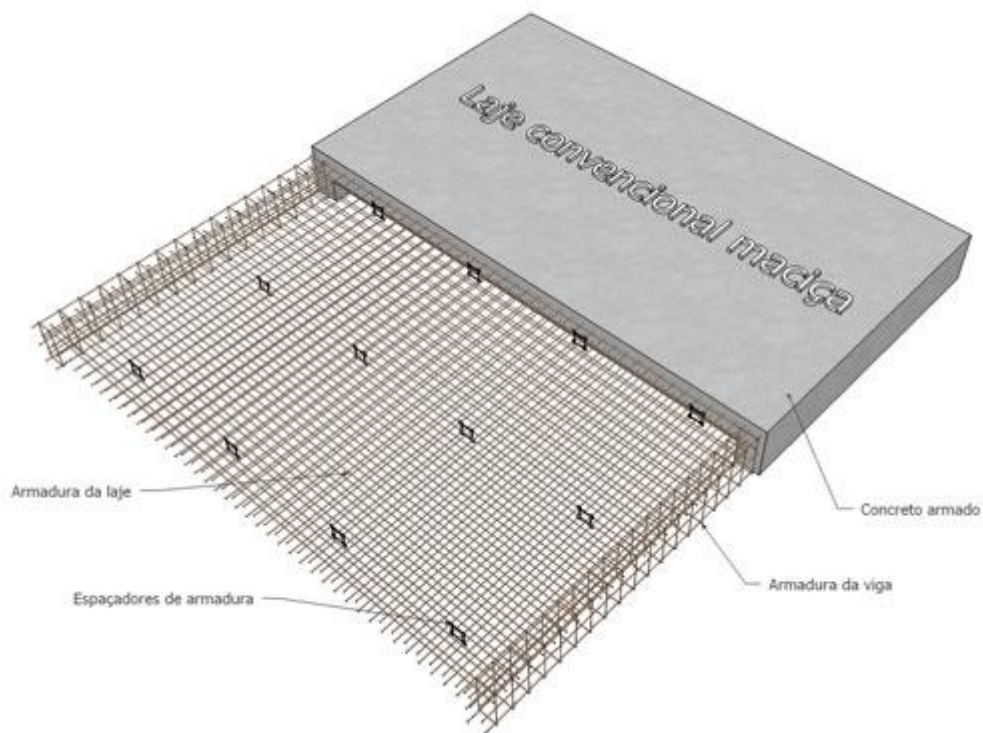
métodos, como teoria das placas, processos aproximados, métodos das linhas de ruptura, métodos numéricos e o de analogia de grelha, que é o modelo utilizado pelo TQS v22.6.

3.3 LAJES MACIÇAS

Laje maciça é aquela onde toda a espessura é composta por concreto, contendo armaduras longitudinais de flexão e eventualmente armaduras transversais, e apoiada em vigas ou paredes ao longo das bordas (BASTOS, 2013). Trata-se de um modelo comumente utilizado em construções de pequeno e médio porte.

As lajes maciças podem ser armadas em uma ou duas direções dependendo da relação entre seus lados, sendo uma de suas grandes vantagens o fato de distribuir suas reações em todas as vigas de contorno (LEITE, 2017). A Figura 2 permite a visualização de uma laje maciça.

Figura 2 – Elementos que compõem uma laje maciça



Fonte: Juliano Vasconcellos (2023)

A NBR 6118/2023 no item 13.2.4.1, prescreve que: “Nas lajes maciças devem ser respeitados os seguintes limites mínimos para a espessura:

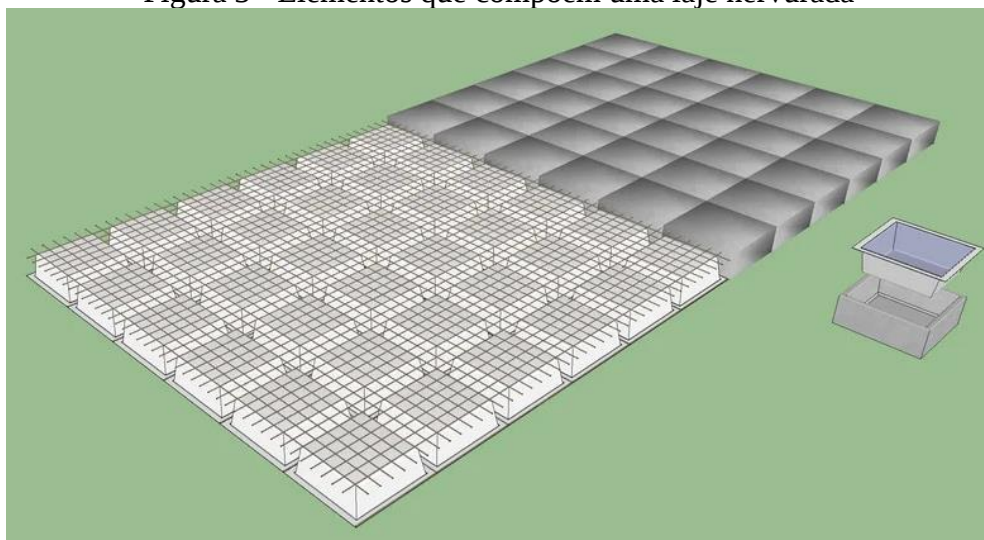
- a) 7 cm para cobertura não em balanço;

- b) 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- c) 10 cm para lajes em balanço;
- d) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- e) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- f) 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com o mínimo de para lajes de piso biapoiadas e para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel;”

3.4 LAJES NERVURADAS

Para Porto e Fernandes (2010), as lajes nervuradas são uma opção para os casos nos quais se deseja reduzir cargas na estrutura, economizar concreto e ainda vencer maiores vão (7 m a 15 m). O qual as nervuras são responsáveis por promover um alívio na estrutura, e consequentemente, permite a redução de vigas e pilares. A Figura 3 apresenta o arranjo para esta estrutura.

Figura 3 - Elementos que compõem uma laje nervurada



Fonte: Juliano Vasconcellos (2023)

Botelho e Marchetti (2015) afirma que as lajes nervuradas são aquelas em que a zona tracionada é constituída por nervuras entre as quais podem ser colocados materiais inertes, de modo a tornar a superfície plana. Não se deve contar com a resistência desses materiais.

Neste sentido, a NBR 6118/2023 no item 13.2.4, norteia parâmetros para o projeto de lajes nervuradas, com as seguintes condições:

a) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje;

b) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa, e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;

c) para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

No qual, esses componentes, denominados de nervuras, podem também ficar expostas ou aparentes, quando não são colocados materiais inertes entre elas.

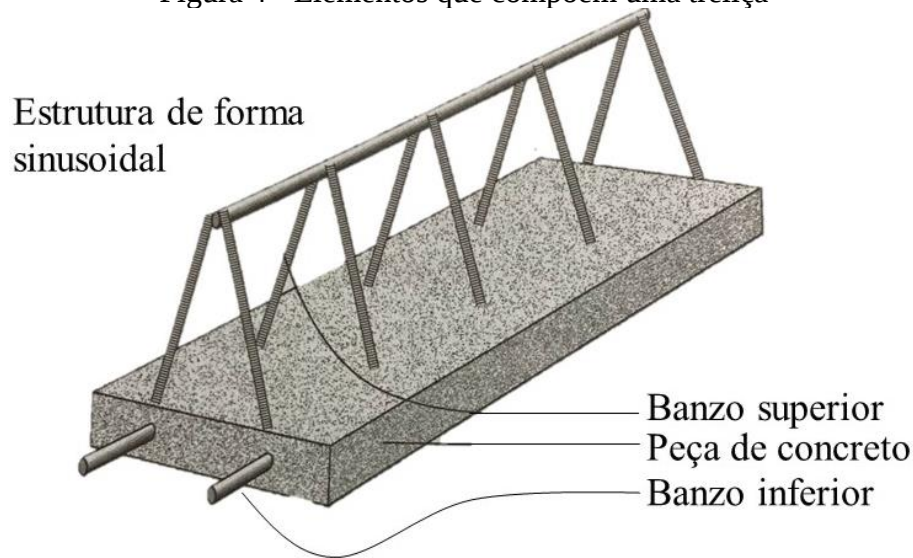
3.5 LAJES TRELIÇADAS

Trata-se de uma estrutura que pode ser executada em concreto armado ou protendido, com uma montagem de vigotas e tijolos.

Para o preenchimento desta estrutura, é utilizado material inerte, sem função estrutural. Sua utilização visa reduzir o peso próprio da laje e o consumo de concreto, podendo ser utilizado materiais como bloco de concreto, bloco cerâmico com furo ou EPS. Esse material é responsável por dar estabilidade lateral às vigotas, travando o painel da laje e aumentando assim a rigidez do conjunto, reduzindo vibrações e deformações na laje. Também são indicadas para distribuir eventuais cargas concentradas sobre a laje (ENGENHARIA DE PROJETOS, 2023).

A armadura das vigotas em concreto armado do tipo treliçada é composta por uma treliça espacial pré-fabricada, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Elementos que compõem uma treliça



Fonte: Botelho e Marchetti (2015)

Nesta perspectiva, o banzo inferior é constituído por duas barras e o banzo superior por uma barra. Os banzos inferior e superior são unidos por barras diagonais inclinadas (em senoide), soldadas por eletrofusão. Proporcionam rigidez ao conjunto, melhoram o transporte e manuseio das vigotas já prontas e aumentam a resistência aos esforços cortantes. (BASTOS, 2021.). Além disto, podem ser inclusas barras adicionais na parte inferior.

Esse tipo de laje pode ser amplamente utilizado, pois seus elementos de enchimento e as vigotas são pré-fabricadas, o que facilita o processo de montagem e pode ser utilizado como fôrma para a capa de concreto produzida no canteiro de obras (SANTAREM et al., 2022)

3.6 MÉTODO DE ANÁLISE DO TQS (ANALOGIA A GRELHA)

3.6.1. ANALOGIA A GRELHA LINEAR

Quando se trata de lajes de concreto, uma grelha representa uma armadura de aço que é construída dentro do concreto para aumentar a sua resistência e capacidade de carga. Essa armadura é geralmente composta por barras de aço colocadas em duas direções perpendiculares, criando uma malha retangular ou quadrada (TQS DOCS, 2023).

Nesta perspectiva, o TQS v22.6 tem como base o método de Analogia de Grelha, que trata de uma alternativa ao cálculo por elementos finitos. O processo consiste em subdividir a laje em grelhas planas formadas por barras igualmente distanciadas, resultando-se uma estrutura reticulada. (MACHADO e MOURA 2023).

O referido método permite a ilustração de como as cargas são flexíveis de forma mais uniforme em uma laje. Para Leite (2017), o modelo gerado pelo sistema pode ser refinado pelo Engenheiro, onde são feitas alterações gráficas do desenho de dados de grelha, modificando barras de lajes, condições de contorno e carregamentos.

Assim como uma grelha pode ser projetada com diferentes espaçamentos entre as barras, a configuração da armadura em uma laje de concreto pode variar dependendo dos requisitos de projeto e das cargas esperadas (LEITE, 2017). Neste sentido, o programa em questão permite a visualização e verificação nas armaduras singularmente, atribuindo os esforços requerido pelas barras.

3.6.2 ANALOGIA A GRELHA NÃO LINEAR

Uma análise não linear é um estudo pormenorizado de cada parte de um todo, para conhecer melhor a natureza das estruturas, afim de entender a atuação das forças aplicadas e os deslocamentos. Desse modo, os efeitos não lineares podem se originar de não linearidade geométrica (ou seja, grandes deformações), não linearidade de material (ou seja, material elasto-plástico) e contato (TORE ENGENHARIA, 2023).

A análise não linear indica o comportamento da estrutura, quanto aos deslocamentos, esforços e tensões, apresentando comportamento desproporcional à medida que o carregamento é aplicado. Isso ocorre diante das alterações das propriedades dos materiais que constituem a estrutura.

Assim sendo, o modelo de grelha considera a não-linearidade física de forma bastante refinada (relações momento-curvatura). Leva em conta a fissuração do concreto, a presença de armaduras e a fluência, tornando-se essencial para uma verificação aprimorada quanto a deformação e aberturas de fissuras em obras de concreto armado (TQS DOCS, 2023).

3.7 AÇÕES

Segundo Porto e Fernandes (2015), para a realização da análise estrutural, deve-se levar em consideração as ações que possam alterar a segurança da estrutura, que são classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais. Além disso, para determinação das ações atuantes nas lajes deve-se recorrer às outras normas, como a NBR 6118/2023 e a NBR 6120/1980.

3.7.1 AÇÕES PERMANENTES

Segundo a NBR 6118/2023, as ações permanentes são as que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida da construção. Também são consideradas como permanentes as ações que crescem no tempo, tendendo a um valor limite constante.

No mais, as ações permanentes são divididas em diretas e indiretas. Para Camacho (2005), as ações permanentes diretas são constituídas pelo peso próprio da estrutura, dos elementos construtivos fixos, das instalações e outras como equipamentos e empuxos. Já as ações permanentes indiretas são constituídas por deformações impostas por retração do concreto, fluência, recalques de apoios, imperfeições geométricas e protensão.

3.7.2 AÇÕES VARIÁVEIS

Ações variáveis são valores que sofrem significativas mudanças durante a vida útil da construção. Assim sendo, as ações variáveis comumente existentes são causadas pelo uso e ocupação da edificação, como as ações decorrentes de sobrecargas em pisos e coberturas, de equipamentos e de divisórias móveis, de pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas, pela ação do vento e pela variação da temperatura da estrutura (MENINO, 2019).

Camacho (2005, p. 30) classifica essas ações em diretas, indiretas e dinâmicas. Neste sentido:

Ações variáveis diretas: são constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção, pela ação do vento e da chuva, devendo respeitar as prescrições feitas por normas específicas. Ações variáveis indiretas: são causadas pelas variações da temperatura, podendo ser com variação uniforme e não uniforme de temperatura. Ações dinâmicas: quando a estrutura estiver sujeita a choques ou vibrações, os respectivos efeitos devem ser considerados na determinação das solicitações.

3.7.3 AÇÕES EXCEPCIONAIS

Ainda segundo a NBR 8681/2003 considera como excepcionais as ações decorrentes de explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais. Os incêndios, ao invés de serem tratados como causa de ações excepcionais, também podem ser levados em conta por meio de uma redução da resistência dos materiais constitutivos da estrutura.

3.8 ESTADOS LIMITES

Para Amorim (2020), Estados limites se manifestam de forma não desejada na estrutura. O método dos estados limites é um método semi-probabilístico para definir quando um estado de deterioração da estrutura é atingido.

Estado limite define a impropriedade para o uso da estrutura, por razões de segurança, funcionalidade ou estética, desempenho fora dos padrões especificados para sua utilização normal ou interrupção de funcionamento em razão da ruína de um ou mais de seus componentes (GUIA DA ENGENHARIA, 2023).

Neste sentido, o dimensionamento dos elementos que compõem um projeto de estruturas de concreto-armado é dimensionado a partir do estado limite ultimo (ELU) e posteriormente verificado os estados limites de serviço (ELS).

3.8.1 ESTADO LIMITE ÚLTIMO

O ELU é sempre caracterizado pela ruína ou esgotamento da capacidade resistente última. Trata-se de uma situação na qual se espera que uma estrutura nunca atinja, em virtude disto, se faz o uso de diversos coeficientes de segurança (TQS DOCS, 2023).

A segurança das estruturas de concreto deve sempre ser verificada em relação aos seguintes estados limites últimos:

Estado limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido; Estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais; Estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem; Estado limite último provocado por solicitações dinâmicas; Casos especiais (CAMACHO, 2005 p. 8).

De forma a atender os Estados Limites Últimos das estruturas, as mesmas devem atingir os valores prescritos na norma ABNT NBR 6118/2023, tanto para os limites de encurtamento, como também para alongamento em todos as combinações de ações atuantes na estrutura (AMORIM, 2020).

3.8.2 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

Estado limite de serviço, remete-se a perda da funcionalidade de uma estrutura. Segundo a NBR 8681/2003, considera-se como estado limite de serviço os danos ligeiros ou localizados, os quais comprometem o aspecto estético, a durabilidade e afetam a utilização normal da

construção. Neste estado, a peça deixa de atender suas funcionalidades, seja por incômodos visuais, de vibração e sonoro.

Assim sendo, a segurança das estruturas de concreto pode exigir a verificação de alguns estados-limites de serviço mediante ao deslocamento sofrido pela estrutura. Embora não cause destruição como o ELU, uma vez alcançado o ELS pode tornar inviável a utilização de um edifício.

Para a NBR 6118/2023 a verificação dos estados limites de serviços se dá a partir de combinações de ações sofridas pela estrutura. Através das diversas verificações dos ELS, procura-se assegurar, em média, que o comportamento real das peças que compõe a estrutura seja adequado, isto é, dentro de limites sensoriais e funcionais aceitáveis (TQS DOCS, 2023).

3.9 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Conforme a NBR 6118/2023 a combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura; a verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos e aos estados-limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e de combinações de serviço, respectivamente.

3.9.1 COMBINAÇÕES ÚLTIMAS

As combinações últimas para o ELU se referem à resistência da estrutura. Usualmente, são utilizadas para definir os esforços solicitantes a serem adotados no dimensionamento dos elementos (TQS DOCS, 2023). Estas combinações são classificadas em normais, especiais ou de construções e excepcionais, sendo definidas pela tabela 11.3 da NBR 6118/2023.

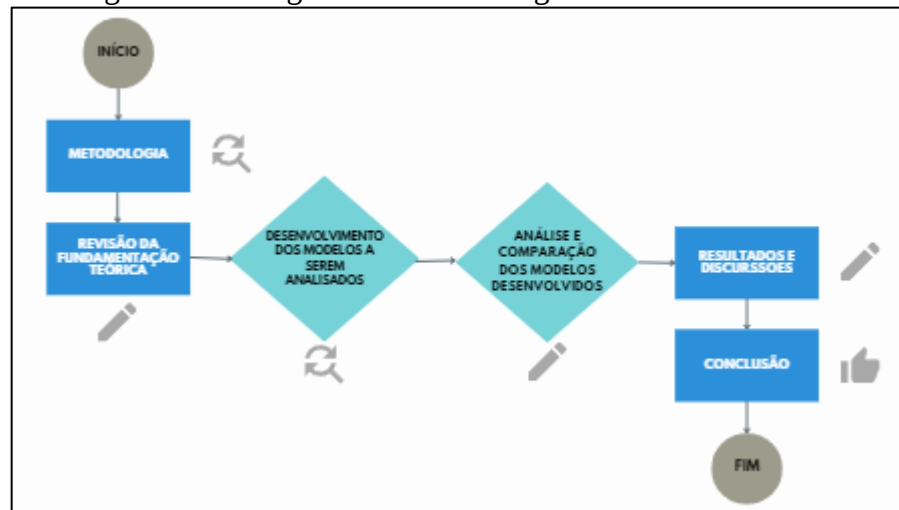
3.9.2 COMBINAÇÕES DE SERVIÇO

Nas combinações de serviço (ELS) são consideradas todas as ações permanentes, inclusive as deformações impostas permanentes e as ações variáveis correspondentes a cada um dos tipos de combinações (CAMACHO, 2005).

4. METODOLOGIA

A pesquisa desenvolveu-se em caráter qualitativo e quantitativo, a partir de dados fornecidos pelo software TQS e com base em fundamentação teórica para a compreensão dos dados. A Figura 5 ilustra o percurso metodológico dividido em etapas do presente trabalho.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho



Fonte: Autor (2023)

Neste sentido, na etapa 1 foi elaborado um levantamento bibliográfico por meio de dissertações, monografias, artigos, normas técnicas, livros e sites acadêmicos para abordar de forma sucinta, sobre as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, que vise interpretar e diagnosticar os dados fornecidos a este objeto de estudo.

Na etapa 2 (ver Figura 05, fluxograma), foi realizado o desenvolvimento dos modelos a serem analisados com base na analogia por grelha da ferramenta TQS V 22.6 ®. Os modelos analisados foram comparados em termos de tipos de lajes com diferentes geometrias variando um dos lados da estrutura, sendo analisados a relação $\lambda = l_y/l_x$, que fora lançado o sistema estrutural e seus carregamentos, resultando nos parâmetros de momento fletor, deslocamentos e fissurações.

Na etapa 3, fase de comparação dos modelos desenvolvidos, será apresentado o estudo paramétrico comparativo entre os diferentes tipos de lajes. Concerne a esta comparação os parâmetros de momento fletor, deslocamentos e as fissurações ocorridas nas lajes.

Após abordar o estudo técnico comparativo desses parâmetros, desenvolveu-se os resultados e as discussões quanto aos valores obtidos, destacando a importância desses parâmetros na escolha de um tipo de laje para uma obra.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS

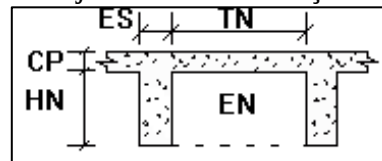
Para o presente estudo realizou-se 12 modelos para as lajes com as seguintes dimensões: 6x3, 6x6 e 6x9 metros. Sendo destinado 3 modelos para lajes maciças, 3 para a lajes nervuradas, 3 para as lajes treliçadas com o uso de EPS e 3 para lajes treliçadas com o uso de lajota tipo cerâmica.

Foi adotado uma espessura de 15 cm para a laje do tipo maciça. Neste sentido foi calculado o valor da inércia para esse referido modelo, obtendo o valor de $I = 28\,125\text{ cm}^4$.

Tomando como referência a inércia da laje maciça, foi desenvolvido os modelos das demais lajes, respeitando as dimensões e parâmetros das peças catalogadas no TQS e que obtivesse valor de inércia aproximado ao adotado como referência.

Sendo assim, para as lajes do tipo nervurada foi desenvolvido um modelo com nervuras de EPS. Como pode ser observado na Figura 6.

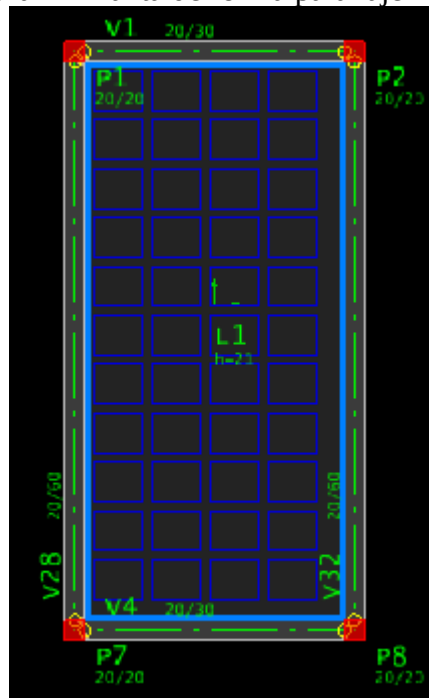
Figura 6 - Laje nervurada de seção retangular



Fonte: TQS adaptada pelo autor (2023)

Foi adotado uma capa (CP) de 5 cm, altura da nervura (HN) de 16 cm, espaçamento entre nervuras (ES) 9 cm e o EPS com tamanho horizontal (TN) de 49 cm por 40 cm de tamanho vertical. Para a laje nervurada com cubeta em EPS, o peso específico estabelecido para este material é de $0,018\text{ tf/m}^3$ e uma inércia em torno de $I = 27.332,87\text{ cm}^4$. A Figura 7 representa a planta de forma de um dos modelos da laje de lajes nervuradas.

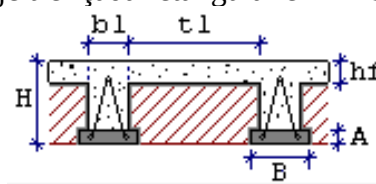
Figura 7 - Planta de fôrma para laje nervurada



Fonte: Autor (2023)

Para a laje treliçada, foi desenvolvido dois modelos. O primeiro modelo com a utilização do EPS unidirecional, com altura de 16 cm, largura de 40 cm e comprimento de 120 cm para cada peça. Suas dimensões podem ser observadas na Figura 8.

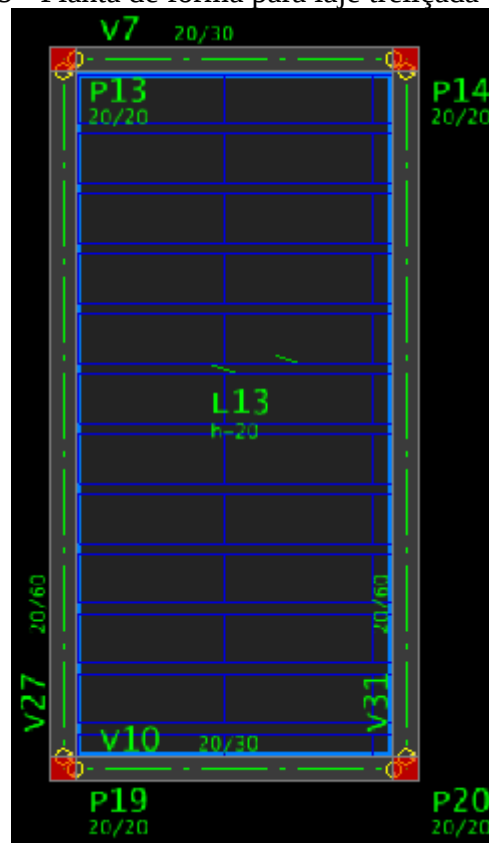
Figura 8 - Laje treliçada retangular em EPS unidirecional



Fonte: Autor (2023)

Para esta amostra a capa (h_f) foi estabelecida em 4 cm, portanto altura total da laje de 20 cm (4 cm da capa mais 16 cm do EPS). Conforme Figura 6, a vigota escolhida no software tem base (B) de 13 cm com altura (A) de 3 cm, largura de b_1 de 9 cm. Por meio destes parâmetros foi calculado a inércia para um metro desta estrutura e o valor obtido foi de $I=29\,800\text{ cm}^4$. Na Figura 9, é possível observar a planta representativa para o modelo desenvolvido.

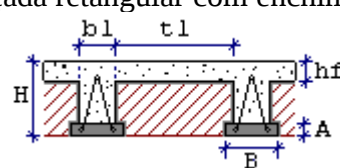
Figura 9 - Planta de fôrma para laje treliçada com EPS



Fonte: Autor (2023)

Ainda pertinente a esse tipo de estrutura, foi desenvolvido um modelo com o emprego do enchimento em bloco cerâmico conforme figura 10.

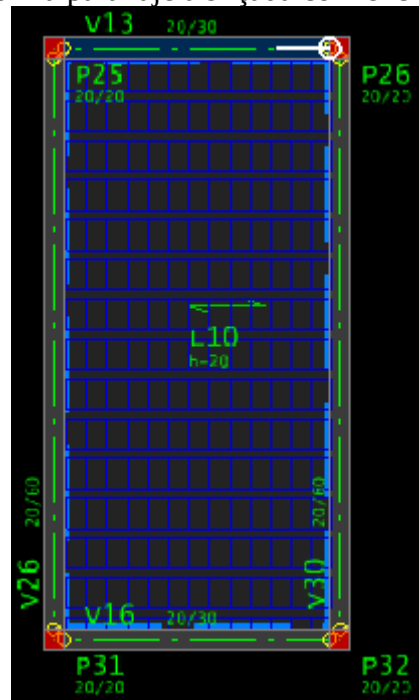
Figura 10 - Laje treliçada retangular com enchimento em bloco cerâmico



Fonte: Autor (2023)

Nesta configuração foi utilizado o bloco cerâmico com 16 cm de altura, 20 cm de largura por 30 cm de comprimento. Capa adotada de 4 cm e o peso específico do material de enchimento de 0,75 tf/m³. Altura total para a laje (Figura 11) também de 20 cm e a inércia coincidente com o modelo com EPS.

Figura 11 - Planta de fôrma para laje treliçada com enchimento cerâmico



Fonte: Autor (2023)

Foram estabelecidos alguns parâmetros para os demais elementos estruturais que compõem esse sistema. Para os pilares foi adotado as dimensões de 20x20 cm, atendendo, portanto, a NBR 6118/2023 que estabelece a área mínima de 360 cm². Para as vigas foi pré-dimensionado a largura de 20cm e a altura sendo considerado como 10% para cada vão.

Com os modelos prontos e construídos no TQS foi realizada a simulação destas lajes para um apartamento convencional com a adição de 0,1 tf/m² para cargas permanentes e 0,15 tf/m² para cargas acidentais, a fim de verificar os deslocamentos e fissurações.

5. RESULTADOS E DISCURSSÕES

5.1 ANÁLISE NÃO LINEAR

Tomando como norte a prerrogativa de que a rigidez dos modelos não é constante, ou seja, a rigidez é alterada mediante o processo de carregamento e sabendo que o concreto armado é um material que possui um comportamento não linear, torna-se necessário a análise não linear de deformação das estruturas ao longo de sua vida útil.

Neste sentido, a não linearidade tem influência expressiva nos deslocamentos e esforços de uma estrutura, visto que, as propriedades dos materiais (concreto e aço) se modificam à medida que o carregamento é aplicado.

Além disso, a carga aplicada a todo o pavimento será dividida em 12 incrementos (estágios) de carga para que a rigidez em cada ponto da estrutura possa ser ajustada gradativamente à medida que a fissura se propaga. Quanto mais incrementos forem inseridos, mais precisos serão os resultados. Quando o número de incrementos de carga é 1, a precisão de uma análise linear tradicional é alcançada.

5.1.1 DESLOCAMENTOS NÃO LINEAR

É essencial que os deslocamentos que surgem em uma estrutura sejam limitados de forma a garantir a qualidade da obra. Para isso, a NBR 6118/20123 na cláusula 11.8.3.1, define combinações de ações de serviço que estabelece limites de flechas mediante ao tipo de edificação, bem como o grau de gerado na estrutura. Neste sentido o deslocamento é definido pela combinação quase permanente, a Figura 12 apresenta os limites para os deslocamentos.

Figura 12 - Limites para deslocamentos (NBR 6118/2023)

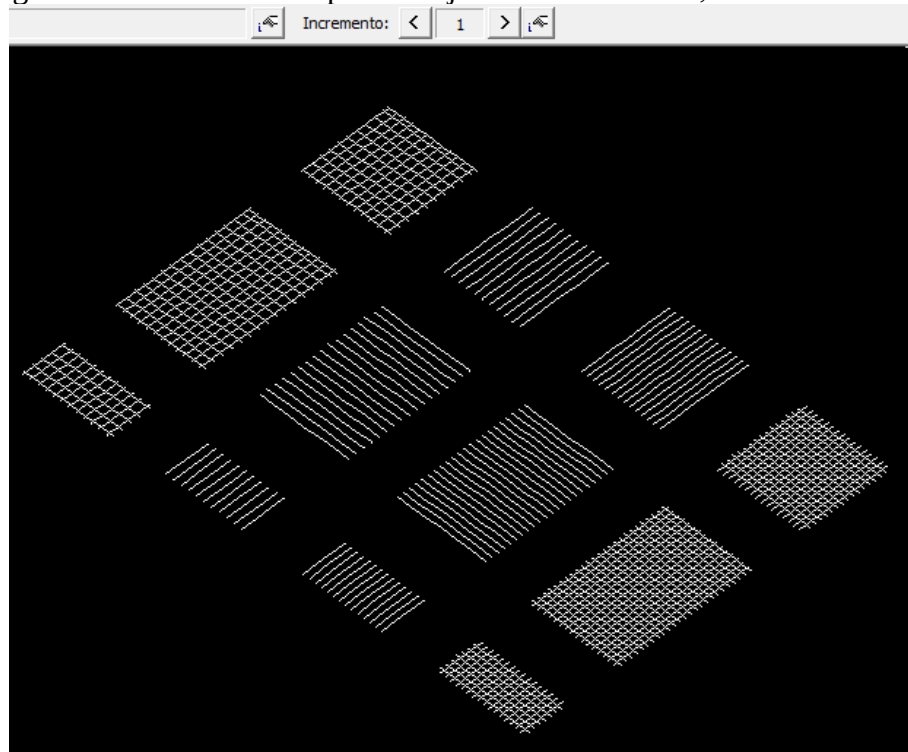
Tabela 13.3 – Limites para deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350 + \text{contraflecha}^b$
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
	Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento

Fonte: NBR 6118/2023

A seguir, as Figuras 13 e 14 mostram a evolução dos deslocamentos partindo na grelha não linear (incremento 1) até o ápice de sua deformação (incremento 12).

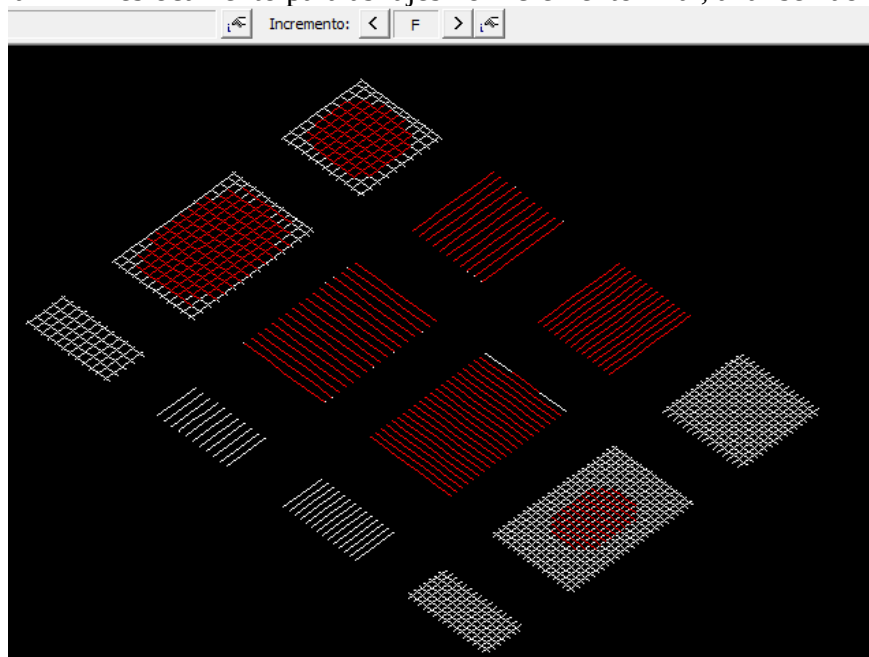
Figura 13 - Deslocamento para as lajes no incremento 1, análise não linear



Fonte: Autor (2023)

Nesta perspectiva, as cores distintas, diferenciando entre cor branca para as regiões que estão no estágio I e na cor vermelha para os trechos fissurados no estágio II. Como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Deslocamento para as lajes no incremento final, análise não linear



Fonte: Autor (2023)

Assim sendo, a NBR 6118/2023 considera um deslocamento máximo de aceitabilidade sensorial como limite de $l/250$. Para as lajes cujas dimensões são 6 x 3 metros, não foram apresentados descolamentos significantes para todos os incrementos de cargas em nenhum dos modelos elaborados.

Por outro lado, as lajes cuja dimensão são 6 x 6 metros, o deslocamento-limite para $l/250$ de 2,4 cm. Conforme a Tabela 1, é possível observar o descolamento que ocorre nos modelos diante a inserção de cargas para a análise não-linear.

Tabela 1 - Comparativo entre os deslocamentos na análise não linear para os modelos 6 x 6

Lajes dimensão 6x6		Deslocamentos (cm)		
Incrementos	Maciça	EPS	Cerâmica	Nervurada
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0,75	0,67	0
4	0,61	1,00	0,89	0,58
5	0,76	1,25	1,11	0,73
6	0,90	1,51	1,33	0,86
7	1,04	1,88	1,63	0,99
8	1,18	2,35	2,03	1,13
9	1,32	2,88	2,50	1,29
10	1,46	3,47	3,02	1,48
11	1,52	3,74	3,27	1,58
12	1,59	4,04	3,52	1,7
F	1,59	8,02	7,06	3,7

Fonte: Autor (2023)

Os valores grifados em vermelho destacam a ocasião em que os limites de fissuração são atingidos. Diante disso, é possível constatar a eficiência da laje maciça, as quais tem deslocamentos aceitáveis e dentro da margem de tolerância. Tal situação pode ser explicado diante da rigidez da peça e uma menor presença do momento fletor, pois sua distribuição é bidirecional.

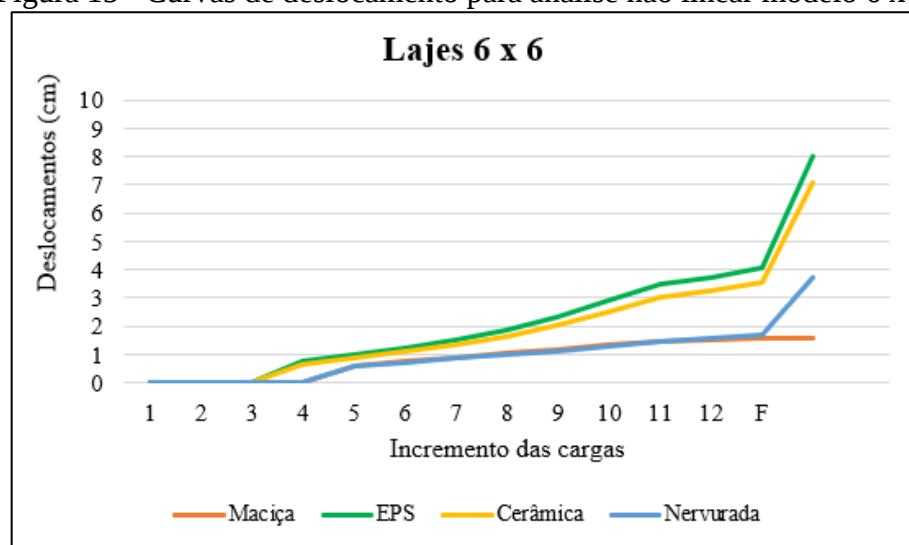
É possível observar na Tabela 1 a eficiência da laje nervurada, a qual apresentou resultados mais satisfatório do que a laje maciça no início de sua deformação. De início, ao adicionar as parcelas de cargas referentes as deformações diferidas no tempo, foi possível observar que laje nervurada no começo dos incrementos sofria deslocamentos 5% menor que a laje maciça.

No entanto, em decorrência do acréscimo contínuo das deformações que ocorre na mesma, por meio de uma tensão constante, laje nervurada sofre um deslocamento 6,92% maior que a laje maciça no 12º (décimo segundo) incremento. Esse aumento significativo das deformações é decorrente de sua rigidez.

Pertinentes as lajes treliçadas, foi possível constatar que os modelos desenvolvidos obtiveram valores semelhantes, sendo que o modelo com enchimento em EPS sofreu um deslocamento levemente superior ao modelo cerâmico. Este resultado pode ser explicado diante da deformação dos diferentes materiais utilizados.

Vale ressaltar que as dimensões dos modelos para as lajes treliçadas são compatíveis, ambas com altura de 20 cm. No entanto, o modelo apresentado (6x6), não é adequado e nem favorece as lajes treliçadas, pois são unidirecionais. A Figura 15, corrobora esta afirmação e ilustra a progressão dos deslocamentos máximos.

Figura 15 - Curvas de deslocamento para análise não linear modelo 6 x 6



Fonte: Autor (2023)

Nesta perspectiva, comparando-se o estágio final dos incrementos, a laje com bloco cerâmico sofre um deslocamento quatro vezes superior em comparação com a laje maciça. Diante da distribuição dos esforços solicitantes ocorrerem em uma direção, o arranjo treliçado está suscetível a deformações excessivas.

Posteriormente foi feita a análise para o modelo com dimensões de 6 x 9 metros. Para este comparativo, as lajes do tipo maciça e nervuradas obtiveram um melhor desempenho.

Para a laje maciça é justificável a contribuição da rigidez de sua estrutura, além da distribuição bidirecional dos esforços. Em contra partida, é possível observar que o comportamento do modelo nervurado se beneficia da distribuição bidirecional dos esforços, além da redução do peso da estrutura. Os dados podem ser observados a seguir na Tabela 2.

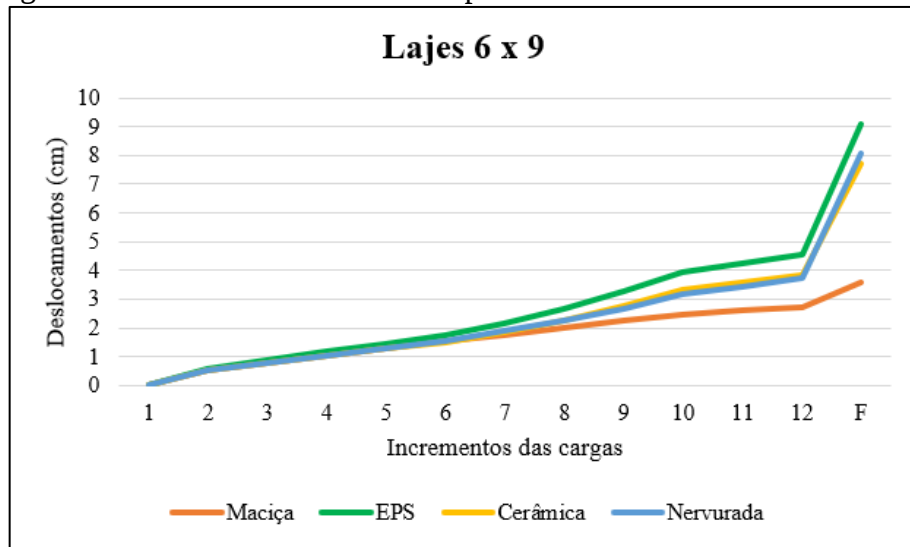
Tabela 2 - Comparativo entre os deslocamentos na análise não linear para os modelos 6 x 9

Lajes dimensão 6x9		Deslocamentos (cm)		
Incrementos	Maciça	EPS	Cerâmica	Nervurada
1	0	0	0	0
2	0,52	0,58	0,51	0,52
3	0,78	0,88	0,76	0,78
4	1,04	1,17	1,02	1,04
5	1,29	1,46	1,27	1,30
6	1,53	1,77	1,52	1,57
7	1,77	2,18	1,85	1,89
8	2,01	2,69	2,27	2,27
9	2,25	3,27	2,76	2,69
10	2,49	3,92	3,31	3,19
11	2,60	4,23	3,56	2,45
12	2,72	4,56	3,84	3,73
F	3,6	9,1	7,73	8,07

Fonte: Autor (2023)

Além disso, a Figura 16, permite a visualização dos deslocamentos máximos na análise não linear para os diferentes modelos.

Figura 16 - Curvas de deslocamento para análise não linear modelo 6 x 9



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 16, observa-se que F é o incremento último, estágio final que considera a deformação diferida ao longo do tempo na peça, ou seja, é a deformação máxima. A mesma confirma a eficiência da laje maciça quanto aos deslocamentos.

5.1.2 FISSURAÇÃO PARA ANÁLISE NÃO LIENAR NOS MODELOS

Quando os modelos cuja dimensão é 6 x 3 m, não apresentaram fissurações significantes quanto aos incrementos de cargas. Por tratar-se de uma estrutura pequena, todos os modelos se apresentam com bons desempenhos.

A NBR-6118/2023 considera que se a abertura máxima característica das fissuras não exceder aos valores de ordem de 0,2 mm a 0,4 mm sob ação das combinações frequentes, não tem importância significativa na corrosão das armaduras passivas. Assim sendo, esses limites devem ser restritos em armaduras ativas e em observância da classe de agressividade ambiental.

Neste sentido, a Tabela 3, apresenta as fissurações para os modelos em estudo.

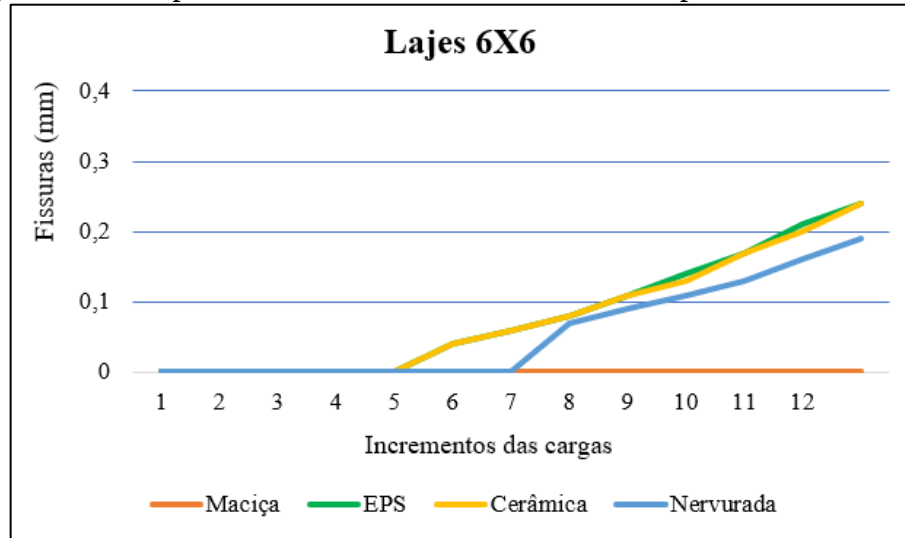
Tabela 3 - Comparativo entre as fissurações na análise não linear para os modelos 6 x 6				
Lajes dimensão 6x6		Deslocamentos (cm)		
Incrementos	Maciça	EPS	Cerâmica	Nervurada
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0,04	0,04	0
6	0	0,06	0,06	0
7	0	0,08	0,08	0,07
8	0	0,11	0,11	0,09
9	0	0,14	0,13	0,11
10	0	0,17	0,17	0,13
11	0	0,21	0,20	0,16
12	0	0,24	0,24	0,19

Fonte: Autor (2023)

Mediante a Tabela verificou-se que as lajes maciças não apresentaram fissurações para todos os incrementos das cargas, isto ocorre pois o concreto atua como um bloco único e se contrai uniformemente. A laje nervurada demonstrou um comportamento melhor que aos modelos em treliças que tiveram seus valores semelhantes.

A Figura 17 apresenta a trajetória da estimativa para a abertura das fissuras diante do incremento de cargas, a qual indica que as lajes treliças fissuraram logo no incremento 5, assim sendo, as lajes treliçadas fissuraram com menores estágios de cargas e atingiram maiores aberturas de fissuração. Por outro lado, a laje nervurada apresentou fissuração no incremento 7.

Figura 17 - Comparativo entre fissuras no modelo 6 x 6 para análise não linear



Fonte: Autor (2023)

Em contrapartida, os modelos em estudos apresentaram aberturas de fissuras que não comprometem a durabilidade e a vida útil das estruturas para as classes de agressividade I (0,4 mm), II e III (0,3 mm). Em vista disso, a norma expressa que em casos onde as fissuras afetem a funcionalidade da estrutura, como por exemplo, no caso da estanqueidade de reservatórios, devem ser adotados limites menores para as aberturas das fissuras.

Se tratando classe de agressividade ambiental IV (0,2 mm), ambientes industriais e respingos de maré, as lajes treliçadas e nervuradas estariam propícias a elevado risco de deterioração da estrutura.

A Tabela 4 acompanha o surgimento e progresso das fissuras para os diferentes níveis de carregamento.

Tabela 4 - Comparativo entre as fissurações na análise não linear para os modelos 6 x 9

Lajes dimensão 6x9		Deslocamentos (cm)			
Incrementos	Maciça	EPS	Cerâmica	Nervurada	
1	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	
4	0	0	0	0,03	
5	0	0,04	0,04	0,05	
6	0	0,06	0,06	0,07	
7	0	0,08	0,08	0,08	
8	0	0,11	0,10	0,11	
9	0,16	0,14	0,13	0,14	
10	0,20	0,17	0,16	0,18	
11	0,23	0,21	0,20	0,22	
12	0,27	0,24	0,24	0,26	

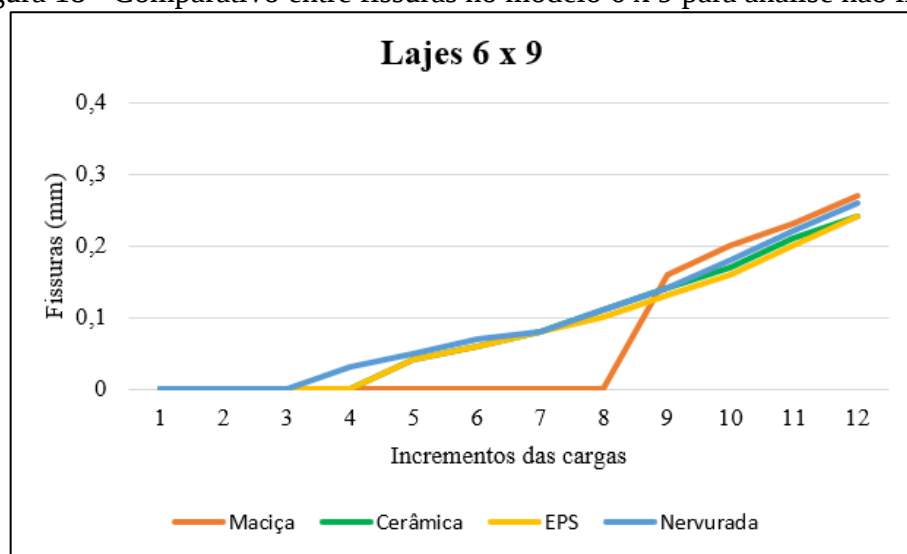
Fonte: Autor (2023)

Como pode observar, a laje maciça apresentou fissuras a partir do nono incremento, porém não comprometem a funcionabilidade.

As lajes treliçadas obtiveram os mesmos valores que os modelos 6 x 6, isso é justificado pela distribuição das cargas que ocorrem no sentido de menor vão, ou seja, 6 metros para ambos os modelos, a fissuração ainda está na margem de tolerância de segurança estabelecido pela NBR 6118/2023.

As lajes nervuradas sofreram um leve aumento da fissuração em relação aos modelos em treliças. Para esta temática abordada, a Figura 18, fornece a seguinte visualização.

Figura 18 - Comparativo entre fissuras no modelo 6 x 9 para análise não linear



Fonte: Autor (2023)

Assim, à medida que os novos estágios de carga fossem sendo aplicados, as fissuras tendem a surgir, possibilitando o acompanhamento e visualização de sua trajetória. Assim sendo, o modelo elaborado para laje nervurada possui uma rigidez menor que os demais tipos de lajes, com isso rompimento tende a ocorrer primeiro a medida que as cargas fossem aplicadas.

Diante do exposto, Almeida (2002), afirma que através da distribuição conveniente da armadura e do uso de barras de conformação superficial que permita boa aderência ao concreto, pode-se controlar a distribuição das fissuras, conseguindo fissuras mais fechadas e o mais próximas uma da outra.

6. CONCLUSÃO

É de suma importância o conhecimento dos diferentes sistemas estruturais e construtivos de lajes. Diante disto, foi possível almejar os objetivos propostos neste trabalho em analisar e compreender os deslocamentos e fissurações de lajes (maciça, nervurada e treliçadas) avaliados pelo método de analogia de grelha.

Neste sentido, verificou-se o comportamento das estruturas para uma sequência de dimensões, tendo como resultado a visualização dos esforços solicitados requeridos, tanto imediatos quando para uma série de incrementos que visam simular a trajetória de vida para estas peças.

Assim sendo, foi possível enfatizar que as lajes maciças apresentaram desempenho de deslocamento e fissuração muitos bons para todos os modelos apresentados. No entanto, a mesma requer um volume maior de concreto, onerando o valor de construção. Além disso, o excesso em concreto torna esta estrutura mais pesada, influenciando também os dimensionamentos de outros elementos estruturais (vigas, pilares e fundação).

Neste sentido, ao reduzir esse volume de concreto utilizando outras soluções, a fissuração passa a ser maior e os deslocamentos também, como apresentados nas análises.

Para a análise não linear, considerando as deformações diferidas ao longo do tempo e o efeito da fluência, a laje treliçada com enchimento cerâmico foi a estrutura que sofreu um maior deslocamento, com 11,39 cm. Para esse modelo, cabe ao responsável técnico reconfigurar o dimensionamento das armaduras, o qual vise combater esse deslocamento excessivo.

Para o modelo de lajes nervuradas foram submetidas aos mesmos testes, os quais confirmaram a eficiência deste modelo tanto para os deslocamentos quanto para a resistência à fissuração em perímetros quadrados ou próximo disso, como no ensaio 6 x6, apresentando bom comportamento à medida que foram variando as dimensões e submetidas aos ciclos de cargas. Para casos de plantas retangulares sugere-se que o responsável técnico avalie o uso da grelha em uma direção, sendo disposta no sentido do menor vão, a fim de mitigar a fissuração e os deslocamentos como visto no estudo com dimensões de 6 x 9 metros.

Neste sentido, é de suma importância fazer a verificação de aberturas de fissuras que tem por finalidade evitar o seu surgimento nas peças de concreto armado de forma excessiva, evitando que as armaduras fiquem expostas e venham a comprometer sua durabilidade. A fim de garantir o comportamento adequado e previsível das estruturas.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto a importância do referido estudo tanto para as empresas quando para os profissionais da construção civil. Visto que, são situações evidenciadas diariamente nos diversos tipos de obras. Assim sendo, sugere-se uma continuidade desta pesquisa, sendo proposto a análise financeira para a montagem e execução destas construções, reforçando ainda mais a necessidade de reunir informações suficientes que melhorem e maximizem a qualidade das obras.

De imediato, é essencial incentivar a capacitação dos profissionais técnicos, a fim de transmitir o conhecimento e entendimento dessas análises comparativas, sendo possível interpretá-las, diagnosticá-las, tratá-las como na aparência de deformações quanto para os surgimentos de fissurações excessivas.

Investir na continuidade deste trabalho, no acúmulo de informações, na análise de seus impactos e na qualidade nas obras, é o norte para despertar o interesse daqueles que compõem a engenharia civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ADORNA, Diego da L.; PARIZOTTO, Liana; LAZZARI, Bruna M.; e outros. **Concreto Armado**: Vigas e Lajes. Grupo A, 2021. E-book. ISBN 9786556901930. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556901930/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado eu te amo**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2015. 339 p. 2 v.

CAMACHO, Jefferson Sidney. **Concreto Armado**: Estados Limites de Utilização. Ilha Solteira 2005, Universidade Estadual Paulista – UNESP. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/estados-limites-de-servico.pdf> . Acesso em: 15 de set. de 2023.

CUNHA, Albino Joaquim Pimenta da; SOUZA, Vicente Custódio Moreira de. **Lajes em concreto armado e protendido**. Niterói/RJ: EDUFF, 1994. 584 p.

GUIA DA ENGENHARIA. **Estados Limites ELU e ELS**: aprenda a diferença!. Brasil, 5 de janeiro de 2018. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/estados-limites/>> . Acesso em: 15 de set. de 2023.

JULIANO VASCONCELLOS (Brasil). Universidade Feevale (ed.). **Catálogo Digital de Detalhamento da Construção**. 2017. Disponível em: <https://cddcarqfeevale.wordpress.com/>. Acesso em: 12 out. 2023.

LEITE, Gabriela Borim. **Estudo dos critérios de parametrização do modelo de grelha para o cálculo de lajes maciças de concreto armado**. 2017. 59 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/30731/1/Trabalho%20Final%20-%20GabrielaBorimLeite.pdf>. Acesso em: 12 out. 2023.

LOPES, André Felipe de Oliveira. **Estudo comparativo entre lajes nervuradas moldadas no local com fôrmas de polipropileno e lajes pré-fabricadas treliçadas**. 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/SP, 2015.

LURE ENGENHARIA. **EM FEA**, o que é análise linear e não linear? - Lure Engenharia. Disponível em: [https://lureengenharia.com.br/2022/04/14/analise-linear-e-nao-linear/#:~:text=Uma%20análise%20não%20linear%20é,elasto-plástico\)%20e%20contato](https://lureengenharia.com.br/2022/04/14/analise-linear-e-nao-linear/#:~:text=Uma%20análise%20não%20linear%20é,elasto-plástico)%20e%20contato) . Acesso em: 15 set. 2023.

MACHADO, Gabriel M.; MOURA, M. W.. **Método de analogia de grelha**: análise numérica de lajes maciças de concreto armado. Ripe, Rio Grande, v. 8, n. 2, p. 43-51, 01 dez. 2022. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/download/46843/36273/148676#:~:text=O%2>

0m%C3%A9todo%20de%20analogia%20de%20grelha%20trata%2Dse%20de%20uma,de%20utiliza%C3%A7%C3%A3o%20e%20entendimento%20por. Acesso em: 12 out. 2023.

OLIVEIRA, M. R. C.; SILVA, M. V. D.; TEIXEIRA, M. B.; SANTOS, D. F. A.. **Estudo comparativo da estabilidade global em diferentes tipos de lajes**. Technology Science, v.2, n.1, p.28-32, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2674-6425.2020.001.0005>

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso básico de concreto armado**: conforme NBR 6118/2014. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

S/A, Quimicryl. Construção Civil cresceu 74,25% nos últimos 20 anos revela estudo do SINDUSCON/MG. 2022. Construção Mercado. Disponível em: <https://www.quimicryl.com.br/construcao-civil-cresceu-7425-nos-ultimos-20-anos-revelaestudo-do-sinduscon-mg/> . Acesso em: 10 jul. 2023.

SANTOS, José Sérgio dos. **Desconstruindo o projeto estrutural de edifícios**: concreto armado e protendido. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 126 p.

TQS, Docs. Análise Não-Linear. Brasil. Disponível em: <https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3158> . Acesso em 15 de set. de 2023.

VIEIRA, Jorge Rocha; OLIVEIRA, Gerran Silva. **Comparação técnica-financeira entre lajes maciças, treliçadas e nervuradas**. 2018. 26 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Brasília, Brasília/DF, 2015.