



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

Raymundo Gabryel Soares Rodrigues

**Desempenho Estrutural de Lajes Treliçadas Versus Lajes Maciças: Um Estudo
Comparativo**

PAU DOS FERROS

2024

Raymundo Gabryel Soares Rodrigues

**Desempenho Estrutural de Lajes Treliçadas Versus Lajes Maciças: Um Estudo
Comparativo**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Henrique
Borges de Oliveira

Co-orientador:

PAU DOS FERROS

2024

© 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.

R685d Rodrigues, Raymundo Gabryel Soares.
Desempenho estrutural de lajes treliçadas
versus lajes maciças: um estudo comparativo /
Raymundo Gabryel Soares Rodrigues. - 2024.
55 f. : il.

Orientador: Leonardo Henrique Borges de
Oliveira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

1. Lajes . 2. Deslocamentos . 3. Fissurações .
4. Grelha. 5. TQS. I. de Oliveira, Leonardo
Henrique Borges , 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.

RAYMUNDO GABRYEL SOARES RODRIGUES

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE LAJES TRELIÇADAS VERSUS LAJES
MACIÇAS: UM ESTUDO COMPARATIVO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: __23__ / __10__ / __ 2024__.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Henrique Borges de Oliveira
Orientador

Karina Estrela Egídio
Membro Examinador

Matheus Alves de Medeiros
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho não teria sido possível sem o apoio incondicional da minha família. Agradeço, especialmente, ao meu Pai Damião e à minha mãe Francisca, por sempre acreditarem em mim e por me fornecerem as bases que me impulsionaram em minha jornada acadêmica. Sacrificando muito de suas vidas para me proporcionar chegar a esse momento. Ao meu irmão Danilo, agradeço pela motivação e pelo companheirismo ao longo de todos esses anos.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu professor e orientador, Leonardo Henrique Borges de Oliveira, cuja orientação e sabedoria foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Seu comprometimento com a educação e a pesquisa serviram como fonte de inspiração. Me mostrou o exemplo de profissional que quero ser. Uma eterna fonte de inspiração.

Agradeço também aos “chegados”, não, agora posso dizer, aos meus irmãos de Ufersa, Pau dos Ferros e vida que tornaram essa trajetória ainda mais significativa: Pedro, Dinho, Elson, Borracha, Guilherme, Lucas Moreno, Henrique, Pablo, Vinicius, Tiago Teixeira, João Neto, Lucas, Vicente, Bruna Dantas, Letícia, Kaelly, Gabryel, Luiz Fernando, Matheus Jardell, Danielly, Ana Julia, Alice, Bianca, Ana Vitória, Geraildo e Lucinha. Cada um de vocês contribuiu de maneira única para minha vida acadêmica e vida pessoal, e sou eternamente grato pelas memórias, risadas e apoio que compartilhamos. Independentemente do tempo que ficarmos sem se vermos, quando nos vermos será como se nos víssemos todo dia.

A todos, meu muito obrigado!

Não é curto o tempo que temos, mas dele muito perdemos. A vida é suficientemente longa e com generosidade nos foi dada, para a realização das maiores coisas, se a empregamos bem. Mas, quando ela se esvai no luxo e na indiferença, quando não a empregamos em nada de bom, então, finalmente constrangidos pela fatalidade, sentimos que ela já passou por nós sem que tivéssemos percebido. O fato é o seguinte: não recebemos uma vida breve, mas a fazemos, nem somos dela carentes, mas esbanjadores. Sêneca.

RESUMO

Lajes em concreto são elementos estruturais planos destinados a suportar cargas verticais e distribuí-las aos apoios, dentro do conceito de lajes em concreto, encontra-se as lajes maciças, constituídas inteiramente de concreto, oferecem resistência uniforme e são utilizadas em diversas edificações devido à sua rigidez, ainda encontra-se as lajes treliçadas que combinam vigotas pré-fabricadas e concreto moldado in loco, proporcionando economia de materiais e eficiência construtiva. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo dessas técnicas construtivas, com a perspectiva de proporcionar um estudo de análise para escolher qual método se adequa melhor a determinadas situações, utilizando a ferramenta TQS, e comparando dados de deslocamentos e fissurações por meio do Método de Analogia à Grelha e comparando a quantidade de aço utilizada. Foram analisados 21 modelos: 3 lajes maciças, 9 lajes treliçadas com enchimento em Poliestireno Expandido (EPS), 9 lajes treliçadas com enchimento cerâmico. A pesquisa visa verificar a influência de parâmetros como a rigidez dos elementos e as características dos materiais nas funcionalidades dessas estruturas. Os resultados indicaram que as lajes maciças apresentaram desempenho superior em deslocamento e fissuração, embora demandem maior quantidade de aço, elevando os custos. As lajes treliçadas mostraram maior tendência a deslocamentos, mas oferecem vantagens em leveza e distribuição de cargas.

Palavras-chave: Lajes. Deslocamentos. Fissurações. Grelha. TQS.

ABSTRACT

Concrete slabs are flat structural elements designed to support vertical loads and distribute them to the supports. Within the concept of concrete slabs, solid slabs, entirely made of concrete, offer uniform resistance and are commonly used in various structures due to their rigidity. Additionally, there are joist slabs, which combine pre-fabricated beams and cast-in-place concrete, offering material savings and constructive efficiency. This work aims to conduct a comparative study of these construction techniques, with the goal of providing an analytical basis for selecting the most suitable method for specific situations. Using the TQS software, it compares data on displacements and cracking through the Grid Analogy Method and analyzes the amount of steel used. A total of 21 models were analyzed: 3 solid slabs, 9 joist slabs with Expanded Polystyrene (EPS) infill, and 9 joist slabs with ceramic infill. The research seeks to assess the influence of parameters such as element rigidity and material characteristics on the functionality of these structures. The results indicated that solid slabs exhibited superior performance in terms of displacement and crack control, although they require a higher amount of steel, increasing costs. Joist slabs showed a greater tendency toward displacements but offer advantages in terms of lightness and load distribution.

Keywords: Slabs. Displacements. Cracking. Grid. TQS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vão Efetivos.....	18
Figura 2: Representação de Pavimento com Laje Maciça apoiadas em Vigas.	19
Figura 3: Laje Trelaçada	21
Figura 4: Trelaç Espacial.....	22
Figura 5: Representação de Grelha no TQS	23
Figura 6: Características dos Estádios do Concreto.	29
Figura 7: Fluxograma Etapas de Desenvolvimento do Trabalho	31
Figura 8: Detalhe de Lajes Trelaçadas	32
Figura 9: Medição do Comprimento da Trelaç Espacial.....	33
Figura 10: Medição da Altura da Trelaç Espacial.	33
Figura 11: Representação da Trelaç 01	35
Figura 12: Representação da Trelaç 02	35
Figura 13: Representação da Trelaç 03	36
Figura 14: Modelo Esquemático 3 m x 3 m.	37
Figura 15: Modelo Esquemático 6 m x 3 m.	38
Figura 16: Modelo Esquemático 9 m x 3 m.	38
Figura 18: Gráfico de Deslocamentos Modelo 3 m x 3 m.....	41
Figura 19: Gráfico de Deslocamentos Modelo 6 m x 3 m.....	42
Figura 20: Gráfico de Deslocamentos Modelo 9 m x 3 m.....	43
Figura 21: Gráfico de Fissurações Modelo 3 m x 3 m.	45
Figura 22: Gráfico de Fissurações Modelo 6 m x 3 m	46
Figura 23: Gráfico de Fissurações Modelo 9 m x 3 m.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões das Lajes Treliçadas (cm)	34
Tabela 2: Inércias e Áreas	37
Tabela 3: Deslocamentos das Lajes (cm).	40
Tabela 4: Fissurações das Lajes (mm).....	44
Tabela 5: Quantidade de Aço nas Lajes do Modelo 3 m x 3m.....	49
Tabela 6: Quantidade de Aço nas Lajes do Modelo 6 m x 3m.....	49
Tabela 7: Quantidade de Aço nas Lajes do Modelo 9 m x 3m.....	50
Tabela 8: Deslocamentos Limites	16

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS	17
2.1 Geral.....	17
2.2 Específicos	17
3. REVISÃO TEÓRICA	17
3.1 Lajes de Concreto Armado	17
3.1.1 Classificação quanto a direção	17
3.2 Lajes Maciças	19
3.3 Lajes Trelaçadas	20
3.4 MÉTODO DE ANÁLISE DO TQS	22
3.4.1 Análise de Grelha.....	22
3.5 AÇÕES	24
3.5.1 Permanentes	24
3.5.2 Ações Variáveis	24
3.5.3 Ações Excepcionais	24
3.6 ESTADOS LIMITES	25
3.7 COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	25
3.7.1 Combinações Últimas	26
3.7.1.1 Combinação Última Normal	26
3.7.2.2 Combinação Última de Construção	26
3.7.1.3 Combinação Última Excepcional	26

3.7.2 COMBINAÇÕES DE SERVIÇOS	27
3.7.2.1 Composição de Combinações	27
3.7.2.2 Coeficientes de Ponderação	28
3.7.2.3 Verificação de Deformações e Fissuras	28
3.8 MOMENTOS DE FISSURAÇÃO DO CONCRETO	28
3.9 ESTÁDIOS DE COMPORTAMENTO DE CONCRETO	29
3.10 DESLOCAMENTOS	30
4. METODOLOGIA.....	31
5. RESULTADOS E DISCURSSÕES	39
5.1	40
5.2 ANÁLISE DE FISSURAÇÃO DOS MODELOS.....	44
5.3 QUANTIDADE DE AÇO	48
6. CONCLUSÃO.....	51

1 INTRODUÇÃO

As técnicas construtivas desempenham um papel fundamental na adaptação e sobrevivência da humanidade em diversos ambientes. Ao longo da história, essas técnicas têm evoluído em consonância com os avanços tecnológicos e a disponibilidade de novos materiais, com o intuito de promover maior economia, conforto e segurança ao ser humano.

Conforme Vieira (2014), a busca incessante por inovações nas técnicas construtivas, com o objetivo de reduzir custos e otimizar o tempo de execução das obras, tem sido uma força motriz na sociedade contemporânea. Essa demanda crescente tem impulsionado um aumento significativo nas pesquisas voltadas ao desenvolvimento contínuo do setor da construção civil.

Nesse contexto, um objeto de estudo relevante na área da Engenharia Civil são as lajes. Essas estruturas são classificadas como elementos planos e bidimensionais, cujas dimensões em comprimento e largura são da mesma ordem de grandeza, superando em proporção a espessura. As lajes têm a função de suportar a maior parte das cargas aplicadas a uma edificação, geralmente perpendiculares ao seu plano. Tais cargas podem ser distribuídas sobre a área da laje, de forma linear, ou concentradas em pontos específicos. As lajes são comumente classificadas em duas categorias principais: Lajes Maciças e Lajes Nervuradas. Ambas são amplamente empregadas devido à sua versatilidade e eficiência estrutural em diversas tipologias de edificações. As lajes maciças, garantem elevada rigidez e controle de fissuração, enquanto as lajes treliçadas oferecem economia de materiais e leveza ao unir vigotas pré-fabricadas e concreto moldado in loco. Essas características tornam ambos os sistemas adequados para variados contextos construtivos.

Este trabalho tem como objetivo investigar, compreender e comparar os deslocamentos, fissurações e quantidade de aço utilizado de lajes maciças e lajes treliçadas baseadas em projetos de lajes treliçadas construídas na cidade de Pau dos Ferros, por meio do método de analogia de grelha.

A pesquisa foi conduzida considerando uma sequência de dimensões das lajes, buscando visualizar os esforços solicitados tanto em condições imediatas quanto ao longo de uma série de incrementos que simulam a trajetória de vida das peças. Este estudo é relevante por fornecer dados sobre o comportamento das lajes em diferentes cenários, possibilitando uma escolha mais fundamentada do tipo de laje a ser utilizado. Essa análise favorece a redução de custos financeiros e promove um desempenho estrutural otimizado. Os resultados obtidos evidenciam que, enquanto as lajes maciças demonstraram um desempenho superior em termos de deslocamento e fissuração, elas também requerem uma maior quantidade de aço, o que eleva

os custos e influencia o dimensionamento de outros elementos estruturais, como vigas, pilares e fundações.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Realizar uma comparação entre as lajes treliçadas e as lajes maciças, considerando os tipos dessas estruturas fabricados em Pau dos Ferros - RN e região.

2.2 Específicos

- Verificar o comportamento de lajes treliçadas em diferentes tipos de vão;
- Verificar o comportamento de lajes maciças em diferentes tipos de vão;
- Verificar deslocamentos e fissuras destas lajes em cada situação.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1 Lajes de Concreto Armado

Conforme Silva (2005), as lajes são elementos estruturais bidimensionais, caracterizados por duas dimensões predominantes em relação a uma terceira, denominada espessura, e submetidos a carregamentos aplicados de forma perpendicular ao seu plano principal. Esse tipo de elemento estrutural é projetado para resistir a cargas verticais, gerando, principalmente, momentos fletores e esforços cortantes. No âmbito da classificação geral das lajes, encontram-se subdivisões como lajes nervuradas e lajes maciças. As lajes podem ser categorizadas segundo diferentes critérios, como o sistema construtivo, a configuração geométrica e sua relação com os apoios.

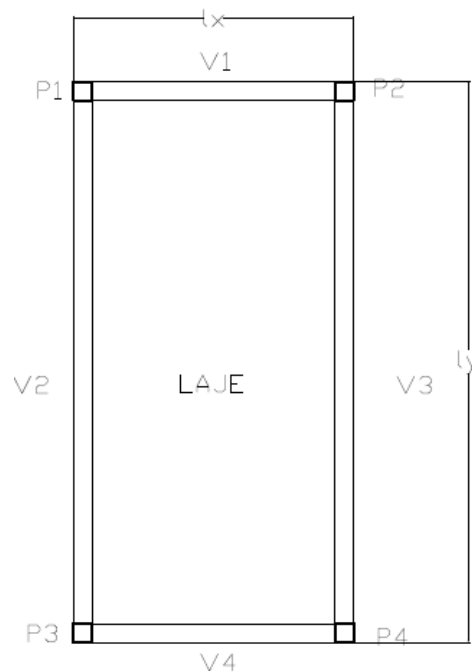
3.1.1 Classificação quanto a direção

De acordo com Amorim (2021), *apud* Pinheiro (2016), as lajes podem ser classificadas como armadas em uma direção (unidirecionais) ou armadas em duas direções (bidirecionais),

dependendo da relação entre o vão efetivo do lado maior (denominado l_y) e o vão efetivo do lado menor (denominado l_x).

Nas lajes unidirecionais, o comportamento estrutural assemelha-se ao de uma viga, onde a armadura principal é distribuída ao longo da direção principal (menor vão), enquanto na direção oposta (maior vão) utiliza-se uma armadura secundária. Por outro lado, nas lajes bidirecionais, a estrutura funciona em ambas as direções, o que torna as duas direções principais, exigindo o uso de armadura principal em ambas. Os vãos efetivos podem ser visualizados conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Vão Efetivos



Fonte: Autor (2024)

Onde l_x representa o vão efetivo do lado menor e l_y representa o vão efetivo do lado maior. A razão entre os vãos efetivos é determinada conforme o cálculo demonstrado na equação 1, esse cálculo é utilizado para verificar se a laje pode ser tratada como unidirecional ou bidirecional, essa definição ajuda no dimensionamento adequado das armaduras e na escolha da metodologia de cálculo dos esforços, contribuindo para a segurança e eficiência da estrutura.

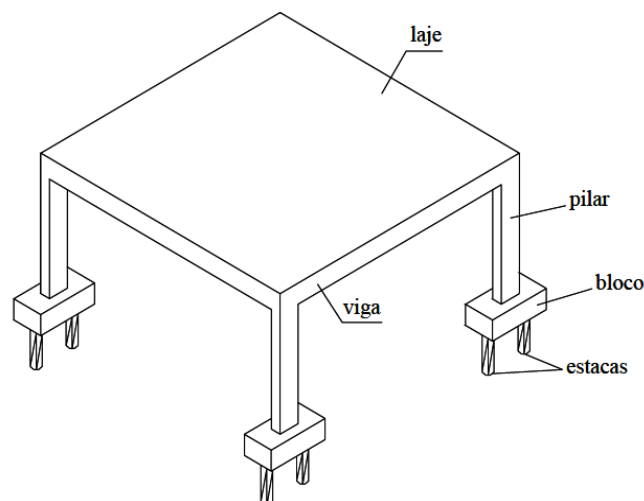
$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \quad (1)$$

3.2 Lajes Maciças

As lajes maciças são formadas por uma placa de concreto com espessura constante ao longo de toda a sua superfície. Segundo França (2016), *apud* Carvalho Filho, as lajes maciças distribuem suas reações de maneira uniforme ao longo de toda a viga de contorno, o que não ocorre com as lajes pré-moldadas. Esse comportamento permite um melhor aproveitamento das vigas nos pavimentos, pois estas podem suportar cargas de magnitudes variadas, dependendo do vão.

As lajes maciças podem ser armadas longitudinalmente (com armadura de flexão) e, eventualmente, transversalmente. A Figura 02, apresentada abaixo, ilustra um pavimento com laje maciça.

Figura 2: Representação de Pavimento com Laje Maciça apoiadas em Vigas.



Fonte: Silva (2005) *apud* França (2016)

A ABNT NBR 6118/2023, em seu item 13.2.4.1, estabelece a espessura mínima para as lajes maciças conforme as seguintes especificações:

- 7 cm para coberturas que não se projetam em balanço;
- 8 cm para lajes de piso que não se projetam em balanço;

- 10 cm para lajes que suportam veículos com peso total igual ou inferior a 30 kN;
- 12 cm para lajes que suportam veículos com peso total superior a 30 kN;
- 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, sendo este o mínimo para lajes de piso biapoiadas e lajes de piso contínuas;
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes em formato de cogumelo, excluindo a área do capitel.

3.3 Lajes Trelaçadas

De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, no item 14.7.7, as lajes trelaçadas são definidas como lajes compostas por nervuras, que podem ser pré-moldadas ou moldadas in loco, nas quais a zona de tração associada aos momentos positivos está localizada nas nervuras. Entre essas nervuras, é possível adicionar material inerte. Conforme França (2016), *apud* Giongo (2007), as lajes nervuradas são formadas por um conjunto de vigas, denominadas nervuras, interligadas por uma mesa de concreto. O funcionamento desse tipo de laje é tal que a mesa de concreto resiste às tensões de compressão, enquanto as barras da treliça suportam as tensões de tração. Contudo, como a ligação entre a mesa e a armadura é realizada através das nervuras de concreto, estas também podem ser submetidas a tensões de compressão. Assim, o conjunto formado pela nervura e pela laje apresenta um comportamento semelhante ao de uma viga de seção “T”.

Segundo a ABNT NBR 6118:2023 a espessura da mesa, na ausência de tubulações horizontais embutidas, deve ser superior ou igual a $1/15$ da distância entre as faces das nervuras e não inferior a 4 cm. O valor mínimo absoluto para a espessura da mesa é de 5 cm, caso haja tubulações embutidas com diâmetro igual ou inferior a 10 mm. Para tubulações com diâmetro superior a 10 mm, a mesa deve possuir espessura mínima de 4 cm acrescida de 4 cm, ou $4\text{ cm} + 2d$, no caso de cruzamento dessas tubulações.

A espessura das nervuras não deve ser inferior a 5 cm. Nervuras com espessura menor que 8 cm não são adequadas para conter armaduras de compressão. Para o dimensionamento das lajes nervuradas, devem-se cumprir as seguintes condições:

- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras igual ou inferior a 65 cm, é dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento na região das nervuras, admite-se a aplicação dos critérios de laje;

- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, é requerida a verificação da flexão da mesa, e as nervuras devem ser avaliadas quanto ao cisalhamento como vigas. No entanto, permite-se a verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for de até 90 cm e a largura média das nervuras for superior a 12 cm;
- Para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras superior a 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada sobre uma grelha de vigas, respeitando-se os limites mínimos de espessura especificados.

Conforme Amorim (2021), *apud* Pinheiro (2016), os sistemas convencionais mais comumente utilizados em edificações incluem as lajes maciças e nervuradas. Em situações que requerem a superação de grandes vãos, é comum a utilização de concreto protendido, com o objetivo de aprimorar o desempenho da estrutura, especialmente em termos de resistência. Para a seleção de um determinado sistema estrutural, é fundamental considerar fatores como a capacidade do meio técnico disponível para a execução do sistema, bem como a disponibilidade de materiais e equipamentos necessários para essa etapa da obra. A Figura 3 a seguir apresenta uma representação de uma laje treliçada.

Figura 3: Laje Treliçada



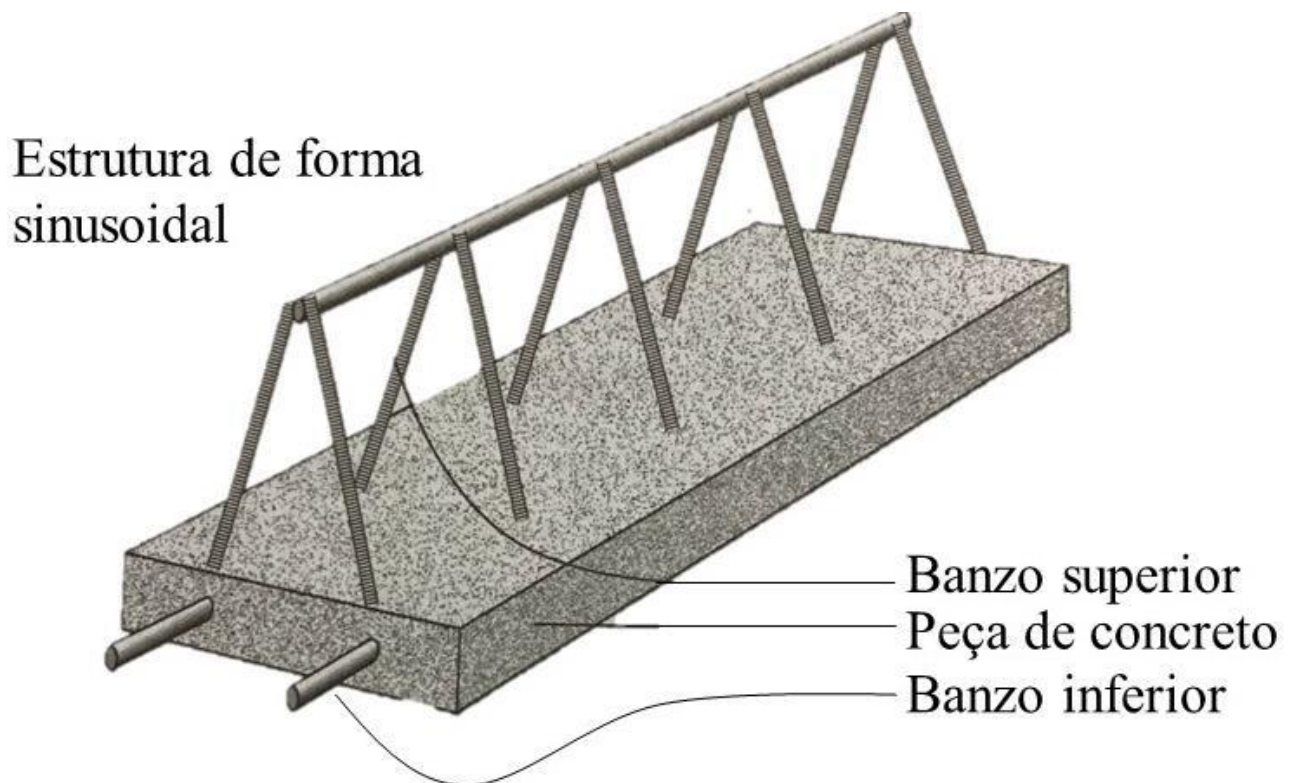
Fonte: Barros Siqueira (2023)

Segundo a Engenharia de Projetos (2023), o preenchimento das lajes treliçadas é realizado por meio da utilização de um material inerte, que não desempenha função estrutural. A adoção desse tipo de material tem como objetivo reduzir o peso próprio da laje e o consumo

de concreto. Os materiais que podem ser empregados para esse preenchimento incluem blocos de concreto, blocos cerâmicos perfurados e poliestireno expandido (EPS). Embora esses materiais não possuam funções estruturais, eles são responsáveis por conferir estabilidade lateral às vigas, garantindo a rigidez do conjunto ao travar o painel da laje.

As armaduras das lajes do tipo treliçada são compostas por uma treliça espacial pré-fabricada, conforme ilustrado na Figura 4 a seguir.

Figura 4: Treliça Espacial



Fonte: Afonso (2023) *apud* Botelho e Marchetti (2015)

3.4 MÉTODO DE ANÁLISE DO TQS

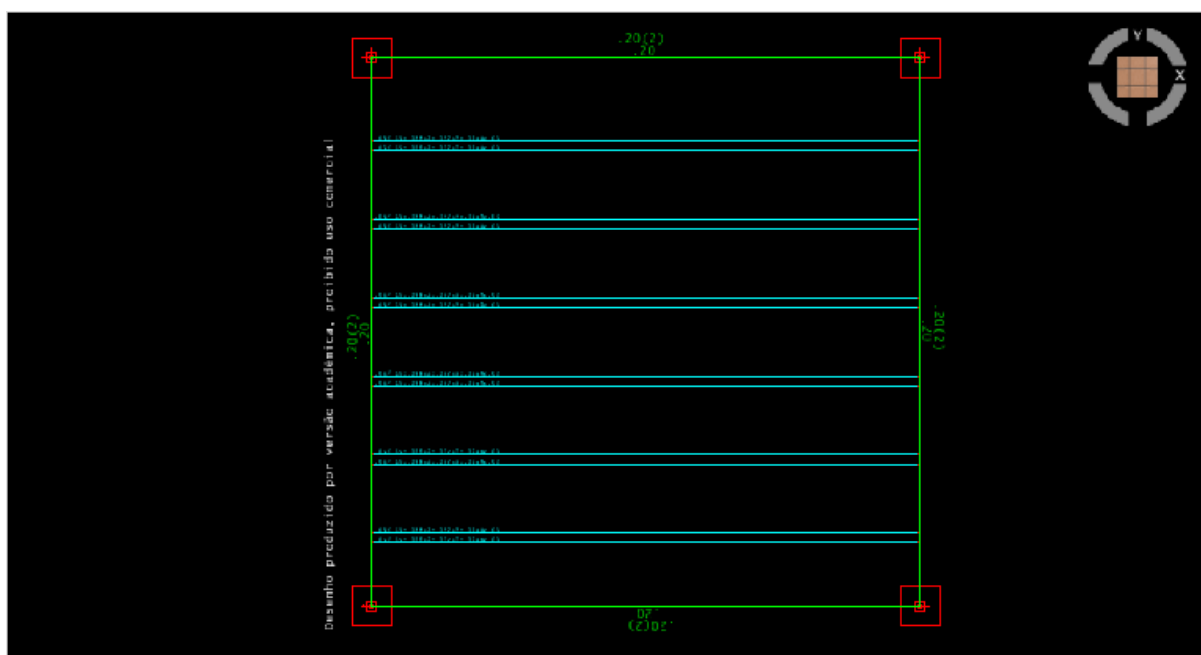
3.4.1 Análise de Grelha

De acordo com o TQS DOCS (2023), uma grelha em lajes de concreto consiste em uma armadura de aço incorporada ao concreto, com o objetivo de aumentar sua resistência e capacidade de carga. Essa armadura é constituída por barras de aço dispostas em duas direções perpendiculares, formando, assim, uma malha retangular ou quadrada.

Assim, a rigidez longitudinal concentra-se nas barras longitudinais, enquanto a rigidez transversal é atribuída às barras transversais. O TQS VERSÃO 24.3 baseia-se nesse método,

que representa uma alternativa ao cálculo por meio de Métodos de Elementos Finitos. Os carregamentos distribuídos aplicados sobre as lajes são redistribuídos entre as barras da grelha de acordo com a faixa de influência correspondente a cada uma delas. No software TQS, as grelhas apresentam dimensões que variam em função do tipo de laje e do material inerte utilizado. Dessa forma, o momento fletor distribuído na grelha deve ser dividido por essa dimensão para se obter o valor real do momento atuante na laje. A Figura 5 apresenta como é representado a grelha no TQS.

Figura 5: Representação de Grelha no TQS



Fonte: Autor (2024)

Conforme descrito pela Tore Engenharia (2023), uma análise não linear envolve um estudo detalhado de cada componente de um sistema, visando aprofundar o entendimento sobre o comportamento das estruturas e permitir a compreensão da interação entre as forças aplicadas e os deslocamentos resultantes. Nesse contexto, os efeitos não lineares podem originar-se da não linearidade geométrica (ou seja, grandes deformações), da não linearidade do material (como observado em materiais elasto-plásticos) e da presença de fenômenos de contato.

Segundo o TQS Docs (2023), o modelo de grelha adota uma abordagem refinada para a consideração da não linearidade física, fundamentando-se nas relações momento-curvatura. Este modelo incorpora a fissuração do concreto, a presença de armaduras e os efeitos de

fluência, sendo, portanto, essencial para uma análise mais precisa das deformações e das aberturas de fissuras em estruturas de concreto armado.

3.5 AÇÕES

Conforme Nunes (2023), apud Porto e Fernandes (2015), a realização da análise estrutural requer a consideração das ações que podem comprometer a segurança da estrutura, as quais são classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais. Além disso, para a determinação das ações atuantes nas lajes, é essencial consultar outras normas técnicas, como a ABNT NBR 6118:2023 e a ABNT NBR 6120:1980.

3.5.1 Permanentes

Segundo a ABNT NBR 6118:2023 as ações permanentes referem-se às cargas que atuam de forma contínua e constante ao longo da vida útil de uma estrutura. Elas englobam o peso próprio dos elementos construtivos, bem como as cargas provenientes de revestimentos, acabamentos e instalações fixas, além de outras cargas que não apresentam variações significativas ao longo do tempo. Essas ações são consideradas inalteráveis e exercem uma influência substancial no dimensionamento e na estabilidade das edificações.

3.5.2 Ações Variáveis

Segundo a ABNT NBR 6118:2023 as ações variáveis caracterizam-se por atuarem de forma intermitente ou apresentarem intensidade variável ao longo da vida útil de uma estrutura. Exemplos dessas ações incluem as cargas resultantes do uso e ocupação, como o peso de pessoas, móveis e veículos, bem como as ações ambientais, como vento, neve e variações de temperatura. Essas ações são imprevisíveis em relação à sua frequência e intensidade, o que demanda que a estrutura seja projetada de modo a acomodar tais variações sem comprometer sua segurança e integridade.

3.5.3 Ações Excepcionais

Segundo a ABNT NBR 6118:2023 as ações excepcionais são definidas como eventos de natureza rara ou imprevista que podem ocorrer esporadicamente ao longo da vida útil de uma estrutura. Exemplos dessas ações incluem situações extremas, como explosões, impactos acidentais, incêndios e terremotos. Embora sejam eventos pouco frequentes, é imperativo que essas ações sejam consideradas no projeto estrutural, a fim de assegurar que a edificação possua

a capacidade de suportá-las sem incorrer em colapso catastrófico, preservando a segurança dos ocupantes e minimizando os danos estruturais.

3.6 ESTADOS LIMITES

De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, os estados limites referem-se a condições específicas que a estrutura não deve ultrapassar para garantir segurança, funcionalidade, durabilidade e conforto ao longo de sua vida útil. Essa norma classifica os estados limites em duas categorias principais: os Estados Limites Últimos (ELU) e os Estados Limites de Serviço (ELS).

Os ELU correspondem às condições em que a estrutura atinge sua capacidade máxima de resistência, podendo resultar em colapso parcial ou total. Este estado limite está diretamente relacionado à segurança da estrutura e de seus elementos. Exemplos de ELU incluem a ruptura do concreto ou do aço de armadura, a instabilidade geral da estrutura ou situações que possam provocar falhas significativas.

Por outro lado, os ELS referem-se às condições em que a estrutura mantém sua integridade, mas apresenta comprometimento em sua funcionalidade ou conforto. Os ELS abrangem aspectos como deformações excessivas, fissuração, vibrações inadequadas ou outros fenômenos que, embora não levem ao colapso, impactam o desempenho da estrutura durante sua vida útil.

3.7 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Uma vez conhecidas as cargas atuantes em uma estrutura, é imprescindível realizar a verificação dos estados limites último e de serviço. Entretanto, essas verificações não são conduzidas considerando as cargas de forma isolada; é necessário efetuar combinações de ações que possibilitem a visualização das cargas atuando simultaneamente sobre a estrutura em análise. Essa abordagem permite uma análise que se aproxima mais da realidade. Dentro dessas combinações, distinguem-se as combinações para os estados limites últimos e as combinações para os estados limites de serviço.

3.7.1 Combinações Últimas

De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, as combinações últimas referem-se a conjuntos de ações (cargas) aplicadas à estrutura, utilizadas para assegurar sua segurança em situações de carregamento extremo. Essas combinações levam em consideração diferentes tipos de ações que podem atuar simultaneamente sobre a estrutura, aplicando coeficientes parciais de segurança a cada uma delas. A norma classifica as combinações últimas em três categorias principais.

3.7.1.1 Combinação Última Normal

Consideram-se as ações permanentes, variáveis e, ocasionalmente, as ações excepcionais.

- As ações permanentes são atribuídas um coeficiente de majoração, geralmente fixado em 1,4, enquanto as ações variáveis recebem coeficientes que variam de acordo com sua natureza, sendo comumente 1,4 para as ações principais e 1,0 para as ações secundárias.
- Essas combinações são aplicadas em condições normais de carregamento.

3.7.2.2 Combinação Última de Construção

- Essa aplicação ocorre durante a fase de construção, momento em que a estrutura ainda não está completamente finalizada e as condições de carga podem diferir das situações finais de uso.
- Os coeficientes podem ser ajustados para refletir essa condição transitória.

3.7.1.3 Combinação Última Excepcional

- Essa abordagem é empregada em situações de carregamento raras, como incêndios, explosões ou impactos.
- Nesses casos, os coeficientes de segurança são reduzidos, uma vez que o objetivo primordial é prevenir o colapso catastrófico da estrutura, ainda que isso implique a ocorrência de danos.

A ABNT NBR 6118:2023 estabelece que, para a verificação dos Estados Limites Últimos, é imprescindível considerar todas as combinações possíveis de ações, aplicando os coeficientes de ponderação apropriados a cada uma delas. Essa abordagem assegura que a estrutura seja capaz de suportar os carregamentos mais severos, preservando sua segurança e estabilidade. A equação (2) a seguir apresenta como é realizada essas combinações.

$$F_d = \gamma_g * F_{gk} + \gamma_{eg} * F_{egk} + \gamma_q * (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} * F_{qjk}) + \gamma_{eg} * \psi_{0e} * F_{eqk} \quad (2)$$

Onde,

F_d = Força de cálculo ou esforço de projeto;

γ_g = Fator de majoração das ações permanentes;

γ_{eg} = Fator de majoração para ações permanentes excepcionais;

γ_q = Fator de majoração para ações variáveis;

F_{gk} = Ação permanente característica;

F_{egk} = Ação permanente excepcional característica;

F_{q1k} = Primeira ação variável característica;

F_{qjk} = Outras ações variáveis características;

F_{eqk} = Ação variável excepcional característica;

ψ_{0j} = Coeficiente de simultaneidade para as ações variáveis ;

ψ_{0e} = Coeficiente de combinação para a ação variável excepcional.

3.7.2 COMBINAÇÕES DE SERVIÇOS

A ABNT NBR 6118:2023 estabelece diretrizes para as combinações de serviço, que são essenciais para a análise dos Estados Limites de Serviço (ELS). Essas combinações têm como objetivo assegurar que as estruturas de concreto atendam aos critérios de desempenho e conforto em condições normais de uso, evitando o comprometimento funcional. Os principais aspectos abordados pela norma em relação às combinações de serviço incluem.

3.7.2.1 Composição de Combinações

As combinações de serviço devem considerar tanto as ações permanentes quanto as variáveis. As ações permanentes são incorporadas em sua totalidade, enquanto as ações variáveis são ponderadas por meio de coeficientes que refletem a incerteza e a variabilidade associadas a essas cargas.

3.7.2.2 Coeficientes de Ponderação

Em relação às ações variáveis, a norma recomenda a aplicação de coeficientes de redução, os quais geralmente incluem: 1,0 para a ação variável mais significativa e 0,5 para as demais ações variáveis que possam atuar simultaneamente.

3.7.2.3 Verificação de Deformações e Fissuras

As combinações de serviço são empregadas para a avaliação de deformações, fissuras e outros aspectos vinculados ao desempenho estrutural. A norma estipula que as deformações e as aberturas de fissuras devem permanecer dentro de limites aceitáveis, garantindo, assim, o conforto dos usuários e a integridade estética e funcional da edificação.

3.8 MOMENTOS DE FISSURAÇÃO DO CONCRETO

De acordo com Amorim (2022), *apud* Clímaco (2016) e Rodrigues (2020), em relação aos Estados Limites de Serviço (ELS), os componentes de concreto armado, sob um regime global elástico, apresentam diversas regiões operando no Estádio I, desde que não apresentem fissuras. No entanto, caso essas peças estejam fissuradas, elas passam a operar no Estádio II. Para determinar em qual estágio a peça se encontra, a seguinte equação (3) estabelece essa distinção.

$$M_r = \frac{\alpha * f_{ctm} * I_c}{y_t} \quad (3)$$

Onde,

α - Fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta. Adota-se:

$\alpha = 1,5$ para seções retangulares

$\alpha = 1,2$ para seções T ou duplo T;

y_t - Distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

I_c - Momento de inércia da seção bruta de concreto;

f_{ctm} - Resistência à tração direta do concreto, deve ser usado o f_{ctm} no estado-limite de deformação excessiva;

A resistência à tração direta do concreto, conforme estabelecido pela NBR 6118:2023 para concretos com classes até 50 MPa, é calculada pela equação (4):

$$f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

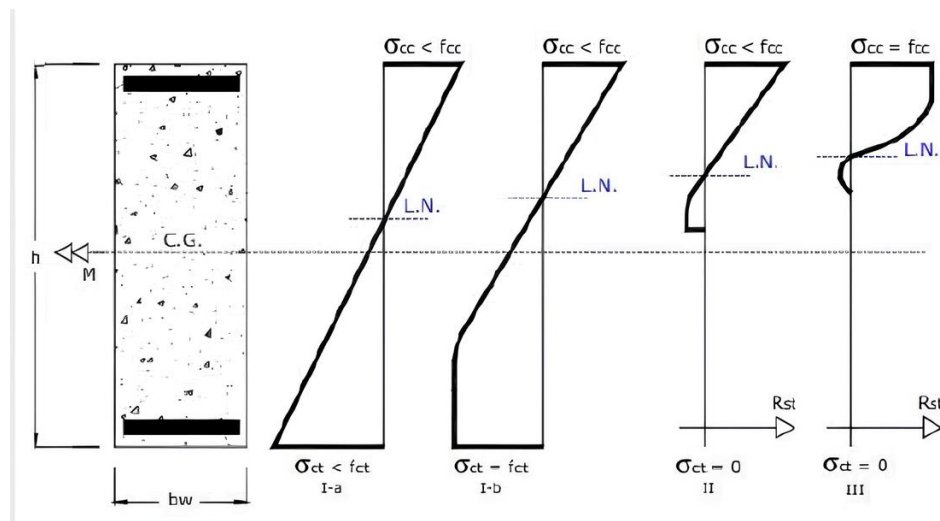
E o momento de inercia é dado pela equação (5):

$$I_c = \frac{b * h^3}{12} \quad (5)$$

3.9 ESTÁDIOS DE COMPORTAMENTO DE CONCRETO

De acordo com Amorim (2022), *apud* Nogueira (2010) *apud* Rodrigues (2020), a avaliação das estruturas em concreto armado em condições de serviço fundamenta-se nas hipóteses clássicas de estágios de comportamento, nos quais a seção é classificada como fissurada ou não fissurada. Essa classificação é significativamente influenciada pela intensidade das solicitações. A Figura 6 a seguir ilustra as características dos três estádios:

Figura 6: Características dos Estádios do Concreto.



Fonte: Amorim (2022), *apud* Nogueira (2010), *apud* Rodrigues (2020)

Ainda segundo Amorim (2022), *apud* Rodrigues (2020), as definições dos três estágios de comportamento são apresentadas da seguinte maneira:

- **Estádio I** – Neste primeiro estágio, o comportamento da seção é dividido em duas fases. Na primeira fase, denominada I-a, a seção é submetida a solicitações baixas, inferiores aos limites de resistência à tração e à compressão do concreto. Nessa condição, a seção permanece não fissurada, e a relação entre tensão e deformação permanece proporcional, caracterizando um regime elástico. Na segunda fase, designada I-b, as solicitações aumentam, elevando também as tensões de tração, o que resulta no surgimento das primeiras fissuras ao atingir o limite de resistência à tração. Apesar da fissuração, o concreto sob tração ainda contribui para a resistência da estrutura, desempenhando um papel significativo em sua integridade.
- **Estádio II** – Este estágio é caracterizado pelo fato de que o concreto localizado abaixo da linha neutra está completamente fissurado. Nessa fase, o concreto nessa região não contribui mais para a resistência às forças de tração, sendo desconsiderado na análise estrutural. Somente a armadura posicionada na zona tracionada, abaixo da linha neutra, continua a atuar, contribuindo para o desempenho global da estrutura. Tanto o concreto na região comprimida quanto o aço na região tracionada permanecem em regime elástico, mantendo uma relação proporcional entre tensão e deformação.
- **Estádio III** – Neste estágio, as solicitações alcançam níveis elevados, levando o aço ao início do escoamento e o concreto ao seu estado de ruptura. Nesse ponto, a tensão na fibra mais comprimida do concreto atinge seu valor máximo de resistência à compressão. Este estágio marca o limite de capacidade da estrutura, no qual o comportamento não é mais elástico e a estrutura se aproxima do colapso. O concreto na região comprimida começa a apresentar falhas, enquanto a armadura de aço assume um papel crítico no desempenho global, operando em regime plástico.

Com base nessas definições, foi seguido um conjunto específico de passos para realizar uma análise comparativa entre os dois tipos de lajes, maciça e treliçada.

3.10 DESLOCAMENTOS

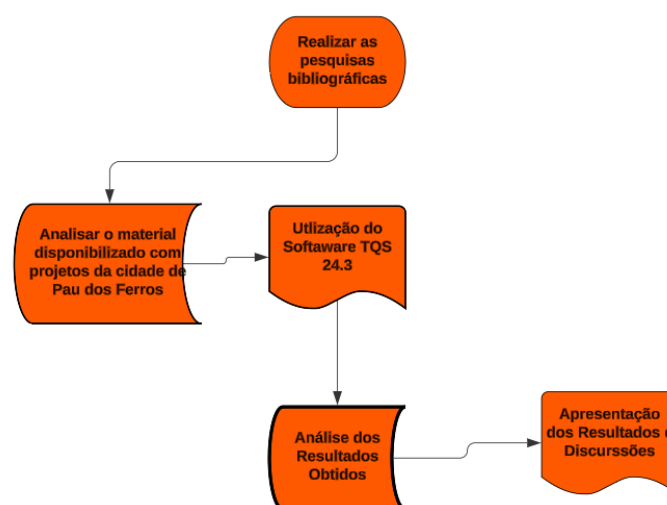
A ABNT NBR 6118:2023 aborda os deslocamentos estruturais no âmbito dos Estados Limites de Serviço (ELS), estabelecendo que tais deslocamentos devem ser restringidos para assegurar o desempenho adequado da estrutura ao longo de sua vida útil. A norma define

critérios para o controle das deformações, visando garantir o conforto dos usuários, prevenir danos a elementos não estruturais e assegurar a integridade funcional da edificação. Além disso, são estipulados limites de deslocamentos admissíveis em função do vão e das características específicas da estrutura. Em termos gerais, a flecha máxima permitida é determinada pela relação entre o comprimento do vão e um fator que varia conforme o tipo de estrutura (por exemplo, lajes, vigas, entre outros). Os valores típicos estabelecidos são $L/250$ para deslocamentos instantâneos e $L/500$ para deslocamentos diferenciais. A Tabela 8 no Apêndice A apresenta a tabela de deslocamentos permitidos pela ABNT NBR 6118:2023.

4. METODOLOGIA

A segunda etapa deste estudo consiste na análise de projetos estruturais e modelos físicos com o objetivo de obter os parâmetros geométricos das treliças utilizadas na cidade de Pau dos Ferros/RN. A segunda etapa refere-se à modelagem dessas treliças na ferramenta computacional TQS v24.3, na qual serão simuladas lajes com variações nos vãos e nas cargas aplicadas. A terceira etapa do estudo será iniciada após o processamento dos modelos na ferramenta computacional e envolverá a análise dos esforços solicitantes, deslocamentos e fissuração das lajes treliçadas em questão. A Figura 07 apresenta um fluxograma ilustrativo das etapas de desenvolvimento deste trabalho.

Figura 7: Fluxograma Etapas de Desenvolvimento do Trabalho

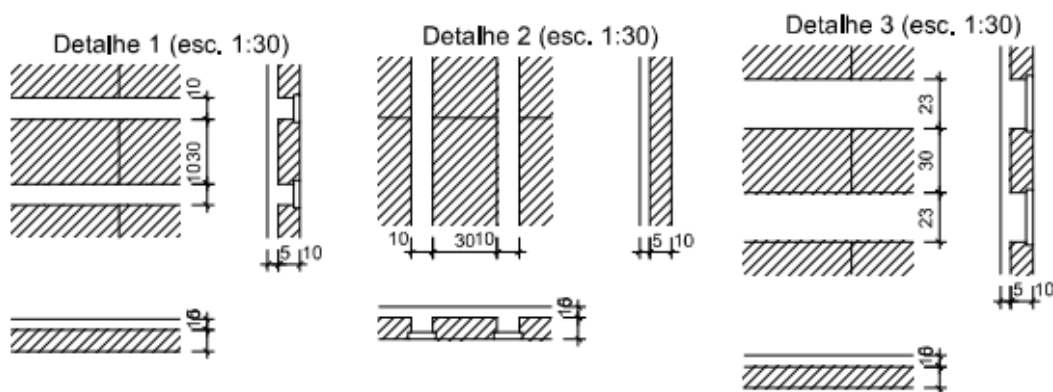


Fonte: Autor (2024)

Nesse contexto, a primeira etapa consistiu na realização de uma revisão bibliográfica que abrangeu dissertações, monografias, artigos científicos, normas técnicas, livros e outras fontes acadêmicas, com o objetivo de abordar de maneira concisa os aspectos das lajes maciças, nervuradas e treliçadas. O intuito dessa revisão foi interpretar e analisar os dados fornecidos, a fim de oferecer subsídios para o diagnóstico e a compreensão do objeto de estudo.

Na segunda etapa, foram analisados projetos de formas diferentes de lajes treliçadas executados na cidade de Pau dos Ferros/RN, onde se observou a disposição da laje treliçada e se obtiveram dados relevantes para o processo, como a espessura da capa de concreto, a altura da treliça e a distância entre as treliças, ver Figura 8. Adicionalmente, foi considerada uma treliça disponibilizada por um residente da cidade, a qual foi utilizada para determinar a altura e o comprimento da treliça, enquanto a espessura da capa de concreto e a distância entre as treliças foram fornecidas pelo morador. As imagens da treliça disponibilizada seguem a seguir nas Figuras 9 e 10.

Figura 8: Detalhe de Lajes Treliçadas



Fonte: Autor (2024)

Figura 9: Medição do Comprimento da Trelça Espacial



Fonte: Autor (2024)

Figura 10: Medição da Altura da Trelça Espacial.



Fonte: Autor (2024)

Após a conclusão dessa etapa, os dados obtidos foram os seguintes. É importante ressaltar que, para facilitar a visualização dos resultados, as treliças foram denominadas como Treliça 01, Treliça 02 e Treliça 03. As Treliças 01 e 02 correspondem ao projeto estrutural disponibilizado, enquanto a Treliça 03 refere-se àquela fornecida pelo morador. A Tabela 1 apresenta as dimensões destas.

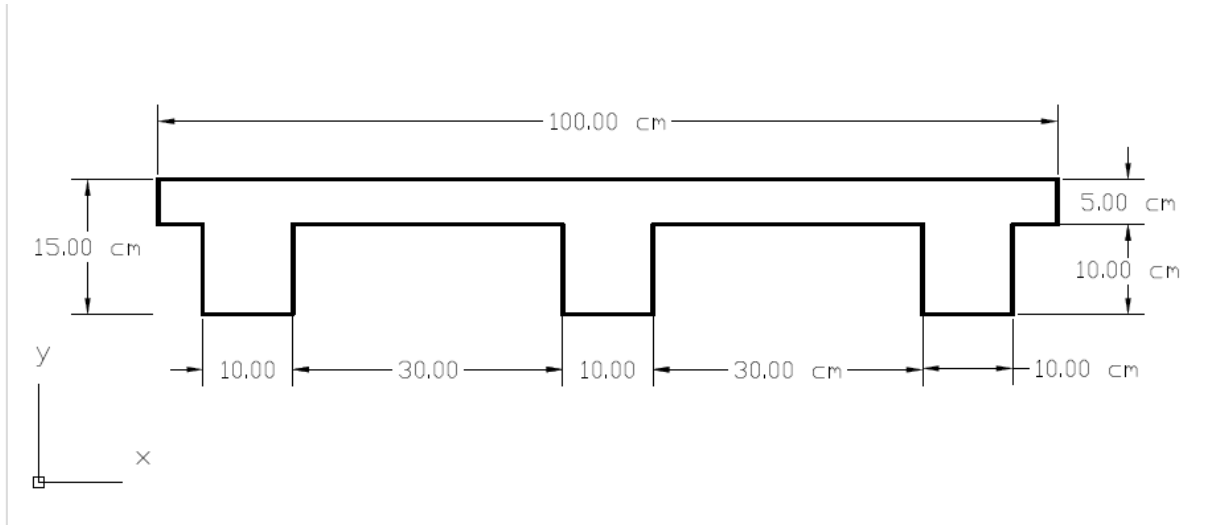
Tabela 1: Dimensões das Lajes Treliçadas (cm)

DESCRIÇÃO	ALTURA DA TRELIÇA	CAPA DE CONCRETO	ALTURA TOTAL DA LAJE	DISTÂNCIA ENTRE AS TRELIÇAS	COMPRIMENTO DA TRELIÇA
TRELIÇA 01	10	5	15	30	10
TRELIÇA 02	10	5	15	30	23
TRELIÇA 03	9	6	15	42	12

Fonte: Autor (2024)

Na terceira etapa, foi realizado um estudo das propriedades geométricas das lajes treliçadas. Para efeito de comparação, foi atribuída uma laje maciça como referência com espessura estimada pela média dos momentos de inercia obtidos pelo estudo das lajes treliçadas. Para isso, utilizou-se a equação $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$, onde I representa a inércia, b a base, h a altura. Inicialmente, com o auxílio do software AutoCAD, foram obtidas as inércias das três treliças mencionadas anteriormente. Em seguida, foi calculada uma inércia média, a qual foi empregada para determinar a altura correspondente da laje maciça. Os cálculos foram realizados conforme a seguinte metodologia, ressaltando-se que todos os cálculos consideraram a largura de 1 metro. As Figuras 11 a 16 apresentam como as treliças foram inseridas no software para a obtenção das inércias, bem como os resultados apresentados pelo software.

Figura 11: Representação da Trelça 01



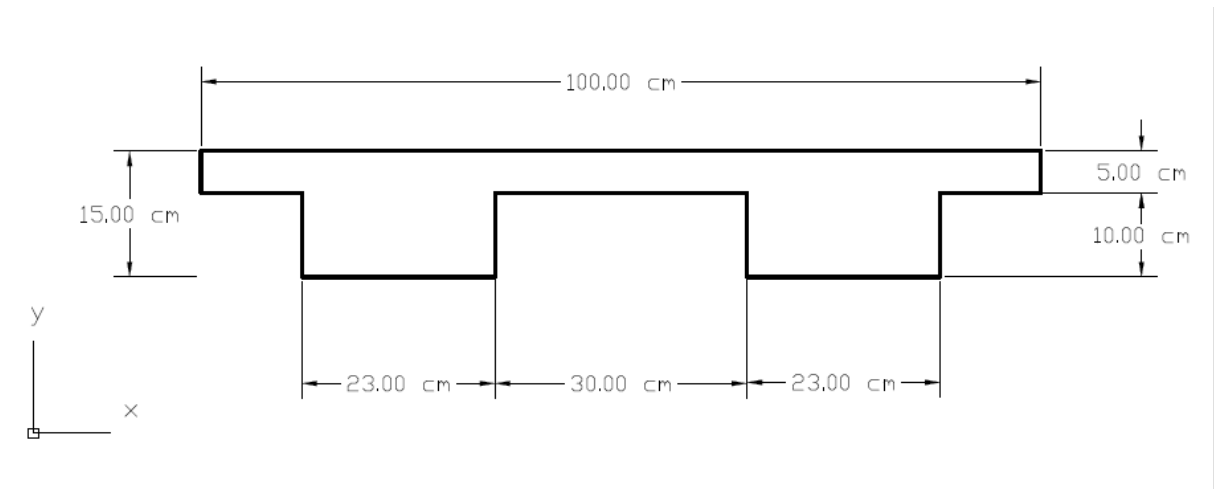
Fonte: Autor (2024)

Assim, por meio da utilização do software AutoCAD, foi possível determinar a seguinte inércia:

$$I_1 = 14088,5417 \text{ cm}^4.$$

Para a Trelça 02:

Figura 12: Representação da Trelça 02



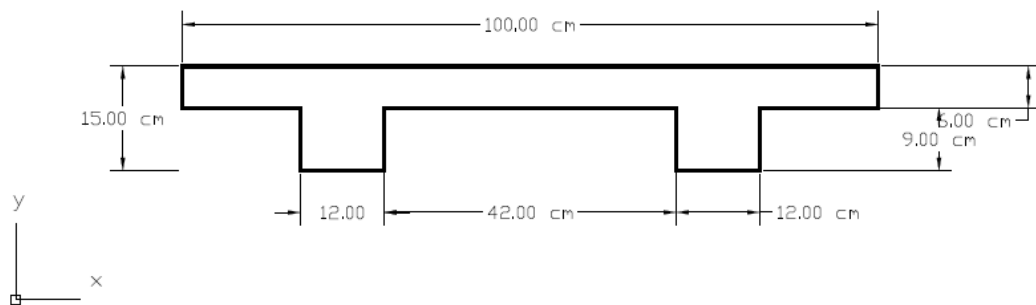
Fonte: Autor (2024)

Assim, por meio da utilização do software AutoCAD, foi possível determinar a seguinte inércia:

$$I_2 = 18351,5625 \text{ cm}^4.$$

Para a Treliça 03:

Figura 13: Representação da Treliça 03



Fonte: Autor (2024)

Assim, por meio da utilização do software AutoCAD, foi possível determinar a seguinte inércia:

$$I_3 = 12191,8235 \text{ cm}^4.$$

Após a obtenção das três inércias, foi calculada a inércia média conforme a equação 6:

$$I_m = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{14088,5417 + 18351,5625 + 12191,8235}{3} = 14877,31 \text{ cm}^4 \quad (6)$$

Com a obtenção dessa inércia, foi possível determinar a altura da laje maciça correspondente às lajes treliçadas pela equação 7:

$$h = \sqrt[3]{\frac{14877,31 \cdot 12}{100}} = 12,13 \text{ cm} \quad (7)$$

Dessa forma, para a altura da laje maciça, foi adotado um valor de 13 cm. A Tabela 2 a seguir apresenta os valores de inércia obtidos para todas as treliças.

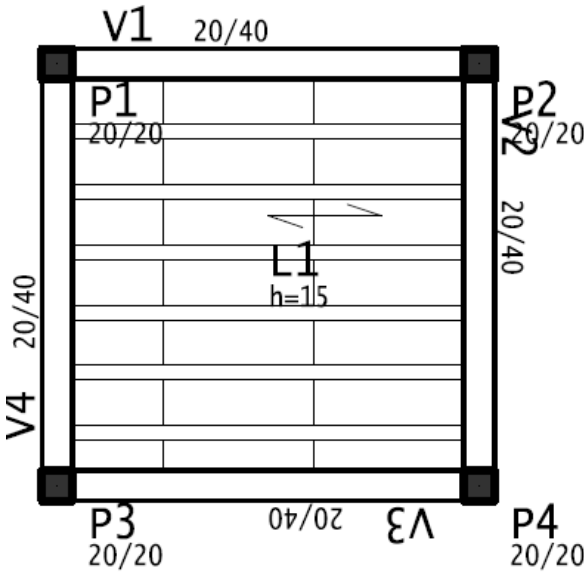
Tabela 2: Inércias e Áreas

DESCRIÇÃO	INÉRCIA (cm^4)	ÁREA (cm)
TRELIÇA 01	14088,5417	800
TRELIÇA 02	18351,5625	960
TRELIÇA 03	12191,8235	816
MACIÇA	18308,33	1300

Fonte: Autor (2024)

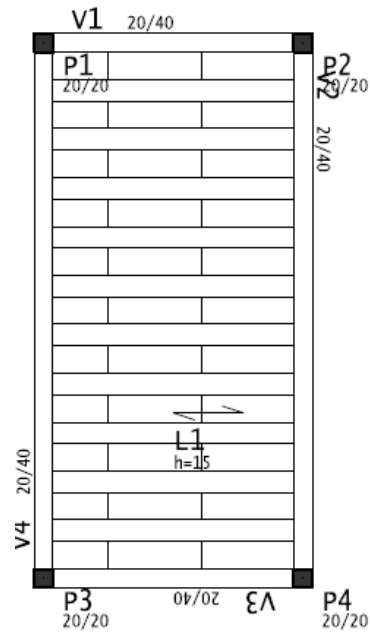
Na quarta etapa, foram elaborados três modelos para a verificação dos resultados no software TQS, sendo estes: 3 m x 3 m, 6 m x 3 m e 9 m x 3 m, estas dimensões consideram o comprimento e largura total dos modelos. Para todos os modelos analisados foram inseridas como carga permanente $0,10 \frac{tf}{m^2}$ e como carga acidental $0,15 \frac{tf}{m^2}$. Os modelos foram estruturados conforme as Figuras 14 a 16 a seguir:

Figura 14: Modelo Esquemático 3 m x 3 m.



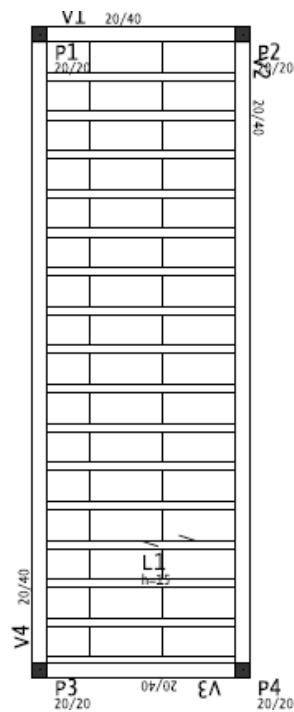
Fonte: Autor (2024)

Figura 15: Modelo Esquemático 6 m x 3 m.



Fonte: Autor (2024)

Figura 16: Modelo Esquemático 9 m x 3 m.



Fonte: Autor (2024)

Com a finalização dos três modelos, procedeu-se à utilização do software TQS. Na aplicação desses modelos, foram empregados pilares com dimensões de 20 cm x 20 cm e vigas

com dimensões de 20 cm x 40 cm, conforme demonstrados nas Figuras 17 a 19 e considerando uma altura de 2,70 m. Foi desenvolvido um modelo para cada uma das treliças analisadas, utilizando materiais inertes na estrutura treliçada, como EPS (poliestireno expandido) e blocos cerâmicos. As verificações de deslocamentos, fissurações e a quantidade de aço consumido foram realizadas para os três modelos elaborados. Além disso, a análise da laje maciça foi conduzida para os três modelos, resultando nas verificações dos três elementos mencionados.

Com as dimensões das treliças definidas e os modelos estruturais estabelecidos, a obtenção de resultados como deslocamentos e fissurações é realizada por meio de uma análise não linear. Esta análise envolve o estudo de estruturas considerando os efeitos não lineares no comportamento dos materiais, na geometria e nas condições de carregamento. Diferentemente da análise linear, na análise não linear a relação entre forças e deslocamentos é mais complexa, e as respostas da estrutura podem se modificar ao longo do processo de aplicação de cargas.

Com o modelo estrutural devidamente definido, recorre-se a métodos de solução numérica, dado que a análise não linear não possui uma solução analítica simples. Entre esses métodos, o mais amplamente utilizado é o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesse procedimento, a estrutura é subdividida em pequenos elementos, sendo que para cada elemento as equações de equilíbrio são resolvidas de maneira iterativa, levando-se em consideração as mudanças nas propriedades dos materiais e nas deformações geométricas.

Na análise não linear, a aplicação das cargas é feita de forma incremental, ou seja, a cada incremento de carga é gerada uma resposta estrutural, e a rigidez da estrutura é recalculada em cada passo. Como a relação força-deslocamento não é linear, a solução demanda várias iterações até que a convergência para cada incremento de carga seja atingida.

Os resultados da análise fornecem informações detalhadas sobre o comportamento da estrutura, incluindo deslocamentos, tensões, deformações e a ocorrência de fissurações.

5. RESULTADOS E DISCURSÕES

Nesse contexto, a não linearidade exerce uma influência significativa sobre os deslocamentos e esforços na estrutura, uma vez que as propriedades dos materiais, tanto o concreto quanto o aço, sofrem alterações à medida que a carga é aplicada. Para capturar esse comportamento, a carga aplicada ao pavimento foi dividida em 12 incrementos (ou estágios), permitindo que a rigidez em cada ponto da estrutura seja ajustada progressivamente conforme a propagação das fissuras. O aumento no número de incrementos de carga resulta em maior

precisão nos resultados obtidos. Em contrapartida, no caso em que apenas um incremento de carga é utilizado, a análise se aproxima da precisão de um modelo linear tradicional.

5.1 Deslocamentos Não-Lineares

A tabela 3 apresenta os valores de deslocamento para os modelos inseridos, considerando os diferentes tipos de laje. Os resultados apresentados correspondem ao incremento 12, momento em que as cargas atuam com sua máxima intensidade. Durante o processo de análise do software, as lajes são modeladas utilizando grelhas. No caso das lajes treliçadas, que são unidirecionais, as grelhas são dispostas no sentido das treliças. Já as lajes maciças, por sua característica bidirecional, apresentam grelhas dispostas em ambos os sentidos.

Tabela 3: Deslocamentos das Lajes (cm).

DESCRIÇÃO	MODELO 3 X 3	MODELO 6 X 6	MODELO 9 X 3
TRELIÇA 01 EPS	0,33	0,98	4,69
TRELIÇA 01 BLOCO CERÂMICO		1,01	4,99
TRELIÇA 02 EPS	0,24	0,97	5
TRELIÇA 02 BLOCO CERÂMICO	0,27	1,01	5,13
TRELIÇA 03 EPS	0,26	0,91	4,90
TRELIÇA 03 BLOCO CERÂMICO	0,33	1,03	5,19
MACIÇA	0,12	0,60	2,92

Fonte: Autor (2024)

A fim de proporcionar uma melhor visualização dos resultados e evidenciar as diferenças entre cada tipo de laje, os dados obtidos são apresentados em forma de gráficos, conforme as Figuras 18 a 20 abaixo.

Figura 17: Gráfico de Deslocamentos Modelo 3 m x 3 m.



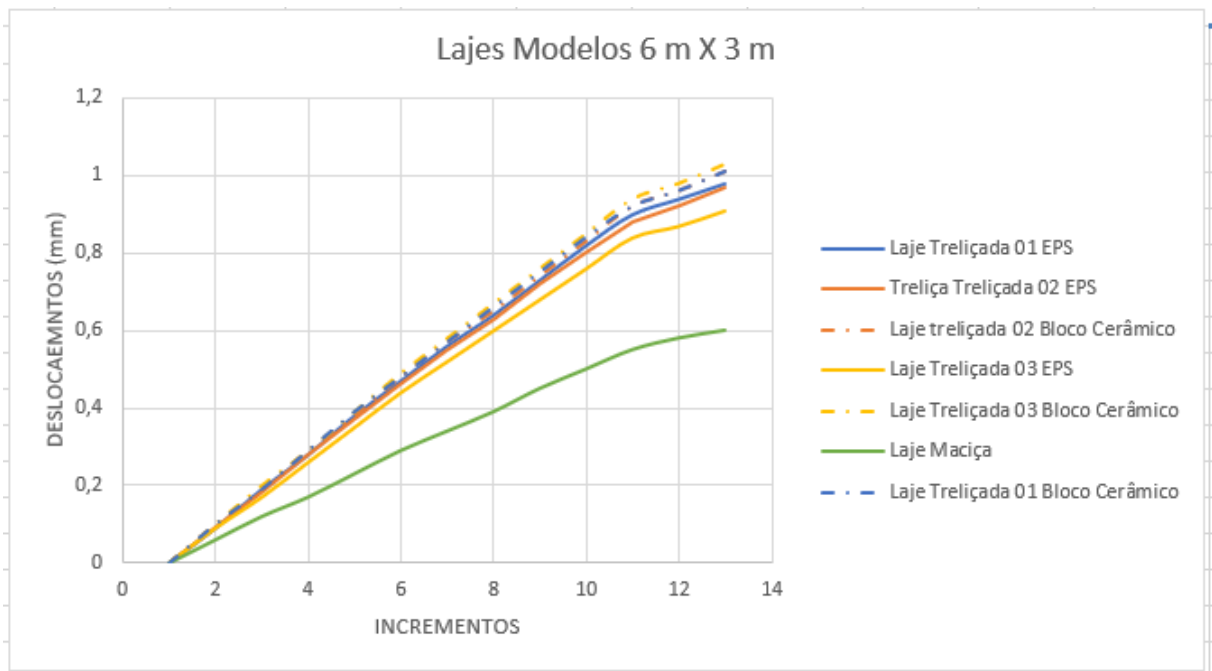
Fonte: Autor (2024)

No gráfico apresentado na Figura 18, que ilustra os deslocamentos das lajes para o modelo de 3 m por 3 m, observa-se que os comportamentos dos deslocamentos das lajes treliçadas são inicialmente muito semelhantes. A partir de determinado ponto, os deslocamentos da laje treliçada 01 com EPS e da laje treliçada 03 com bloco cerâmico passam a aumentar em relação às demais lajes. Para esses dois tipos de laje, os deslocamentos tornam-se idênticos, resultando na sobreposição de suas curvas no gráfico. Outro comportamento relevante evidenciado no gráfico refere-se às lajes treliçadas 03 com EPS e 02 com EPS. Até o incremento 4, seus deslocamentos são bastante próximos; no entanto, após esse ponto, os deslocamentos da laje treliçada 03 com EPS tornam-se superiores aos da laje treliçada 02 com EPS, comportamento que se inverte no incremento 11 e se repete no incremento 12. Por fim, nota-se que os deslocamentos da laje maciça são inferiores aos das demais lajes, e essa diferença torna-se mais acentuada com o aumento dos incrementos. Analisando os dados descritos e observando as diferenças de deslocamento entre as lajes treliçadas com EPS e bloco cerâmico no modelo apresentado é possível atribuir esse comportamento a um conjunto de fatores, dentre os quais:

- **Peso próprio:** Os blocos cerâmicos são significativamente mais pesados que o EPS, o que eleva o peso próprio da laje e, consequentemente, as solicitações de carga, resultando em maiores deslocamentos. O EPS, por ser mais leve, reduz o peso próprio da laje e as forças que geram deslocamentos.

- **Distribuição de inércia:** A presença de blocos cerâmicos altera a geometria e a distribuição da inércia da seção, reduzindo a rigidez global da laje e aumentando os deslocamentos. Nas lajes com EPS, a inércia é distribuída de maneira mais uniforme, o que tende a minimizar os deslocamentos.

Figura 18: Gráfico de Deslocamentos Modelo 6 m x 3 m.



Fonte: Autor (2024)

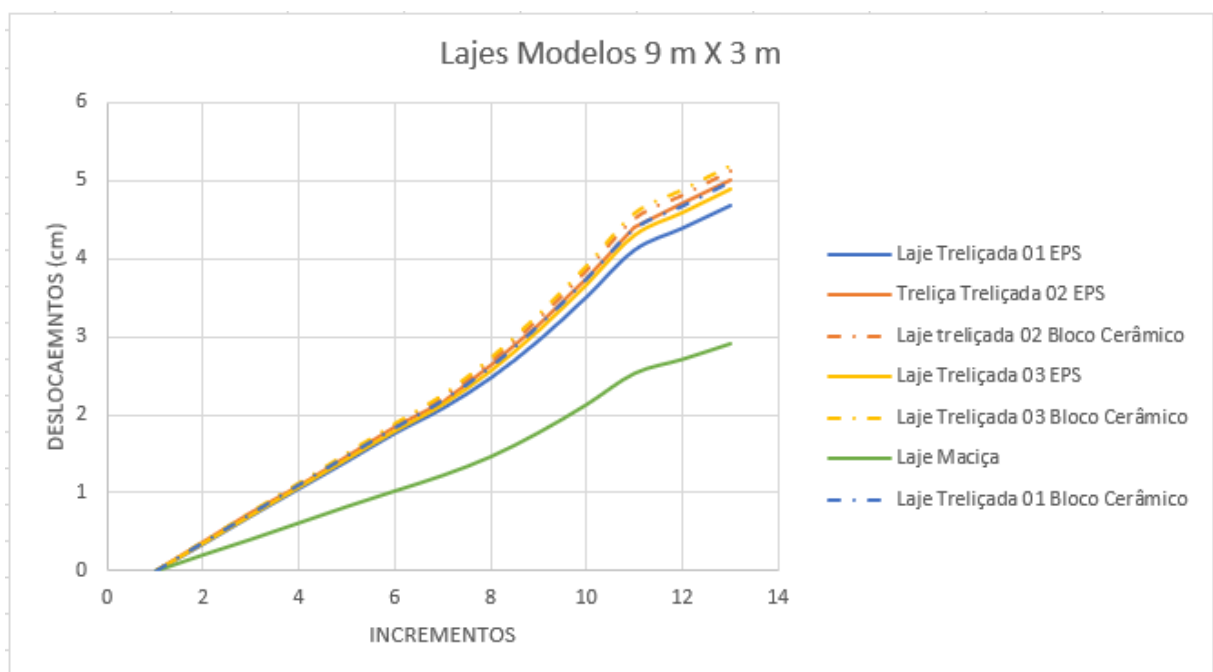
No gráfico apresentado na Figura 19, que demonstra os deslocamentos das lajes para o modelo de 6 metros por 3 metros, observa-se que os deslocamentos das lajes treliçadas são inicialmente muito próximos, com suas curvas praticamente sobrepostas até o incremento 4. A partir do incremento 8, esse comportamento começa a se diferenciar, e o deslocamento da laje treliçada 03 com EPS torna-se inferior ao das demais lajes. No incremento 12, a laje treliçada 03 com bloco cerâmico apresenta o maior deslocamento. De maneira semelhante ao modelo de 3 metros por 3 metros, a laje maciça exibe deslocamentos menores em comparação às lajes treliçadas, e essa diferença torna-se mais pronunciada com o aumento dos incrementos. Analisando os dados descritos e observando as semelhanças de deslocamento entre as lajes treliçadas com EPS e bloco cerâmico no modelo apresentado é possível atribuir esse comportamento a um conjunto de fatores, dentre os quais:

- **Propriedades dos materiais de preenchimento:** Embora o EPS e o bloco cerâmico tenham diferenças em densidade e resistência, seu impacto no comportamento global da laje treliçada pode ser mitigado pela presença das nervuras, que concentram a rigidez e

suportam a maior parte das cargas. Assim, o preenchimento (EPS ou bloco cerâmico) exerce influência mais limitada nos deslocamentos gerais, resultando em comportamentos similares.

- **Dimensões e relação vão-altura:** Nos modelos de lajes maiores (6 metros por 3 metros), a relação entre o vão e a altura da laje torna o comportamento estrutural mais dependente da treliça e da rigidez global, enquanto o tipo de enchimento (EPS ou bloco cerâmico) desempenha um papel secundário no desempenho global.

Figura 19: Gráfico de Deslocamentos Modelo 9 m x 3 m.



Fonte: Autor (2024)

No gráfico apresentado na Figura 20, que ilustra os deslocamentos das lajes para o modelo de 9 metros por 3 metros, o comportamento se assemelha bastante ao observado no gráfico da Figura 19. Até o incremento 8, os valores de deslocamento são muito próximos, com as curvas sobrepostas até o incremento 4. A partir do incremento 9, nota-se uma variação nos deslocamentos, sendo que a laje treliçada 01 com EPS apresenta o menor valor de deslocamento no incremento 12, enquanto a laje treliçada 03 com bloco cerâmico exibe o maior valor. Similarmente aos outros modelos, a laje maciça apresenta os menores deslocamentos, e essa diferença torna-se mais evidente com o aumento dos incrementos. A semelhança desses resultados com o modelo anterior pode-se ser explicada pelos mesmos motivos, as propriedades dos materiais de enchimento e a relação vão-altura e suas dimensões. Em relação aos deslocamentos das lajes maciças serem inferiores aos das treliçadas nos três modelos, pode-se

dar pelo fato de as lajes maciças possuírem maior rigidez, apresentarem uma distribuição uniforme do concreto, entre outros pontos.

Dessa forma, de acordo com a ABNT NBR 6118:2023, os deslocamentos limites para as lajes em questão são estabelecidos pelo seguinte cálculo, conforme apresenta as Equações 8 a 10:

$$d = \frac{l}{250} = \frac{300}{250} = 1,20 \text{ cm} \quad (8)$$

$$d = \frac{l}{250} = \frac{600}{250} = 2,40 \text{ cm} \quad (9)$$

$$d = \frac{l}{250} = \frac{900}{250} = 3,60 \text{ cm} \quad (10)$$

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que as lajes treliçadas 01, 02 e 03 no modelo 9x3 não atendem aos critérios de verificação de deslocamentos, uma vez que apresentam valores superiores a 3,60 cm, tanto nas lajes compostas por EPS quanto nas compostas por blocos cerâmicos. O Apêndice A apresenta uma tabela com os valores dos deslocamentos para todos os incrementos de todas as lajes analisadas nos três modelos estudados.

5.2 ANÁLISE DE FISSURAÇÃO DOS MODELOS

A NBR 6118:2023 estabelece que, a abertura característica máxima das fissuras não exceder valores entre 0,2 mm e 0,4 mm sob a ação das combinações frequentes, essa condição não terá um impacto significativo na corrosão das armaduras passivas. Conforme a tabela, são apresentados os dados de fissuração das lajes para o incremento 12 da análise não-linear.

Tabela 4: Fissurações das Lajes (mm)

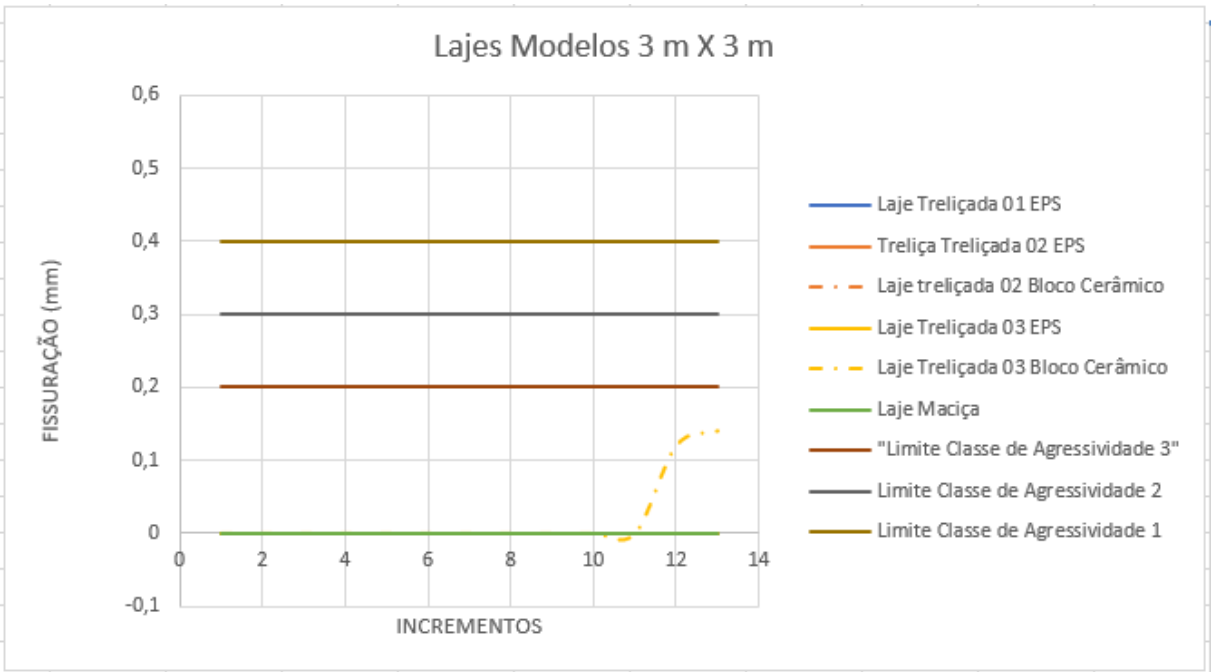
DESCRIÇÃO	MODELO 3 X 3	MODELO	MODELO
		6 X 6	9 X 3
TRELIÇA 01 EPS	0	0,29	0,49
TRELIÇA 01 BLOCO CERÂMICO		0,30	0,40

TRELIÇA 02 EPS	0	0,31	0,41
TRELIÇA 02 BLOCO CERÂMICO	0	0,31	0,41
TRELIÇA 03 EPS	0	0,30	0,40
TRELIÇA 03 BLOCO CERÂMICO	0,14	0,31	0,41
MACIÇA	0	0,31	0,40

Fonte: Autor (2024)

A fim de proporcionar uma melhor visualização dos resultados e evidenciar as diferenças entre cada tipo de laje, os dados obtidos são apresentados em forma de gráficos conforme as figuras 21 a 23 abaixo.

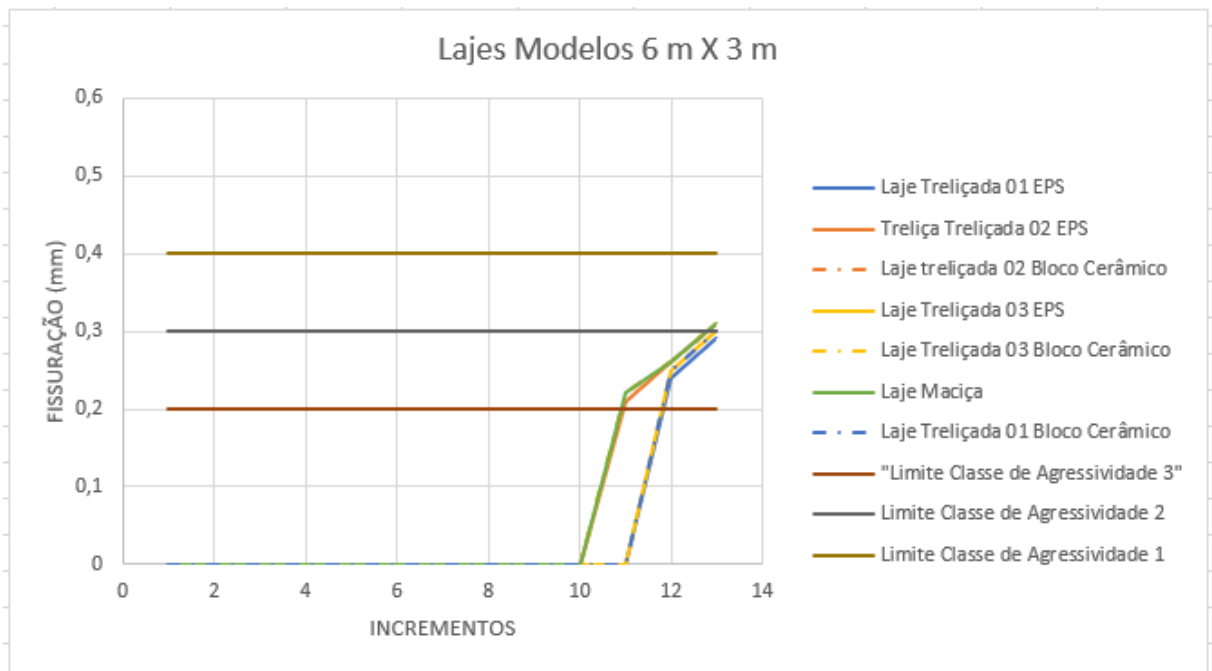
Figura 20: Gráfico de Fissurações Modelo 3 m x 3 m.



Fonte: Autor (2024)

O gráfico apresentado na Figura 21 demonstra o comportamento das fissurações nas lajes analisadas no modelo de 3 metros por 3 metros. Observa-se que, com exceção de uma laje (laje treliçada 03 com bloco cerâmico), nenhuma das lajes apresentou fissurações. A laje treliçada 03 com bloco cerâmico apresentou fissurações apenas no incremento 12, contudo, os resultados obtidos permanecem dentro dos limites estabelecidos pelas classes de agressividade ambiental.

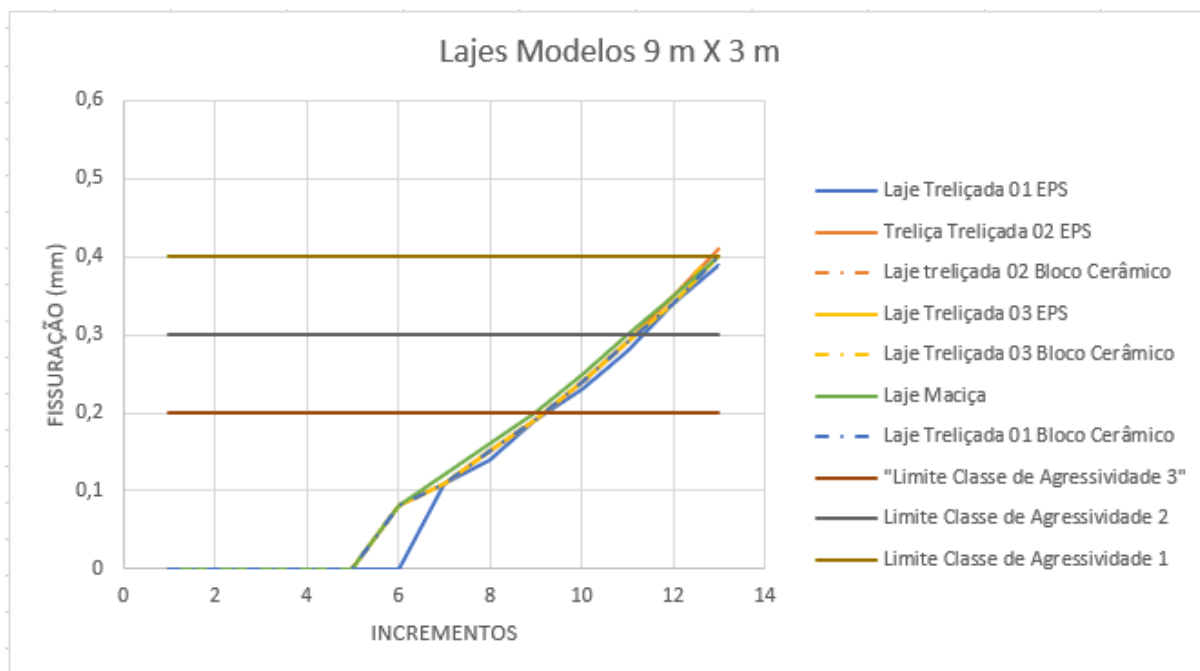
Figura 21: Gráfico de Fissurações Modelo 6 m x 3 m



Fonte: Autor (2024)

O gráfico apresentado na Figura 22 ilustra o comportamento das fissurações nas lajes analisadas no modelo de 6 metros por 3 metros. Observa-se que, até o incremento 10, nenhuma das lajes apresentou fissurações. A partir desse incremento, começam a surgir fissurações em todas as lajes, com exceção da laje treliçada 01 com EPS e da laje treliçada 03 com bloco cerâmico. Vale ressaltar ainda o comportamento semelhante das lajes, o que acarreta as curvas estarem quase sobrepostas. Nota-se, ainda, que todas as lajes ultrapassaram o limite de fissuração estabelecido pela classe de agressividade ambiental 3, referente a ambientes mais agressivos com maior presença de umidade, cloretos e poluentes, enquanto apenas a laje maciça também excedeu o limite de fissuração determinado pela classe de agressividade 2, que engloba ambiente expostos a agentes que promovem a carbonatação moderada.

Figura 22: Gráfico de Fissurações Modelo 9 m x 3 m.



Fonte: Autor (2024)

O gráfico apresentado na Figura 23 ilustra o comportamento das fissurações nas lajes analisadas no modelo de 9 metros por 3 metros. Diferentemente dos modelos anteriores, observa-se que as fissurações surgem mais cedo, a partir do incremento 5, exceto na laje treliçada 01 com EPS, que começa a apresentar fissuras no incremento 7. Um comportamento semelhante ao modelo anterior é a proximidade dos valores de fissuração entre as lajes. Além disso, nota-se que todas as lajes ultrapassam os limites de fissuração estabelecidos pelas classes de agressividade ambiental 3 e 2, com a laje treliçada 03 com EPS excedendo os três limites impostos.

Para as lajes que não apresentaram fissurações em nenhum dos incrementos analisados, tal comportamento pode ser explicado pelos seguintes fatores: O sistema de laje treliçada, ao empregar vigotas e EPS como material de enchimento, promove uma distribuição eficiente das cargas sobre a estrutura. As vigotas, que são os elementos principais responsáveis pela resistência e rigidez, suportam as cargas mais significativas, enquanto o EPS, atuando como material inerte, alivia o peso próprio da laje sem contribuir estruturalmente. Essa combinação reduz o carregamento excessivo sobre a estrutura e, conseqüentemente, minimiza as tensões que poderiam causar fissuras. Além disso, as lajes com dimensões de 3x3 metros são relativamente pequenas, o que contribui para a diminuição dos momentos fletores que poderiam

induzir fissuração. Com um vão reduzido, as tensões no concreto são distribuídas de maneira mais uniforme e controlada, diminuindo assim a probabilidade de fissuração.

Em todos os modelos analisados, as lajes (sejam maciças ou treliçadas) estão sujeitas a uma distribuição de cargas que é majoritariamente uniforme. Nos três modelos de diferentes dimensões, o comportamento das lajes em termos de flexão tende a ser semelhante, especialmente no centro do vão, onde os momentos fletores máximos ocorrem. Isso explica por que as fissurações se concentram no centro das lajes — essa é a região onde os esforços de tração são mais elevados, pois o momento fletor é maior devido à maior distância entre os apoios. Embora as lajes treliçadas utilizem EPS ou blocos cerâmicos como enchimento, o que altera a rigidez comparativamente às lajes maciças, as vigotas de concreto nas lajes treliçadas proporcionam um comportamento semelhante ao das lajes maciças em termos de capacidade de resistir às tensões de tração e compressão. Como o EPS ou os blocos cerâmicos não têm função estrutural relevante, a distribuição dos esforços na seção transversal é muito próxima, o que resulta em padrões de fissuração similares.

Embora o EPS seja mais leve que os blocos cerâmicos, a diferença de peso não é significativa o suficiente para alterar drasticamente o comportamento da laje em termos de fissuração. O fator determinante na distribuição dos esforços e fissuras é a geometria da laje e a maneira como os esforços são distribuídos pelas vigas e vigotas, mais do que o tipo de enchimento. Portanto, a semelhança nos resultados de fissuração entre as lajes treliçadas com EPS, bloco cerâmico e as lajes maciças se deve ao fato de que a geometria e os esforços predominantes nas lajes são os principais fatores que governam o comportamento estrutural, e as diferenças no tipo de enchimento têm um impacto limitado no comportamento global de fissuração.

5.3 QUANTIDADE DE AÇO

A seguir, são apresentadas três tabelas referentes aos modelos de lajes com dimensões de 3 m x 3 m, 6 m x 6 m e 9 m x 9 m, contendo a quantidade de aço utilizada em cada tipo de laje.

Tabela 5: Quantidade de Aço nas Lajes do Modelo 3 m x 3m.

Modelo de Laje 3x3	TR12645 (Kg)	CA-60 (Kg)	CA -50 (Kg)	TOTAL (Kg)
Laje Trelaçada EPS 01				
Laje Trelaçada EPS 02	10	2	1,24	13,24
Laje Trelaçada EPS 03	10	2	7,03	19,03
Laje Trelaçada Cerâmica 01	15	3	7,13	25,13
Laje Trelaçada Cerâmica 02	10	4	1,23	15,23
Laje Trelaçada Cerâmica 03	10	2	7,03	19,03
Laje Maciça		7,06	51,82	58,88

Fonte: Autor (2024)

Tabela 6: Quantidade de Aço nas Lajes do Modelo 6 m x 3m.

Modelo de Laje 6x3	TR12645 (Kg)	CA-60 (Kg)	CA -50 (Kg)	TOTAL (Kg)
Laje Trelaçada EPS 01				
Laje Trelaçada EPS 02	25	16,36	19,38	60,74
Laje Trelaçada EPS 03	25	16,36	18,94	60,3
Laje Trelaçada Cerâmica 01	35	7,06	14,61	56,67
Laje Trelaçada Cerâmica 02	25	16,36	18,94	60,3
Laje Trelaçada Cerâmica 03	25	7,06	13,53	45,59
Laje Maciça		10,60	93,95	104,55

Fonte: Autor (2024)

Tabela 7: Quantidade de Aço nas Lajes do Modelo 9 m x 3m.

Modelo de Laje 9x3	TR12645 (Kg)	CA-60 (Kg)	CA -50 (Kg)	TOTAL (Kg)
Laje Treliçada EPS 01				
Laje Treliçada EPS 02	40	26,20	32,26	98,46
Laje Treliçada EPS 03	37	17,60	22,64	77,24
Laje Treliçada Cerâmica 01	52	19,60	22,70	94,3
Laje Treliçada Cerâmica 02	40	28,20	30,86	99,06
Laje Treliçada Cerâmica 03	50	19,60	22,70	92,3
Laje Maciça		14,13	136,08	150,21

Fonte: Autor (2024)

A quantidade de aço em lajes treliçadas com EPS e blocos cerâmicos para os três modelos (3 m x 3 m, 6 m x 3 m e 9 m x 3 m) apresenta resultados muito semelhantes devido à forma como essas lajes são projetadas. As lajes treliçadas são compostas por vigotas pré-moldadas, que já incluem uma quantidade de aço suficiente para resistir às solicitações previstas, enquanto os materiais de enchimento, como EPS e blocos cerâmicos, não possuem função estrutural. Portanto, a quantidade de aço necessária para as treliças depende mais das vigotas, que apresentam dimensões e configurações padronizadas, resultando em pouca variação entre os diferentes modelos de lajes analisados. Além disso, o uso desses materiais inertes (EPS e blocos cerâmicos) alivia o peso da estrutura, o que reduz as demandas sobre o sistema e, conseqüentemente, a necessidade de aço adicional.

Por outro lado, as lajes maciças apresentam uma quantidade significativamente maior de aço porque são constituídas inteiramente de concreto armado, sem a presença de materiais de enchimento que possam reduzir o peso próprio da laje. Nessas lajes, o concreto e o aço precisam resistir conjuntamente a todas as solicitações de cargas aplicadas. Como resultado, a necessidade de aço é proporcionalmente maior, especialmente à medida que os vãos aumentam (6 m x 3 m e 9 m x 3 m), pois a laje maciça depende exclusivamente da interação entre o concreto e a armadura para suportar as cargas e controlar a fissuração. A ausência de alívio de peso, como ocorre nas lajes treliçadas com EPS ou blocos cerâmicos, leva a uma maior demanda por aço para garantir a rigidez e a resistência necessárias.

6. CONCLUSÃO

O conhecimento aprofundado sobre os diferentes sistemas estruturais e construtivos de lajes é de extrema relevância. Diante desse contexto, os objetivos propostos neste trabalho, que visavam a análise e compreensão dos deslocamentos, fissurações e quantidades de aço em lajes maciça e treliçada, baseadas em lajes treliçadas desenvolvidas na cidade de Pau dos Ferros - RN, foram alcançados utilizando-se o método de analogia de grelha em conjunto com a ferramenta computacional TQS.

Nesse sentido, foi possível verificar o comportamento das estruturas para uma sequência de dimensões, permitindo a visualização dos esforços solicitados, tanto imediatos quanto ao longo de uma série de incrementos, simulando o comportamento das peças ao longo de sua vida útil.

Pode-se destacar que as lajes treliçadas, em termos de fissurações, podem ser adequadas a qualquer classe de agressividade, dependendo do vão que essas lajes serão construídas. Observa-se que, à medida que o vão aumenta, diminui a quantidade de classes de agressividade às quais essas lajes se ajustam. No que diz respeito às lajes treliçadas, a principal diferença entre elas está nos deslocamentos, com as lajes treliçadas com blocos cerâmicos apresentando maiores deslocamentos. Em relação às fissurações e à quantidade de aço, os resultados são muito semelhantes, independentemente do tamanho dos vãos.

Ao analisar as mesmas lajes treliçadas em cenários com vãos maiores, observou-se que, quanto maior o vão, maiores são os deslocamentos, as fissurações e a quantidade de aço necessária. Especificamente quanto ao consumo de aço, verificou-se que a quantidade de aço utilizada nas lajes maciças é consideravelmente maior em comparação às lajes treliçadas. Em lajes treliçadas, ao comparar o uso de EPS ou bloco cerâmico como material de enchimento, percebe-se uma leve variação na quantidade de aço, sem grandes diferenças significativas.

Outro aspecto relevante refere-se à diferença significativa nos deslocamentos entre as lajes treliçadas e a laje maciça, sendo que a laje maciça apresenta valores de deslocamento substancialmente inferiores. Esse comportamento pode ser justificado por diversos fatores, maior rigidez: As lajes maciças, por possuírem uma seção transversal inteiramente sólida de concreto, demonstram maior rigidez, resultando em menores deformações. Em contrapartida, nas lajes treliçadas, a presença de vazios ou preenchimentos parciais (como EPS ou blocos cerâmicos) reduz a rigidez global, levando ao aumento dos deslocamentos; Distribuição uniforme do concreto: Nas lajes maciças, o concreto é distribuído de maneira uniforme, o que incrementa o momento de inércia e, conseqüentemente, a capacidade de resistência aos deslocamentos. Já nas lajes treliçadas, a existência de espaços vazios entre as nervuras diminui

o momento de inércia, contribuindo para maiores deslocamentos; Comportamento não linear: As lajes treliçadas apresentam um comportamento não linear mais acentuado devido à interação entre o concreto das nervuras e o material de enchimento, resultando em deslocamentos maiores em comparação com a laje maciça, que exibe um comportamento mais uniforme; Distribuição de esforços: Nas lajes treliçadas, os esforços são concentrados nas nervuras, que suportam a maior parte da carga. Como essas nervuras possuem uma área de concreto menor, são mais suscetíveis a deformações. Por outro lado, nas lajes maciças, a carga é distribuída por toda a seção transversal, proporcionando maior resistência e, conseqüentemente, menores deslocamentos.

Ao adotar soluções que reduzam esse volume de concreto e conseqüentemente a quantidade de aço, observou-se um aumento nas fissurações e nos deslocamentos, conforme demonstrado nas análises.

Por fim, é crucial verificar as aberturas de fissuras nas peças de concreto armado para evitar seu surgimento excessivo, o que poderia expor as armaduras e comprometer a durabilidade da estrutura. A verificação dessas fissuras é essencial para garantir o comportamento adequado e previsível das estruturas ao longo do tempo.

Dada a relevância deste estudo tanto para empresas quanto para os profissionais da construção civil, considerando que as situações abordadas são frequentes nos diversos tipos de obras, recomenda-se a continuidade da pesquisa. Propõe-se a pesquisa de mais tipos de lajes utilizados na região, não limitando-se a cidade de Pau dos Ferros -RN. Outra proposta seria ampliar a verificação de diferentes tipos de lajes em vigas e pilares, como adotar mecanismos construtivos diferentes de lajes influenciam no dimensionamento de vigas e pilares.

É igualmente essencial, de imediato, incentivar a capacitação dos profissionais técnicos, a fim de transmitir o conhecimento e a compreensão das análises comparativas realizadas. Isso permitirá que os profissionais sejam capazes de interpretar, diagnosticar e tratar adequadamente tanto as deformações aparentes quanto o surgimento de fissuras excessivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

AMORIM, R. A. **Estudo paramétrico dos tipos de lajes usuais e métodos de análise**. 2021. 72 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, [s.l.].

BARROS SIQUEIRA, P. R. **Relatório final de estágio supervisionado I. WE Engenharia & Design Residencial – Salgueiro/PE**. [s.l.: s.n.].

BEZERRA, Camilla. **Estudo de flechas em lajes maciças de concreto armado**. 2020. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

CARTAXO, A. E. **Laje pré-fabricada com armação treliçada: dimensionamento e processo construtivo**. 2019. 65 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, [s.l.].

DA COSTA NUNES, P. A. **Análise comparativa entre as lajes maciças, nervuradas e treliçadas**. 2023. 42 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, [s.l.].

GUIA DA ENGENHARIA. **Estados Limites ELU e ELS: aprenda a diferença!** Brasil, 5 de janeiro de 2018. Disponível em: Acesso em: 2 de out. de 2024.

MORAES, M. A. F. **Estudo comparativo de custos de três tipos de lajes (maciça, vigota treliçada e nervurada com cubetas plásticas) da nova reitoria da Universidade Federal do Tocantins (UFT)**. 2020. 96 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Tocantins, [s.l.].

OLIVEIRA, Murylo Rodrigues Cândido de et al. **Estudo comparativo da estabilidade global em diferentes tipos de lajes**. *Technology Science*, Marabá, v. 2, n. 1, p. 28-32, jan. 2020.

PINHEIRO, Guilherme. **Análise comparativa de dois tipos de lajes com ênfase na influência do vão e do carregamento no estado limite de deformações excessivas**. 2016. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

REGGIANI, R. F. P. **Verificação de lajes de concreto armado no estado limite de serviço de deformação excessiva**. 2016. 151 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, [s.l.]. RODRIGUES,

TQS, Docs. Análise Não-Linear. Brasil. Disponível em:
<https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3158> . Acesso em 2 de out. de 2024.

APÊNDICE A

Tabela 8: Deslocamentos Limites

Tipo de Efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento- limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	1/250
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas variáveis de utilização	1/350
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	1/250
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	1/250 + contra flecha
			Ocorrido após a construção do piso	1/600
	Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com a recomendação do fabricante do equipamento

Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	l/500 e 10 mm
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	l/250 e 25 mm
		Movimento Lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente	H/1700 e H/850 entre pavimentos
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	l/400 e 15 mm

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2023 (2024)

