

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

EDUARDO MARINHO CARVALHAES SILVA

**COMPARAÇÃO DOS MOMENTOS FLETORES, CARREGAMENTOS E
TAXA DE AÇO EM SISTEMA ESTRUTURAL COMPOSTO POR LAJES
MACIÇAS E TRELIÇADAS**

**PALMAS – TO
2021**

EDUARDO MARINHO CARVALHAES SILVA

**COMPARAÇÃO DOS MOMENTOS FLETORES, CARREGAMENTOS E
TAXA DE AÇO EM SISTEMA ESTRUTURAL COMPOSTO POR LAJES
MACIÇAS E TRELIÇADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel do Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientadora: Caroline Rezende Couto Luz

**PALMAS - TO
2021**

Silva, Eduardo Marinho Carvalhaes
COMPARAÇÃO DOS MOMENTOS FLETORES, CARREGAMENTOS E
TAXA DE AÇO EM SISTEMA ESTRUTURAL COMPOSTO POR LAJES
MACIÇAS E TRELIÇADAS/ Eduardo Marinho Carvalhaes Silva. – Palmas,
TO, 2021. 70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientadora: Ma. Caroline Rezende Couto Luz

1. Lajes maciças. 2. Lajes treliçadas. 3. Concreto armado. I. Rezende Couto
Luz, Caroline. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduardo Marinho Carvalhaes Silva

COMPARAÇÃO DOS MOMENTOS FLETORES, CARREGAMENTOS E TAXA DE AÇO EM SISTEMA ESTRUTURAL COMPOSTO POR LAJES MACIÇAS E TRELIÇADAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel do Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Aprovado em: 29 /09/2021

BANCA AVALIADORA

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO ARAUJO FORTES**
Data: 21/02/2024 07:06:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Me. Caroline Rezende Couto Luz
Orientadora

Em Licença Maternidade - Processo nº 23236.019463/2023-81

Rodrigo Araujo Fortes
Coordenador de Curso de Bacharelado em Engenharia Civil
Portaria PAL/REI/IFTO Nº 8/2024, de 05 de janeiro de 2024

Documento assinado digitalmente
 **MOACYR SALLES NETO**
Data: 21/02/2024 16:40:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Moacyr Salles Neto

Documento assinado digitalmente
 **GILSON MARAFIGA PEDROSO**
Data: 21/02/2024 11:39:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gilson Marafiga Pedrosa

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e minha segunda mãe (minha querida madrinha), por sempre estarem ao meu lado e nunca me deixarem desistir do meu sonho. Em segundo lugar agradeço a minha pessoa, por mesmo diante de todas as adversidades encontradas não deixou de sonhar e trabalhar duro para alcançar seus objetivos

Grande agradecimento a minha orientadora, que teve paciência, mostrou o melhor caminho e esteve ao meu lado ao longo deste trabalho.

Também agradeço as duas pessoas que me deram a primeira oportunidade de estágio e trabalho, e que nunca mediram esforços para compartilhar seu conhecimento e agregar ao meu aprendizado, e ao longo dessa caminhada tornaram mais que meus chefes e sim amigos, Daniel e Bruno.

E por fim agradeço aos meus amigos que estiveram junto nessa longa caminhada da graduação, Chrystian, Henrique, Felipe, Guilherme e Yan.

RESUMO

Nos dias atuais, contamos com uma diversidade de sistemas construtivos na indústria da construção, entretanto desconhecemos por muitas vezes a efetividade de cada modelo, seja em seu desempenho ou economia. Mesmo dentre todas as opções, o concreto se destaca como o material mais empregado na construção, e seu uso combinado com o aço possibilita a construção de diversas edificações. Entretanto, o concreto armado é um material de elevado peso específico e para vencer grandes vãos é necessário estruturas mais robustas, que demandam de maior consumo de insumos e mão de obra, mas atualmente existem tecnologias que buscam solucionar o problema. Por isso, foram analisadas duas edificações de concreto armado, usando duas tipologias de lajes comuns no Brasil, com o objetivo de responder qual sistema apresentou maior redução dos momentos, carregamentos e taxa de aço. Para tanto, foram concebidos dois modelos estruturais, um com lajes maciças e outro com lajes treliçadas, para um edifício de oito pavimentos no software TQS. Na análise, foram dimensionadas as duas metodologias propostas e verificados seus deslocamentos, esforços e carregamentos na fundação. Por fim, constatou-se que o sistema de lajes treliçadas apresentou redução nos carregamentos verticais, momentos fletores e taxa de aço.

Palavras-chave: Concreto armado. Lajes maciças. Lajes treliçadas. Esforços.

ABSTRACT

Nowadays, we have a diversity of constructive systems in the construction industry, however we are often unaware of the effectiveness of each model, whether in its performance or economy. Even within all the options, concrete stands out as the material most used in construction, and its use combined with steel enables the construction of various buildings. However, reinforced concrete is a material with high specific weight, and to overcome large spans, more robust structures are needed, which demand greater consumption of inputs and labor, but currently there are technologies that seek to solve the problem. About the study it sought to analyze two reinforced concrete buildings, using two types of slabs common in Brazil, in order to answer which system presented the greatest reduction in moments, loads and steel rate. Thus, two structural models were designed for an 8-storey building in the TQS software: one with solid slabs and the other with lattice slabs. In the analysis, the two proposed methodologies were dimensioned and their displacements, efforts and loads on the foundation were verified. Finally, it was found that the lattice slab system showed a reduction in vertical loads, bending moments and steel rate.

Keywords: Reinforced concrete. Massive slabs. Lattice slabs. efforts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva de Gauss.....	18
Figura 2 – Ilustração do aço trabalhando na região tracionada.....	20
Figura 3 - Elemento linear de seção delgada	22
Figura 4 - Elemento linear de seção não delgada	22
Figura 5 - Elemento bidimensional	23
Figura 6 - Elemento tridimensional	23
Figura 7 - Fluxo de ações	24
Figura 8 - Representação vãos de laje unidirecional.....	26
Figura 9 - Representação dos vãos de laje bidirecional	27
Figura 10 - Representação vão efetivo.....	27
Figura 11 – Sentido da armadura principal para o caso de lajes com borda livre	28
Figura 12 - Representação gráfica das vinculações das lajes.....	28
Figura 13 - Representação do engaste elástico e momentos fletores negativos	29
Figura 14 - Representação de parede paralela à direção principal	31
Figura 15 - Representação de parede ortogonal à direção principal	31
Figura 16 - Laje treliçada e sua composição	32
Figura 17 - Elementos de enchimento.....	32
Figura 18 - Armadura de distribuição	34
Figura 19 - Ilustração de armação da treliça	34
Figura 20 – Planta baixa.....	38
Figura 21 – Corte do edifício	39
Figura 22 - Representação gráfica das etapas da metodologia empregada	40
Figura 23 – Escolha do modelo de análise TQS.	41
Figura 24 - Escolha do modelo.....	42
Figura 25 - Classe de concreto.....	43
Figura 26 - Isopleta de velocidade básica do vento.....	44
Figura 27 – Cálculo de carga de arrasto do vento TQS	45
Figura 28 – Representação gráfica da altura de parede utilizada nos cálculos	46
Figura 29 – Planta de formas pavimento tipo – laje treliçada	48

Figura 30 – Planta de formas pavimento tipo – laje maciça	48
Figura 31 – Gráfico das vigas de maiores variações de momento fletor positivo	54
Figura 32 – Comparativo da distribuição de esforços V209	55
Figura 33 – Comparativo da distribuição de esforços V210	55
Figura 34 – Gráfico das vigas de maiores variações de momento fletor negativo.....	56
Figura 35 – V212 e L12	56
Figura 36 – V220 e L5	57
Figura 37 – V35 e L8	57
Figura 38 – Variações percentuais das taxas de aço nas vigas V212, V234 e v235	58
Figura 39 – Variações dos valores das taxas de aço nas vigas V212, V234 e v235	58
Figura 40 – Variações percentuais das cargas axiais nos pilares	61
Figura 41 – Maiores variações das cargas axiais.....	61
Figura 42 – Reações da viga V206 no pilar P13 (laje treliçada).....	62
Figura 43 - Reações da viga V206 no pilar P13 (laje maciça).....	62
Figura 44 - Reações da viga V223 no pilar P13 (laje treliçada).....	62
Figura 45 - Reações da viga V223 no pilar P13 (laje maciça).....	62
Figura 46 – Reações da viga V207 no pilar P14 (laje treliçada).....	63
Figura 47 – Reações da viga V207 no pilar P14 (laje maciça)	63
Figura 48 – Reações V212 no P24 laje treliçada.....	63
Figura 49 – Reações V212 no P24 laje treliçada maciça	63
Figura 50 - Maiores variações dos momentos fletores dos pilares na direção x (P8, P16 e P31).....	64
Figura 51 - Maiores variações dos momentos fletores na direção Y dos pilares (P13, P17 e P24) (tf.m)	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peso específico dos materiais.....	24
Tabela 2 - Espessura material de enchimento.....	33
Tabela 3 - Tabela de treliças padronizadas	35
Tabela 4 - Primeiro lançamento da estrutura e deslocamentos das lajes.....	49
Tabela 5 – Segundo lançamento da estrutura e deslocamentos das lajes	50
Tabela 6 – Terceiro lançamento da estrutura e deslocamentos das lajes	51
Tabela 7 – Quarto lançamento da estrutura e deslocamentos das lajes	51
Tabela 8 – Coeficientes γ_z das lajes treliçadas e maciças.....	52
Tabela 9 – Valores dos momentos fletores nas vigas e taxa de aço	53
Tabela 10 – Esforços e carregamentos dos pilares	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 PROBLEMA DE PESQUISA	14
3 JUSTIFICATIVA.....	15
4 OBJETIVOS.....	16
4.1 Objetivo Geral.....	16
4.2 Objetivos específicos.....	16
5 REVISÃO DE LITERATURA	17
5.1 Concreto.....	17
5.1.1 Resistência à compressão	17
5.1.2 Massa específica.....	19
5.1.3 Módulo de elasticidade.....	19
5.1.3.1 Módulo de elasticidade longitudinal.....	19
5.1.3.2 Coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade Transversal do Concreto.....	20
5.2 Aços para armadura.....	20
5.3 Concreto armado	21
5.4 Classificação dos elementos estruturais	21
5.5 Cargas atuantes nos elementos estruturais	24
5.6 Lajes	25
5.6.1 Lajes maciças	25
5.6.1.1 Quanto sua direção	26
5.6.1.2 Vãos efetivos.....	27
5.6.1.3 Vinculações	28
5.6.1.4 Ações	29
5.6.1.5 Carga de parede em lajes	30
5.6.2. Lajes treliçadas	31
5.6.2.1 Material de enchimento	32
5.6.2.2. Nervuras transversais.....	33
5.6.2.3. Armaduras de distribuição.....	33
5.6.2.4 Armação das treliças	34
5.6.2.5. Armadura complementar	35

5.6.2.6 Ação da laje nas vigas do pavimento	35
5.7 Ferramenta computacional.....	36
5.7.1. TQS	36
5.8 Parâmetros de estabilidade global	37
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	38
6.1 Do lançamento do edifício.....	41
6.1.1 Criação do edifício.....	41
6.1.1.1. Materiais e classes	43
6.1.2. Cargas horizontais	43
6.1.2.1. Carga de vento	43
6.1.3. Cargas verticais.....	45
6.1.3.1. Cargas verticais em vigas	45
6.1.3.2. Cargas verticais em lajes	46
6.1.3.2. Cargas verticais em pilares	46
6.1.4. Do lançamento da estrutura	47
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
7.1 Verificação de deslocamentos nas lajes	49
7.2. Estabilidade global.....	52
7.3. Esforços em vigas.....	52
7.3.1. Momentos fletores positivos das vigas.....	54
7.3.2. Momentos fletores negativos das vigas	56
7.3.3 Taxa de aço das vigas	58
7.4. Esforços nos pilares	59
7.4.1. Carga axiais nos pilares (Fz).....	61
7.4.2. Momentos fletores nos pilares direção X.....	64
7.3.3. Momentos fletores nos pilares direção Y.	65
8 CONCLUSÃO	66
9 REFERÊNCIAS.....	67
10 APÊNDICE.....	70

1 INTRODUÇÃO

Em um país continental como o Brasil, é comum que a construção civil seja diversificada, encontrando grande variedade de sistemas construtivos. Tal pluralidade de metodologias é possível por conta da variação de cultura e clima, que implica diretamente no modo de construir da sociedade.

Sob esta ótica, entre o grande leque de sistemas e materiais empregados na indústria da construção, onde é possível encontrar edificações em estrutura de madeira, metálica, alvenaria estrutural, é de destaque o concreto armado. A resistência aos esforços solicitantes, trabalhabilidade que permite fácil modelagem de diversas formas, durabilidade, baixo custo, fácil obtenção de matéria-prima, mão-de-obra com conhecimento e experiência na área são algumas das características que torna o concreto armado tão dominante no Brasil.

Existem basicamente dois grupos de estruturas: reticuladas e laminares. Sistemas laminares, são compostos por paredes de alvenaria estrutural ou paredes de concreto. Nesta concepção estrutural, os esforços solicitantes nas lajes são transmitidos diretamente para os planos de parede que possuem função de vedação, resistência e transmissão de esforços à fundação. O sistema tem suas limitações no que tange arquiteturas mais arrojadas e esbeltas, impossibilidade de alterações futuras e um *layout* limitado.

Nas estruturas reticuladas, as lajes transmitem esforços para as vigas em seu perímetro que as repassam aos pilares e, por fim, chegam às fundações. As paredes neste caso possuem apenas função de vedação da estrutura. Em ambas metodologias é imprescindível a presença das lajes, pois é o elemento estrutural que receberá as ações e carregamentos, desde pessoas, equipamentos, revestimentos e até paredes.

Segundo Bastos (2021a), lajes são elementos de superfície, planas e bidimensionais, denominadas como placas. No estudo das lajes de concreto armado, podemos encontrar diferentes tipos de estrutura, as mais comuns são lajes maciças, lajes alveolares e lajes nervuradas. A escolha da tipologia depende de alguns fatores: arquitetura, vãos livres, cargas, repetições, entre outros. Em edifícios de múltiplos pavimentos, onde tem a repetição do

“pavimento tipo” nos demais andares da edificação é comum o uso de lajes maciças, pois a repetição de formas viabiliza seu uso em relação ao custo. Em contrapartida dependendo das cargas e vãos a serem vencidos, o custo de uma laje mais robusta, com maior espessura pode inviabilizar, então pode-se adotar sistema de lajes nervuradas, por ser possível um ganho de inércia no aumento da espessura e redução dos volumes de concreto.

Segundo NBR 6118:2014, define laje nervurada como as lajes moldadas *in loco* ou com nervuras pré-moldadas, com zona de tração dos momentos solicitantes positivos nas nervuras, permitindo ser adicionado um material inerte entre elas. Este tipo de material não possui função estrutural, apenas de preenchimento de espaço vazio, e tem como objetivo a diminuição do peso próprio da estrutura. O elemento responsável pela união das nervuras, resistência a esforços de compressão e transmissão das cargas às nervuras é a mesa, composta por uma capa de concreto de espessura variável.

Por outro lado, as lajes maciças são compostas em toda sua espessura por concreto, sem materiais inertes de preenchimento. A adoção da altura depende da tipologia da laje, dimensão e cargas atuantes. Como consequência de ser uma placa maciça de concreto, possui elevado peso próprio em comparação às lajes nervuradas, contém elevado consumo de fôrmas e escoramento em comparação ao sistema nervurado, mas em contrapartida tem maior rigidez e melhor distribuição de esforços para as vigas em seu perímetro.

Em virtude do exposto, o presente trabalho traz o estudo dos comportamentos estruturais de um edifício, composto por laje maciças e treliçada, buscando analisar o sistema com maiores reduções de esforços.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

O presente trabalho objetiva responder à seguinte questão: “A utilização de lajes nervuradas reduz os esforços na estrutura quando comparadas às lajes maciças?”.

3 JUSTIFICATIVA

Um dos grandes gargalos das estruturas de concreto armado é a redução de esforços, entretanto o elevado peso próprio é o maior obstáculo. Como consequência as fundações tendem a ser mais robustas, em comparação a outras tipologias construtivas, aumentando o consumo de aço, concreto e mão de obra.

Entre os elementos presentes nas estruturas de concreto armado, as lajes por serem elementos de maiores dimensões e receber grande parte das cargas das edificações, possui parcela significativa em relação aos esforços nos demais elementos da edificação, então nasce a necessidade de o engenheiro calculista analisar mais de uma metodologia construtiva no que tange a respeito de lajes.

Adoção da laje treliçada, além de seus benefícios na execução, busca a diminuição do peso próprio e consequentemente redução dos esforços gerados na estrutura em relação a laje maciça, entretanto devido às limitações técnicas do sistema a prevista oneração de esforços pode não ocorrer.

Segundo Mohamad, Brondani e Isaia(2015), a construção civil possui a sua disposição ampla tipologia de sistemas estruturais, de modo que é importante adotar o princípio da sustentabilidade conjunto as tipologias construtivas. Objetivando o uso racional dos materiais para redução dos impactos humanos ao meio ambiente, resultando em possíveis reduções de custos. Giongo (2007) diz que o custo de estruturas de concreto armado é em torno de 20% a 25% do custo total da obra, quando se trata de edifícios convencionais. Evidentemente os valores podem chegar a mudar, dependendo da exigência arquitetônica, qualidade de acabamento, solos pouco resistivos que resultam em sistemas de fundações mais caras, entre outros fatores.

No custo das estruturas, está envolvido valores de insumos, mão de obra, reaproveitamento de formas, escoramento, lançamento, adensamento, cura e desforma. Então se torna necessário, a busca de modelos para redução de material, reaproveitamentos e ganho de produtividade da equipe.

Contudo, se torna imprescindível o estudo de diferentes tipologias de lajes em um edifício, responsáveis pelo maior volume de concreto, formas e cargas em um edifício convencional de concreto armado.

Diante o exposto, o presente trabalho traz o estudo dos dois sistemas de lajes mais usais, lajes maciças convencionais e lajes treliçadas, onde o foco da análise é estudar a influência de cada modelo nos demais elementos da estrutura, visando possíveis reduções de esforços e, como consequência, a diminuição do uso de insumos e otimização da mão de obra.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Analisar os esforços gerados em estrutura composta por lajes maciças convencionais e lajes treliçadas e compará-los.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar os esforços gerados em cada modelo de laje;
- Dimensionar cada um dos modelos propostos;
- Aferir as cargas e esforços nas vigas e pilares;
- Comparar os esforços nos elementos estruturais para a tipologia com lajes maciças e nervuradas;
- Identificar as estruturas com maiores variações dos esforços e as causas específicas;
- Comparar resultados obtidos em cada análise;
- Definir o modelo que apresenta maior redução de esforços na estrutura global.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Concreto

Segundo Bastos (2021a), concreto é um material composto por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita), podendo ser adicionado aditivos químicos com objetivo de modificar ou potencializar suas características físicas. O concreto apresenta propriedades no estado fresco e endurecido.

- **Estado Fresco:** trabalhabilidade, consistência, segregação, exsudação, compacidade, massa específica, ar incorporado.
- **Estado Endurecido:** compacidade, resistência mecânica, elasticidade, retração, fluência, durabilidade, massa específica, absorção, permeabilidade, difusão.

O concreto em seu estado endurecido, apresenta alta resistência à compressão, sendo então excelente material para o uso em estruturas, que apresentam esforços à compressão. Entretanto, apresenta fragilidade quando submetido a tração, então seu uso é combinado com o aço para estruturas suportarem os esforços de tração, formando o concreto armado.

5.1.1 Resistência à compressão

Segundo Carvalho (2014), a principal característica do concreto é sua resistência à compressão, que determina por ensaio em corpos de provas submetidos a compressão centrada. A resistência obtida através da Equação 1.

$$f_{cj} = \frac{N_{rup}}{A} \quad (1)$$

f_{cj} – resistência à compressão do corpo de prova;

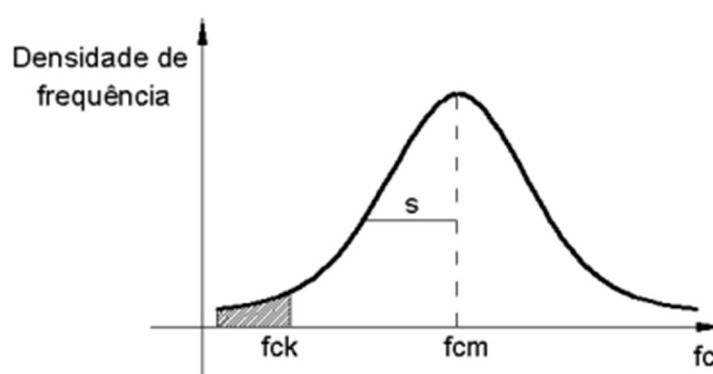
N_{rup} – carga de ruptura o corpo de prova;

A – área da seção transversal do corpo de prova.

Para Gutfreind e Aurich (2014), a resistência característica do concreto é uma medida estatística que leva em conta não apenas o valor da média aritmética dos corpos de prova, como também o coeficiente de variação δ , da série de valores.

Segundo Pinheiro (2007), ao ensaiar um número grande de corpos de prova, pode ser feito o gráfico com os valores da resistência *versus* quantidade dos corpos, representado na figura 1.

Figura 1 – Curva de Gauss



Fonte: Próprio autor (2021)

A partir do gráfico, encontra-se a curva de Gauss para a resistência do concreto a compressão. Ainda, prescreve que na curva de Gauss encontra os valores da resistência média a compressão e resistência característica do concreto à compressão. Então determina o f_{ck} do concreto por meio da equação 2.

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s \quad (2)$$

f_{ck} = resistência característica do concreto;

f_{cm} = resistência média aritmética dos corpos de prova;

s = desvio padrão (distância entre a abscissa de f_{cm} e a do ponto de inflexão da curva).

5.1.2 Massa específica

Pinheiro (2004), diz que para efeito de cálculo, adota-se para cálculo, 2400 Kg/m³ para concreto simples e 2500 Kg/m³ para concreto armado.

5.1.3 Módulo de elasticidade

5.1.3.1 Módulo de elasticidade longitudinal

A ABNT NBR 6118:2014 define que o módulo de elasticidade seja determinado pelo ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522:2017, tendo o corpo de prova uma idade de 28 dias.

Pinheiro (2004) afirma que, para o concreto, o módulo de elasticidade é aplicado na parte retilínea da curva de tensão x deformação. Na presença de uma curva, é aplicada a expressão na tangente da curva de origem, resultando no módulo de deformação tangente. Também é relatado que o módulo de elasticidade secante é utilizado na determinação dos esforços e na verificação dos limites de serviço.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, os valores do módulo de elasticidade são definidos pelas expressões contidas na equação 3, para f_{ck} de 20 MPa e 50 MPa.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

$\alpha_E = 1,2$ para basalto;

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, o módulo de deformação secante pode ser obtido por meio de ensaios estabelecidos pela ABNT NBR 8522:2017, ou por meio das expressões contidas nas equações 4 e 5.

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (4)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (5)$$

5.1.3.2 Coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade Transversal do Concreto

Bastos (2021a), diz que aplicando uma força no concreto surgem deformações em duas direções, direção da força e transversal. O coeficiente de Poisson (ν), é determinado pela relação da deformação transversal e a deformação longitudinal.

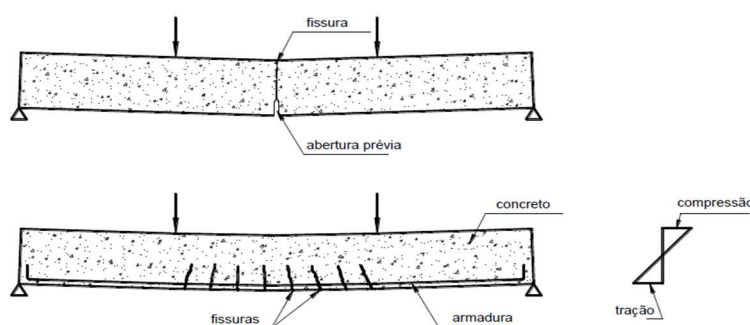
A ABNT NBR 6118:2014 estabelece que tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ e tensões de tração menores que f_{ct} , o coeficiente de Poisson pode ser adotado como 0,2 ($\nu=0,2$). Então especifica que o módulo de elasticidade transversal deve ser estimado em função do módulo de elasticidade secante, sendo exemplificado na equação 6.

$$G_c = \frac{E_{cs}}{2,4} \quad (6)$$

5.2 Aços para armadura

O concreto possui baixa resistência à tração, seu uso fica limitado apenas a elementos submetidos a compressão, em elementos onde parte da estrutura está submetida a flexão é necessário o uso do aço em conjunto com o concreto. Segue ilustração do aço combatendo os esforços de flexão em um elemento estrutural, representado na figura 2.

Figura 2 – Ilustração do aço trabalhando na região tracionada



Fonte: Bastos (2021b)

A ABNT NBR 7480:2007 classifica o aço destinado a armadura de concreto armado em três categorias, a divisão é dada por meio do valor característico da resistência de escoamento (resistência limite do aço à não sofrer deformação permanente), são elas, CA-25, CA-50 e CA-60, com as respectivas resistências limites de 250 MPa, 500 MPa e 600 MPa.

Segundo Carvalho (2014), as principais características mecânicas do aço, são obtidas através de ensaios, são eles: resistência característica, limite de resistência, e alongamento.

5.3 Concreto armado

A ABNT NBR 6118:2014 define os elementos de concreto armado como aqueles que seu comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, sem aplicação de alongamentos iniciais do aço antes da efetivação da aderência.

Segundo Bastos (2021a), o concreto armado alia as qualidades do concreto com as do aço, então permitindo construir elementos com variados formatos, relativa rapidez e facilidade, e resistindo de esforços de compressão e tração.

5.4 Classificação dos elementos estruturais

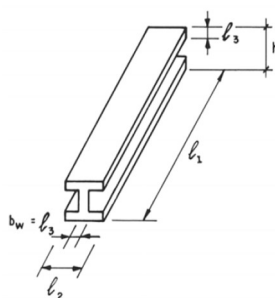
Segundo Giongo (2007), os elementos estruturais, que constituem a estrutura global, são formados por lajes, vigas e pilares, ou a união destes elementos, como exemplo, as escadas cujo são constituídas por lajes e vigas. Eles devem possuir função compatível com os esforços solicitantes, e garantir a segurança por meio dos estados limites último e de serviço.

Logo, a importância de conhecer as funções de cada elemento e os esforços que estão sujeitos, então a necessidade de classificá-los de acordo com sua geometria.

Giongo (2007), classifica-os de acordo com sua geometria, fazendo comparações entre suas ordens de grandeza das dimensões características do elemento, são elas, L1, L2 e L3. Surgindo então as seguintes classificações:

- Elementos lineares de seção delgada – espessura (b_w) muito menor que altura da seção transversal (h), e está muito menor que seu comprimento (L_1). Se assemelha às barras, sendo visto na figura 3.

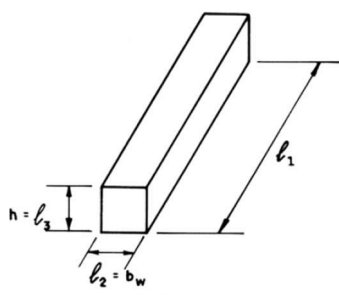
Figura 3 - Elemento linear de seção delgada



Fonte: Giongo (2007).

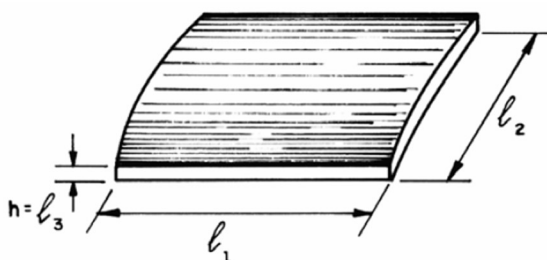
- Elementos lineares de seção não delgada – largura (b) na mesma ordem de grandeza da altura (h) as seções transversais e, bem menor que o comprimento (L_1). Também é classificado como barras, exemplo viga e pilar, sendo vista na figura 4.

Figura 4 - Elemento linear de seção não delgada



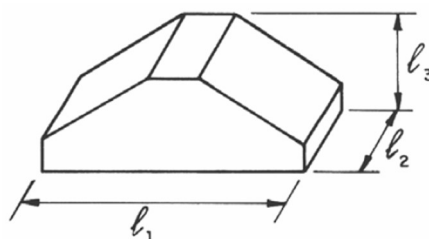
Fonte: Giongo (2007).

- Elementos bidimensionais – possuem dimensões em planta (L_1 e L_2) muito superiores à espessura (h). São elementos de superfícies, exemplo as lajes, sendo visto na figura 5.

Figura 5 - Elemento bidimensional

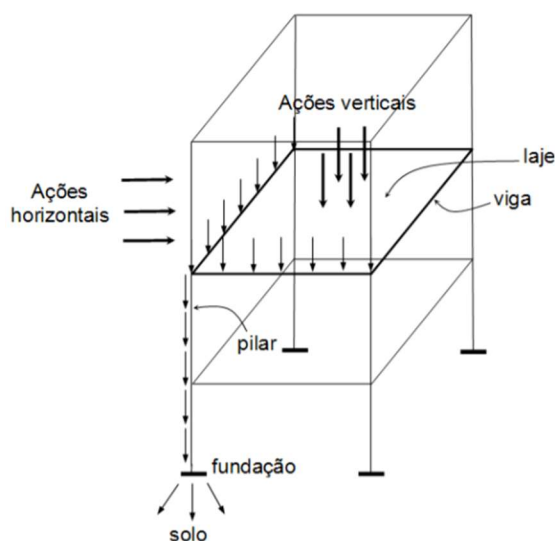
Fonte: Giongo (2007).

- Elementos tridimensionais – elementos cujas três dimensões (L_1 , L_2 e L_3) possuem a mesma ordem de grandeza. São exemplos, blocos de fundações e sapatas, sendo visto na figura 6.

Figura 6 - Elemento tridimensional

Fonte: Giongo (2007).

Entretanto, mesmo com a classificação quanto a geometria, a definição não se aplicam no comportamento estrutural. Vigas e pilares são classificados como lineares, mas não são submetidos ao mesmo tipo de esforço solicitante. Sendo assim, é necessário estudo dos esforços atuantes em cada elemento e os caminhos dos carregamentos na estrutura. Na figura 7 é exemplificado o fluxo de ações dos edifícios de concreto armado, entretanto não se aplica as edificações compostas por estruturas laminares, pois os carregamentos das lajes são recebidos pelas paredes e na sequência fundações.

Figura 7 - Fluxo de ações

Fonte: Alva (2018).

5.5 Cargas atuantes nos elementos estruturais

ABNT NBR 6120:2019, classifica as cargas como:

- Cargas permanentes – constituído pelo peso próprio da estrutura, elementos fixos e instalações permanentes, exemplo: regularização, revestimentos e forro.
- Cargas variáveis – são as cargas atuantes da estrutura em função do seu uso, exemplo: pessoas, equipamentos e veículos.

A norma faz indicações de valores de cargas para cada um dos itens citados. A tabela 1 representa alguns valores usuais de cargas permanentes.

Tabela 1 – Peso específico dos materiais

MATERIAL		PESO ESPECÍFICO (KN/m ³)
Blocos artificiais e pisos	Blocos cerâmicos vazados com parede vazadas	12
	Blocos cerâmicos maciços	18
	Lajotas cerâmicas	18
	Porcelanato	23
Argamassas e concretos	Concreto armado	25
	Concreto simples	24
	Argamassa cimento e areia	21

Fonte: ABNT NBR 6120:2019

5.6 Lajes

Campos Filho (2014) determina que as lajes são elementos planos solicitados, em maioria, por cargas normais em seu plano médio. Elas formam os pisos dos edifícios de concreto armado. São estruturas planas em que predominam comprimento e largura em relação à dimensão da altura (espessura). As lajes são diferenciadas pela sua forma, vinculação e sua relação com as bordas, geralmente ocorrem de forma retangulares, mas podem ser de forma trapezoidal ou em L.

Giongo (2007) pontua a importância da análise estrutural das lajes, devido ao alto consumo de concreto, em torno de 50% do volume total da edificação.

Logo, a importância do conhecimento das tipologias de lajes existentes na indústria da construção deve se basear na busca pela racionalização e atendimento às arquiteturas arrojadadas, de modo a atender os benefícios do construtor e usuário do edifício.

As lajes podem ser classificadas como, maciças, nervuradas, moldadas no local ou pré-fabricadas.

5.6.1 Lajes maciças

Bastos (2021b) conceitua laje maciça como aquela que em toda sua espessura é composta por concreto, sem presença de enchimentos, possui armaduras longitudinais a flexão e eventualmente transversais, sendo apoiadas em vigas ou paredes em seu contorno. Podendo ser de concreto armado convencional ou protendido.

As lajes maciças são projetadas para diversos tipos de uso, residenciais e comerciais. Sua aplicação também é feita em muros de arrimo, escadas e reservatórios. Segundo Bastos (2021b), só não são aplicadas em residências de médio e pequeno porte, devido às facilidades de execução das lajes -treliçadas e custo menor.

É importante a classificação do sistema, que podem ser classificadas por sua geometria, vínculos, apoios, entre outros. Então é imprescindível o estudo de suas diferentes tipologias.

5.6.1.1 Quanto sua direção

Para efeito de cálculo, o tipo de armação das lajes, está relacionado a sua geometria, ou seja, definição das direções da armação depende diretamente das dimensões do elemento, e podem ser classificadas como unidirecionais e bidirecionais.

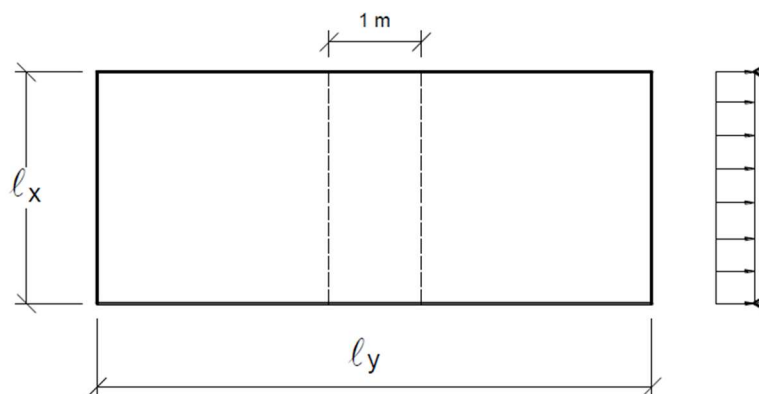
- Laje unidirecional: cuja razão entre o maior e menor vão seja maior que 2. Exemplificado na figura 8 e o cálculo de acordo com a equação 7.

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \geq 2 \quad (7)$$

l_y = maior vão;

l_x = menor vão.

Figura 8 - Representação vãos de laje unidirecional



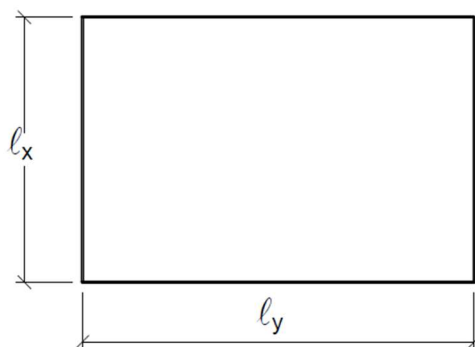
Fonte: Bastos (2021b).

- Laje bidirecional: cuja razão entre o maior e menor vão seja menor ou igual 2. Isto é mostrado na equação 8 e exemplificado na figura 9.

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \leq 2 \quad (8)$$

l_y = maior vão;

l_x = menor vão.

Figura 9 - Representação dos vãos de laje bidirecional

Fonte: Bastos (2021b).

5.6.1.2 Vãos efetivos

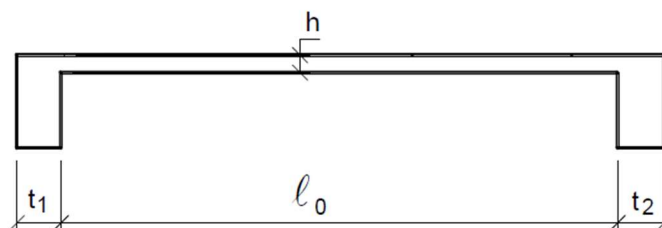
A ABNT NBR 6118:2014 define que os vãos efetivos das direções principais é calculado pela seguinte expressão contida nas equações desde que os apoios sejam suficientemente rígidos na direção vertical. A representação consiste no esquema da figura 10.

$$l_{ef} = l_o + a1 + a2 \quad (9)$$

Sendo:

$$a1 \leq \left\{ \frac{t_1}{2}, 0,3h \right\} \quad (10)$$

$$a2 \leq \left\{ \frac{t_2}{2}, 0,3h \right\} \quad (11)$$

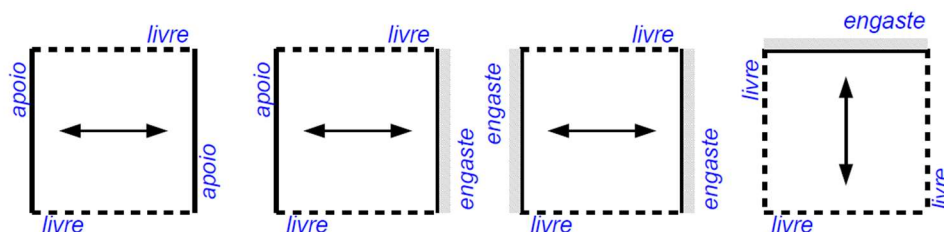
Figura 10 - Representação vão efetivo

Fonte: Bastos (2021b).

Campos Filho (2014) diz que as relações de distribuição de armadura feita de acordo com a relação dos vãos apresentam algumas limitações em função das vinculações de bordas. As lajes que possuem apoio em duas bordas paralelas (as outras duas livres) três bordas livres (lajes em balanço), serão armadas em uma única direção, independente da razão entre seus vãos. Logo,

a importância do estudo das vinculações existentes nas lajes, mostrado na figura 11.

Figura 11 – Sentido da armadura principal para o caso de lajes com borda livre

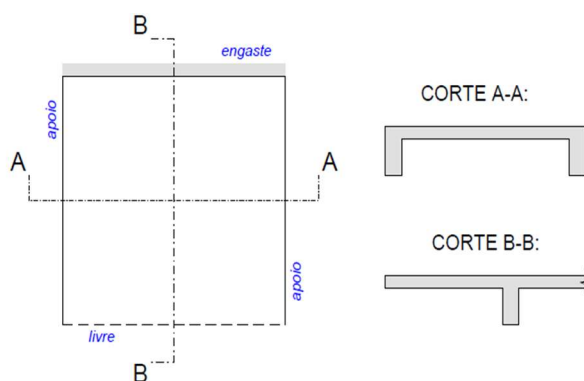


Fonte: Campos Filho (2014).

5.6.1.3 Vinculações

Bastos (2021a), conceitua que para determinação dos esforços e deformações em lajes, é necessário estabelecer os vínculos com os apoios e cita os três tipos mais comuns de vinculações: apoio simples, engaste perfeito e engaste elástico. Podendo ser exemplificado na figura 12.

Figura 12 - Representação gráfica das vinculações das lajes

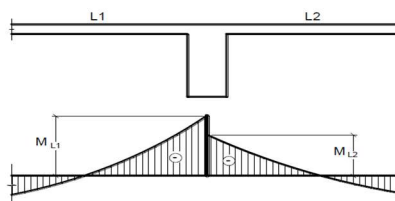


Fonte: Campos Filho (2014).

Entretanto, por conta das limitações das tabelas usadas para cálculo de lajes, só é admitido apoios simples, engaste perfeito e apoios pontuais. O engaste elástico é possível ser determinado com programas computacionais.

- **Apoio simples:** apoio de bordas onde não existe continuidade de lajes vizinhas, podendo ser uma parede de alvenaria estrutural ou viga de concreto armado.
- **Engaste perfeito:** quando a borda da laje tem continuidade além do apoio, com lajes vizinhas. Exemplo: lajes em balanço.
- **Engaste elástico:** apoio entre lajes contínuas, onde surgem momentos fletores negativos por conta da continuidade, entretanto para efeito de cálculo dos momentos fletores, as lajes contínuas devem ser consideradas engastadas, como representado na figura 13.

Figura 13 - Representação do engaste elástico e momentos fletores negativos



Fonte: Bastos (2021b).

5.6.1.4 Ações

No dimensionamento de estruturas, é necessário a determinação das cargas permanentes e variáveis atuantes. Pelo fato de as lajes serem elementos de superfícies, recebem cargas de pisos, forro, cargas acidentais de uso, parede (no caso de não estarem sobre vigas), entre outras.

Em edifícios residenciais, nos pavimentos tipos a depender da arquitetura e da disposição das vigas dispostas pelo engenheiro, a carga de alvenaria pode ocasionar de descarregar diretamente na laje, então é importante o conhecimento da metodologia de cálculo das cargas de alvenaria.

Bastos (2021a), diz que o módulo de calcular carga de parede depende do peso da parede e se a laje é armada em uma ou duas direções. E a determinação do peso é dependente do tipo da unidade de alvenaria, espessura do revestimento por face, largura e altura da parede. A ABNT NBR 6120:2019 auxilia no cálculo do peso da parede, pois em sua Tabela 2 (item 5.4) fornece o peso específico de paredes de alvenaria estrutural e de vedação com alguns

tipos de unidade (como bloco de concreto e bloco ou tijolo cerâmico) e em função da espessura do revestimento das faces. Então, o peso de parede, é calculado pela equação 12.

$$P_{par} = \gamma_{alv} \cdot h \cdot l \quad (12)$$

P_{par} = peso da parede (KN);

H = altura da parede (m);

l = comprimento da parede (m).

5.6.1.5 Carga de parede em lajes

A determinação dos esforços gerados por uma determinada parede é de suma importância, pois em muitos casos a arquitetura não permite o apoio das alvenarias diretamente nas vigas. A ABNT NBR 6120:2019 dispõe dos valores a serem adotados.

- **Lajes armadas em duas direções:**

Bastos (2021b) determina que para o cálculo da carga, é o peso de parede calculado dividido por toda área da laje, representado na equação (13).

$$g_{par} = \frac{P_{par}}{A_{par}} \quad (13)$$

- **Lajes armadas em uma direção:**

Segundo Bastos (2021b) as cargas devem ser analisadas de acordo com a disposição da parede, representado nas figuras 14 e 15. Em alvenaria de direção paralela à direção principal da laje, analisa-se como carga uniformemente distribuída exemplificada na equação 14, na ocorrência de paredes ortogonais à direção principal, a carga de parede é considerada como uma força pontual (P), sendo o P o peso de uma parede em um comprimento de um 1m.

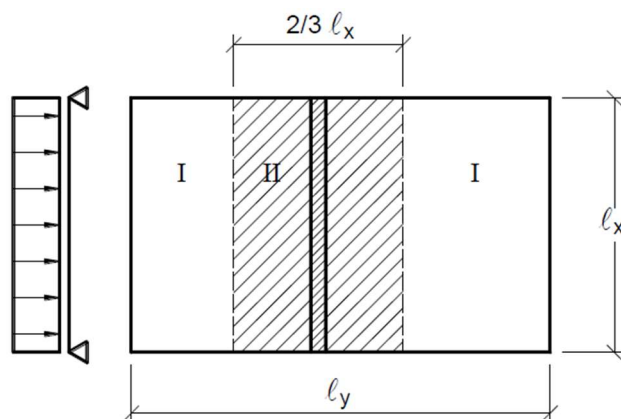
$$g_{par} = \frac{3P_{par}}{2l_x^2}$$

(14)

P_{par} = peso da parede (KN);

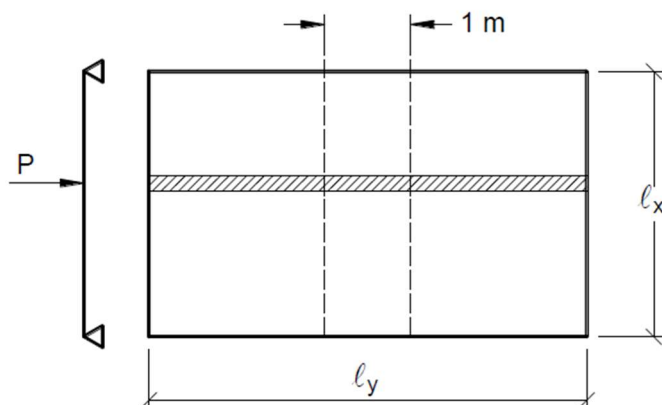
l_x = menor vão (m).

Figura 14 - Representação de parede paralela à direção principal



Fonte: Bastos (2021b).

Figura 15 - Representação de parede ortogonal à direção principal



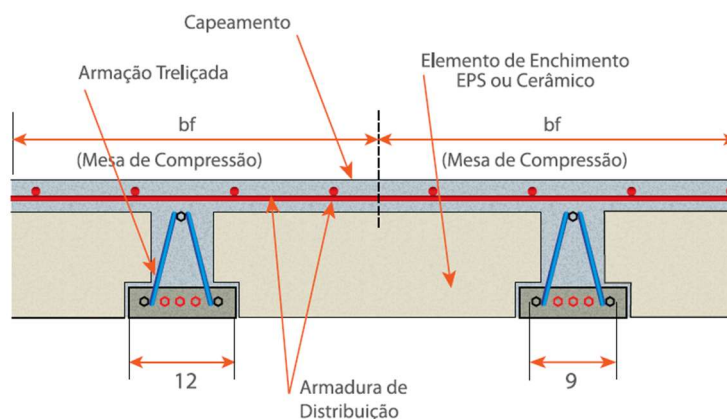
Fonte: Bastos (2021b).

5.6.2. Lajes treliçadas

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2014), as lajes treliçadas são compostas por elementos pré-moldados, elementos de enchimento (feitos de cerâmica ou EPS - poliestireno expandido), capa de concreto e armadura distribuída na região. As armações treliçadas são formadas por treliças, com um banzo superior contendo uma barra e um banzo inferior contendo duas barras,

além de diagonais com formato senoidal. A figura 16 ilustra a composição de uma laje treliçada e seus componentes.

Figura 16 - Laje treliçada e sua composição

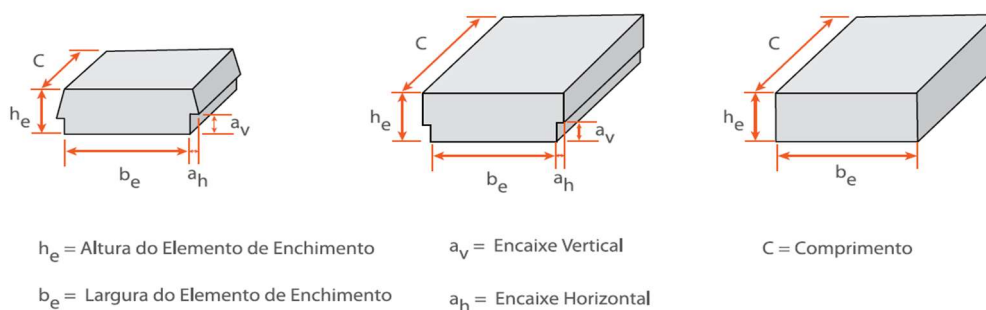


Fonte: ArcelorMittal (2021).

5.6.2.1 Material de enchimento

Bastos (2021b), define que os blocos de enchimento têm função de moldar o concreto, dando então forma às nervuras e capa, proporcionando superfícies inferiores lisas. Os materiais de enchimento devem ser leves e de baixo custo, sendo os mais comuns os blocos cerâmicos e EPS, representado na figura 17.

Figura 17 - Elementos de enchimento



Fonte: ArcelorMittal (2021).

No Manual de lajes treliçadas da ArcelorMittal (2021), é indicado que os elementos de enchimento devem ser intercalados entre as vigotas, e seu

principal objetivo é a redução no volume de concreto e o peso próprio da estrutura e não devem ser considerados materiais resistentes. Entretanto, a qualidade do material é importante, pois os enchimentos possuem também a função de transferir o peso do concreto fresco às vigotas.

Conforme é apresentado no Manual de lajes treliçadas da ArcelorMittal (2021), as alturas padronizadas dos materiais de preenchimento, como segue na tabela 2.

Tabela 2 - Espessura material de enchimento

Altura elemento de enchimento (cm)	7	8	10	12	16	20	24	29
Altura total da laje (cm)	10	11	14	16	20	24	29	34
	11	12	-		-	-	-	-
	12	13	15	17	21	25	30	32

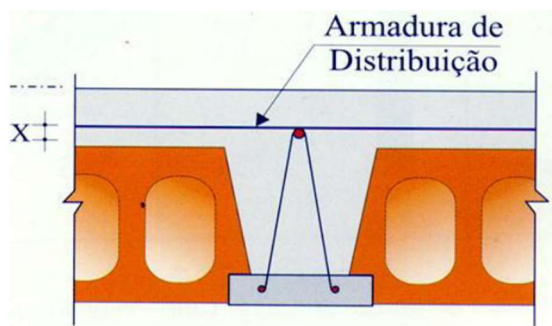
Fonte: ArcelorMittal (2021).

5.6.2.2. Nervuras transversais

Bastos (2021a), diz que as nervuras transversais tem o objetivo de travar a vigotas e redistribuir os esforços solicitantes, a disposição dos elementos é paralela à direção principal da laje.

5.6.2.3. Armaduras de distribuição

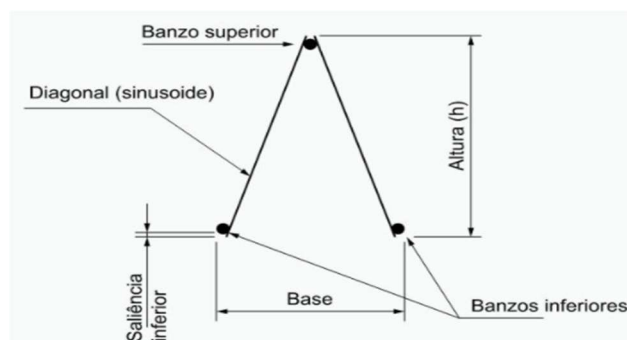
Segundo Droppa Junior (1999), é armadura inserida na capa de concreto, cujo demonstrado na figura 18, e sua inserção permite melhor rigidez da estrutura da laje. Também combate o cisalhamento entre as abas das vigotas treliçadas. O objetivo da armadura é aumentar o desempenho do sistema, reduzindo a retração diferencial do concreto moldado no local e o concreto pré-moldado e proporcionar melhor distribuição dos esforços.

Figura 18 - Armadura de distribuição

Fonte: Bastos (2021a).

5.6.2.4 Armação das treliças

A ABNT NBR 14859-3:2017 prescreve que as treliças são constituídas de um fio de aço no topo (banzo superior) e dois fios de aço inferiores (banzo inferior), cujo são interligados por vergalhões na diagonal, chamados de sinusoide, graficamente representado na figura 19.

Figura 19 - Ilustração de armação da treliça

Fonte: ABNT NBR 14859-3:2017

Bastos (2021b), conceitua que com auxílio de tabelas, fornecidas pelos fabricantes, pode determinar as características das lajes, entre elas as armaduras de treliças.

A fabricante ArcelorMittal, traz em seu manual, tabela de dimensionamento dessas armaduras em treliça, de acordo com o peso linear da estrutura analisada, apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Tabela de treliças padronizadas

Especificações do Produto			Composição/Fios			
Modelo	Designação	Altura (h) (mm)	Superior	Diagonal	Inferior	Peso Linear (kg/m)
T8 8L	TR 8644	80	6	4,2	4,2	0,735
TB 8M	TR 8645	80	6	4,2	5	0,825
TB 12M	TR 12645	120	6	4,2	5	0,886
TB 12R	TR 12646	120	6	4,2	6	1,016
TB 16L	TR 12745	160	7	4,2	5	1,032
TB 16R	TR 12746	160	7	4,2	6	1,168
TB 20L	TR 20745	200	7	4,2	5	1,111
TB 20R	TR 20756	200	7	5	6	1,446
TB 25M	TR 25856	250	8	5	6	1,686
TB 25R	TR 25858	250	8	5	8	2,024
TB 30M	TR 30856	300	8	5	6	1,823
TB 30R	TR 30858	300	8	5	8	2,168

Fonte: ArcelorMittal (2021).

5.6.2.5. Armadura complementar

Em suas notas de aula, Bastos (2021a) diz que as armaduras complementares têm a função de aumentar a resistência das lajes aos momentos positivos e negativos. A armadura positiva fica localizada em todo o comprimento das treliças, somando com as barras dos banzos inferiores. E as negativas estão dispostas próximas a face superior da capa. O manual da ArcelorMittal traz consigo tabelas de dimensionamento das armaduras complementares.

5.6.2.6 Ação da laje nas vigas do pavimento

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), diz que em consequência do seu processo construtivo, as lajes treliçadas unidirecionais tem como a principal característica a disposição dos trilhos na menor direção, cujo são apoiados em suas extremidades. Como consequência, as vigas ortogonais à direção das vigotas recebem a maior parte da carga. Então é perceptível certa desvantagem

as lajes maciças, pois além do maior esforço de flexão, concentra quase toda carga em uma única direção.

Entretanto, Carvalho e Figueiredo Filho (2014), diz que não é possível admitir que as vigas que estão paralelas aos trilhos não recebam qualquer carregamento da laje. Então em função dos valores obtidos em suas análises, o autor recomenda 25% da carga total seja transmitida a essas vigas.

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), prescreve equações para o cálculo dos carregamentos do seu modelo simplificado, exemplificado nas equações 15 e 16.

- Vigas ortogonais às nervuras:

$$P_{vy} = \frac{P.l_x.l_y}{2.l_y} = \frac{P.l_x}{2} \quad (15)$$

- Vigas paralelas às nervuras:

$$P_{vy} = \frac{0,25.P.l_x.l_y}{2.l_y} = \frac{0,25.P.l_x}{2} \quad (16)$$

P= carga uniformemente distribuída sobre o pavimento;

l_x = vão na direção paralela às nervuras;

l_y = vão na direção ortogonal às nervuras.

5.7 Ferramenta computacional

Segundo Scheleider (2018), a utilização de ferramentas computacionais permite os profissionais reduzirem os prazos e aumentar assertividade das análises estruturais, tornando o uso das ferramentas computacionais indispensáveis, entretanto salienta que é indispensável a análise dos resultados por profissionais habilitados.

5.7.1. TQS

Scheleider (2017), descreve que o *software* em questão é sistema que integrado, que possibilidade elaboração de projetos em concreto armado, protendido e alvenaria estrutural. Também conceitua que o sistema possui ferramenta CAD, que permite o lançamento de elementos estruturais e modelagem da estrutura e lançamento de solicitações e cargas da edificação.

5.8 Parâmetros de estabilidade global

Wordell (2003), conceitua que o lançamento e dimensionamento de pilares, vigas e lajes possui o objetivo de suportar as cargas verticais das estruturas, que são compostas pelo peso próprio da estrutura, permanentes e acidentais e possíveis acidentais. Entretanto, a escassez de espaço impossibilita a construção de grandes edifícios horizontais, a solução encontrada pela arquitetura são edificações verticais que possuem maior esbeltez, com tudo torna imprescindível o estudo dos esforços horizontais e a instabilidade global das edificações.

Segundo ABNT NBR 6118:2014, as estruturas são classificadas como de nós fixos e nós moveis. Estruturas que possuem coeficiente γ_z menor ou igual a 1,1, são denominadas de nós fixos e estruturas com γ_z maior que 1,1, são estruturas de nós moveis, cujo necessita análise de segunda ordem.

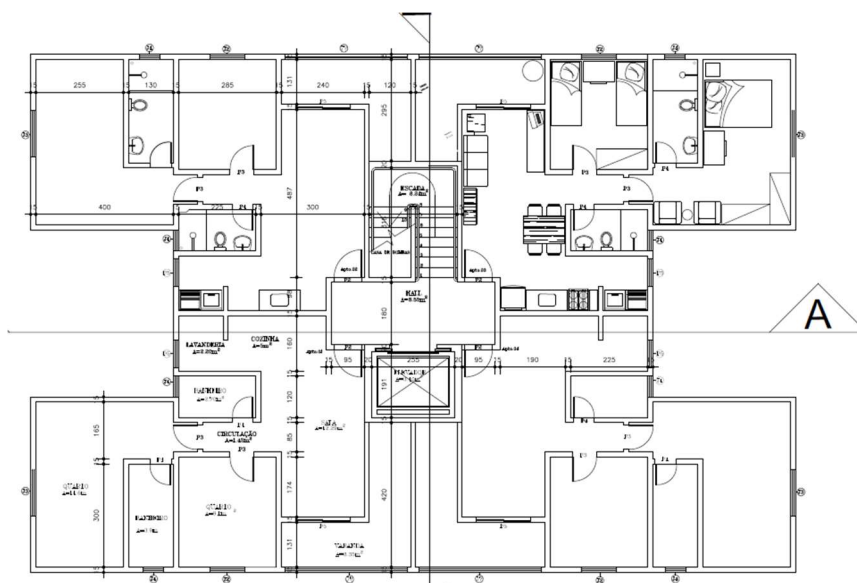
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho consiste no estudo de caso de dois sistemas construtivos de lajes, sendo elas maciças e treliçadas, cujo foram analisadas e dimensionadas por meio do *software* TQS, onde se analisou todos os sistemas estruturais do edifício.

Inicialmente, foi realizado estudo dos materiais e elementos empregados nas estruturas de concreto armado, mais especificamente sobre as lajes maciças e treliçadas unidirecionais, por meio de trabalhos, artigos e livros, devidamente apresentados na revisão de literatura.

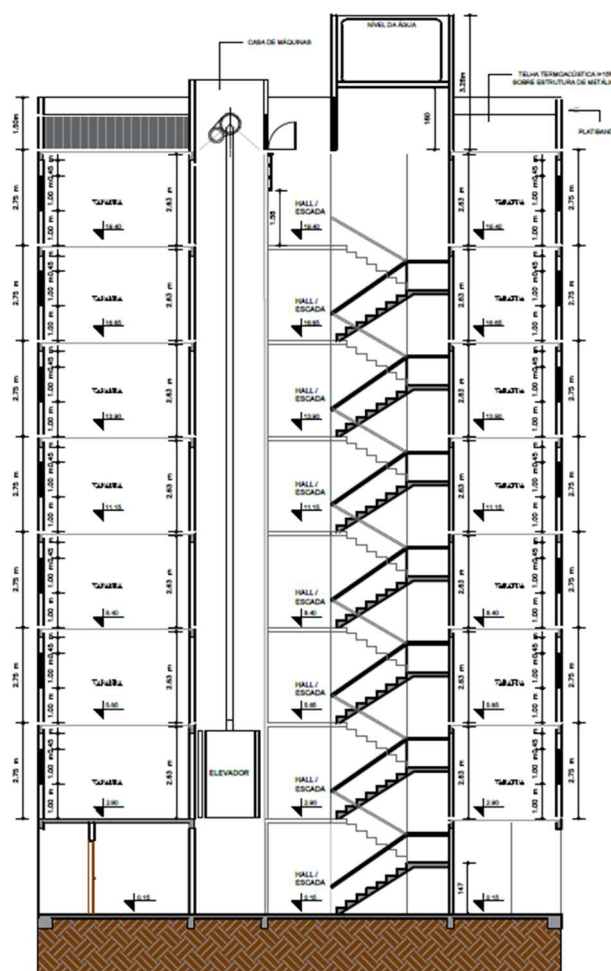
A etapa decorrente, foi a modelagem da edificação no *software* TQS, partindo de um edifício fictício com térreo, 7 pavimentos tipos e cobertura, representado ilustrados nas figuras 20 e 21.

Figura 20 – Planta baixa



Fonte: Próprio autor

Figura 21 – Corte do edifício



Fonte: Próprio autor

A concepção estrutural inicial teve como base a planta de forma pré-dimensionada, apresentado na prancha 01 do apêndice, ao qual foram locados os pilares, vigas e lajes maciças em planta. O mesmo modelo foi utilizado com o sistema de lajes treliçadas, apenas padronizando todas as lajes com 16 cm de altura, por conta dos carregamentos, a tabela 6 mostra que lajes com 16 cm resistem a solicitações de até 1,168 Kg/m.

Posteriormente, foram lançados os dados iniciais do edifício no TQS para criação do edifício, onde são lançadas informações como: altura do pé direito dos pavimentos, classe do concreto, cobrimento e cálculo do coeficiente de arrasto do vento.

Então, foi lançada toda a estrutura, com base na planta de formas existente, iniciando pelo lançamento de pilares, vigas e lajes maciças

respectivamente, possuindo então a concepção do edifício pronta com o sistema de lajes maciças. Posteriormente, foi feita a verificação dos esforços das estruturas, buscando identificar algum erro grave no sistema. O mesmo procedimento foi utilizado no sistema de lajes treliçadas, alterando apenas a tipologia e altura das mesmas.

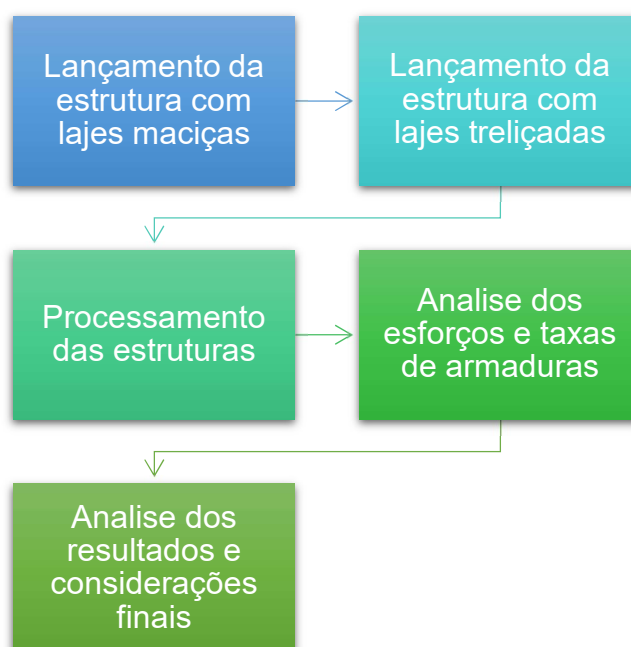
Buscando então atingir o objetivo do trabalho, que consiste em analisar a tipologia estrutural que apresenta menores esforços para estrutura.

Com isso, foi possível realizar as análises estruturais do edifício e fazer o comparativo dos seguintes itens:

- Deslocamento;
- Carregamento;
- Taxa de aço de vigas e pilares;
- Esforços na planta de cargas.

Os procedimentos adotados estão representados na figura 22.

Figura 22 - Representação gráfica das etapas da metodologia empregada



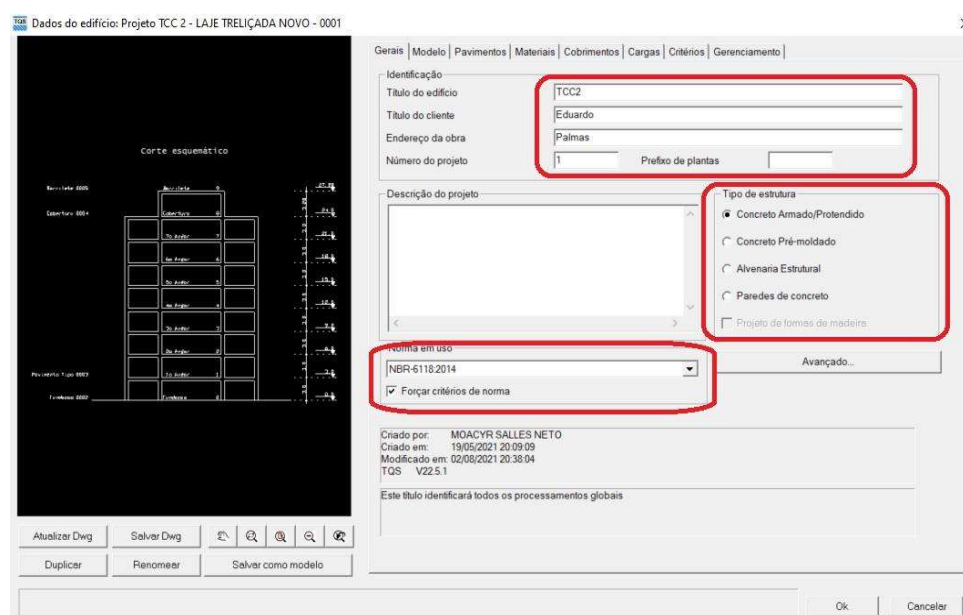
Fonte: Próprio autor.

6.1 Do lançamento do edifício

6.1.1 Criação do edifício

Ao iniciar o TQS e criar um novo edifício, teve-se que inserir os dados da edificação e escolher a norma a ser tomada como parâmetro, nos lançamentos do presente trabalho foi executado na norma vigente de concreto armado ABNT NBR 6118:2014, representado na figura 23.

Figura 23 – Escolha do modelo de análise TQS.



Fonte: Próprio autor

Ainda na criação do edifício é escolhido o modelo de processamento da estrutura, o sistema trabalha com duas tipologias de modelo, são elas:

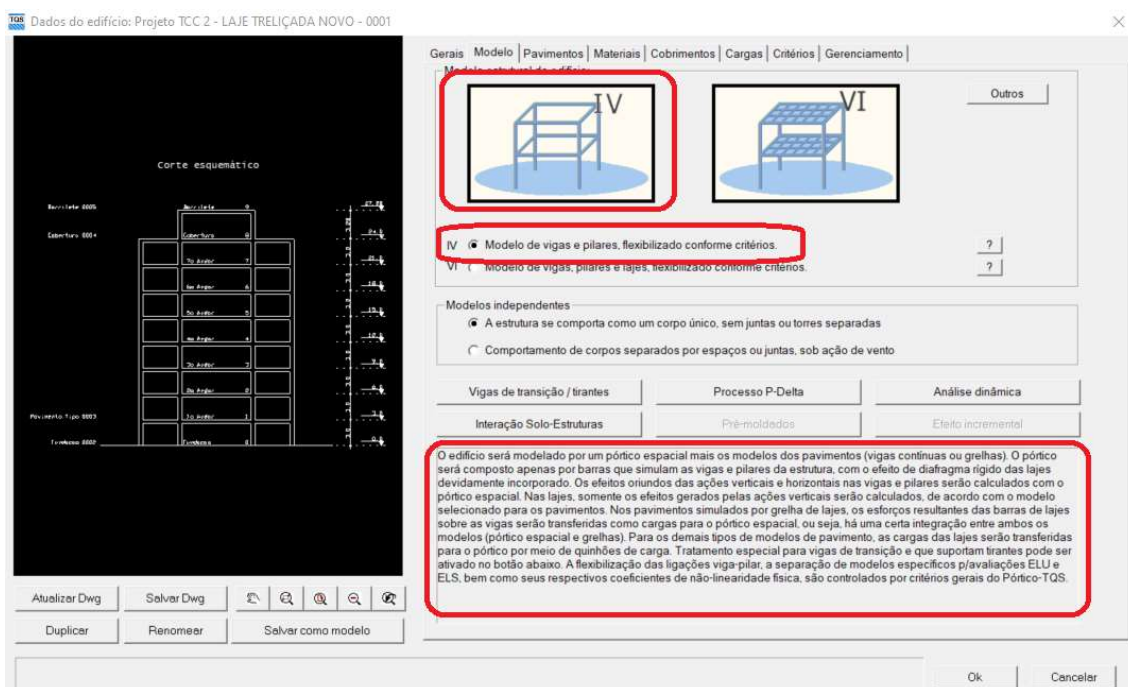
- **Modelo IV:** Modelo de vigas e pilares, flexibilizado conforme critérios,
- **Modelo VI:** Modelo de vigas, pilares e lajes, flexibilizando conforme critérios.

Segundo Kristiner (2019), o modelo IV é feito por um pórtico espacial onde vigas e pilares, que trabalham em conjunto para com os modelos dos pavimentos para inserção da laje. A modelagem é feita como sistema estrutural reticulado, onde vigas e barras representam barras, cujo recebem os esforços das lajes. O modelo em questão foi adotado no presente trabalho, por estabelecer a relação de recebimento de esforços da laje pelo pórtico.

De acordo com TQS (2021), no modelo VI a estrutura é analisada de forma conjunta, não mais analisada por pórticos e grelhas. Então o modelo torna-se mais consistente pois a compatibilidade entre deformações e esforços de todos os elementos da estrutura.

Na figura 24, representa o modelo adotado para elaboração do presente trabalho.

Figura 24 - Escolha do modelo

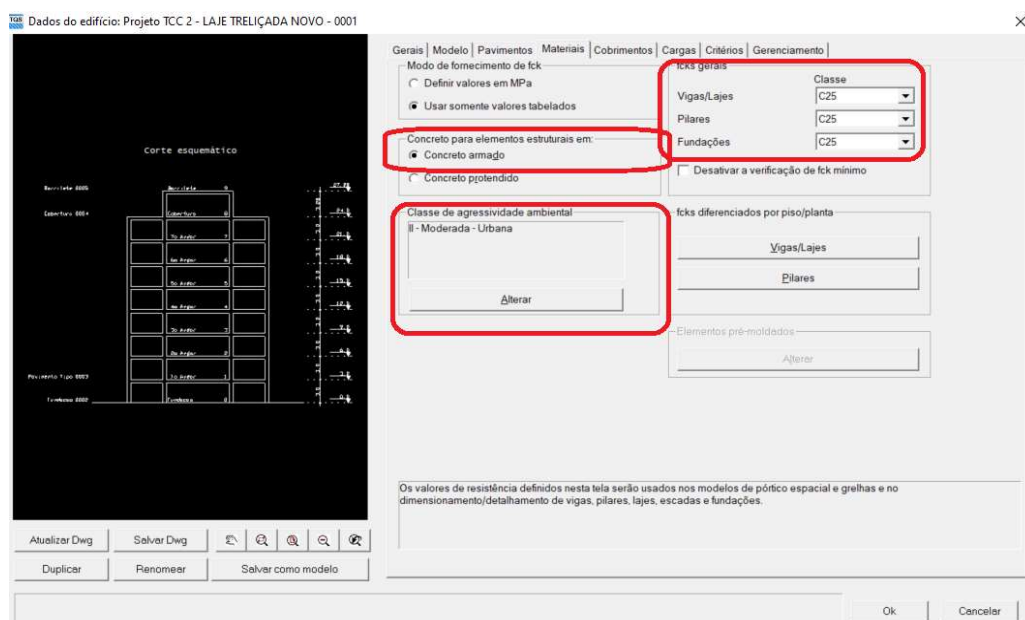


Fonte: Próprio autor.

6.1.1.1. Materiais e classes

Foi empregado no trabalho concreto com classe C25. A classe de agressividade adotada foi a II (moderada), que corresponde a ambientes urbanos de pequeno risco, na qual foi selecionada por considerar que o edifício fictício estaria localizado na cidade de Palmas – TO. Consequentemente, os cobrimentos do concreto para pilares e vigas seriam de 3,0 centímetros e para lajes de 2,5 centímetros, conforme ABNT NBR 6118:2014. Processo exemplificado na figura 23.

Figura 25 - Classe de concreto



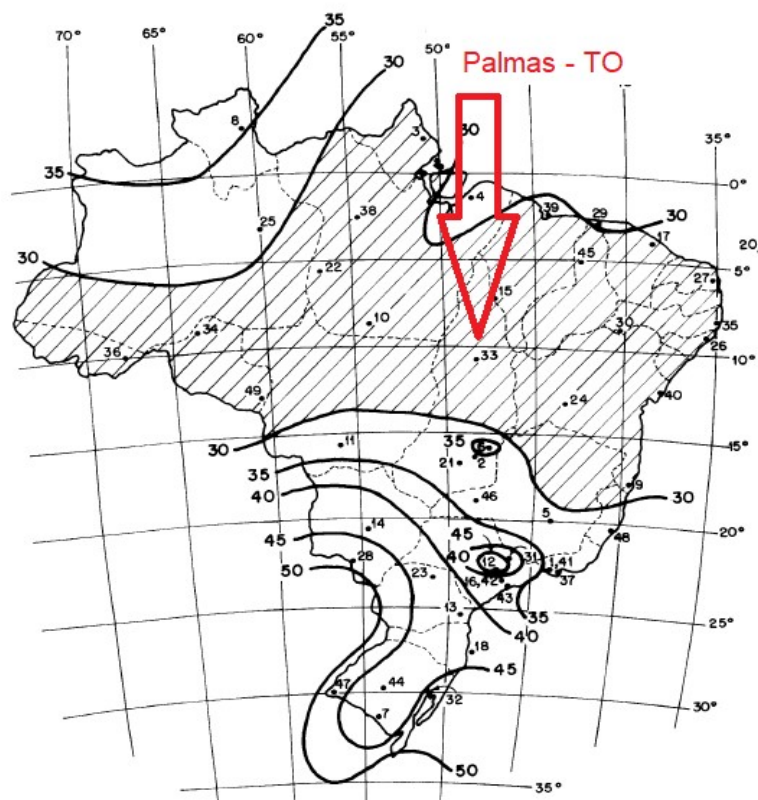
Fonte: Próprio autor.

6.1.2. Cargas horizontais

6.1.2.1. Carga de vento

As cargas verticais de vento calculadas no presente trabalho, seguiram os pressupostos descritos na ABNT NBR 6123:1988. Então foi determinado de acordo com a região do edifício em estudo velocidade básica do vento, V_0 , como 30m/s, o valor foi obtido pela isopleta presente na norma, representado na figura 26.

Figura 26 - Isopleta de velocidade básica do vento



Fonte: ANBT NBR 6123:1988

No seguimento, foram adotados os seguintes valores para o cálculo da carga de vento: fator topográfico igual a um, característica de rugosidade IV para terrenos cobertos por obstáculos em zona florestal ou urbana, edificação de classe B com dimensões horizontais ou verticais entre 20m e 50m, e fator estatístico para edificações de uso habitacional ou indústria com alta ocupação.

De acordo com a ABNT NBR 6123:1988, as edificações que não possuem duas vezes a altura média das edificações vizinhas estão sujeitas a um regime de vento de alta turbulência.

A edificação analisada neste trabalho foi classificada como de baixa turbulência. Com base nos pressupostos estabelecidos com a ajuda da norma e nas características físicas, topográficas e regionais das edificações, o coeficiente de arrasto, foi calculado utilizando o software TQS. Na figura 27, estão representados os parâmetros adotados no software e o valor do C_a para cada direção do vento.

Figura 27 – Cálculo de carga de arrasto do vento TQS

Dados do edifício: Projeto TCC 2 - LAJE TRELICADA NOVO - 0001

Gerar | Modelo | Pavimentos | Materiais | Cobrimentos | Cargas | Critérios | Gerenciamento

Verticais | Vento | Adicionais | Adicionais-2 | Combinações

V0 - Velocidade básica: 30 m/s

S1 - Fator do terreno: 1.00

S2 - Categoria de rugosidade: IV

S2 - Classe da edificação: B

S3 - Fator estatístico: 1.00

Ângulo	C.A.	Def Cot	Cot ini
1 90	1.26	Não	0
2 270	1.26	Não	0
3 0	1.06	Não	0
4 180	1.06	Não	0

Cota inicial para aplicação de vento

Inserir | Apagar | Calcular CAs

☐ Excentricidade em todos os casos 15.0 %

☐ Casos de vento nas plantas de formas

Tabelas de excentricidades e forças impostas

Excentricidades do caso selecionado

Ler tabelas de túnel de vento - planilha SDF

Ler tabelas de túnel de vento - FTV XML

Avançado...

Forneça as variáveis para cálculo de vento conforme a norma ou especifique valores especiais ou de ensaio no item "Excentricidades".

Fonte: Próprio autor.

6.1.3. Cargas verticais

6.1.3.1. Cargas verticais em vigas

Os elementos estruturais lançados nos pavimentos do modelador estrutural, receberam cargas permanentes e acidentais. Nas vigas dos pavimentos tipos, foram lançados carregamentos de alvenaria, nas quais possuem carga de parede e carga acidentais. Usando os critérios da ABNT NBR 6120:2019, na tabela 7 representa os valores adotados para carga de parede.

Entretanto, foi necessária a conversão das unidades, uma vez que os valores de entrada aceitos no TQS estão em tf/m. Convenção foi estabelecida, onde 1 KN/m² equivale a 0,10 tf/m². A partir dos valores descritos na norma, foram calculadas as cargas por faixa de metro, conforme exemplificado na equação 17 e na figura 26.

$$C_p = P_p * h_a \quad (17)$$

$$h_a = P_d - h_v$$

C_p = Carga de parede tf/m;

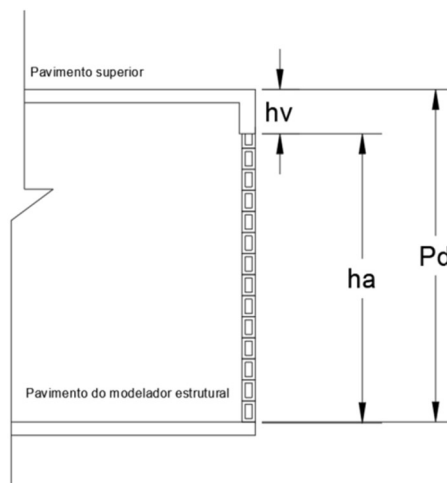
P_p = Peso de parede tf/m²;

h_a = Altura de alvenaria (m);

P_d = Pé direito (m);

h_v = Altura da viga (m).

Figura 28 – Representação gráfica da altura de parede utilizada nos cálculos



Fonte: Próprio autor.

Para cargas acidentais, foi adotado valores estabelecidos na ABNT NBR 6120:2019: 2,0 KN/m² para pavimentos tipos e térreo e 1,5 KN/m² para pavimento de cobertura.

6.1.3.2. Cargas verticais em lajes

Com exceção do peso próprio, os carregamentos nos dois sistemas de lajes analisados não tiveram alteração, ambos seguiram os pressupostos da ABNT NBR 6120:2019. Foi considerado os pesos específicos de 23 KN/m³ e 20 KN/m³, para porcelanato e argamassa de regularização respectivamente e para as cargas acidentais utilizou 2,0 KN/m². Em lajes de cobertura foi definido 0,4 KN/m² para cobertura em estrutura metálica e telhas de fibrocimento e 1,5 KN/m² de carga acidental.

6.1.3.2. Cargas verticais em pilares

Nos pilares, foram considerados apenas seu peso próprio e os carregamentos provenientes das vigas, em que os valores são calculados pelo TQS.

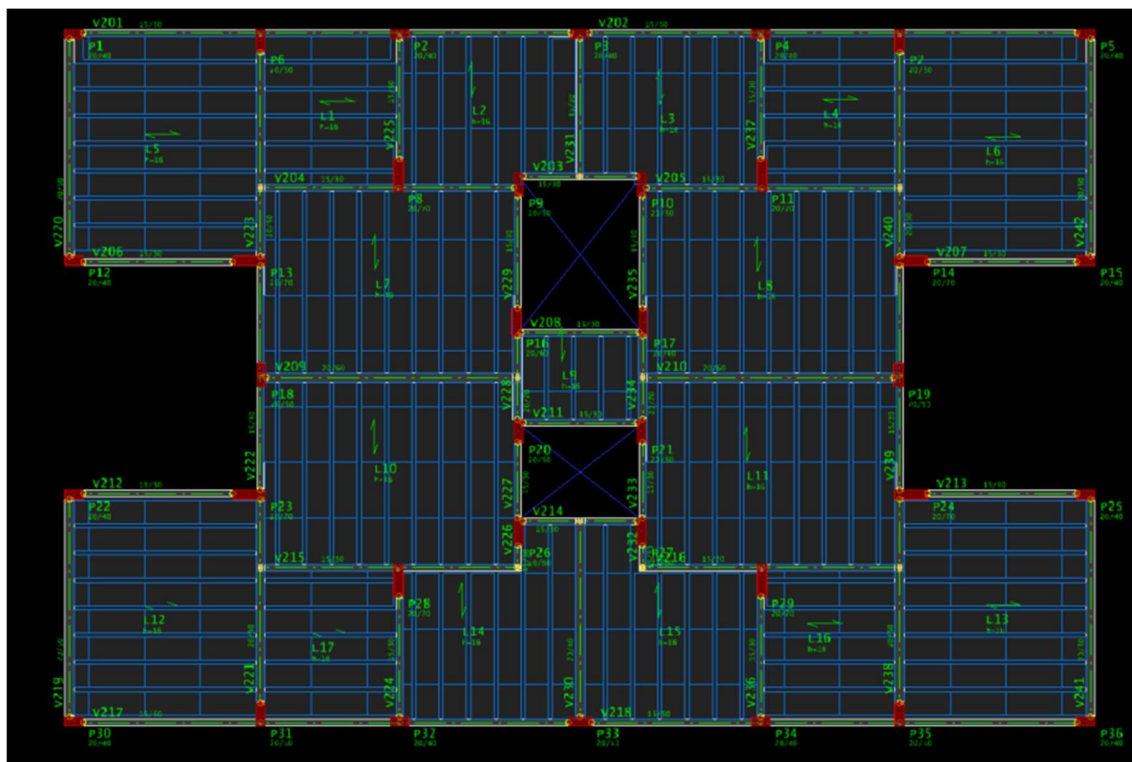
6.1.4. Do lançamento da estrutura

A estrutura foi lançada partindo de uma planta de formas pré - dimensionada pelo autor. No modelador estrutural do TQS, foi adicionado a planta como referência externa, para lançamento de pilares, vigas e lajes respectivamente.

Em ambos os sistemas de estudo, foi adotado a mesma disposição estrutural, com exceção da modelagem das lajes em que teve alteração na tipologia e altura. Na concepção com lajes maciças foram utilizadas alturas de dez e doze centímetros. As alturas das lajes treliçadas foram padronizadas em 16cm, sendo feita alteração de acordo com a necessidade de aumentar rigidez e diminuir deslocamentos verticais.

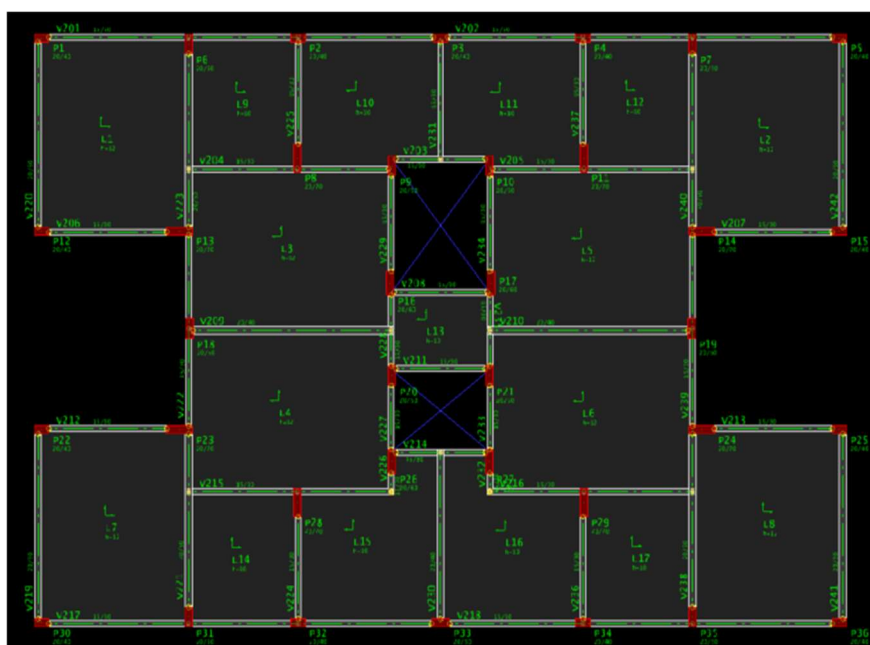
Em representação as plantas de forma do pavimento tipo de ambos sistemas, nas figuras 29 e 30.

Figura 29 – Planta de formas pavimento tipo – laje trelçada



Fonte: Próprio autor.

Figura 30 – Planta de formas pavimento tipo – laje maciça



Fonte: Próprio autor

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Verificação de deslocamentos nas lajes

O TQS permite verificar os deslocamentos das lajes na opção de grelha não linear, onde foi observado por meio das análises de ELS (estado limite de serviço), que os deslocamentos estavam fora dos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014. As alturas iniciais estabelecidas das tuas tipologias de lajes, tiveram seus deslocamentos verificados, a tabela 4 mostra os valores dos deslocamentos encontrados para cada laje.

Tabela 4 - Primeiro lançamento da estrutura e deslocamentos das lajes

LAJE	LAJE MACIÇA		L(cm)	L/250 (cm)	LAJE TRELIÇADA			
	Altura (cm)	Deslocamento (cm)			Altura (cm)	Deslocamento (cm)	L(cm)	L/250 (cm)
L1	10,00	0,31	174,70	0,70	16,00	0,63	174,70	0,70
L2	10,00	0,36	112,80	0,45	16,00	0,85	112,80	0,45
L3	10,00	0,36	93,20	0,37	16,00	0,36	93,20	0,37
L4	10,00	0,32	147,70	0,59	16,00	0,36	147,70	0,59
L5	12,00	0,62	143,00	0,57	16,00	2,99	143,00	0,57
L6	12,00	0,63	143,00	0,57	16,00	3,02	143,00	0,57
L7	12,00	1,13	308,50	1,23	16,00	1,95	308,50	1,23
L8	12,00	1,11	308,40	1,23	16,00	1,97	308,40	1,23
L9	10,00	0,04	180,00	0,72	16,00	0,18	180,00	0,72
L10	12,00	1,12	308,40	1,23	16,00	1,91	308,40	1,23
L11	12,00	1,11	308,40	1,23	16,00	1,96	308,40	1,23
L12	12,00	0,82	243,00	0,97	16,00	3,17	243,00	0,97
L13	12,00	0,80	243,00	0,97	16,00	3,17	243,00	0,97
L14	10,00	0,36	107,80	0,43	16,00	4,11	107,80	0,43
L15	10,00	0,35	88,20	0,35	16,00	3,99	88,20	0,35
L16	10,00	0,31	159,00	0,64	16,00	0,35	159,00	0,64
L17	10,00	0,30	159,00	0,64	16,00	0,35	159,00	0,64

Fonte: Próprio autor

No sistema composto por lajes maciças, L5 e L6 obtiveram deslocamentos maiores que o permitido por norma, entretanto por apresentar deslocamento de 0,05cm seria possível adotar contra flechas. Nas lajes treliçadas L2, L5, L6, L7, L8, L10, L11, L12, L13, L14 e L15, as flechas

excederam o permitido em norma, então foi necessário o aumento da altura para 20cm. A tabela 5 mostra o segundo lançamento das estruturas com as novas alturas.

Tabela 5 – Segundo lançamento da estrutura e deslocamentos das lajes

LAJE	LAJE MACIÇA				LAJE TRELIÇADA			
	Altura (cm)	Deslocamento (cm)	L(cm)	L/250 (cm)	Altura (cm)	Deslocamento (cm)	L(cm)	L/250 (cm)
L1	10,00	0,31	174,70	0,70	16,00	0,63	174,70	0,70
L2	10,00	0,36	112,80	0,45	20,00	0,28	112,80	0,45
L3	10,00	0,36	93,20	0,37	16,00	0,36	93,20	0,37
L4	10,00	0,32	147,70	0,59	16,00	0,36	147,70	0,59
L5	12,00	0,78	143,00	0,57	20,00	1,79	143,00	0,57
L6	12,00	0,79	143,00	0,57	20,00	1,81	143,00	0,57
L7	12,00	1,33	308,50	1,23	20,00	1,56	308,50	1,23
L8	12,00	1,27	308,40	1,23	20,00	1,60	308,40	1,23
L9	10,00	0,04	180,00	0,72	16,00	0,18	180,00	0,72
L10	12,00	1,33	308,40	1,23	20,00	1,54	308,40	1,23
L11	12,00	1,26	308,40	1,23	20,00	1,60	308,40	1,23
L12	12,00	0,82	243,00	0,97	20,00	1,62	243,00	0,97
L13	12,00	0,80	243,00	0,97	20,00	1,62	243,00	0,97
L14	10,00	0,36	107,80	0,43	20,00	2,46	107,80	0,43
L15	10,00	0,35	88,20	0,35	20,00	2,34	88,20	0,35
L16	10,00	0,31	159,00	0,64	16,00	0,35	159,00	0,64
L17	10,00	0,30	159,00	0,64	16,00	0,35	159,00	0,64

Fonte: Próprio autor

Entretanto, mesmo com aumento de altura as lajes apresentaram deformações, em sequência foi feito mais duas análises com aumento pontuais de espessura nas lajes com deformações, representados pelas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Terceiro lançamento da estrutura e deslocamentos das lajes

LAJE	LAJE MACIÇA				LAJE TRELIÇADA			
	Altura (cm)	Deslocamento (cm)	L(cm)	L/250 (cm)	Altura (cm)	Deslocamento (cm)	L(cm)	L/250 (cm)
L1	10,00	0,31	174,70	0,70	16,00	0,63	174,70	0,70
L2	10,00	0,36	112,80	0,45	20,00	0,28	112,80	0,45
L3	10,00	0,36	93,20	0,37	16,00	0,36	93,20	0,37
L4	10,00	0,32	147,70	0,59	16,00	0,36	147,70	0,59
L5	12,00	0,78	143,00	0,57	29,00	0,84	143,00	0,57
L6	12,00	0,79	143,00	0,57	29,00	0,84	143,00	0,57
L7	12,00	1,33	308,50	1,23	29,00	1,27	308,50	1,23
L8	12,00	1,27	308,40	1,23	29,00	1,32	308,40	1,23
L9	10,00	0,04	180,00	0,72	16,00	0,18	180,00	0,72
L10	12,00	1,33	308,40	1,23	29,00	1,26	308,40	1,23
L11	12,00	1,26	308,40	1,23	29,00	1,31	308,40	1,23
L12	12,00	0,82	243,00	0,97	20,00	0,81	243,00	0,97
L13	12,00	0,80	243,00	0,97	20,00	0,80	243,00	0,97
L14	10,00	0,36	107,80	0,43	29,00	0,45	107,80	0,43
L15	10,00	0,35	88,20	0,35	29,00	0,50	107,80	0,43
L16	10,00	0,31	159,00	0,64	16,00	0,35	159,00	0,64
L17	10,00	0,30	159,00	0,64	16,00	0,35	159,00	0,64

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Quarto lançamento da estrutura e deslocamentos das lajes

LAJE	LAJE MACIÇA				LAJE TRELIÇADA			
	Altura (cm)	Deslocamento (cm)	L(cm)	L/250 (cm)	Altura (cm)	Deslocamento (cm)	L(cm)	L/250 (cm)
L1	10,00	0,31	174,70	0,70	16,00	0,63	174,70	0,70
L2	10,00	0,36	112,80	0,45	20,00	0,28	112,80	0,45
L3	10,00	0,36	93,20	0,37	16,00	0,36	93,20	0,37
L4	10,00	0,32	147,70	0,59	16,00	0,36	147,70	0,59
L5	12,00	0,78	143,00	0,57	34,00	0,58	143,00	0,57
L6	12,00	0,79	143,00	0,57	34,00	0,58	143,00	0,57
L7	12,00	1,33	308,50	1,23	29,00	0,74	308,50	1,23
L8	12,00	1,27	308,40	1,23	29,00	0,76	308,40	1,23
L9	10,00	0,04	180,00	0,72	16,00	0,18	180,00	0,72
L10	12,00	1,33	308,40	1,23	29,00	0,74	308,40	1,23
L11	12,00	1,26	308,40	1,23	29,00	0,76	308,40	1,23
L12	12,00	0,82	243,00	0,97	20,00	0,81	243,00	0,97
L13	12,00	0,80	243,00	0,97	20,00	0,80	243,00	0,97
L14	10,00	0,36	107,80	0,43	29,00	0,39	107,80	0,43
L15	10,00	0,35	88,20	0,35	29,00	0,35	107,80	0,43
L16	10,00	0,31	159,00	0,64	16,00	0,35	159,00	0,64
L17	10,00	0,30	159,00	0,64	16,00	0,35	159,00	0,64

Fonte: Próprio autor.

7.2. Estabilidade global

Após lançamento e processamento da estrutura, obteve-se os resultados da estabilidade global dos modelos. O TQS fez análise das cargas de vento para todas as direções (90°, 270°, 0° e 180°) e determinou os coeficientes γ_z apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Coeficientes γ_z das lajes treliçadas e maciças

CASO	DIREÇÃO DO VENTO	LAJE MACIÇA		LAJE TRELIÇADA	
		γ_z	Classificação da estrutura	γ_z	Classificação da estrutura
1	90	1,08	Nós fixos	1,07	Nós fixos
2	270	1,08	Nós fixos	1,07	Nós fixos
3	0	1,1	Nós fixos	1,11	Nós móveis ^a
4	180	1,1	Nós fixos	1,11	Nós móveis ^a
^a $1,1 \leq \gamma_z \leq 1,30$ necessário majoração dos esforços horizontais em $0,95 \cdot \gamma_z$					

Fonte: Próprio autor.

Em todos os casos das lajes maciças, a estrutura ficou classificada como de nós fixos, pois os coeficientes não foram superiores a 1,1.

Para as lajes treliçadas, apenas os casos 1 e 2 apresentaram valores maiores que 1,1, entretanto como os coeficientes se encontravam entre 1,1 e 1,3, seria necessário majoração das ações horizontais de $0,95 \cdot \gamma_z$.

7.3. Esforços em vigas

No processamento final das estruturas, obteve-se os valores da taxa de aço total de cada viga nos pontos de maiores momentos fletores negativos e positivos. Por apresentar maior número de repetições, tal análise foi realizada apenas para o pavimento tipo. Na tabela 9, estão contidos os valores dos momentos, taxa de aço e variação percentual das tipologias.

Tabela 9 – Valores dos momentos fletores nas vigas e taxa de aço

VIGA	LAJE MACIÇA				LAJE TRELIÇADA				VARIAÇÃO DAS TIPOLOGIAS		
	Seção (cm)	Taxa de aço (Kgf/m³)	Momento fletor máximo positivo (tf.m)	Momento fletor máximo negativo (tf.m)	Seção (cm)	Taxa de aço (Kgf/m³)	Momento fletor máximo positivo (tf.m)	Momento fletor máximo negativo (tf.m)	Variação taxa de aço	Variação momento fletor positivo	Variação momento fletor negativo
V201	15X50	59,40	1,88	3,05	15X50	48,10	1,19	2,90	-19,02%	-36,70%	-4,90%
V202	15X50	59,60	1,87	3,07	15X50	47,90	1,15	2,88	-19,63%	-38,50%	-6,20%
V203	15X30	99,00	0,95	1,09	15X30	88,30	0,64	1,06	-10,81%	-32,60%	-2,80%
V204	15X30	94,50	0,70	2,00	15X30	94,50	0,89	2,09	0,00%	27,10%	4,50%
V205	15X30	94,10	0,68	1,90	15X30	99,50	0,85	1,98	5,74%	25,00%	4,20%
V206	15X30	129,80	0,76	2,23	15X30	76,80	1,30	1,30	-40,83%	71,10%	-41,70%
V207	15X30	108,40	0,77	2,13	15X30	71,10	1,36	1,35	-34,41%	76,60%	-36,60%
V208	15X30	98,90	0,39	0,85	15X30	87,20	0,47	0,94	-11,83%	20,50%	10,60%
V209	20X60	99,00	5,88	3,43	20X60	65,90	8,65	3,95	-33,43%	47,10%	15,20%
V210	20X60	99,30	5,68	3,38	20X60	65,90	8,74	3,59	-33,64%	53,90%	6,20%
V211	15X30	100,00	0,36	0,79	15X30	88,30	0,48	0,88	-11,70%	33,30%	11,40%
V212	15X30	129,80	0,79	2,25	15X30	76,80	0,46	1,30	-40,83%	-41,80%	-42,20%
V213	15X30	129,80	0,77	2,17	15X30	71,10	0,47	1,35	-45,22%	-39,00%	-37,80%
V214	15X30	115,20	1,16	1,14	15X30	148,30	0,99	1,26	28,73%	-14,70%	10,50%
V215	15X30	87,50	0,76	2,10	15X30	97,00	1,29	2,37	10,86%	69,70%	12,90%
V216	15X30	87,50	0,72	2,00	15X30	96,40	1,27	2,34	10,17%	76,40%	17,00%
V217	15X50	60,50	1,82	3,58	15X50	49,20	1,40	3,48	-18,68%	-23,10%	-2,80%
V218	15X50	60,50	1,82	3,55	15X50	49,00	1,36	3,67	-19,01%	-25,30%	3,40%
V219	20X50	44,60	3,22	1,66	20X50	46,50	3,29	2,49	4,26%	2,20%	50,00%
V220	20X50	44,70	3,14	1,65	20X50	46,50	3,40	2,57	4,03%	8,30%	55,80%
V221	20X50	70,30	4,25	6,47	20X50	86,10	3,83	7,19	22,48%	-9,90%	11,10%
V222	15X30	103,40	0,57	1,30	15X30	86,90	0,84	1,24	-15,96%	47,40%	-4,60%
V223	20X50	76,20	4,26	6,83	20X50	86,10	4,02	7,10	12,99%	-5,60%	4,00%
V224	15X30	112,60	0,85	2,10	15X30	84,30	0,66	1,71	-25,13%	-22,40%	-18,60%
V225	15X30	128,60	0,81	2,18	15X30	118,20	0,61	1,82	-8,09%	-24,70%	-16,50%
V226	15X30	87,70	0,01	1,24	15X30	87,70	0,01	1,31	0,00%	0,00%	5,60%
V227	15X30	138,60	0,03	1,95	15X30	129,90	0,01	2,02	-6,28%	-66,70%	3,60%
V228	20X70	223,20	1,12	2,92	20X70	303,30	1,72	3,26	35,89%	53,60%	11,60%
V229	15X30	105,90	0,25	1,81	15X30	108,70	0,78	1,44	2,64%	212,00%	-20,40%
V230	20X40	52,80	2,58	1,89	20X40	50,60	1,28	1,60	-4,17%	-50,40%	-15,30%
V231	15X30	72,30	1,23	1,17	15X30	97,00	0,59	0,88	34,16%	-52,00%	-24,80%
V232	15X30	87,70	0,01	1,30	15X30	91,00	0,01	1,43	3,76%	0,00%	10,00%
V233	15X30	138,60	0,02	1,94	15X30	129,90	1,62	0,01	-6,28%	8000,00%	-99,50%
V234	20X70	135,90	0,25	1,65	20X70	299,20	1,79	3,25	120,16%	616,00%	97,00%
V235	15X30	219,40	0,93	2,94	15X30	108,70	0,14	1,33	-50,46%	-84,90%	-54,80%
V236	15X30	112,60	0,85	2,14	15X30	114,60	0,66	1,68	1,78%	-22,40%	-21,50%
V237	15X30	128,60	0,81	2,21	15X30	118,20	0,62	1,83	-8,09%	-23,50%	-17,20%
V238	20X50	70,60	4,23	6,33	20X50	86,10	3,81	7,20	21,95%	-9,90%	13,70%
V239	15X30	103,40	0,57	1,28	15X30	86,90	0,85	1,26	-15,96%	49,10%	-1,60%
V240	20X50	73,20	4,29	6,36	20X50	86,10	3,98	7,15	17,62%	-7,20%	12,40%
V241	20X50	46,50	3,17	1,74	20X50	46,50	3,29	2,45	0,00%	3,80%	40,80%
V242	20X50	46,50	3,13	1,75	20X50	46,50	3,40	2,45	2,61%	0,00%	8,60%

Fonte: Próprio autor

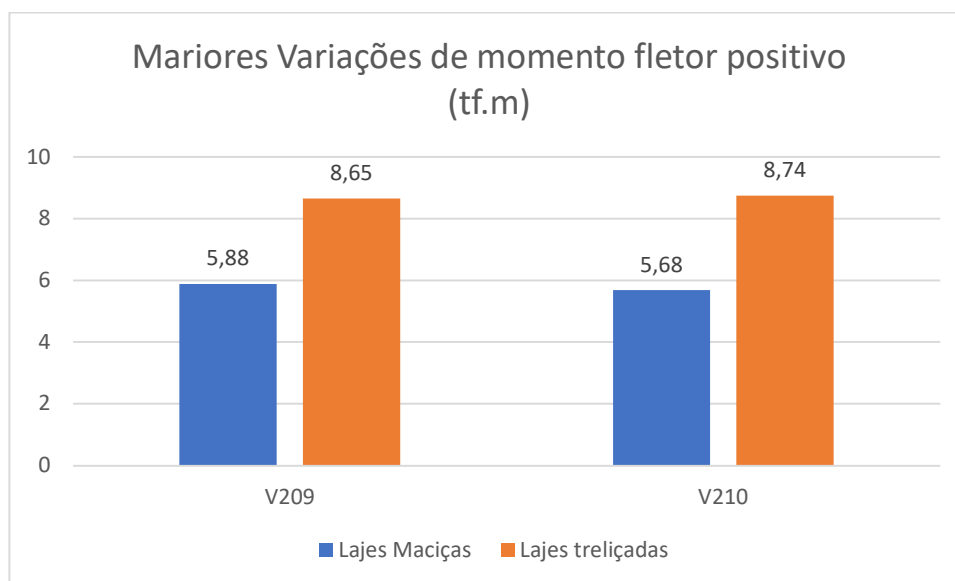
A partir dos dados obtidos pelo dimensionamento da estrutura e apresentados na tabela 9, foram selecionadas as vigas que apresentaram as maiores variações de momentos fletores para análise.

7.3.1. Momentos fletores positivos das vigas

A partir dos dados obtidos pelo dimensionamento da estrutura e análise da tabela 9, foram selecionadas as vigas com maiores variações de momentos fletores positivos e negativos.

Na figura 29 estão apresentados os valores dos momentos fletores positivos das vigas do pavimento tipo que tiveram maiores variações de momentos fletores totais.

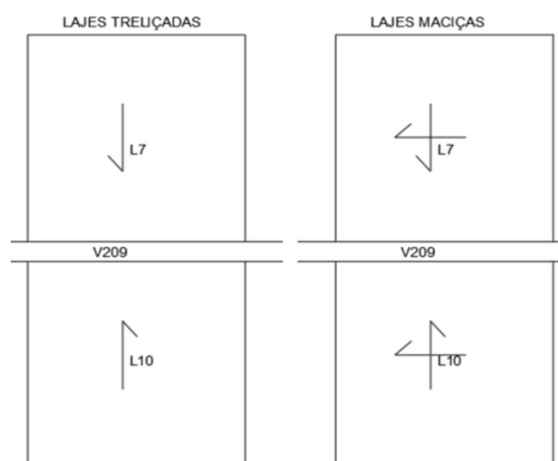
Figura 31 – Gráfico das vigas de maiores variações de momento fletor positivo



Fonte: Próprio autor.

V209 – Foi observado um aumento de 47% no momento fletor, o qual pode ser justificado pela mudança na distribuição de esforços nas lajes L7 e L10. No caso das lajes treliçadas, ambas são consideradas bidirecionais, porém esse conceito não é aplicado da mesma forma no regime da laje treliçada, onde os trilhos estão dispostos na direção principal. A figura 32 representa essa mudança de comportamento dos esforços.

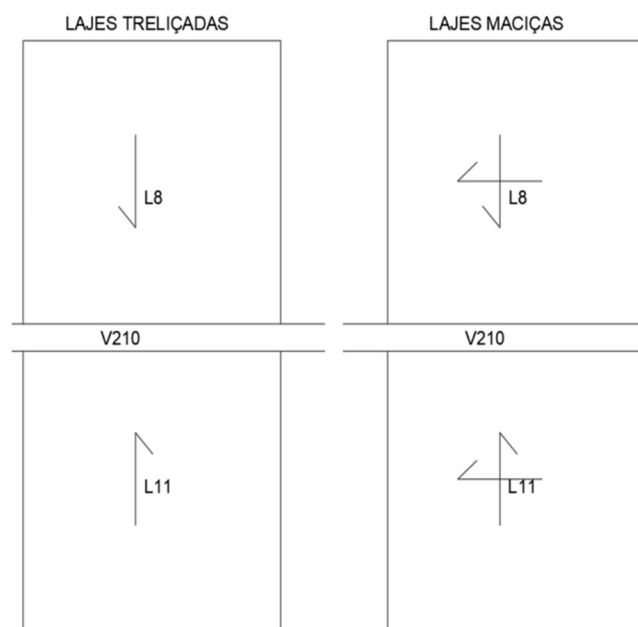
Figura 32 – Comparativo da distribuição de esforços V209



Fonte: Próprio autor

V210 – Aumento no momento fletor 54%, fenômeno semelhante que ocorre na V209. A figura 31 representa o esquema de distribuição de esforços das lajes.

Figura 33 – Comparativo da distribuição de esforços V210

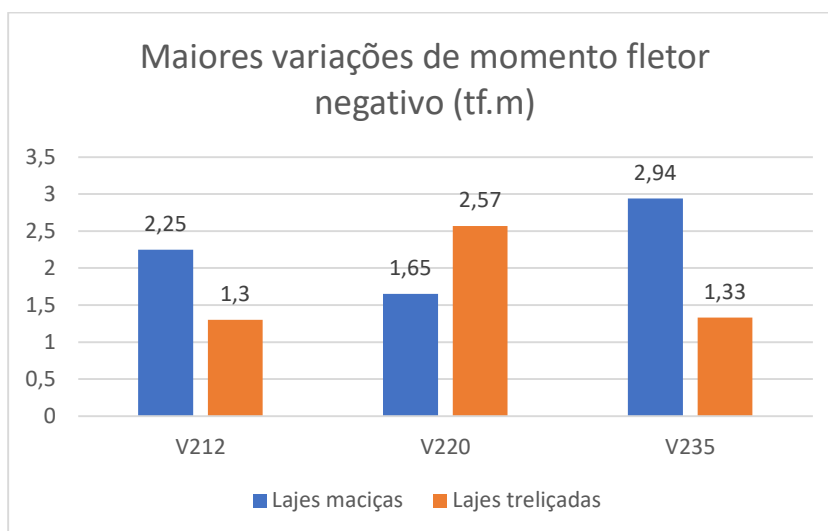


Fonte: Próprio autor

7.3.2. Momentos fletores negativos das vigas

A partir dos dados apresentados na tabela 9, foi considerado para análise as maiores variações de momentos fletores negativos em valores absolutos das vigas pavimento tipo, ilustrados na figura 34.

Figura 34 – Gráfico das vigas de maiores variações de momento fletor negativo



Fonte: Próprio autor

V212 – Apresentou redução 0,95 tf.m e em valores percentuais 42,2%, a mudança da tipologia, como representado na figura 35, a laje L12, passou a distribuir seus esforços na direção paralela a viga V212, justificando a redução dos esforços.

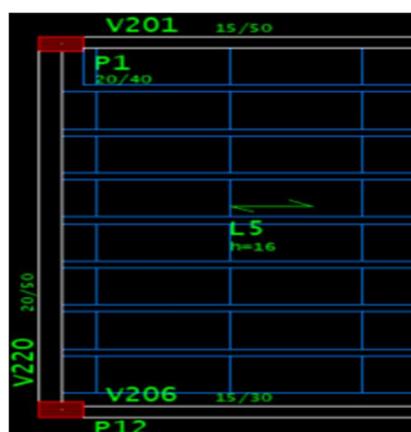
Figura 35 – V212 e L12



Fonte: Próprio autor

V220 – Apresentou um aumento de 0,92 tf.m, o que corresponde a um aumento de 55,8% em relação à laje maciça. É importante ressaltar que os trilhos da laje L5 estão dispostos de forma paralela à direção da viga, o que contribui para o aumento dos esforços. Isso ocorre porque as lajes treliçadas unidirecionais distribuem suas cargas na direção de menor vão. Essa disposição é ilustrada na figura 36.

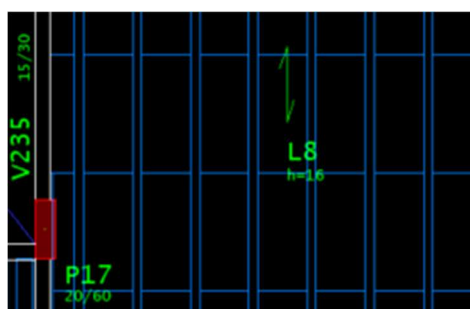
Figura 36 – V220 e L5



Fonte: Próprio autor

V235 – A viga apresentou uma variação significativa no momento fletor negativo, com uma redução de 1,61 tf.m, o que corresponde a uma diminuição de 54,8% do esforço quando comparado à tipologia de laje maciça. Essa redução pode ser justificada pela mudança no comportamento da distribuição de esforços da laje, uma vez que ela passa a transmitir seus carregamentos na direção paralela à viga em questão, exemplificado na figura 37.

Figura 37 – V35 e L8

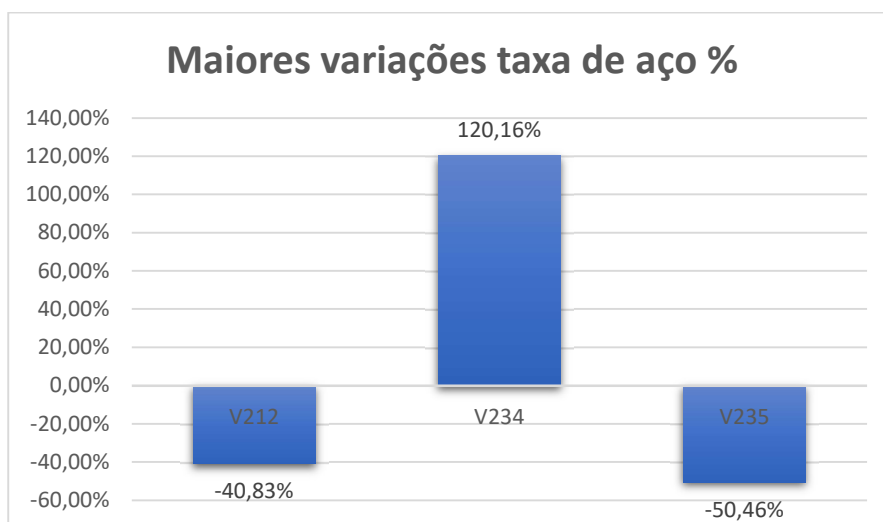


Fonte: Próprio autor

7.3.3 Taxa de aço das vigas

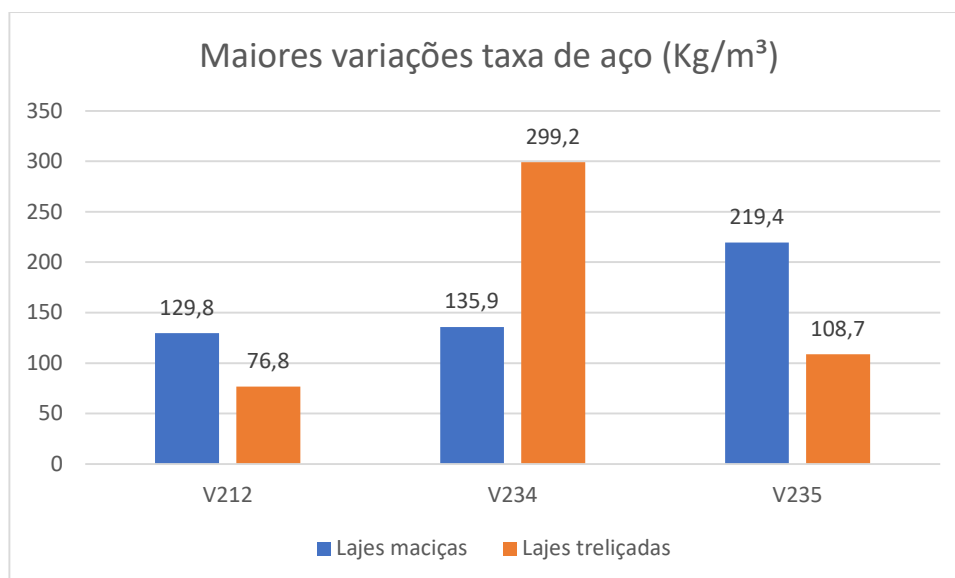
A taxa de aço é a relação entre o volume de concreto do elemento e quantidade aço em quilogramas. Com base nos dados da tabela 9 foram identificadas as maiores variações, representadas nas figuras 38 e 39.

Figura 38 – Variações percentuais das taxas de aço nas vigas V212, V234 e v235



Fonte: Próprio autor

Figura 39 – Variações dos valores das taxas de aço nas vigas V212, V234 e v235



Fonte: Próprio autor

V212 – Apresentou redução de 41,77% no momento fletor máximo positivo e 42,22% no máximo negativo, corroborando para redução da taxa de aço, visto que o aço papel fundamental no concreto armado quando a peça está submetida a esforços e flexão.

V234 – Aumento de 86,46% e 96,76%, em seus momentos fletores máximos positivos e negativos respectivamente. A alta 120,16% na taxa de aço é justificada pelo aumento os esforços de flexão na viga. Em valores absolutos a V324 apresenta a segunda maior taxa de aço do pavimento 299,2 Kg/m³, pois apresenta pequeno comprimento linear, possuindo então menor volume de concreto e área de aço elevado por consequência na alta dos esforços.

V235 – Obteve redução de 84,95% e 54,76%, dos momentos positivos e negativos respectivamente.

7.4. Esforços nos pilares

Com base nos resultados gerados após os processamentos da estrutura, foi possível fazer análise dos efeitos de cada sistema estrutural sobre os pilares, levando em considerações os esforços normais, momentos M_x e M_y e taxa de aço. Por meio dos dados apresentados na tabela 10, foi possível analisar os pilares que sofreram maiores variações percentuais dos esforços de momentos fletores e cargas axiais.

Tabela 10 – Esforços e carregamentos dos pilares

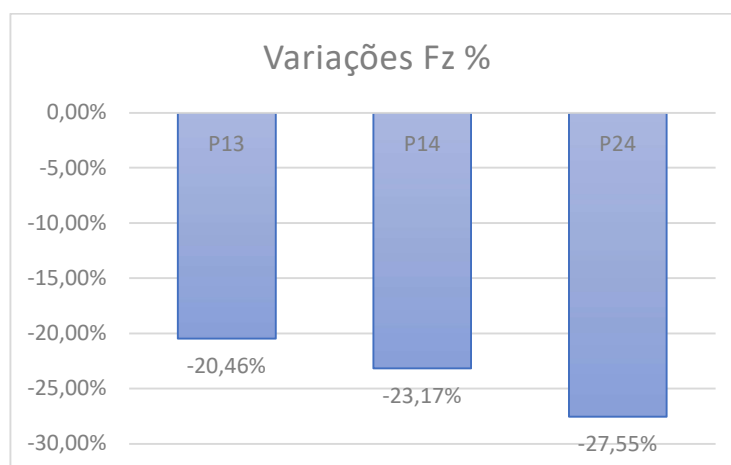
5	LAJE MACIÇA					LAJE TRELIÇADA					VARIAÇÕES %			
	Seção (cm)	Taxa de aço (Kg/m ³)	Fz (tf)	Mx (tf.m)	My (tf.m)	Seção (cm)	Taxa de aço (Kg/m ³)	Fz (tf)	Mx (tf.m)	My (tf.m)	Taxa de aço	Variação Fz	Variação Mx	My
P1	20X40	78,20	49,03	0,16	0,21	20X40	78,20	43,63	0,05	0,28	0,00	-0,11	-0,69	0,33
P2	20X40	78,20	44,17	0,04	2,59	20X40	78,20	42,58	0,05	2,48	0,00	-0,04	0,25	-0,04
P3	20X40	78,20	54,08	-0,24	0,01	20X40	78,20	48,40	-0,14	-0,05	0,00	-0,11	-0,42	-6,00
P4	20X40	78,20	43,09	0,02	-0,13	20X40	78,20	41,48	-0,02	-0,16	0,00	-0,04	-2,00	0,23
P5	20X40	78,20	48,17	0,18	-0,20	20X40	78,20	43,55	0,05	-0,37	0,00	-0,10	-0,72	0,85
P6	20X50	65,20	80,45	0,27	0,04	20X50	65,20	72,00	0,07	0,00	0,00	-0,11	-0,74	-1,00
P7	20X50	68,10	82,22	0,25	-0,03	20X50	65,20	71,84	0,06	-0,03	-0,04	-0,13	-0,76	0,00
P8	20X70	63,70	80,67	0,24	2,56	20X70	63,70	72,11	0,40	2,54	0,00	-0,11	0,67	-0,01
P9	20X50	64,90	52,04	0,43	0,09	20X50	64,90	55,89	0,33	0,06	0,00	0,07	-0,23	-0,33
P10	20X50	64,90	54,27	-2,23	-0,03	20X50	64,90	54,97	-2,20	-0,05	0,00	0,01	-0,01	0,67
P11	20X70	63,70	77,53	1,42	-0,12	20X70	63,70	69,82	1,53	-0,15	0,00	-0,10	0,08	0,25
P12	20X40	78,20	45,71	0,15	0,08	20X40	78,20	42,85	-0,05	0,16	0,00	-0,06	-1,33	1,00
P13	20X70	63,70	80,25	0,02	1,53	20X70	63,70	63,83	0,15	1,24	0,00	-0,20	6,50	-0,19
P14	20X70	63,70	82,59	0,05	-1,43	20X70	63,70	63,45	0,14	-1,61	0,00	-0,23	1,80	0,13
P15	20X40	78,20	44,56	-0,17	-0,09	20X40	78,20	42,18	-0,06	-0,25	0,00	-0,05	-0,65	1,78
P16	20X60	56,30	68,43	0,07	0,32	20X60	56,30	60,92	0,31	0,11	0,00	-0,11	3,43	-0,66
P17	20X60	56,30	68,94	0,08	-0,30	20X60	56,30	66,45	0,11	0,08	0,00	-0,04	0,38	-1,27
P18	20X50	65,20	69,12	0,24	0,15	20X50	65,20	70,75	0,21	0,19	0,00	0,02	-0,13	0,27
P19	20X50	65,20	68,07	0,24	-0,16	20X50	65,20	69,45	0,20	-0,22	0,00	0,02	-0,17	0,38
P20	20X50	64,00	57,54	-0,26	0,10	20X50	64,90	50,67	-0,27	-0,05	0,01	-0,12	0,04	-1,50
P21	20X50	64,90	58,00	-0,26	-0,08	20X50	64,90	52,18	-0,27	0,02	0,00	-0,10	0,04	-1,25
P22	20X40	78,20	46,58	0,30	0,47	20X40	78,20	41,58	0,23	0,55	0,00	-0,11	-0,23	0,17
P23	20X70	63,70	81,60	-0,02	-1,87	20X70	63,70	61,88	-0,11	-2,09	0,00	-0,24	4,50	0,12
P24	20X70	63,70	82,35	-0,02	0,62	20X70	63,70	59,66	-0,08	0,39	0,00	-0,28	3,00	-0,37
P25	20X40	78,20	44,35	0,19	-0,09	20X40	78,20	40,78	0,09	-0,24	0,00	-0,08	-0,53	1,67
P26	20X60	56,30	62,41	1,47	-0,05	20X60	56,30	53,99	1,50	-0,14	0,00	-0,13	0,02	1,80
P27	20X60	56,30	64,76	1,45	-0,06	20X60	56,30	54,58	1,58	-0,01	0,00	-0,16	0,09	-0,83
P28	20X70	63,70	84,42	-0,68	0,24	20X70	63,70	74,26	-0,57	0,21	0,00	-0,12	-0,16	-0,13
P29	20X70	63,70	82,69	-0,65	-0,16	20X70	63,70	74,66	-0,60	-0,16	0,00	-0,10	-0,08	0,00
P30	20X40	78,20	50,58	-0,27	0,87	20X40	78,20	47,14	-0,17	0,92	0,00	-0,07	-0,37	0,06
P31	20X50	65,20	81,79	0,13	-0,10	20X50	65,20	78,05	0,37	-0,14	0,00	-0,05	1,85	0,40
P32	20X40	78,20	42,80	-0,05	0,30	20X40	78,20	44,17	-0,05	0,20	0,00	0,03	0,00	-0,33
P33	20X50	65,20	61,74	0,32	-0,02	20X50	65,20	59,33	0,25	-0,13	0,00	-0,04	-0,22	5,50
P34	20X40	78,20	42,76	-0,05	-0,13	20X40	78,20	44,35	-0,04	-0,15	0,00	0,04	-0,20	0,15
P35	20X50	68,10	82,25	-0,09	-0,04	20X50	65,20	76,34	0,05	-0,04	-0,04	-0,07	-1,56	0,00
P36	20X40	78,20	48,37	-0,16	-0,21	20X40	78,20	45,68	-0,05	-0,33	0,00	-0,06	-0,69	0,57

Fonte: Próprio autor.

7.4.1. Carga axiais nos pilares (Fz)

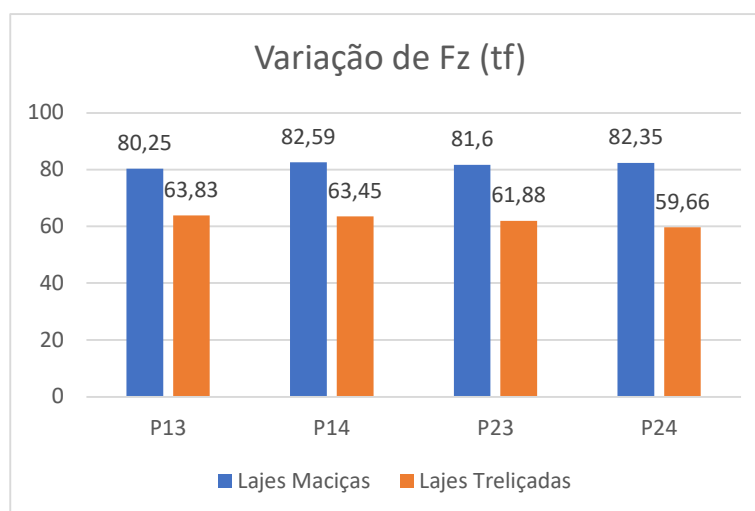
A partir dos dados contidos na tabela 10, foi possível identificar os pilares que apresentaram as maiores variações em relação às cargas axiais às quais estavam submetidos. Essas informações estão representadas nas figuras 40 e 41.

Figura 40 – Variações percentuais das cargas axiais nos pilares



Fonte: Próprio autor.

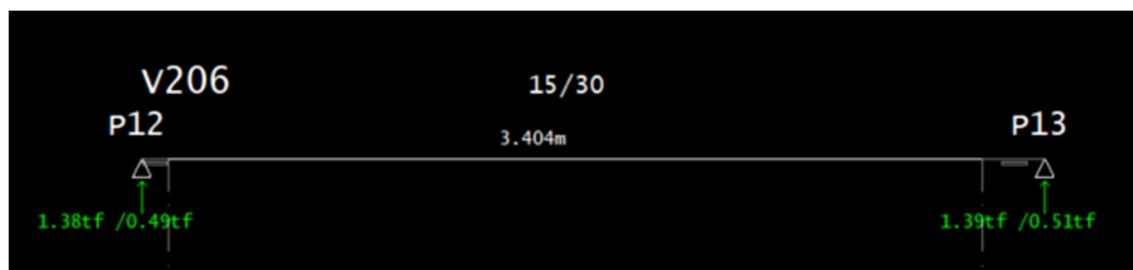
Figura 41 – Maiores variações das cargas axiais



Fonte: Próprio autor.

P13 – Foi observada uma redução de 20,46% no carregamento, que pode ser atribuída à adoção do sistema de lajes trelaçadas, resultando em reduções nos apoios das vigas no P13. Essa informação é ilustrada nas figuras 42, 43, 44 e 45.

Figura 42 – Reações da viga V206 no pilar P13 (laje treliçada)



Fonte: Próprio autor.

Figura 43 - Reações da viga V206 no pilar P13 (laje maciça)



Fonte: Próprio autor.

Figura 44 - Reações da viga V223 no pilar P13 (laje treliçada)



Fonte: Próprio autor.

Figura 45 - Reações da viga V223 no pilar P13 (laje maciça)



Fonte: Próprio autor.

P14 – O pilar em apresenta simetria a posição do P13, tendo o mesmo arranjo de vigas e lajes em sua área de influência, nas figuras 46 e 47 apresenta redução dos carregamentos no mesmo, devido a mudança do sistema de lajes.

Figura 46 – Reações da viga V207 no pilar P14 (laje treliçada)

Fonte: Próprio autor.

Figura 47 – Reações da viga V207 no pilar P14 (laje maciça)

Fonte: Próprio autor.

P24 – Redução de 27,55%, maior redução apresentada por um pilar na estrutura, também justifica pela redução das reações no apoio ao se adotar o uso de laje treliçada, mostrado nas figuras 48 e 49.

Figura 48 – Reações V212 no P24 laje treliçada

Fonte: Próprio autor.

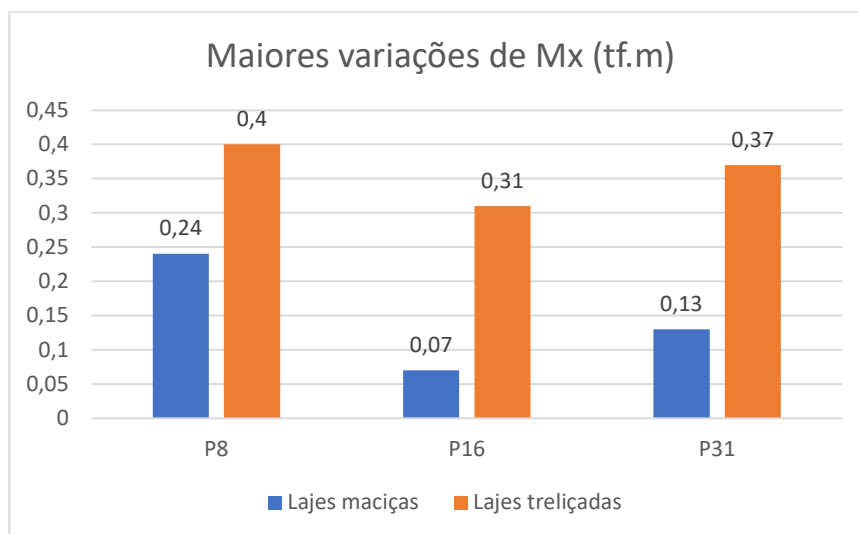
Figura 49 – Reações V212 no P24 laje treliçada maciça

Fonte: Próprio autor.

7.4.2. Momentos fletores nos pilares direção X.

Com base nos dados da Tabela 10, foram identificadas as maiores variações de momentos fletores na direção "X", conforme ilustrado na Figura 50.

Figura 50 - Maiores variações dos momentos fletores dos pilares na direção x (P8, P16 e P31)



Fonte: Próprio autor.

P08 – Registrou aumento de 0,16 tf.m, por consequência da mudança da distribuição dos esforços das lajes, a V204 no tramo a direita do P8 teve elevação dos momentos fletores por influência dos carregamentos das lajes L2 e L7, aumentando a necessidade de apoio da V204.

P16 – Registrou aumento de 0,24 tf.m, por conta do ganho de 4,89 tf.m do momento negativo da V228, solicitando necessidade maior de engastamento e corroborando para o aumento do momento no pilar.

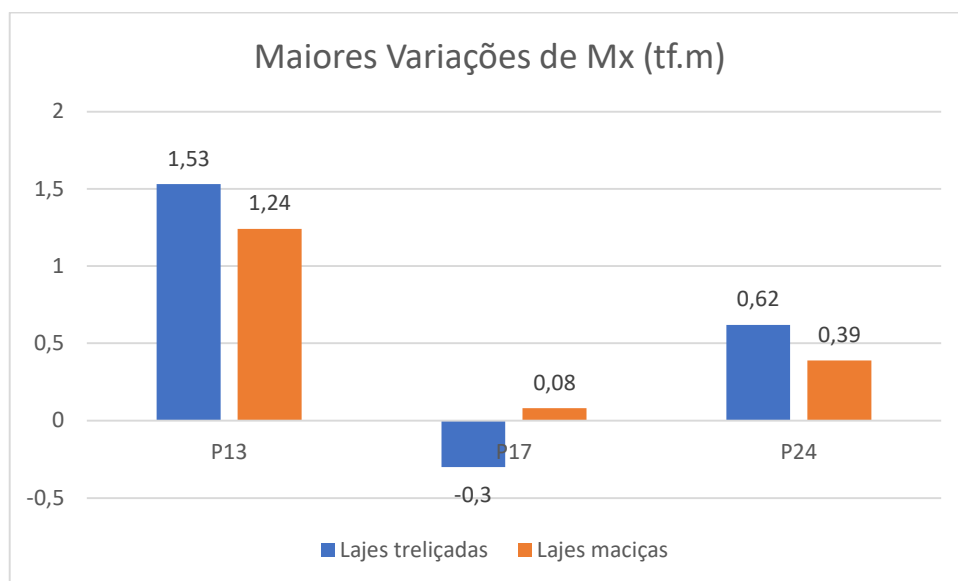
P31 – Aumento de 0,24 tf.m, levado pela elevação do momento negativo das vigas V217 e V221, na região do P31, ambas têm seus apoios no pilar em questão, respaldando a elevação o momento no elemento.

Embora os pilares em questão tenham obtido maiores aumentos de momento fletor, não impactou na taxa de aço, logo que as mesmas não se alteraram com a mudança de tipologia de laje.

7.3.3. Momentos fletores nos pilares direção Y.

As maiores variações de momentos fletores na direção "Y" foram extraídas a partir da tabela 12 e estão ilustradas na figura 51.

Figura 51 - Maiores variações dos momentos fletores na direção Y dos pilares (P13, P17 e P24) (tf.m)



Fonte: Próprio autor.

P13 – Redução de 0,29 tf.m, a viga V222 obteve diminuição de 0,29 tf.m de momento fletor negativo, na região do pilar em questão e a viga V223 redução no seu momento fletor positivo de 0,55 tf.m, ambas estão paralelas a direção Y do pilar.

P17 – Aumento de 0,38 tf.m, a viga 234 que possui um de seus apoios o pilar 17, registrou elevação de 5,83 tf.m do seu momento negativo na região do apoio, tal aumento é justificado pelo fato da viga ser apoio da 210, que teve seu carregamento aumentado em virtude da mudança do sistema estrutural, corroborando então para o aumento do esforço no pilar.

P24 – Redução do esforço em 0,23 tf.m, por consequência da mudança de sistema estrutural, a viga V213 passou a ser menos solicitada, pois encontra-se paralela a direção dos trilhos da laje L13, então teve redução nos seus momentos negativos e positivos de 0,82 tf.m e 0,25 tf.m respectivamente.

8 CONCLUSÃO

O presente trabalho é o estudo de um edifício de múltiplos pavimentos, com dois sistemas construtivos de lajes diferentes, laje maciça e treliçada unidirecional.

As lajes maciças apresentaram melhor desempenho inicial em relação os deslocamentos verticais, quando verificados no ELS (estado limite de serviço), pois não apresentou deformações superior ao permitido por norma e não foi necessário o aumento de suas alturas.

Entretanto, no sistema de lajes treliçadas, as L5, L6, L7, L8, L10, L11, L12, L13, L14 e L5 apresentaram deformações maiores que permitido em norma, sendo fundamental o aumento de altura das lajes, aumentando gradativamente a altura até chegar em um valor que atendesse os requisitos da ABNT NBR 6118:2014.

Contudo, a estrutura apresentou redução de 9,39% nos carregamentos totais dos pilares nas fundações de quando comparado ao sistema de lajes maciças, tal diminuição é consequência da redução do peso próprio do edifício com o uso de laje treliçada.

Além disso, as taxas de aços das vigas do pavimento tipo e pilares apresentaram redução de 4,11% e 0,20% em valores máximos, respectivamente.

As ações horizontais também foram analisadas em ambos os modelos, ao qual o sistema estrutural que apresentou melhor desempenho foi de lajes maciças, em todas as direções atuantes do vento o coeficiente γ_z ficou menor ou igual a 1,1, análise de segunda ordem global. O sistema de lajes treliçadas apresentou na incidência do vento nos ângulos de 0° e 180° , γ_z de 1,11, sendo então necessária majoração dos esforços horizontais.

Por esta ótica, considera-se que ambas as tipologias de laje tiveram resultados similares quanto à estabilidade global.

Também vale salientar que na mudança para treliçadas, resultou em uma redistribuição das reações das lajes nas vigas, as lajes treliçadas sobrecarregam as vigas que estão ortogonais a sua direção principal e alivia as tensões nas vigas paralelas a direção dos trilhos.

Diante o exposto, conclui-se que o sistema de lajes treliçadas apresentou maiores deformações iniciais, entretanto o problema foi solucionado com o ganho de inércia, conseguindo então atender os critérios estabelecidos por normas. Em relação aos esforços, redução quando comparado os momentos fletores negativos e positivos das vigas e diminuição nos esforços nas direções “x” e “y” dos pilares. Também, ocorreu reduções nos reduções nas cargas axiais dos pilares.

9 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação**. 2007. NBR 7480. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 3: Armadura de treliças eletrossoldadas para lajes pré-fabricadas – Requisitos**. 2017. NBR 14859-3. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas para o cálculo de estruturas e edificações**. 2019. NBR 6120. Rio de Janeiro.

ARCELORMITTAL. **Manual técnico de lajes treliçadas**. ArcelorMittal, 2010. Disponível em: <<http://rangellage.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Manual-Lajes-Treli%C3%A7adas.pdf>>. Acesso em: 23 de março de 2021.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do concreto armado**. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2021a.

BASTOS, P. S. **Lajes de concreto armado**. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2021b.

BASTOS, P. S. **Vigas de concreto armado**. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2021c.

BASTOS, P. S. **Flexão compostas e pilares de concreto armado**. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2021d.

CAMPOS FILHO, A.C. **Projeto de lajes maciças de concreto armado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

CARVALHO, Roberto. FIGUEIREDO FILHO, Jasson. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4.ed. São Carlos: Ufscar, 2014. 415p.

DROPPA JUNIOR, Alonso. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

GIONGO, José. **Concreto Armado: Projeto estrutural de edifícios**. Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007. Disponível em: < <http://repositorio.eesc.usp.br/items/7fab05e-70e5-4922-bde6-aa04daba3fe0> >. Acesso em: 25 de março de 2021.

GUTFREIND, Henrique. AURICH, Mauren. **Propriedades e característica dos materiais de concreto e aço**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do sul Faculdade de Engenharia. Porto Alegre, 2014.

MOHAMAD G, BRONDANI R.P, ISAIA G.C. **Sustentabilidade em projeto de estrutura em concreto armado**. Revista Ibracon - Concreto e Construções, 2015.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

KRISTINER, Isabel. **Análise comparativa com enfoque na estabilidade global de edifícios de múltiplos pavimentos utilizando o modelo IV e modelo VI do software CAD/TQS.** Universidade do vale do Taquari. Lajeado, 2019.

SCHELEIDER, Avner. SILVA, Mayara. **Análise comparativa do comportamento estrutural e desempenho construtivo de lajes lisas maciças em concreto armado *versus* concreto protendido – estudo de caso aplicado em TQS.** Universidade Tecnológica do Paraná. Curitiba, 2017.

WORDELL, Fernando. **Avaliação da instabilidade global de edifícios altos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

10 APÊNDICE

Prancha 01: Planta baixa e leiaute do apartamento tipo

Prancha 02: Cortes AA e BB

Prancha 03: Planta de formas do pavimento tipo