



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VIVIAN CHAVES FREIRE

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS ESTRUTURAIS EM LAJES LISAS
PARA PAVIMENTOS DE EDIFICAÇÕES**

RUSSAS

2023

VIVIAN CHAVES FREIRE

ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS ESTRUTURAIS EM LAJES LISAS PARA
PAVIMENTOS DE EDIFICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Campus de Russas da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. DSc. Jerfson Moura Lima.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F935a Freire, Vivian Chaves.
Análise comparativa de sistemas estruturais em lajes lisas para pavimentos de edificações / Vivian Chaves Freire. – 2023.
84 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Jerfson Moura Lima.
1. lajes lisas maciças. 2. laje lisas nervuradas. 3. pavimentos de edificações. 4. sistemas estruturais. 5. TQS. I. Título.

CDD 620

VIVIAN CHAVES FREIRE

ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS ESTRUTURAIS EM LAJES LISAS PARA
PAVIMENTOS DE EDIFICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Campus de Russas da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 30/11/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jerfson Moura Lima (ORIENTADOR)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. MSc. Éder Leonardo do Rego Nascimento
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologias do Ceará (IFCE)

Prof. MSc. Mateus do Nascimento Lira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus familiares, sobretudo aos meus alicerces: Maria Aurenilde Freire Chaves (mãe), Francisco Sérgio Alves Freire (pai) e aos meus afetuosos avós.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela dádiva da vida, e por me permitir a realização deste sonho.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais e avós, pelo constante incentivo em momentos difíceis, pela confiança em meu potencial acadêmico e pela compreensão nas ocasiões em que precisei me ausentar para cumprir as exigências do curso.

Ao meu parceiro Antonino Ascino da Silva, pelo apoio e compreensão como educanda, além do suporte emocional que contribuíram significativamente para meu desempenho e permanência na universidade.

Aos amigos, Maria Aurilene Rocha, Laís Alves Diógenes e Éric Henrique de Lima, que estiveram ao meu lado durante a graduação, enfrentando desafios e me motivando. Agradeço pelos conselhos, ensinamentos e palavras de incentivo compartilhadas.

Aos professores e, em especial a Jerfson Moura Lima, cuja orientação foi fundamental para a realização deste estudo, bem como ao corpo docente da Universidade Federal do Ceará (UFC), que contribuíram para a minha formação acadêmica. A todos, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Os sistemas estruturais são compostos por elementos estruturais dentre os quais se destacam os pilares, vigas e lajes. Além dos sistemas convencionais, existem os sistemas estruturais em lajes lisas, incluindo as lajes lisas maciças e nervuradas sem e com viga-faixa. No projeto de laje de concreto armado, é essencial utilizar sistemas construtivos que atendam às especificidades exigidas, garantindo qualidade, funcionalidade e economia da estrutura. Nesse contexto, é fundamental que os projetistas conheçam as características e diferenças entre os sistemas construtivos. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é realizar uma análise comparativa entre os sistemas estruturais em lajes lisas maciças (Sistema A), lajes lisas nervuradas sem viga-faixa (Sistema B) e com viga-faixa (Sistema C) para pavimentos de edificações. Para isto, foi utilizado o software TQS Versão V24 para dimensionar uma estrutura padrão para cada sistema e coletar dados como esforços, consumo de materiais e deslocamentos. Além disso, foi realizado um estudo paramétrico, variando os vãos da estrutura padrão para cada modelo estrutural, analisando os mesmo parâmetros citados anteriormente. Observou-se que, para a estrutura padrão, cada sistema estrutural apresentou particularidades: o sistema B teve melhor desempenho em relação ao consumo de materiais, o sistema C mostrou-se mais rígido e o sistema A teve melhor desempenho em relação ao momento fletor máximo positivo. No estudo paramétrico, à medida que os vãos foram ampliados, o sistema A tornou-se desvantajoso para os parâmetros analisados, enquanto os sistemas B e C apresentaram melhor desempenho. No entanto, o sistema B chegou a maiores vãos. Por fim, concluiu-se que para vãos menores, o sistema A se mostra como a melhor opção, enquanto para vãos maiores, o sistema B é o mais adequado.

Palavras-chave: lajes lisas maciças; laje lisas nervuradas; pavimentos de edificações; sistemas estruturais; TQS.

ABSTRACT

Structural systems are composed of structural elements, including columns, beams, and slabs. In addition to conventional systems, there are structural systems in flat slabs, including solid and ribbed slabs without and with drop panels. In the design of reinforced concrete slabs, it is essential to use construction systems that meet the specific requirements, ensuring quality, functionality, and economy of the structure. In this context, it is crucial for designers to understand the characteristics and differences between construction systems. Therefore, the objective of this study is to perform a comparative analysis of structural systems in solid flat slabs (System A), ribbed flat slabs without drop panels (System B), and with drop panels (System C) for building floors. For this purpose, the TQS Version V24 software was used to design a standard structure for each system and collect data such as forces, material consumption, and displacements. Additionally, a parametric study was conducted, varying the spans of the standard structure for each structural model, analyzing the same parameters mentioned earlier. It was observed that, for the standard structure, each structural system presented particularities: System B performed better in terms of material consumption, System C showed greater rigidity, and System A had better performance in relation to the maximum positive bending moment. In the parametric study, as the spans were increased, System A became disadvantageous for the parameters analyzed, while Systems B and C showed better performance. However, System B supported larger spans. Finally, it was concluded that for smaller spans, System A is the best option, while for larger spans, System B is the most suitable.

Keywords: solid flat slabs; ribbed flat slabs; building floors; structural systems; TQS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema estrutural convencional	15
Figura 2 – Sistema estrutural em laje lisa maciça	16
Figura 3 – Sistema estrutural em laje lisa nervurada sem viga-faixa	17
Figura 4 – Sistema estrutural em laje lisa nervurada com viga-faixa	17
Figura 5 – Ponte da amizade	21
Figura 6 – Edifício Copan	21
Figura 7 – Carregamentos atuantes nas lajes	23
Figura 8 – Laje nervurada com vigas	24
Figura 9 – Laje maciça com vigas	24
Figura 10 – Laje lisa maciça	24
Figura 11 – Laje lisa nervurada	25
Figura 12 – Laje pré-fabricada do tipo painel	25
Figura 13 – Laje nervurada com vigotas pré-fabricadas	25
Figura 14 – A- Laje cogumelo e B- laje lisa	26
Figura 15 – Representação de Laje lisa maciça	27
Figura 16 – Laje lisa nervurada com viga-faixa e laje lisa nervurada com engrossamento da região dos apoios	28
Figura 17 – Faixas das lajes para a distribuição dos esforços numa série de pórticos equivalentes	30
Figura 18 – Malha de Elementos Finitos	31
Figura 19 – Elemento finito SOLID65	32
Figura 20 – Largura colaborante em seções T	35
Figura 21 – Seção T com linha neutra na mesa	35
Figura 22 – Seção T com linha neutra na alma	36

Figura 23 – Colapso da estrutura por punção do Shopping Poty	39
Figura 24 – Representação de uma grelha	41
Figura 25 – Arquitetura padrão utilizada como referência externa	44
Figura 26 – Dimensões da cubeta	45
Figura 27 – Geometria das cubetas	46
Figura 28 – Fluxograma da metodologia	48
Figura 29 – Consumo de aço (kg) x sistemas estruturais	51
Figura 30 – Consumo de concreto (m ³) x sistemas estruturais	52
Figura 31 – Esforços cortantes (tf) devido ao peso próprio do sistema estrutural A, vão 4 m	53
Figura 32 – Esforços cortantes (tf) devido ao peso próprio do sistema estrutural B, vão 4 m	54
Figura 33 – Esforços cortantes (tf) do devido ao peso próprio sistema estrutural C, vão 4 m	54
Figura 34 – Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) devido ao peso próprio sistema estrutural A, vão 4 m	55
Figura 35 – Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) devido ao peso próprio sistema estrutural B, vão 4 m	55
Figura 36 – Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) devido ao peso próprio sistema estrutural C, vão 4 m	56
Figura 37 – Esforços cortantes (tf) no ELU sistema estrutural A, vão 4m	57
Figura 38 – Esforços cortantes (tf) no ELU sistema estrutural B, vão 4m	58
Figura 39 – Esforços cortantes (tf) no ELU sistema estrutural C, vão 4m	58
Figura 40 – Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELU sistema estrutural A, vão 4 m	59
Figura 41 – Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELU sistema estrutural B, vão 4 m	59

Figura 42 – Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELU sistema estrutural C, vão 4 m	60
Figura 43 – Esforços cortantes no ELS sistema estrutural A, vão 4m	61
Figura 44 – Esforços cortantes no ELS sistema estrutural B, vão 4 m	62
Figura 45 – Esforços cortantes no ELS sistema estrutural C, vão 4m	62
Figura 46 – Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELS sistema estrutural A, vão 4 m	63
Figura 47 – Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELS sistema estrutural B, vão 4 m	63
Figura 48 – Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELS sistema estrutural C, vão 4 m	64
Figura 49 – Deslocamentos no ELS sistema estrutural A, vão 4 m	65
Figura 50 – Deslocamentos no ELS sistema estrutural B, vão 4 m	65
Figura 51 – Deslocamentos no ELS sistema estrutural C, vão 4 m	66
Figura 52 – Deslocamento no ELS (cm) x sistemas estruturais	67
Figura 53 – Consumo de aço (kg) x sistemas Estruturais	69
Figura 54 – Consumo de concreto (m ³) x sistemas Estruturais	70
Figura 55 – Momento fletor máximo positivo (tfm) devido ao peso próprio x vão (m)	71
Figura 56 – Momento fletor máximo negativo devido ao peso próprio (tfm) x vão (m)	71
Figura 57 – Momento fletor máximo positivo no ELU (tfm) x vão (m)	72
Figura 58 – Momento fletor máximo negativo no ELU (tfm) x vão (m)	72
Figura 59 – Momento fletor máximo positivo no ELS (tfm) x vão (m)	73
Figura 60 – Momento fletor máximo negativo no ELS (tfm) x vão (m)	73
Figura 61 – Esforço cortante máximo devido ao peso próprio (tf) x vão (m)	74
Figura 62 – Esforço cortante máximo no ELU (tf) x vão (m)	74
Figura 63 – Esforço cortante máximo no ELS (tf) x vão (m)	75

Figura 64 – Deslocamentos no ELS (cm) x vão (m) 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Peso de aço em quilograma do sistema estrutural.....	49
Tabela 2	– Peso em quilograma do sistema estrutural B.....	49
Tabela 3	– Peso de aço em quilograma do sistema estrutural C.....	50
Tabela 4	– Consumo de concreto para os três sistemas estruturais.....	51
Tabela 5	– Momentos fletores máximos positivos e negativos e esforço cortante máximo devido ao peso próprio para os três sistemas estruturais arquitetura padrão.....	53
Tabela 6	– Momentos fletores máximos positivos e negativos (tfm) e esforço cortante máximo (tf) devido ao peso próprio para os três sistemas estruturais.....	57
Tabela 7	– Momentos fletores máximos positivos e negativos e esforço cortante máximo no ELS para os três sistemas estruturais.....	61
Tabela 8	– Deslocamentos máximos para cada sistema estrutural non ELS.....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	18
1.2	Justificativa	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Estruturas de concreto armado	20
2.2	Elementos e sistemas estruturais para pavimentos	22
2.2.1	<i>Lajes de concreto armado</i>	22
2.2.2	<i>Sistema estrutural em lajes lisas de concreto armado</i>	26
2.2.2.1	<i>Sistema estrutural em lajes lisas maciças de concreto armado</i>	26
2.2.2.2	<i>Sistema estrutural em lajes lisas nervuradas de concreto armado</i>	28
2.3	Análise estrutural de pavimentos de edificações	29
2.3.1	<i>Métodos dos Pórticos Equivalentes</i>	30
2.3.2	<i>Métodos dos Elementos Finitivos</i>	31
2.4	Dimensionamento segundo a NBR 6118:2023	33
2.4.1	<i>Estado limite último</i>	33
2.4.1.1	<i>Dimensionamento à flexão</i>	33
2.4.1.1.1	Dimensionamento à flexão de lajes maciças de concreto armado	33
2.4.1.1.2	Dimensionamento à flexão de lajes nervuradas.....	34
2.4.1.2	<i>Dimensionamento ao cisalhamento</i>	37
2.4.1.3	<i>Dimensionamento à Punção</i>	38
2.4.2	<i>Estado limite de serviço</i>	39
2.4.2.1	<i>Estado limite de deformação</i>	39
2.4.2.2	<i>Estado limite de fissuração</i>	40
2.5	Software TQS	41
2.6	Estado da arte	42
3	METODOLOGIA	44
3.1	Arquitetura e concepção estrutural	44
3.2	Sistemas estruturais	45
3.3	Lançamento Estrutural no Software TQS	46
4	RESULTADOS	49
4.1	Consumo de aço	49

4.2	Consumo de concreto.....	51
4.3	Esforços devido ao peso próprio.....	52
4.4	Esforços no estado limite último	57
4.5	Esforços no estado limite de serviço	60
4.6	Deslocamento no ELS.....	64
5	ESTUDO PARAMÉTRICO.....	68
5.1	Análise do consumo de aço.....	68
5.2	Análise do consumo de concreto.....	69
5.3	Análise dos momentos fletores.....	70
5.4	Análise dos esforços cortantes	74
5.5	Análise dos deslocamentos.....	75
6	CONCLUSÃO.....	77
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A estrutura é a parte mais resistente de uma edificação, tendo por finalidade resistir às ações a ela aplicadas de maneira que garanta segurança e estabilidade. De acordo com Souza e Rodrigues (2008), os elementos estruturais combinados formam os sistemas estruturais, cuja finalidade é receber e transmitir as ações sofridas para as fundações. Esses sistemas são compostos por elementos como pilares, vigas e lajes. As lajes, por sua vez, são elementos planos, comumente com duas dimensões consideravelmente superiores à terceira (espessura), possuindo como principal função receber os carregamentos atuantes no pavimento transferindo-os para os apoios (PINHEIRO, MUZARDO, SANTOS, 2003).

Dentre os sistemas estruturais para pavimentos existentes na construção civil, apresentam-se os convencionais (Figura 1) que consistem na combinação das lajes, vigas e pilares. Nesse sistema, as cargas atuantes nas lajes são transferidas para as vigas, que por sua vez as transmitem aos pilares, que finalmente as direcionam para as fundações. Esse método é amplamente utilizado devido à sua tradicionalidade e à disponibilidade de mão de obra qualificada. Além disso, a presença de muitas vigas, forma diversos pórticos, conferindo rigidez à estrutura. No entanto, é importante destacar que o uso desse sistema demanda um alto consumo de fôrmas e concreto.

Figura 1 – Sistema convencional.



Fonte: Filho e Guesser Júnior (2019).

Ao longo dos anos, a construção civil, visando atender as demandas do mercado, como a necessidade de vencer grandes vãos, têm impulsionado o surgimento de novos sistemas construtivos. Entre esses sistemas, destacam-se os sistemas estruturais em lajes lisas, que se

diferenciam dos demais por se apoiarem diretamente nos pilares. Dentro da categoria de lajes lisas, encontram-se as lajes lisas maciças, as lajes lisas nervuradas sem viga-faixa e com viga-faixa. As lajes lisas maciças (Figura 2) se destacam por sua presença proeminente na construção civil, devido à facilidade de cálculo e à simplicidade na execução. Além disso, caracterizam-se por conter toda sua espessura em concreto e por não fazerem parte do sistema estrutural convencional, dispensando vigas ou paredes em seu conjunto de apoio, interligando as placas e as cargas diretamente aos pilares.

Figura 2 – Sistema estrutural em laje lisa maciça.



Fonte: Carluc (2022).

De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, as lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, onde a zona de tração está localizada nas nervuras, dentre as quais pode ser inserido material inerte, geralmente mais leve, contribuindo assim para redução do peso próprio em comparação com o sistema convencional. Segundo Carvalho e Pinheiro (2009), o surgimento das lajes lisas nervuradas (Figura 3) ocorreu principalmente devido à demanda por vãos maiores, uma vez que as lajes maciças necessitam de grandes espessuras, o que as torna desvantajosas.

Figura 3 – Sistema estrutural em laje lisa nervurada sem viga-faixa.



Fonte: QiSuporte (2022).

Uma das desvantagens ao se utilizar os sistemas em lajes lisas é o surgimento de esforços cisalhantes na ligação laje-pilar, podendo ocorrer o fenômeno da punção. Portanto, com o intuito de combatê-lo, adota-se o engrossamento da seção do pilar (capitél) ou da laje (ábaco), sendo este último representado na Figura 3. Outra solução é a adoção de regiões de maior rigidez no alinhamento dos pilares, conhecidas como vigas-faixas, representadas na Figura 4.

Figura 4 – Sistema estrutural em laje lisa nervurada com viga-faixa.



Fonte: Atex Brasil (2017).

No projeto de laje de concreto armado, é fundamental utilizar sistemas construtivos apropriados para garantir a qualidade, funcionalidade e economia da estrutura. Nesse sentido, é essencial que projetistas conheçam as características e distinções entre os sistemas estruturais,

a fim de selecionar o mais adequado de acordo com as necessidades da construção. Portanto, é relevante realizar uma comparação entre os diversos tipos de sistemas estruturais.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise comparativa entre sistemas estruturais distintos para pavimentos de edificações. Como objetivos específicos têm-se:

- Dimensionar, com o software estrutural TQS, três modelos de sistema estrutural com mesma arquitetura;
- Entender o comportamento de estruturas distintas, sendo eles: sistema estrutural em laje lisa maciça, sistema em laje lisa nervurada sem viga-faixa e sistema estrutural em laje lisa nervurada com viga-faixa utilizados em um pavimento residencial;
- Avaliar o consumo de aço e concreto, os esforços devido ao peso próprio, esforços no Estado Limite Último e de Serviço e deslocamentos para diferentes sistemas estruturais;
- Identificar o melhor desempenho estrutural dentre os sistemas estudados por meio de estudo paramétrico.

1.2 Justificativa

Conforme Silva (2005), projetistas de estruturas de concreto armado e construtoras têm buscado alternativas simples e eficazes que possam reduzir os custos (mão-de-obra e/ou material), proporcionar versatilidade e que forneçam um aumento na relação custo-benefício.

Nesse contexto, neste trabalho buscou-se disponibilizar informações essenciais aos projetistas acerca dos sistemas de lajes lisas, por meio de um estudo comparativo e paramétrico realizando um estudo de cunho comparativo e paramétrico de três sistemas estruturais distintos. Cada sistema é abordado individualmente, com suas características, funcionalidades e possíveis aplicações em diferentes estilos de edificações.

Silva (2010) realizou um estudo comparativo entre lajes maciças e nervuradas para diferentes vãos, analisando a influência da variação do vão de uma laje no consumo de aço e concreto para cada sistema estrutural, visando otimizar o uso desses materiais. Ao contrário de algumas pesquisas acadêmicas anteriores, que exploram isoladamente os sistemas e os elementos de sustentação da obra, este trabalho aborda os sistemas estruturais em laje lisa maciça e laje lisa nervurada com e sem viga-faixa para um pavimento, fornecendo informações

críticas e esclarecedoras que auxiliarão os projetistas na escolha adequada dos sistemas estruturais, considerando suas propriedades favoráveis e desfavoráveis para cada projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos gerais necessários para o desenvolvimento e entendimento deste trabalho, abordando as estruturas de concreto armado, os sistemas em lajes sem vigas e o dimensionamento para esse tipo de elemento estrutural.

2.1 Estruturas de Concreto Armado

As estruturas de concreto armado resultam da combinação de concreto, composto por agregados miúdos (areia), agregados graúdos (brita) e pasta de cimento (cimento e água), com uma armadura de aço convenientemente inserida (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). Essa junção permite combinar a resistência à compressão do concreto com a resistência à tração do aço, tornando as estruturas de concreto armado capazes de suportar diversos carregamentos e vencer grandes vãos e balanços (SANTOS, 2008).

O concreto é um material que possui considerável resistência à compressão, tornando-o adequado para ser empregado em diversos elementos estruturais sujeitos a esforços de compressão. No entanto, é frágil e apresenta baixa deformação plástica até a ruptura, além de ter uma resistência reduzida à tração. Por essas razões, o concreto não pode ser usado isoladamente em elementos sujeitos à tração, como vigas, tirantes, lajes, entre outros (BASTOS, 2019).

Para superar essas limitações, o aço é utilizado em conjunto com o concreto, sendo posicionado de forma a resistir aos esforços de tração aos quais a estrutura está sujeita. O aço, além de resistir bem à tração e compressão, possui boa ductilidade e, quando associado ao concreto, aumenta a resistência à compressão. Assim, o conjunto de barras de aço que forma a armadura, revestida pelo concreto, compõe o Concreto Armado (BASTOS, 2019). Os dois materiais devem agir solidariamente, sendo este fato possível devido às forças de aderência entre a superfície do aço e o concreto.

As estruturas de concreto armado apresentam diversas vantagens, como boa trabalhabilidade, resistência significativa à maioria das solicitações, possibilidade de se tornar mais econômica em comparação com estruturas de aço em alguns casos, e técnicas de execução dominadas em todo o Brasil (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Esses fatores justificam a ampla utilização deste tipo de estrutura em todo o mundo, inclusive, no Brasil, 80% das obras executadas são de concreto armado (PAZ; BELLEI; BARBISAN, 2019), sendo aplicadas na construção de pontes, barragens, edificações,

reservatórios, dentre outros (BASTOS, 2019). As Figuras 5 e 6 representam duas grandes obras em concreto armado sendo a Figura 5 a Ponte da Amizade localizada na fronteira entre o Brasil e Paraguai, enquanto a Figura 6 ilustra o edifício Copan, considerada uma das maiores obras em concreto armado do Brasil.

Figura 5 - Ponte da amizade.



Fonte: Rotas de Viagem (2020).

Figura 6 - Edifício Copan.



Fonte: Estadão (2019).

Apesar das várias vantagens apresentadas anteriormente, as estruturas de concreto armado também possuem algumas desvantagens, tais como elevado peso próprio, dificuldades em reformas e demolições, e baixa proteção térmica (SILVA, 2015). Compreender as características e aplicações das estruturas de concreto armado é fundamental para o

dimensionamento de lajes lisas, assim como para outros temas abordados ao longo deste trabalho.

2.2 Elementos e sistemas estruturais para pavimentos

Os sistemas estruturais são compostos por um conjunto de elementos interrelacionados ou independentes que formam um todo mais elaborado e integrado, servindo a um fim comum (PASSAMANI, 2019). Estes elementos estruturais consistem em peças, que geralmente possuem uma ou duas dimensões superiores às demais, como vigas, lajes e pilares, formando os sistemas estruturais (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Os sistemas construtivos podem ser subdivididos em subestrutura e superestrutura, com a subestrutura composta pelas fundações e a superestrutura pela vedação externa e estrutura (PASSAMANI, 2019). O modelo usual de estrutura de concreto armado é conhecido pela utilização de lajes, vigas e pilares, onde as cargas são aplicadas diretamente sobre as lajes, que se apoiam nas vigas, e estas se apoiam nos pilares, responsáveis por transferir os esforços às fundações da edificação (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

No entanto, no início do século XX surgiu um novo sistema como modelo estrutural inovador, no qual as vigas não eram utilizadas como elemento de transição de esforços das lajes para os pilares. Pela razão das lajes possuírem uniformidade devido à ausência de vigas eram chamadas de lajes lisas (DANTAS, 2020 apud GASPARINI, 2002). O elemento estrutural (laje) e os sistemas estruturais (lajes lisas) objeto de estudo do presente trabalho serão detalhados a seguir.

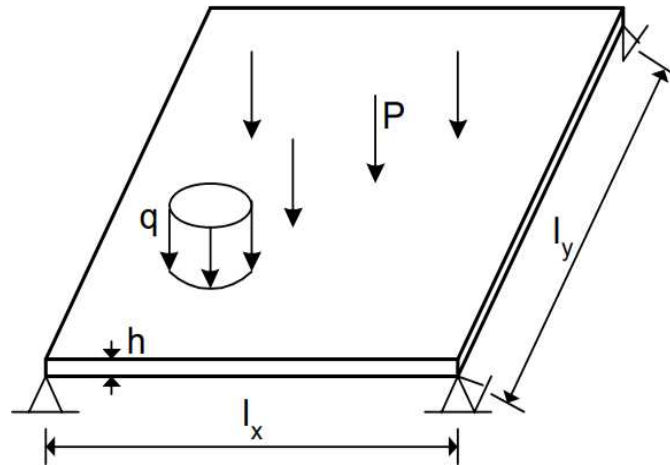
2.2.1 Lajes de concreto armado

De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, as lajes são elementos de superfície plana (elementos no qual uma dimensão, geralmente a espessura é pequena em relação às demais dimensões), sujeitas principalmente a ações normais ao seu plano. Ademais, as lajes são definidas como elementos de superfície, plano e bidirecional, destinadas a receber a maioria das cargas a que as edificações estão submetidas, tais como móveis, pessoas, equipamentos, paredes, entre outros.

As cargas atuantes nas lajes podem estar distribuídas linearmente (alvenarias), na área da laje (peso próprio) ou como forças pontuais (pilar apoiado na laje). Embora incomum, as placas podem estar sujeitas às ações externas na forma de momentos fletores, comumente

aplicados nas bordas da laje (BASTOS, 2021). A Figura 7 ilustra os carregamentos atuantes nas lajes, sendo “P” a representação de uma carga pontual atuando na laje e “q” uma carga distribuída na área da laje.

Figura 7 - Carregamentos atuantes nas lajes.



Fonte: Araújo (2014).

As lajes são elementos estruturais que têm como função fundamental receber os carregamentos provenientes da utilização das construções e transmiti-los às vigas (ARAÚJO, 2014). Além disso, como também menciona Araújo (2014), as lajes também têm a função de distribuir os carregamentos horizontais entre os elementos estruturais de contraventamento, além de atuar como mesas de compressão das vigas T.

De acordo com Silva (2005), as lajes podem ser divididas em dois grandes grupos: as moldadas no local (“in loco”), que são totalmente construídas na própria obra, e as pré-fabricadas, que são produzidas fora do canteiro de obras, em indústrias. As lajes moldadas no local podem ser subdivididas em lajes com vigas (Figura 8 e Figura 9) e sem vigas (Figura 10 e Figura 11), podendo ser nervuradas. Por sua vez, as lajes pré-fabricadas podem ser do tipo painéis (Figura 12) e nervuradas com vigotas pré-fabricadas (Figura 13) (SILVA, 2005).

Figura 8 - Laje nervurada com vigas.



Fonte: Mapa de Obra (2017).

Figura 9 - Laje maciça com vigas.



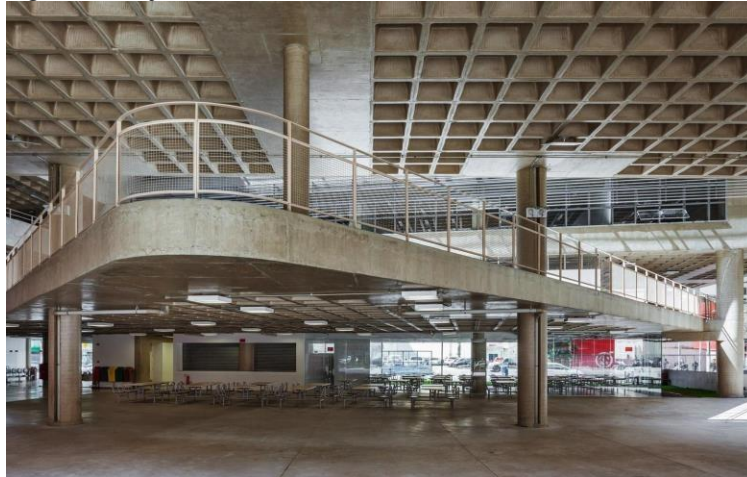
Fonte: Guia da Engenharia (2020).

Figura 10 - Laje lisa maciça.



Fonte: ArchDaily (2022).

Figura 11- Laje lisa nervurada.



Fonte: Revista Vitruvius (2014)

Figura 12- Laje pré-fabricada do tipo painel.



Fonte: Contanet (2018).

Figura 13 - Laje nervurada com vigotas pré-fabricadas.

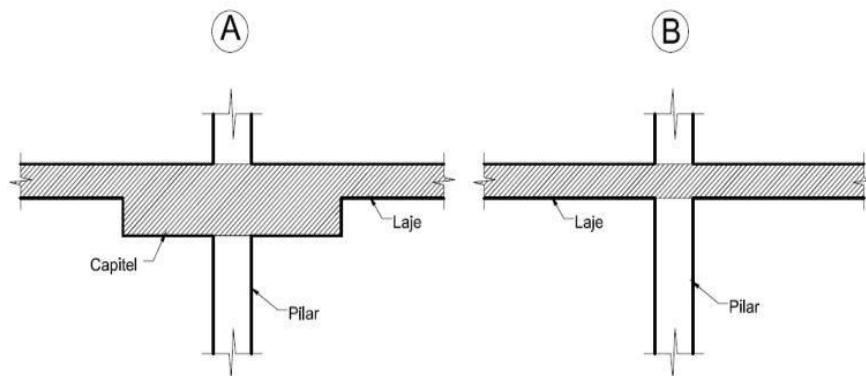


Fonte: Inova Civil (2022).

2.2.2 Sistema estrutural em lajes lisas de concreto armado

As lajes lisas são estruturas laminares horizontais, podendo ser de concreto armado ou protendido, diferenciando-se dos demais tipos por se apoiarem diretamente nos pilares (OLIVEIRA et al; 2013). Conforme a ABNT NBR 6118:2023, às lajes sem vigas podem ser classificadas em dois tipos: lajes lisas apoiadas nos pilares sem capitéis e lajes apoiadas diretamente sobre os pilares com capitéis, conhecidas como laje-cogumelo, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - A- Laje cogumelo e B-laje lisa.



Fonte: Spohr (2008).

As estruturas em lajes lisas são uma excelente opção para construções de edifícios de concreto, pois permitem menores prazos de execução tendo em vista à facilidade de armação e concretagem, reduzindo tanto custo quanto a mão-de-obra. Além disso, oferecem maior liberdade arquitetônica e capacidade de vencer grandes vãos (SACRAMENTO et al.,2012).

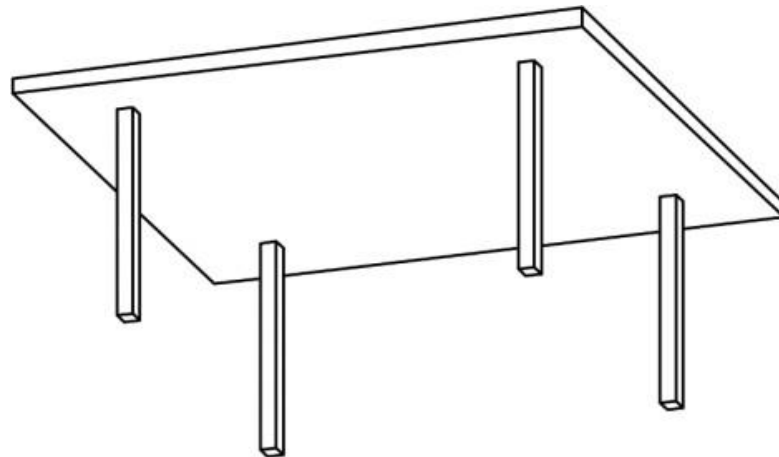
Entretanto, é importante destacar que ao utilizar o método construtivo de lajes lisas, é necessário considerar que elas apresentam uma ligação direta com os pilares, o que pode gerar esforços concentrados (esforço cortante) e ocasionar o fenômeno de punção (SACRAMENTO et al., 2012). Também é necessário considerar que este tipo de laje é mais suscetível a sofrer maiores deslocamentos transversais e acarreta uma redução na estabilidade global da edificação (AQUE,2017).

2.2.2.1 Sistema estrutural em lajes lisas maciças de concreto armado

As lajes maciças são caracterizadas por possuírem espessura composta inteiramente por concreto, com armaduras longitudinais resistentes à flexão e possivelmente armaduras transversais (BASTOS, 2021). Devido à necessidade de uma grande quantidade de concreto, esse tipo de construção pode elevar o custo da obra em comparação com outros tipos de lajes. No entanto, por ser um modelo mais tradicional, ainda é amplamente utilizado atualmente, devido à disponibilidade de mão-de-obra treinada para executar esse sistema construtivo (ALBURQUERQUE; PINHEIRO, 2002).

As lajes lisas maciças não seguem um sistema estrutural convencional, uma vez que não possuem paredes ou vigas para apoiar as placas, sendo assim, elas se apoiam diretamente sobre os pilares (PAIVA, 2021), como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Representação de laje lisa maciça.



Fonte: Silva (2019).

No que diz respeito às lajes maciças convencionais (tipo laje-viga-pilar), a presença de vigas possibilita a formação de vários pórticos, conferindo considerável rigidez à estrutura (ALBURQUERQUE; PINHEIRO, 2002). No entanto, a arquitetura da edificação torna-se limitada e a execução demanda uma quantidade significativa de fôrmas. Como solução para os principais desafios encontrados nesse sistema convencional, foi desenvolvido o sistema de lajes lisas maciças (PAIVA, 2021).

Algumas vantagens do uso de lajes lisas maciças, conforme Carvalho e Pinheiro (2009), incluem:

- Simplificação na execução de fôrmas, devido ao plano liso contínuo das lajes, o que permite o reaproveitamento dos materiais;
- Facilidade na instalação de sistemas hidráulicos e elétricos, pois reduz a necessidade de perfuração de vigas e curvas;

- Favorecimento da execução das armações, uma vez que as vigas são eliminadas, portanto todo o trabalho realizado para efetuar a armação deste elemento são suprimidos;
- Simplificação da concretagem, devido à redução de recortes.

No entanto, este sistema estrutural apresenta desvantagens como mencionadas por Carvalho e Pinheiro (2009) tais como:

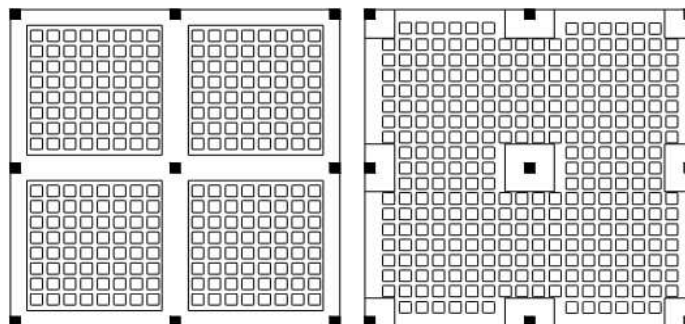
- Puncionamento na ligação-laje pilar;
- Instabilidade às ações laterais.

2.2.2.2 Sistema estrutural em lajes lisas nervuradas de concreto armado

Em conformidade com a ABNT NBR 6118:2023, lajes nervuradas são definidas como lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos fletores positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte. Segundo Carvalho (2009), as lajes sem vigas podem ser aliviadas do tipo nervurada ou com vazios internos, reduzindo o peso próprio das lajes e o consumo de concreto, aliviando as cargas transferidas aos pilares e, conseqüentemente, os carregamentos transmitidos às fundações, o que resulta em redução dos custos da estrutura.

Spohr (2008) destaca que as lajes lisas nervuradas devem ser apoiadas diretamente sobre os pilares, e a região da ligação laje-pilar (apoios) deve ser projetada para amenizar os esforços concentrados. Algumas formas de reduzir os efeitos ocasionados pela concentração dos esforços são a inserção de regiões maciças em volta dos pilares ou a adição de elementos que conferem maior rigidez no alinhamento dos pilares, como as faixas ou viga-faixa. A Figura 16 representa uma laje lisa nervurada com viga-faixa e uma laje lisa nervurada com engrossamento na região dos pilares, respectivamente.

Figura 16 - Laje lisa nervurada com viga-faixa e laje lisa nervurada com engrossamento na região dos apoios.



Fonte: Melo (2021).

De acordo com Araújo (2014), as lajes são comumente utilizadas para vencer grandes vãos. Isso se deve ao fato de apresentarem nervuras com armadura longitudinal de tração, o que resulta em um peso próprio reduzido, já que a parte do concreto que ficaria na região tracionada é eliminada e substituída por material de enchimento, como blocos cerâmicos furados, blocos de poliestireno expandido (EPS) ou fôrmas. Esse tipo construtivo é empregado principalmente em casos em que as solicitações ou vãos demandam lajes de grande espessura (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

Comparativamente a outros tipos de lajes, as lajes nervuradas apresentam diversas vantagens, conforme destacado por Spohr (2008), tais como:

- Maior inércia em relação ao sistema de lajes convencional, possibilitando o aumento dos vãos entre os pilares;
- Flexibilidade na distribuição dos pilares de acordo com a necessidade do projeto, sem a necessidade de disposição regular;
- A posição das paredes não é condicionada de acordo com a alocação das vigas;
- Redução do peso próprio da estrutura devido ao menor peso próprio.
- No entanto, como citado por Carvalho e Pinheiro (2009), algumas desvantagens relevantes das lajes nervuradas incluem:
 - Dificuldade na passagem das tubulações;
 - Puncionamento da ligação laje-pilar;
 - Considerável deslocamento transversal;
 - Maior instabilidade global.

2.3 Análise estrutural de pavimentos de edificações

A análise estrutural é essencial para compreender a resposta da estrutura diante dos carregamentos a que é submetida. Ela envolve a determinação dos esforços solicitantes e dos deslocamentos da estrutura sob as ações aplicadas, sendo considerada uma das etapas mais importantes na criação de um projeto estrutural. A partir dos resultados obtidos na análise estrutural, são realizados o dimensionamento e o detalhamento dos elementos estruturais, bem como a verificação do desempenho em serviço da estrutura (TQS, 2023).

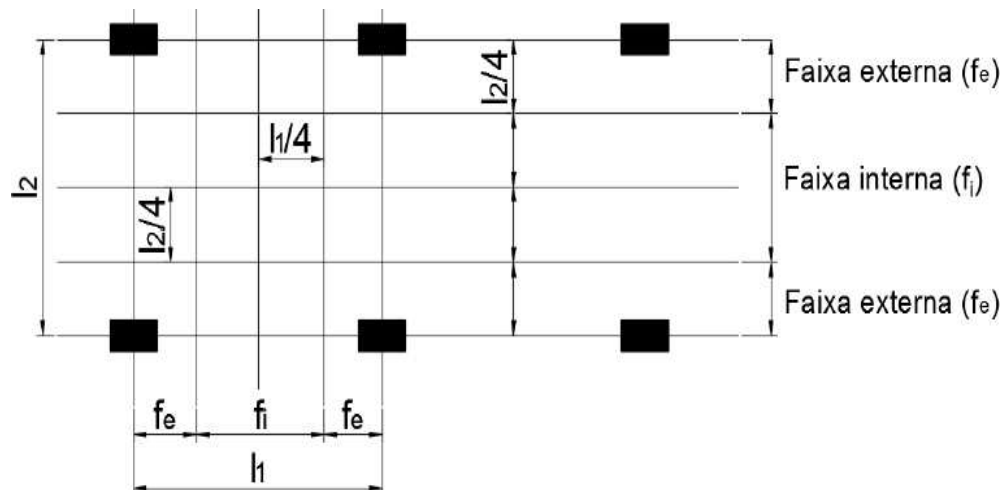
Conforme a ABNT NBR 6118:2023, a análise estrutural de lajes lisas pode ser realizada utilizando o método analítico, como o método dos pórticos equivalentes, e por meio de métodos numéricos, sendo o mais comum o método dos elementos finitos.

2.3.1 Método dos Pórticos Equivalentes

O Método dos Pórticos Equivalentes (MPE) é empregado para calcular os esforços atuantes em lajes, utilizando um processo elástico aproximado com redistribuição. Nesse método, são adotados pórticos múltiplos em ambas as direções para determinar os esforços solicitantes. É importante observar que o MPE é mais adequado quando os pilares estão alinhados em fileiras ortogonais, de forma regular e com vãos pouco distintos conforme abordado na ABNT NBR 6118:2023.

De acordo com Dadalt (2019), a estrutura é representada por uma série de pórticos equivalentes, que recebem todas as cargas das lajes e são calculados para as ações verticais aplicadas em sua área de influência. Após a determinação dos momentos fletores, é necessário distribuí-los em faixas na laje, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Faixas das lajes para a distribuição dos esforços numa série de pórticos equivalentes.



Fonte: Silva (2019).

Conforme a NBR 6118:2023 (ABNT, 2023), a distribuição dos momentos fletores deve seguir as seguintes proporções:

- 45% dos momentos positivos para as duas faixas internas;
- 27,5% dos momentos positivos para cada uma das faixas externas;
- 25% dos momentos negativos para as duas faixas internas;
- 37,5% dos momentos negativos para cada uma das faixas externas.

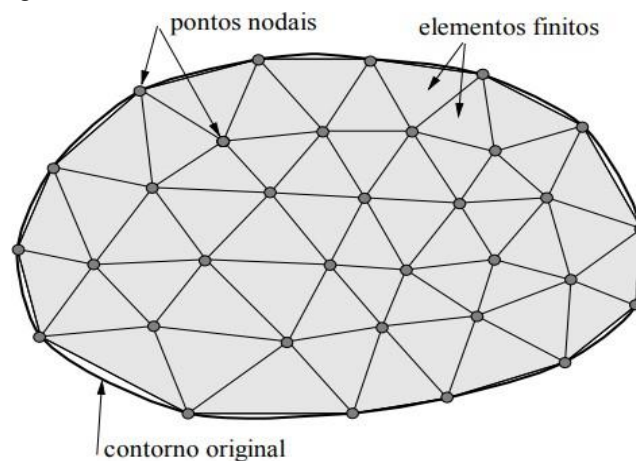
Os momentos obtidos por meio do Método dos Pórticos Equivalentes (MPE) são utilizados para o dimensionamento à flexão. Para a verificação da punção, as forças normais

devem ser obtidas pela média entre os valores encontrados nos dois pórticos aos quais o pilar pertence (DADALT, 2019 apud ARAÚJO, 2010). No dimensionamento das armaduras negativas, a redução dos momentos negativos deve ser desprezada, considerando os valores integrais encontrados no pórtico na ligação laje-pilar (PEREIRA, 2016 apud ARAÚJO, 2010). Além disso, para obter os esforços normais, deve-se considerar o maior dos valores encontrados nas duas direções (DADALT, 2019 apud EMERICK, 2005).

2.3.2 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico frequentemente utilizado para resolver problemas de engenharia nos quais os métodos analíticos não conseguem fornecer soluções satisfatórias (AQUE, 2017). Conforme destacado por Souza (2003), a ideia principal por trás do MEF é dividir o meio contínuo do problema em regiões menores (sub-regiões) de geometria simples, (formato triangular, cúbico, etc.), conhecidas como "elementos finitos". Esses elementos são utilizados para discretizar o domínio do problema e são conectados entre si por meio de nós ou pontos nodais, conforme ilustrado na Figura 18. O conjunto de elementos finitos e nós é comumente referido como malha de elementos finitos, também representada na Figura 18.

Figura 18 - Malha de Elementos Finitos.



Fonte: Souza (2003).

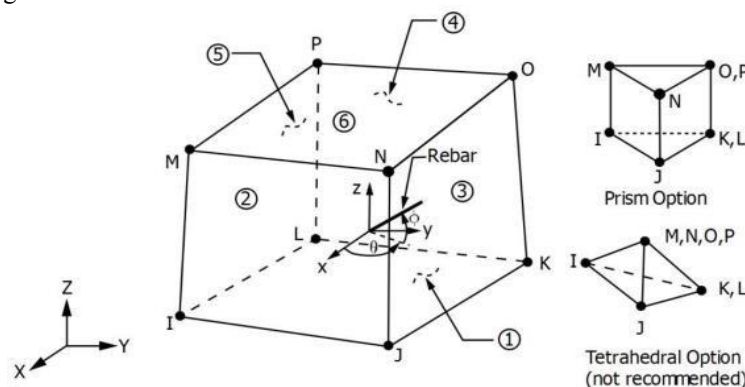
Além disso, os procedimentos para realizar a análise de um problema utilizando o MEF podem ser divididos em quatro etapas: análise preliminar, pré-processamento, processamento e pós-processamento (SILVA, 2019 apud KIM E SANKAR, 2011).

De acordo com Souza (2003), a precisão do método está diretamente relacionada ao tamanho do elemento, à quantidade de nós e aos tipos de elementos presentes na malha. À medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero e a quantidade de nós tende ao infinito, obtém-se uma malha mais consistente e a solução alcançada tende a convergir para a solução exata do problema. Em outras palavras, quanto mais refinada for a malha, mais precisos serão os resultados obtidos na análise. No entanto, é importante considerar que quanto menor o tamanho do elemento finito, maior será o tempo de processamento demandado pela máquina, devido ao elevado número de equações a serem resolvidas. Ademais, a partir de um certo refinamento, o número elevado de elementos não gera melhorias consideráveis na solução do problema (AQUE, 2017).

Vale ressaltar que o MEF é um dos melhores métodos utilizados para a análise estrutural do pavimento de um edifício, pois é capaz de analisar praticamente qualquer geometria definida. Portanto, é amplamente utilizado para realizar a análise estrutural de elementos de concreto armado, como lajes maciças ou nervuradas apoiadas em vigas ou diretamente sobre os pilares, de acordo com Melo (2021).

Silva (2019), em sua pesquisa, aplicou o MEF para a análise estrutural de lajes, utilizando o software ANSYS. O elemento utilizado foi o SOLID65, apresentando oito nós e três graus de liberdade por nó, conforme observado na Figura 19. A geração da malha foi obtida a partir da discretização da estrutura, estabelecida com base nas dimensões do elemento adotado. A autora ressalta a importância de verificar a malha por meio de análises de convergência e refiná-la conforme a necessidade. Para a análise estrutural da laje em estudo, a malha de elementos finitos adotada foi de 15 cm, devido à limitação do software em utilizar elementos menores, que ultrapassariam a quantidade de nós permitida. Esse trabalho representa uma aplicação do MEF para análise de lajes em concreto armado.

Figura 19 - Elemento finito SOLID65.



Fonte: Silva (2019).

2.4 Dimensionamento segundo a NBR 6118:2023

Segundo a ABNT NBR 6118:2023, após a análise estrutural, uma etapa crucial é o dimensionamento, cujo objetivo é garantir a segurança das estruturas como um todo ou de suas partes, tanto em relação ao Estado Limite Último (ELU) quanto ao Estado Limite de Serviço (ELS). Para alcançar esse propósito, é fundamental que as solicitações de cálculo sejam inferiores às resistências de cálculo para todos os estados-limites relevantes da estrutura em estudo.

2.4.1 Estado limite último

O estado-limite último está associado à ocorrência de colapso ou qualquer outra forma de falha estrutural que resulte na interrupção, total ou parcial, do uso da estrutura (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

2.4.1.1 Dimensionamento à flexão

Conforme afirmado por Pinheiro (2003), o dimensionamento à flexão é realizado no estágio III, também conhecido como "cálculo na ruptura" ou "cálculo no estágio III". Neste estágio, o concreto atinge o ponto de ruptura e o aço tracionado atinge o escoamento, permitindo o aproveitamento máximo de ambos os elementos, uma vez que trabalham com suas resistências de cálculo. A seguir, serão apresentados os procedimentos para o dimensionamento à flexão de lajes maciças e nervuradas, respectivamente.

2.4.1.1.1 Dimensionamento à flexão de lajes maciças de concreto armado:

Após a determinação dos esforços solicitantes característicos a partir da análise estrutural, é viável realizar o dimensionamento das lajes à flexão. O dimensionamento para peças sujeitas à flexão no Estado Limite Último é obtido por meio do equilíbrio da seção. De acordo com Bastos (2021), o dimensionamento para flexão simples de lajes maciças pode ser realizado de forma análoga ao dimensionamento de vigas, considerando uma faixa de laje com largura igual a 1,0 m. Dessa forma, as equações a seguir permitem o dimensionamento de seções retangulares com armadura simples.

$$M_d = 0,68b_w \times f_{cd} (d - 0,4x) \quad (1)$$

$$A_s = \frac{M_d}{\sigma_{sd} (d - 0,4x)} \quad (2)$$

Sendo,

M_d é o momento fletor solicitante de cálculo;

b_w é a largura da seção;

f_{cd} resistência de cálculo do concreto à compressão;

d é a altura útil da seção;

x é a posição da linha neutra;

A_s é a área de aço;

σ_{sd} é a tensão na armadura tracionada.

Para garantir o comportamento dúctil adequado dos elementos estruturais, a ABNT NBR 6118:2023 recomenda a análise da relação entre a posição da linha neutra e a altura útil da seção. Isso se deve ao fato de que a capacidade de rotação dos elementos estruturais é influenciada pela posição da linha neutra no ELU. Quanto menor for a relação x/d , maior será essa capacidade. Portanto, para assegurar o comportamento dúctil adequado em lajes, é necessário que a posição da linha neutra no Estado Limite Último atenda aos limites estabelecidos pela NBR 6118:2023 (ABNT, 2023), sendo estes:

- $x/d \leq 0,45$ para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa;
- $x/d \leq 0,35$ para concretos com $50 < f_{ck} \leq 90$ MPa.

2.4.1.1.2 Dimensionamento à flexão das lajes nervuradas

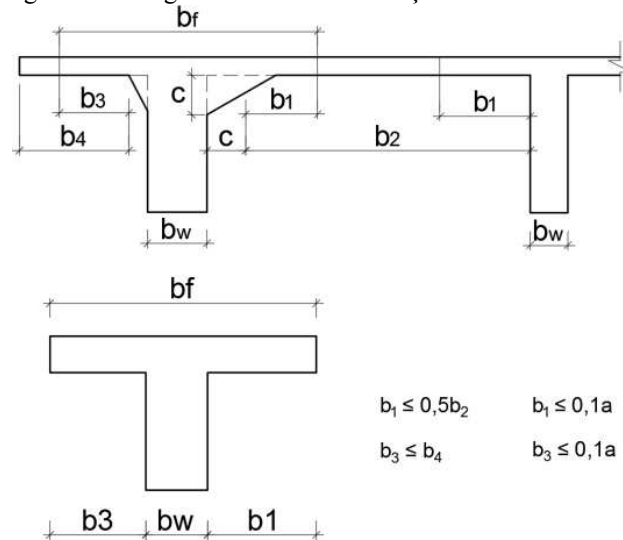
Conforme Pinheiro (2003) determinados os momentos fletores nas nervuras através da análise estrutural, o dimensionamento à flexão das lajes nervuradas deve levar em conta alguns fatores como:

- Quando a mesa está comprimida, a seção considerada deve ser a seção T. Geralmente, a linha neutra está na mesa, o que faz com que a seção se comporte como uma seção retangular com uma área resistente de $b_f \times h$;
- Quando a mesa está tracionada e não há laje dupla, a seção resistente é considerada retangular $b_w \times h$.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2023 quando a mesa da seção T encontra-se comprimida, para o dimensionamento à flexão, interpreta-se que ela contribui para resistir aos esforços. Portanto a largura colaborante deve ser definida pela largura da viga (b_w) aumentada

em no máximo 10% da distância entre os pontos de momento fletor nulo, para cada lado da viga em que haja laje colaborante. Além disso, os limites de b_1 e b_3 devem ser respeitados conforme ilustra a Figura 20.

Figura 20 - Largura colaborante em seções T.

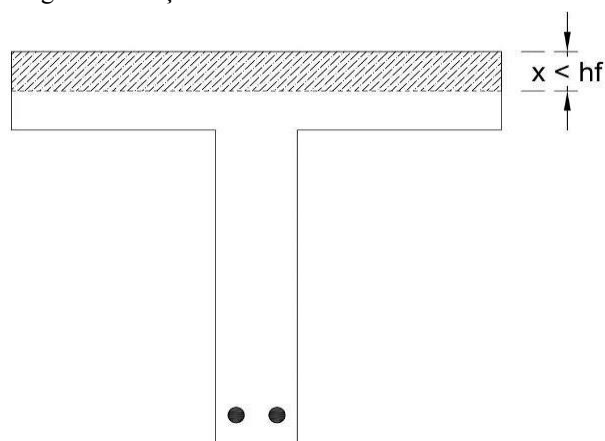


Fonte: Silva (2019).

Ademais, o dimensionamento à flexão de seções T deve ser realizado de acordo com a posição da linha neutra, assim sendo, há duas hipóteses de cálculo (SILVA, 2019):

a) Linha neutra na mesa:

Figura 21- Seção T com linha neutra na mesa.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para esse caso $x < h_f$. Portanto, o dimensionamento pode ser realizado considerando uma seção retangular de largura b_f e altura h , tendo em vista que a resistência à tração do concreto é desprezada.

Sendo assim, têm-se as seguintes equações para o dimensionamento:

$$M_d = (0,68 x d - 0,272x^2)b_f f_{cd} \quad (3)$$

Em que,

M_d é o momento fletor solicitante de cálculo;

x é a posição da linha neutra;

f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto à compressão;

d é a altura útil.

Já a área de aço da armadura de tração é:

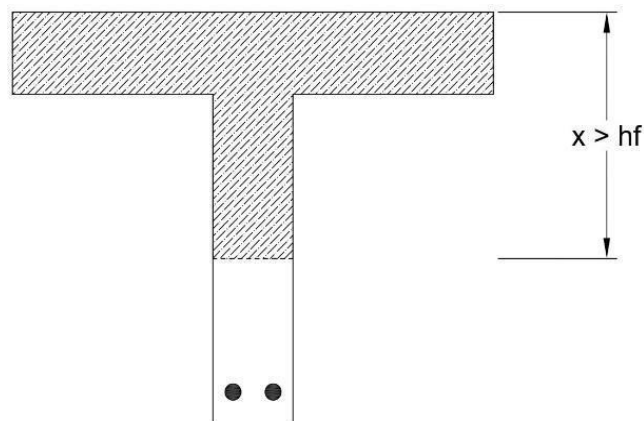
$$A_s = \frac{M_d}{(d-0,4x)f_{yd}} \quad (4)$$

Sendo,

f_{yd} é a resistência de cálculo do aço à tração.

b) Linha neutra na alma:

Figura 22- Seção T com linha neutra na alma.



Fonte: Autoria própria (2023).

Neste caso $x > h_f$. A linha neutra fictícia encontra-se dentro da alma, logo o cálculo da armadura é realizado dividindo os momentos fletores de cálculo em duas partes: momento resistido pelas abas (M_1) e momento resistido pela nervura (alma) (M_2), logo o momento fletor total (M_d) é:

$$M_d = M_1 + M_2 \quad (5)$$

Sendo,

$$M_1 = 0,85 \times f_{cd} \times h_f (b_f - b_w) \times (d - \frac{h_f}{2}) \quad (6)$$

$$M_2 = M_d - M_1 \quad (7)$$

Onde,

h_f é a altura da mesa;

b_f é a largura colaborante da mesa;

b_w a largura da alma.

Determinados os momentos fletores obtém-se as parcelas de área de aço A_{s1} e A_{s2} :

$$A_{s1} = \frac{M_1}{(d - \frac{h_f}{2}) \times f_s} \quad (8)$$

$$A_{s2} = \frac{M_2}{(d - 0,4x) \times f_s} \quad (9)$$

Sendo assim, a área de aço da armadura de tração A_s é dada por:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (10)$$

2.4.1.2 Dimensionamento ao cisalhamento

Além do dimensionamento à flexão, é necessário verificar as lajes quanto ao cisalhamento. De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, as lajes maciças ou nervuradas podem dispensar a armadura transversal para resistir às forças de tração provenientes da força cortante, desde que a força cortante solicitante de cálculo seja igual ou inferior à força cortante resistente. Para realizar essa verificação, é necessário utilizar as seguintes equações:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (11)$$

No qual,

$$V_{Rd1} = [r_{Rd1}K(1,2 + 40\rho_1) + 0,15\sigma_{cp}]b_wd \quad (12)$$

Em que:

$$r_{Rd1} = 0,25f_{ctd} \quad (13)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (14)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_wd} < |0,02| \quad (15)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} \quad (16)$$

V_{Rd1} é a força cortante resistente de cálculo;

V_{Sd} é a força cortante de sollicitação;

A_{s1} é a área da armadura de tração;

b_w é a largura mínima da seção ao longo da altura útil;

N_{Sd} é a força longitudinal devido a protensão ou carregamento;

r_{Rd} é a tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento;

K é um coeficiente que tem os seguintes valores:

$K = |1|$, para elementos onde 50 % da armadura inferior não chega até o apoio.

$K = |1,6 - d|$, para os demais casos não menores que $|1|$.

Ademais, é necessário verificar a compressão diagonal do concreto em elementos sem armadura de cisalhamento, o que é feito comparando a força cortante sollicitante de cálculo (V_{Sd}) com a resistência de cálculo (V_{Rd2}).

Tem-se,

$$V_{Rd2} = 0,5 \times \alpha_{v1} \times f_{cd} \times b_w \times 0,9 \times d \quad (17)$$

Em que:

$$\alpha_{v1} = \left(0,7 - \frac{f_{ck}}{200}\right) \leq 0,5 \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (18)$$

Conforme a norma, para lajes que necessitam de armadura para força cortante, a resistência dos estribos deve ser no máximo de:

- 250 MPa, para lajes com espessura de até 15 centímetros;
- 435 MPa, para lajes com espessura superior a 35 centímetros. Permitindo a interpolação linear.

2.4.1.3 Dimensionamento à punção

Apesar das inúmeras vantagens já mencionadas do sistema de lajes lisas, ao se utilizar este sistema uma atenção particular deve ser dada à ligação laje-pilar, tendo em vista que essa está sujeita ao fenômeno de punção (PEREIRA FILHO, 2016). A punção é uma forma de ruptura por cisalhamento que pode ocorrer em elementos de placa quando submetidos a uma carga ou reação concentrada aplicada transversalmente. Esse fenômeno é caracterizado por ocorrer de maneira brusca, sendo capaz de levar a estrutura à ruína por meio do colapso progressivo (OLIVEIRA et al., 2013). A Figura 23 ilustra o colapso da estrutura ocorrido em um shopping em construção na cidade de Teresina, com 40.000 m² de área colapsada, devido à punção (PEREIRA FILHO, 2016).

Figura 23 - Colapso da estrutura por punção do Shopping Poty.



Fonte: Araújo (2013).

Conforme menciona Pereira Filho (2021), a normativa estabelece que a resistência à punção em lajes lisas sem armaduras de cisalhamento pode ser determinada com base em uma tensão resistente atuando em uma área de controle. Para as lajes que contém armadura de cisalhamento, a norma orienta a verificação das seguintes possibilidades de ruptura: dentro das armaduras de cisalhamento, fora das regiões que possuem armadura de cisalhamento ou devido ao esmagamento da biela próxima ao pilar. O dimensionamento de lajes à punção de acordo com a ABNT NBR 6118:2023 está descrito no item 19.5 da referida norma.

2.4.2 Estado limite de serviço

O Estado Limite de Serviço (ELS) pode ser definido como o estado limite que está diretamente relacionado com a durabilidade da estrutura, conforto do usuário, aparência e a sua boa utilização funcional, tanto com relação aos usuários quanto às máquinas e equipamentos utilizados (ABNT NBR 6118:2023). Nos próximos tópicos, serão descritas algumas verificações que devem ser realizadas em estruturas de concreto armado.

2.4.2.1 Estado-limite de deformação

Conforme a ABNT NBR 6118:2023, os deslocamentos-limites consistem em valores práticos utilizados para verificar, em serviço, o estado-limite de deformações excessivas da estrutura. Com o objetivo de evitar desconfortos para os usuários decorrentes de flechas excessivas, esses deslocamentos são limitados (MELO, 2021). A norma mencionada classifica os deslocamentos-limites em quatro grupos básicos:

- a) Aceitabilidade sensorial: o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável;
- b) Efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da edificação;
- c) Efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão a ela ligados;
- d) Efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-as ao modelo estrutural adequado.

De acordo com (BARROS; BARROS; FILHO, 2020) a principal consequência advinda da não linearidade física do concreto armado é a perda de rigidez dos elementos devido à presença de fissuras. Portanto, para determinar as flechas nas estruturas lineares de concreto armado, é necessário considerar a rigidez efetiva das seções transversais dos elementos, levando em conta a presença de armações, fissuração do concreto e as deformações diferidas no tempo. Para isto, Branson determina uma expressão empírica que define a rigidez efetiva em qualquer seção transversal (OLIVEIRA E SILVA, 2011). Vale ressaltar que para se obterem deslocamentos mais próximos da realidade deve-se considerar o valor da inércia para o cálculo dos deslocamentos.

Ademais, as flechas limites são determinadas de acordo com a classificação do grupo e são limitadas de acordo com a Tabela 13.3- Limites para deslocamentos da ABNT NBR 6118:2023, com o objetivo de garantir um comportamento adequado da estrutura em serviço. Vale destacar que para assegurar que a estrutura atenda ao estado limite de deformação, é necessário que as deformações encontradas sejam iguais ou inferiores ao limite estabelecido pela norma.

2.4.2.2 Estado-limite de fissuração

Em conformidade com a ABNT NBR 6118:2023, as fissuras em elementos de concreto armado são inevitáveis devido à grande variabilidade e baixa resistência do concreto à tração. Portanto, é crucial que as aberturas das fissuras permaneçam dentro dos limites

estabelecidos pela norma, a fim de não comprometer as condições de serviço e a durabilidade da estrutura (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2021).

Com o objetivo de alcançar um bom desempenho na proteção das armaduras quanto à corrosão e à aceitabilidade sensorial dos usuários, busca-se limitar a abertura dessas fissuras. Os valores limites estabelecidos pela norma podem ser encontrados na Tabela 13.4 - Exigências mínimas de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental da ABNT NBR 6118:2023.

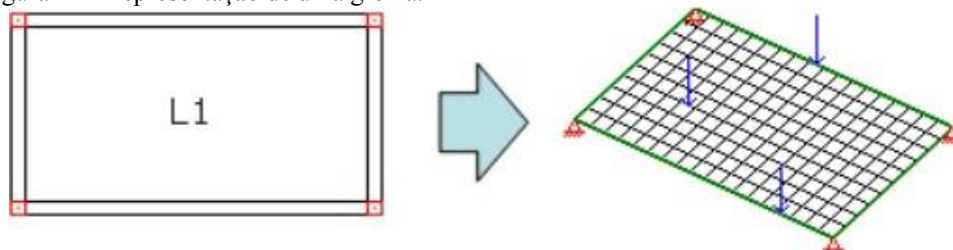
Ademais, para assegurar que a estrutura atenda ao estado limite de fissuração, os valores de abertura das fissuras obtidos analiticamente ou por meio de softwares devem ser iguais ou inferiores aos limites estabelecidos pela norma. Isso é essencial para garantir que a estrutura atenda ao estado limite de fissuração e mantenha sua durabilidade ao longo do tempo.

2.5 Software TQS

O TQS é um software direcionado ao desenvolvimento de projetos estruturais de concreto armado. Este é composto por um conjunto de sistemas que de maneira integrada e automatizada, oferecem recursos essenciais para concepção estrutural, análise, dimensionamento e detalhamento da armação, geração de desenhos e produção de plantas (TQS DOCS, 2023).

Como mencionado anteriormente, o software é capaz de realizar desde a análise estrutural até a geração de plantas. Portanto, esse elemento pode ser utilizado para a obtenção dos esforços para o dimensionamento das lajes através do modelo da grelha (TQS DOCS, 2023). A grelha pode ser compreendida como um modelo composto por elementos lineares, as barras, dispostas em um plano horizontal, permitindo avaliar o comportamento de um piso (vigas e lajes de um pavimento) sujeito a ações verticais (TQS DOCS, 2023). A Figura 24 mostra a representação de uma grelha composta por barras, enquanto os pilares são representados por apoios. (TQS DOCS, 2023).

Figura 24 - Representação de uma grelha.



Fonte: Software TQS (2023).

O TQS classifica três tipos distintos de grelhas: grelha de lajes planas, grelha de lajes nervuras e grelha somente de vigas. O primeiro tipo é usado para analisar pavimentos sem nervuras, como lajes lisas, cogumelos e lajes convencionais (vigas e lajes). O modelo de grelha de lajes nervuradas é destinado à análise de pavimentos com nervuras, como lajes treliçadas e nervuradas. Por fim, o último modelo, a grelha apenas de vigas, é utilizado para analisar pavimentos sem lajes, como fundações com vigas baldrame (TQS DOCS, 2023).

É essencial ressaltar que o software considera os apoios da grelha (os pilares) como apoios elásticos independentes. Isso ocorre porque, se os pilares fossem considerados como restrições simples, poderiam resultar em picos de momentos negativos, levando a esforços diferentes do esperado.

Portanto, "molas" de restrição são inseridas nas extremidades de cada barra de laje e viga que se apoiam diretamente nos pilares. Isso faz com que as regiões próximas ao pilar se tornem plásticas e percam rigidez, levando os esforços a se redistribuírem para as regiões mais rígidas (TQS DOCS, 2023). Além disso, é importante destacar que o software realiza o dimensionamento dos elementos estruturais conforme a ABNT NBR 6118:2023.

2.6 Estado da arte

Neste item, serão apresentados alguns estudos semelhantes ao desenvolvido na presente pesquisa. Os trabalhos abordam, de forma geral, lajes sem vigas, realizando comparações entre custos de distintos sistemas estruturais, métodos variados para obtenção dos esforços para as lajes lisas, além da comparação dos esforços para sistemas estruturais diferentes. Em seguida, os estudos são detalhados sucintamente.

Melo (2021) desenvolveu a análise, dimensionamento e detalhamento de um pavimento de edifício comercial chamado Bittar V, localizado em Brasília-DF, através do software TQS. Além de comparar as soluções entre si, o estudo também comparou diferentes alternativas estruturais com fins econômicos já entregue e executada pela empresa PROEST (Projetos de Estruturas e Construção Civil), que optou pelo sistema de laje lisa nervurada com vigas faixa no eixo dos pilares. A autora buscou determinar qual método construtivo é o mais econômico, concluindo que o método adotado pela PROEST foi o mais econômico.

Paiva (2021) realizou um estudo comparativo entre os sistemas estruturais em laje lisa maciça e laje lisa nervurada para compor seu trabalho de conclusão de curso. A autora buscou determinar qual tipo de sistema construtivo obtinha um maior desempenho estrutural. Após realizar a análise e o dimensionamento através do software Eberick, concluiu-se que o

sistema estrutural em laje lisa nervurada foi o mais viável para a edificação do referido trabalho, devido à grande economia dos materiais utilizados.

Gregório (2017) efetuou um estudo comparativo entre lajes lisas maciças e nervuradas visando eleger o modelo estrutural que apresentaria maior eficiência. Para chegar a tal conclusão, ela modelou três projetos estruturais no software Eberick: laje lisa maciça sem vigas de borda, laje lisa maciça com vigas de borda e laje nervurada com vigas de borda, realizando uma comparação entre flechas, esforços cortantes, momentos fletores e torsões, consumo de aço e concreto para cada sistema estrutural. Concluiu-se que o modelo em laje lisa maciça sem vigas de borda obteve melhor desempenho em relação aos momentos fletores, torsões e esforço cortante, enquanto a laje nervurada com viga de borda obteve os valores mais econômicos.

Rheinheimer (2020) desenvolveu um estudo que buscou realizar a análise estrutural de lajes lisas usando o Método dos Pórticos Múltiplos (MPM) e métodos computacionais, visando analisar a eficiência do primeiro método em relação ao segundo, por meio da análise comparativa dos esforços obtidos para cada método. O autor concluiu que o MPM apresentou resultados divergentes das soluções obtidas através dos métodos computacionais, devido à sua simplicidade e limitações.

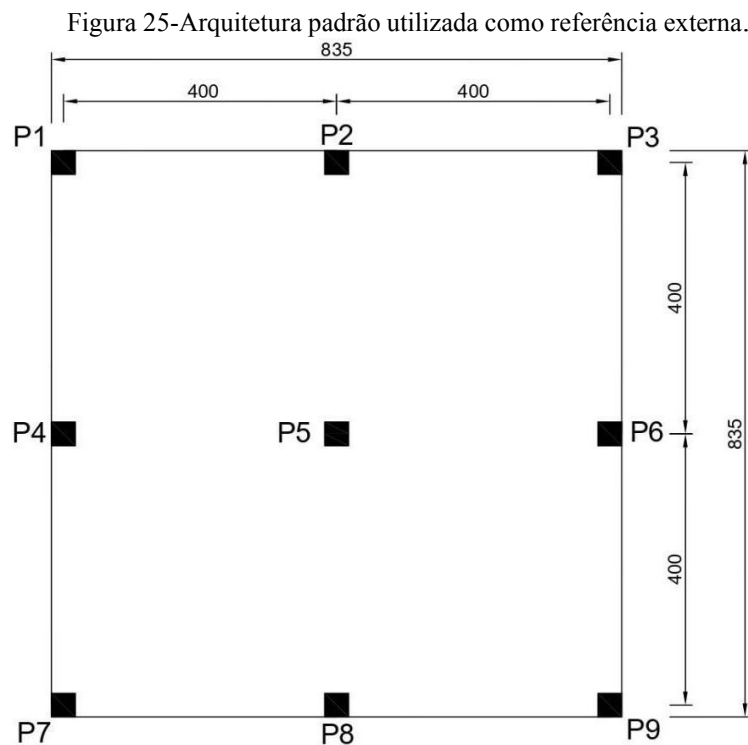
Atualmente, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos acerca dos sistemas estruturais em lajes lisas, mostrando sua evolução no mercado da construção civil, bem como algumas vantagens ao se utilizar este tipo construtivo. Visando agregar informações relevantes acerca dos sistemas em lajes lisas, o presente trabalho tem como foco principal o estudo comparativo de consumo de materiais, esforços aos quais os modelos estão submetidos e deslocamentos além do desenvolvimento de um estudo paramétrico que buscou mostrar qual sistema é mais eficiente estruturalmente quando variados os vãos das lajes.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo consistiu na análise comparativa de três sistemas estruturais (laje lisa maciça, laje lisa nervurada sem viga-faixa e laje lisa nervurada com viga-faixa), por meio da realização de analogias entre os esforços para cada tipo de sistema, levando em consideração o peso próprio, os esforços no estado limite último e de serviço, os deslocamentos e consumo de aço e concreto. Para a realização da análise, dimensionamento e extração dos dados necessários, foi utilizado o software TQS versão V24.

3.1 Arquitetura e concepção estrutural

Após determinar os sistemas a serem utilizados, foi definida a arquitetura padrão possuindo vão de 4 m e a concepção estrutural, conforme ilustra a Figura 25.



Fonte: Autoria própria (2023).

O pavimento residencial em estudo tem como características o pé direito de 3 metros e área de 69,7225 m². Vale salientar que o software AutoCAD foi utilizado para o desenvolvimento do projeto arquitetônico.

3.2 Sistemas estruturais

A escolha por sistemas estruturais em lajes sem vigas foi motivada pela demanda crescente do mercado da construção civil por edificações com vãos cada vez maiores e vigas com espessuras menores, visando evitar recortes excessivos. Portanto, os sistemas estruturais adotados foram:

- Laje lisa maciça (Sistema A);
- Laje lisa nervurada sem viga-faixa (Sistema B);
- Laje lisa nervurada com viga-faixa (Sistema C).

Definidos os sistemas estruturais a serem utilizados, foram definidas as espessuras da laje para cada tipo de sistema construtivo.

- Sistema A:

Adotou-se a espessura para lajes lisas maciças de 17 cm seguindo a NBR 6118:2023 (ABNT, 2023), que afirma que a mínima espessura deve ser de 16 cm para lajes lisas maciças.

- Sistemas B e C:

Para os sistemas B e C que consistem em sistemas de lajes nervuradas utilizou-se fôrmas quadradas bidirecionais. As fôrmas adotadas foram da empresa Impacto, que atua no ramo da construção civil dispondo de diversos produtos e serviços como protensão, cimbramentos, fôrmas para lajes nervuradas e módulos habitacionais.

Para a estrutura padrão, com vão de 4 metros, foi utilizada a mesma fôrma para os dois sistemas, com dimensões de 61 x 61 x 16 C 5 H 16, onde 61 x 61 cm representam as dimensões da cubeta, 16 cm a altura do molde (h), 5 cm a espessura da lâmina (hm) e 21 cm a altura total (ht). Enquanto a Figura 26 representa as dimensões da cubeta, a Figura 27 mostra sua geometria.

Figura 26 - Dimensões da Cubeta.

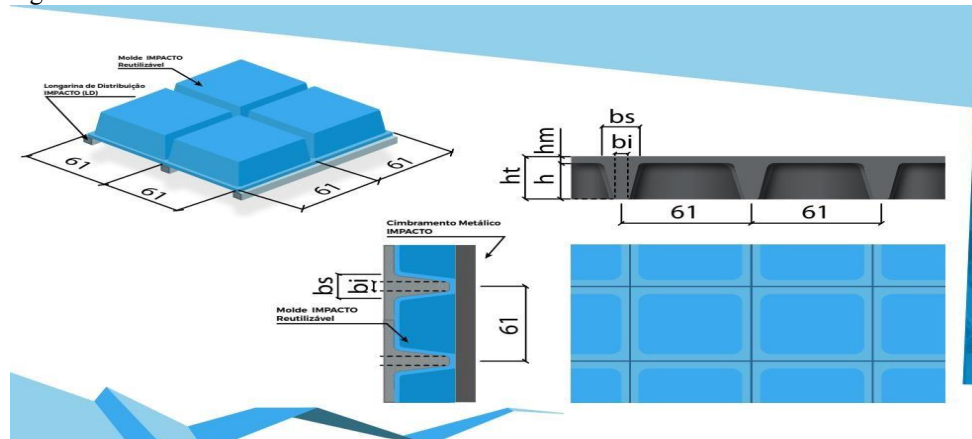


The image shows a technical drawing of a bidirectional slab form (CUBETA 61X61cm) by Impacto. The drawing includes a 3D perspective view of the form and a table of dimensions and material properties. The table is as follows:

ALTURA DO MOLDE (h)	ESPESSURA DA LÂMINA (hm)	ALTURA TOTAL (ht)	LARGURA DA NERVURA			VOLUME DO VAZIO		EQUIVALÊNCIA EM CONSUMO DE CONCRETO (m ³ /m ²)	PESO PRÓPRIO (Kg/m ²)
			inf.(bi)	med.(br)	sup.(bs)	(m ³)	(m ³ /m ²)		
	4	20						0,081	204
16	5	21	7	8,5	10	0,044	0,119	0,091	229
	6	22						0,101	254

Fonte: Impacto (2018).

Figura 27 - Geometria das Cubetas.



Fonte: Impacto (2018).

Com o intuito de realizar uma análise comparativa precisa entre os sistemas estruturais estudados, buscou-se utilizar a mínima espessura das lajes que atendessem aos requisitos do Estado Limite Último (ELU) e do Estado Limite de Serviço (ELS). Quanto aos pilares, foi adotada uma seção de 35 x 35 cm, atendendo à norma que estabelece que a área da seção transversal de um pilar deve ser de no mínimo 360 cm².

Posteriormente, a estrutura foi lançada no software com a consideração de algumas prescrições normativas, as quais serão abordadas no próximo tópico.

3.3 Lançamento estrutural no software TQS

Para iniciar o lançamento da estrutura no software, foi necessário criar um novo edifício, onde alguns dados são inseridos, tais como os materiais a serem utilizados, os cobrimentos e as cargas. Para este trabalho, adotaram-se os seguintes dados:

- $f_{ck} = 30$ MPa;
- Classe de agressividade ambiental II;
- Cobrimento dos pilares: 3 cm;
- Cobrimento das lajes: 2,5 cm;
- Consideração das ações do vento e desaprumo.

Após definir esses dados, foi necessário criar os pavimentos da edificação, sendo que, para este estudo, foi considerado apenas um pavimento. Com os dados iniciais determinados, utilizou-se a arquitetura desenvolvida no AutoCAD como referência externa para lançar os elementos estruturais. O lançamento da estrutura começou pelos pilares, seguido pelo

lançamento das lajes. No processo de lançamento das lajes, foi necessário realizar o fechamento de bordo e, em seguida, escolher o sistema construtivo, bem como as espessuras mínimas mencionadas anteriormente.

Posteriormente à definição dos sistemas e dimensões, determinaram-se as cargas atuantes nas lajes. Para as cargas permanentes adotou-se conforme ABNT NBR 6120:2019 um contrapiso de argamassa e areia com peso específico de 21 kN/m^3 e 4 cm de espessura, resultando em uma carga permanente de $0,84 \text{ kN/m}^2$. Além disso, admitiu-se o revestimento, com uma carga de 1 kN/m^2 , já como carga acidental considerou-se uma edificação residencial tendo como carga distribuída 2 kN/m^2 . A carga advinda do peso próprio foi calculada automaticamente pelo software. É importante mencionar que as cargas de alvenaria foram desconsideradas.

Adicionalmente, no processo de lançamento do sistema B, foram estabelecidas as dimensões da região maciça no entorno dos pilares. Essas dimensões foram determinadas levando em conta a última superfície possível de verificar a punção, atribuindo as dimensões "4d" para o ábaco, em que "d" representa a altura útil da seção transversal da laje.

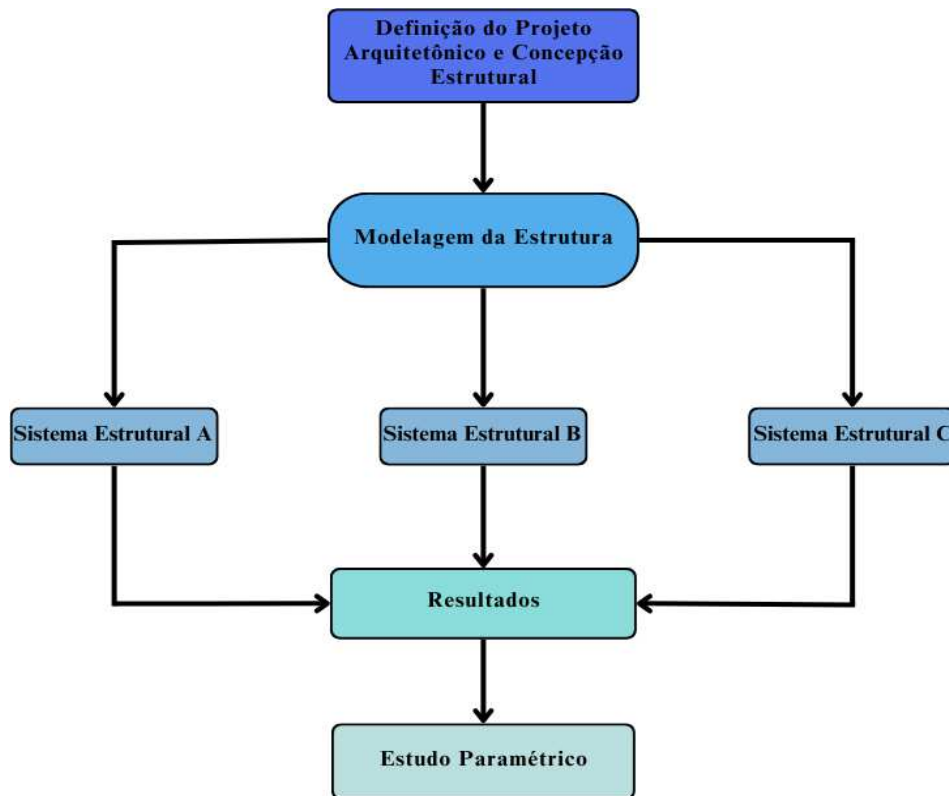
Após o lançamento das vigas faixas do sistema estrutural C, com altura da seção transversal igual à altura da laje (21 cm) e base da seção igual à dimensão do pilar (35 cm), procedeu-se com o processamento global da estrutura. Essa etapa é responsável pelo dimensionamento dos elementos estruturais, detalhamento das armaduras, geração de desenhos, transferência de esforços, além do processamento e geração de modelos numéricos (TQS Docs, 2023).

Subsequentemente, foi realizada a análise não linear da grelha, levando em consideração a não linearidade física, fissuração do concreto, presença de armaduras e fluência. Essa etapa é fundamental para a análise da abertura de fissuras e flechas.

Além disso, a modelagem dos três sistemas estruturais possibilitou a comparação dos consumos de aço e concreto, dos esforços devido ao peso próprio, dos esforços no ELU e ELS, e dos deslocamentos.

Com o objetivo de explorar outras possibilidades, foi conduzido um estudo paramétrico, variando os vãos da estrutura para os valores de 3m, 5m, 6m, 7m e 8m, considerando os vãos como a distância entre os centros dos pilares. Nessa análise, foram levados em conta o consumo de aço e concreto, os esforços devido ao peso próprio, os esforços no ELU e ELS, e os deslocamentos. A metodologia do presente trabalho está representada no fluxograma da Figura 28.

Figura 28-Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autoria própria (2023).

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos do estudo da estrutura padrão, com vão de 4 m. Para isto foi realizada uma análise comparativa entre o consumo de aço, consumo de concreto, esforços devido ao peso próprio, esforços no ELU, esforços no ELS e deslocamentos entre os três sistemas estruturais adotados.

4.1 Consumo de aço

Foi analisado o consumo de aço da estrutura padrão para os três sistemas estruturais. Para extrair a quantidade de aço do pavimento de cada modelo estrutural, foram geradas as tabelas de ferros, sendo que através destas foi possível extrair a quantidade de cada tipo de armação utilizada. Na Tabela 1 está detalhada a quantidade total de aço do pavimento para o Sistema A.

Tabela 1 - Peso de aço em quilograma do Sistema Estrutural A.

Sistema Estrutural A	
Planta	Peso de aço (kg)
Armação de Punção	276
Armação Negativa Horizontal	211
Armação Negativa Vertical	193
Armação Positiva Horizontal	199
Armação Positiva Vertical	212
Armação de Cisalhamento	-
Armação total das lajes do pavimento	1091

Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 1 mostrou que a maior quantidade de aço utilizada nas lajes para o sistema A foi a armação positiva vertical. Esse fato pode ser explicado devido a laje estar majoritariamente submetida a momentos fletores positivos. A segunda armação preponderante foi a de punção, mostrando que esse esforço foi relevante para o dimensionamento da laje, comportamento esperado em sistemas estruturais em lajes lisas. A Tabela 2 apresenta as armações necessárias para o sistema estrutural B.

Tabela 2 - Peso de aço em quilograma do Sistema Estrutural B.

Sistema Estrutural B	
Planta	Peso de aço (kg)
Armação de Punção	126

Armação Negativa Horizontal	123
Armação Negativa Vertical	125
Armação Positiva Horizontal	178
Armação Positiva Vertical	186
Armação de Cisalhamento	-
Armação total das lajes do pavimento	738

Fonte: Autoria própria (2023).

É possível observar através da Tabela 2 que as armações positivas horizontais e verticais foram predominantes, uma vez que a maior parte da área da laje está sujeita à flexão positiva. Por fim, a Tabela 03 mostra as armações obtidas para o sistema estrutural C.

Tabela 3 - Peso de aço em quilograma do Sistema Estrutural C.

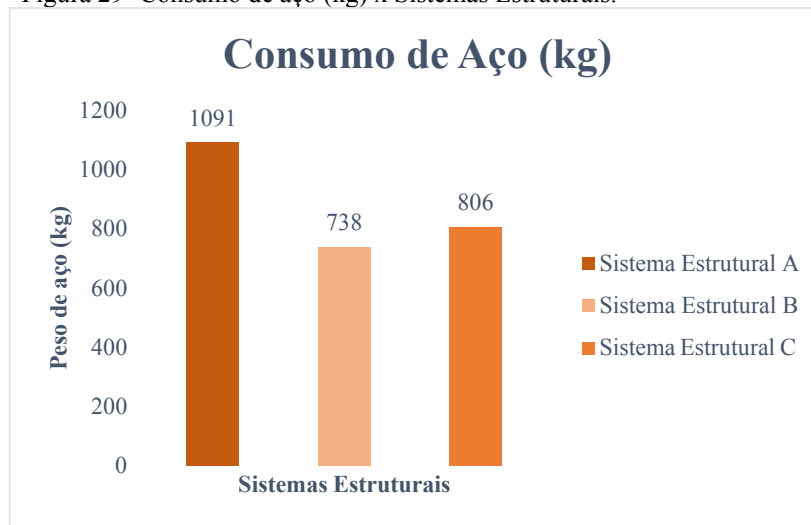
Sistema Estrutural C	
Planta	Peso de aço (kg)
Armação de Punção	-
Armação Negativa Horizontal	159
Armação Negativa Vertical	126
Armação Positiva Horizontal	100
Armação Positiva Vertical	109
Armação de Cisalhamento	-
Armação das vigas	312
Armação total das lajes e vigas do pavimento	806

Fonte: Autoria própria (2023).

O sistema C apresentou uma maior quantidade de armadura nas vigas-faixas, levando em consideração que essas regiões são maciças, possuindo uma maior rigidez. Isso resultou em uma maior concentração de esforços nessas regiões, exigindo uma área de aço superior para resisti-los. Além disso, as armaduras negativas horizontais apresentaram valores significativos, devido à maior concentração de momentos nos apoios.

Além disso, foi desenvolvido um gráfico, representado na Figura 29, para comparar o consumo de aço nos três sistemas estruturais com vão de 4 m.

Figura 29- Consumo de aço (kg) x Sistemas Estruturais.



Fonte: Autoria própria (2023).

Percebeu-se que o sistema estrutural utilizando laje lisa maciça (Sistema A) apresentou maior consumo de aço com relação aos demais sistemas, sendo superior em 47,85% com relação ao sistema B e em 35,36% ao sistema C. Essa superioridade deve-se ao fato de que o peso próprio da laje é alto, desencadeando um aumento dos e, conseqüentemente, necessitando de uma maior quantidade de armação para combatê-los.

Já ao analisar os sistemas B e C o último apresentou aumento em 9,21% em relação a A. Isso deve-se pela região das vigas-faixas possuírem maiores volumes de concreto se comparada aos maciços na região dos apoios do sistema B. Portanto, há um aumento do peso próprio da estrutura, ocasionando maiores esforços, com isso demandando maior área de aço para vencê-los.

4.2 Consumo de concreto

Na Tabela 4 está representado o consumo de concreto das lajes para cada sistema estrutural com vão de 4 m.

Tabela 4 – Consumo de Concreto para os três sistemas estruturais.

Sistema Estrutural	Consumo de Concreto (m ³)
A	11,69
B	9,42
C *	10,01

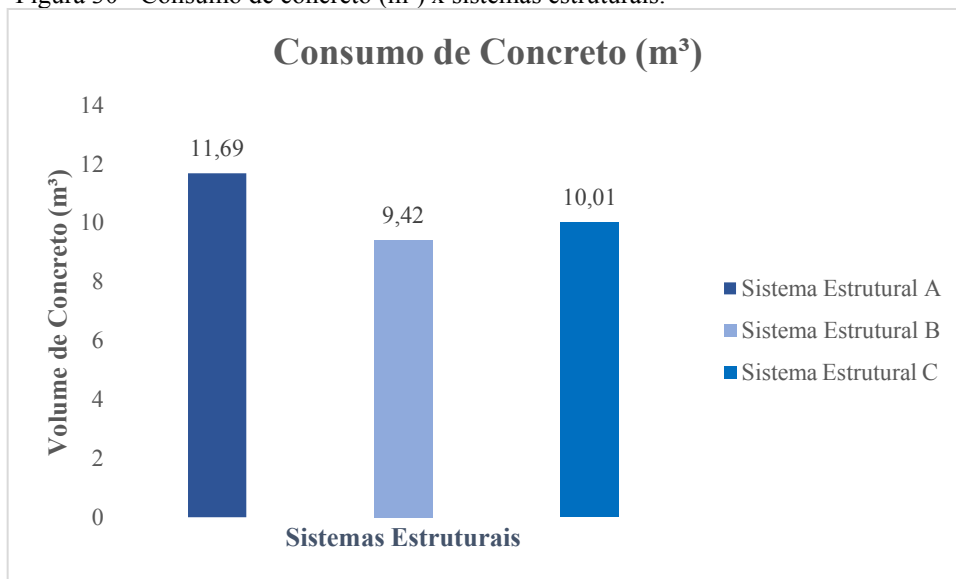
*Foi incluído no sistema C o consumo de concreto das vigas faixa.

Fonte: Autoria própria (2023).

Para os sistemas estruturais estudados foi possível perceber que o sistema em lajes lisas maciças apresentou o maior consumo de concreto, o que era esperado tendo em vista que toda sua espessura é composta por concreto.

O consumo superior de concreto do sistema C com relação ao sistema B, apesar das lajes apresentarem as mesmas espessuras (21 cm), deu-se devido ao fato de o consumo de concreto das vigas-faixas ser maior do que o volume desse material na região maciça dos apoios do sistema B. Quantitativamente essa diferença corresponde a 6,26 %. O consumo de concreto para cada sistema estrutural pode ser verificado na Figura 30.

Figura 30 - Consumo de concreto (m³) x sistemas estruturais.



Fonte: Autoria própria (2023).

Com relação ao sistema B, o sistema A apresentou acréscimo no consumo de concreto cerca de 24,1 %. Ademais, o sistema A foi superior ao sistema C em 16,8 %. A redução do consumo de concreto observada nos sistemas em lajes nervuradas explica-se devido a região de concreto tracionada ter sido substituída por material inerte (fôrmas).

4.3 Esforços devido ao peso próprio

As principais cargas atuantes em uma estrutura são advindas do seu peso próprio, portanto a análise dos esforços devido a estes carregamentos para o presente trabalho possui considerável relevância. Além disso, tem-se que as cargas permanentes devido ao contrapiso e revestimento, bem como a carga accidental, foram consideradas iguais para os três sistemas estruturais, logo, os estudos comparativos foram possíveis de serem realizados devido ao peso

próprio dos sistemas abordados, tendo em vista que foi o único carregamento distinto entre os três tipos estruturais.

A Tabela 5 apresenta os esforços cortantes, momentos fletores máximo positivos e negativos devido ao peso próprio para os três sistemas estruturais com vão de 4 m.

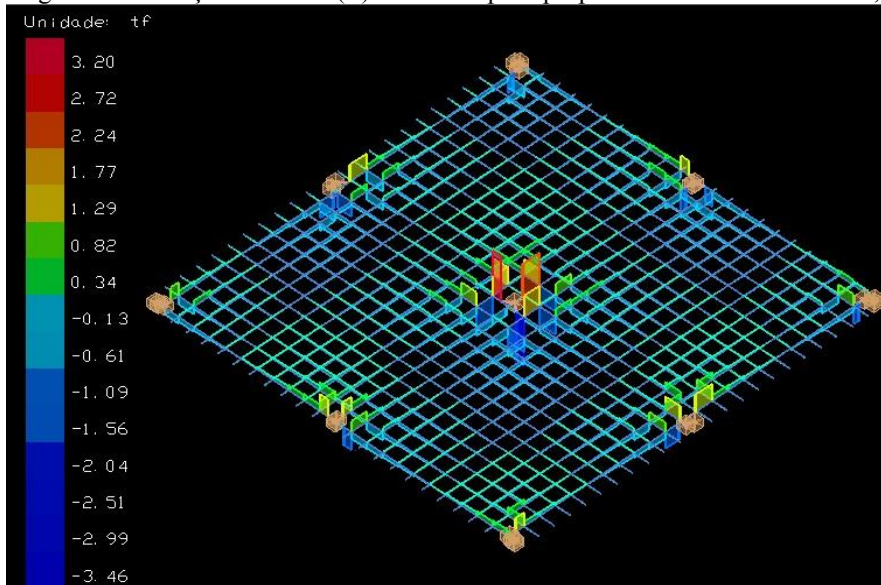
Tabela 5 - Momentos fletores máximos positivos e negativos e esforço cortante máximo devido ao peso próprio para os três sistemas estruturais para a estrutura padrão com vão de 4m.

Sistema Estrutural	Momento fletor máximo positivo (tfm)	Momento fletor máximo negativo (tfm)	Esforço cortante máximo (tf)
A	0,27	0,75	3,20
B	0,28	0,54	2,12
C	0,38	0,91	2,05

Fonte: Autoria própria (2023).

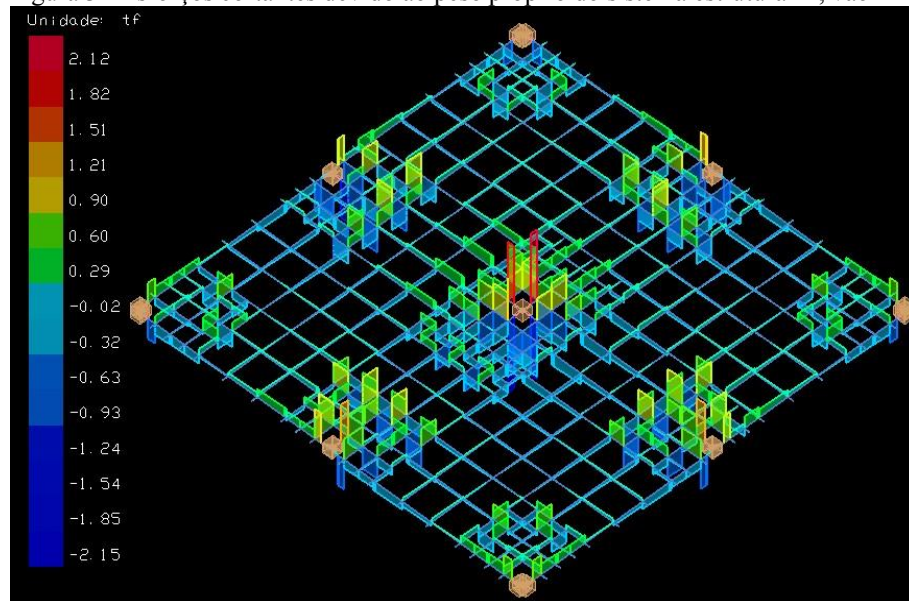
Na Figura 31, Figura 32 e Figura 33 são representados os esforços cortantes máximos e mínimos devido ao peso próprio para os três sistemas estruturais com vãos de 4 m em uma visualização por cores. A magnitude desses esforços nas barras é representada através da variação de cores, onde cada cor está correlacionada a um valor numérico representado em escala.

Figura 31- Esforços cortantes (tf) devido ao peso próprio do sistema estrutural A, vão 4 m.



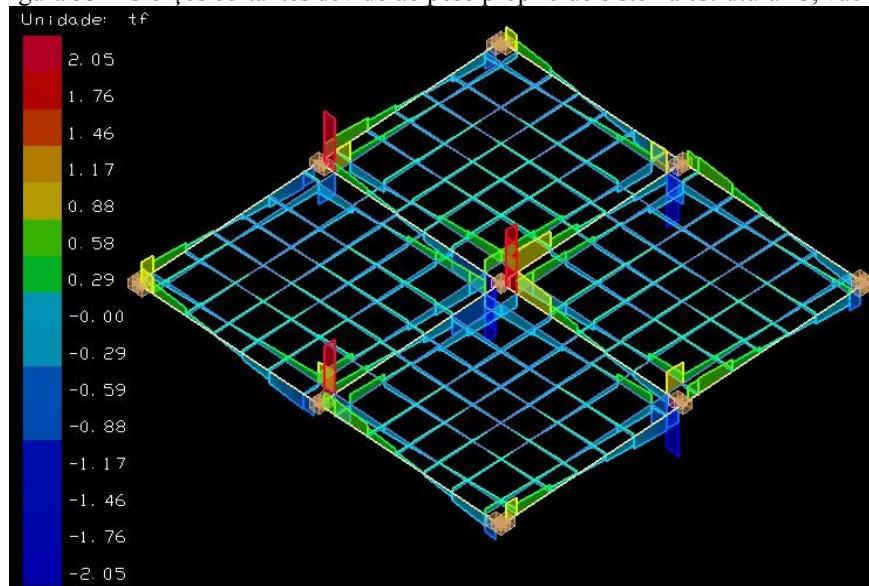
Fonte: TQS (2023).

Figura 32- Esforços cortantes devido ao peso próprio do sistema estrutural B, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Figura 33- Esforços cortantes devido ao peso próprio do sistema estrutural C, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

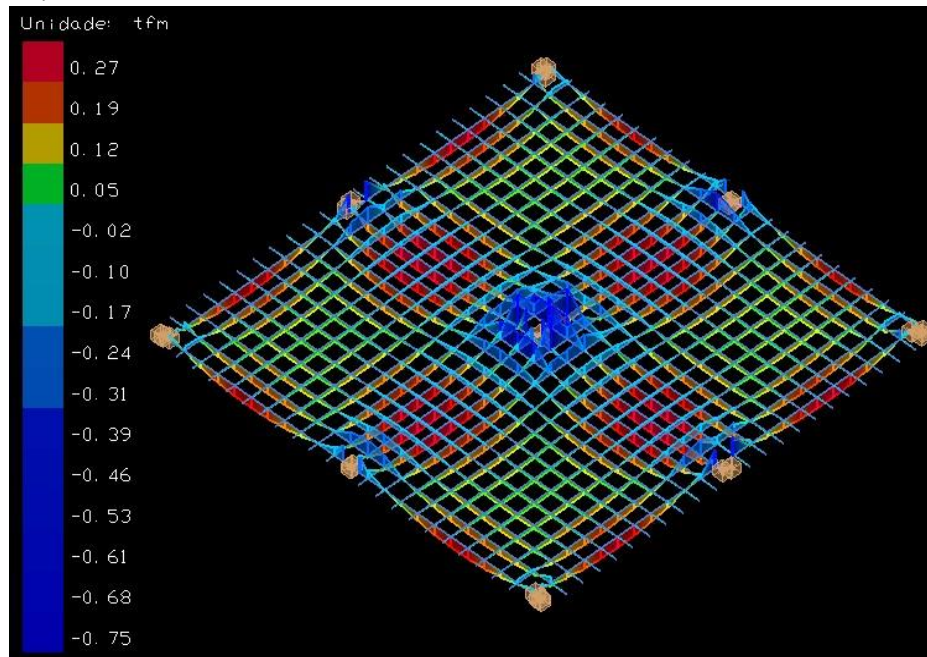
Ao observar as Figuras 31, 32 e 33 foi possível constatar, que para o sistema estrutural A, o esforço cortante máximo ocorreu no apoio 5, o que era esperado tendo em vista que para os sistemas estruturais em lajes lisas há uma concentração de esforços cisalhantes nos apoios devido à ligação direta laje-pilar. No sistema B, o esforço cortante máximo também ocorreu no apoio 5, enquanto no sistema C os cortantes máximos deram-se nos apoios 2, 4 e 5.

Ademais, notou-se uma menor concentração de esforços cortantes na laje lisa maciça, devido à sua continuidade, o que requer uma seção menor para resistir aos esforços

cortantes. Já para no sistema B, devido à falta de continuidade na laje, os esforços são mais densos, exigindo seções maiores para resisti-los. No caso do sistema C, devido à presença de vigas-faixas, os esforços são ainda menos concentrados.

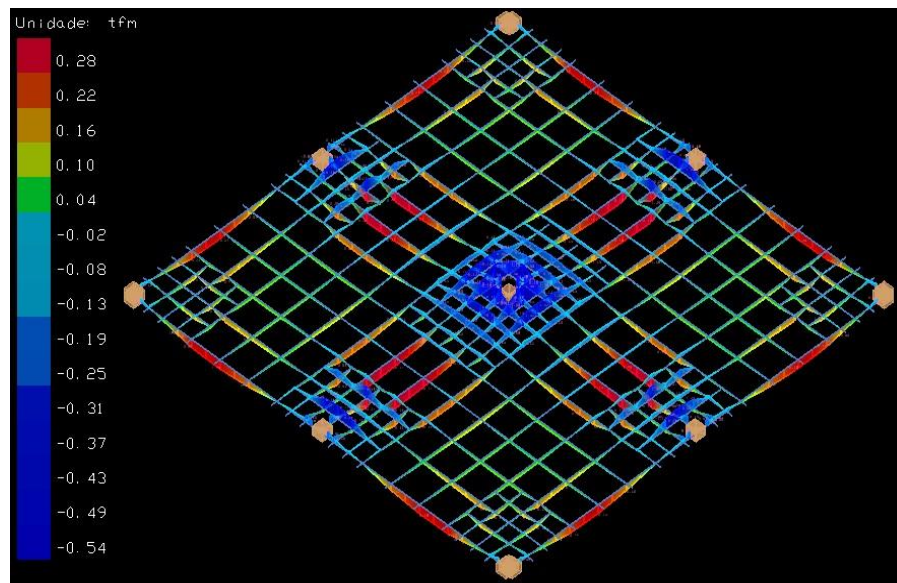
Os momentos fletores máximos positivos e negativos devido ao peso próprio para cada sistema estrutural com o vão de 4 m estão representados nas Figuras 34, 35 e 36.

Figura 34 - Momentos fletores máximo e mínimo devido ao peso próprio do sistema estrutural A, vão 4 m.



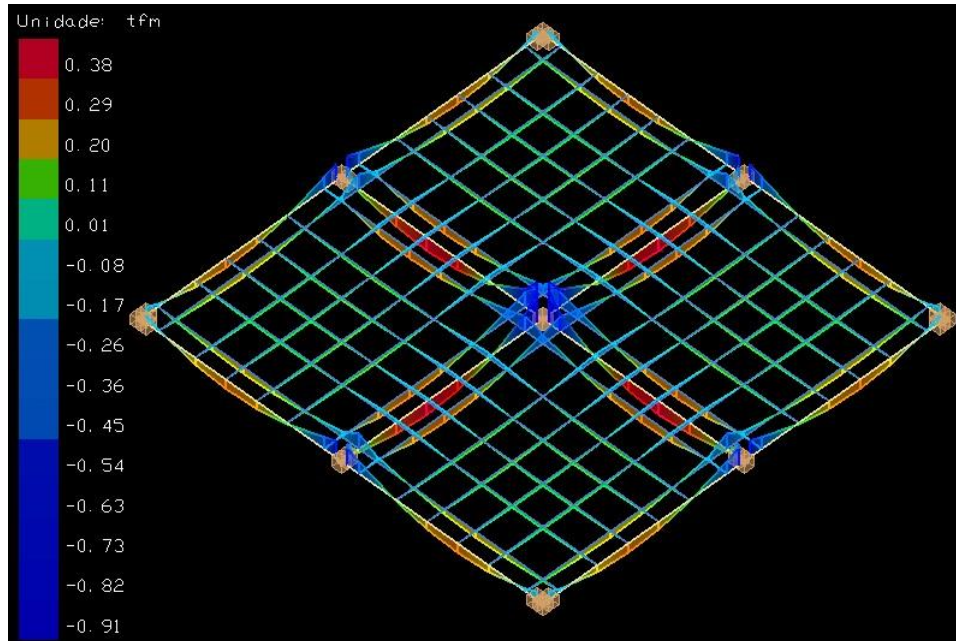
Fonte: TQS (2023).

Figura 35 - Momentos fletores máximo e mínimo devido ao peso próprio do sistema estrutural B, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Figura 36 - Momentos fletores máximo e mínimo devido ao peso próprio do sistema estrutural C, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Através das Figuras 34, 35 e 36, foi possível observar que os momentos máximos negativos ocorreram nos apoios para os três sistemas estruturais, portanto os resultados são condizentes com a realidade, tendo em vista que, na prática, os momentos fletores nos apoios são negativos. Além disso, o momento fletor máximo negativo do sistema estrutural C foi 68,51 % superior ao do sistema B. Ao comparar os sistemas A e C, o segundo apresentou momento fletor máximo negativo cerca de 21,35 % maior, enquanto o sistema A teve uma superioridade em relação ao sistema B de 38,88%.

Notou-se que os momentos fletores positivos foram maiores no meios dos vãos da laje para os sistemas A e B, enquanto para o sistema C, os momentos máximos positivos ocorreram na região das vigas-faixas.

Outrossim, identificou-se que o sistema estrutural C apresentou um momento fletor máximo positivo cerca de 40,74 % superior ao sistema A. Esse fato pode ser explicado pela região das vigas-faixas ser maciça e de espessura superior à laje do sistema A, que possui uma espessura de 17 cm, enquanto a do sistema C tem 21 cm. Portanto, nessa região, o peso próprio da estrutura é maior, ampliando os esforços aos quais está submetida.

Ao avaliar os sistemas A e B, o sistema B apresentou momento fletor máximo positivo superior em 3,7%. Essa superioridade pode ser atribuída à altura das lajes, sendo que laje do sistema B tem uma altura de 21 cm, enquanto a do sistema A tem uma altura de 17 cm, aumentando o peso próprio do sistema B. Além disso, a região maciça no entorno dos pilares

também pode ter influenciado nesse resultado. Já ao comparar os sistemas B e C, o último apresentou um momento fletor máximo positivo superior em 35,71%. Isso pode ser explicado pelo fato de o sistema C ter uma maior região maciça.

4.4 Esforços no estado limite último

Para uma melhor visualização dos esforços máximos para cada sistema estrutural no Estado Limite Último (ELU) para o vão de 4 m foi desenvolvida a Tabela 6.

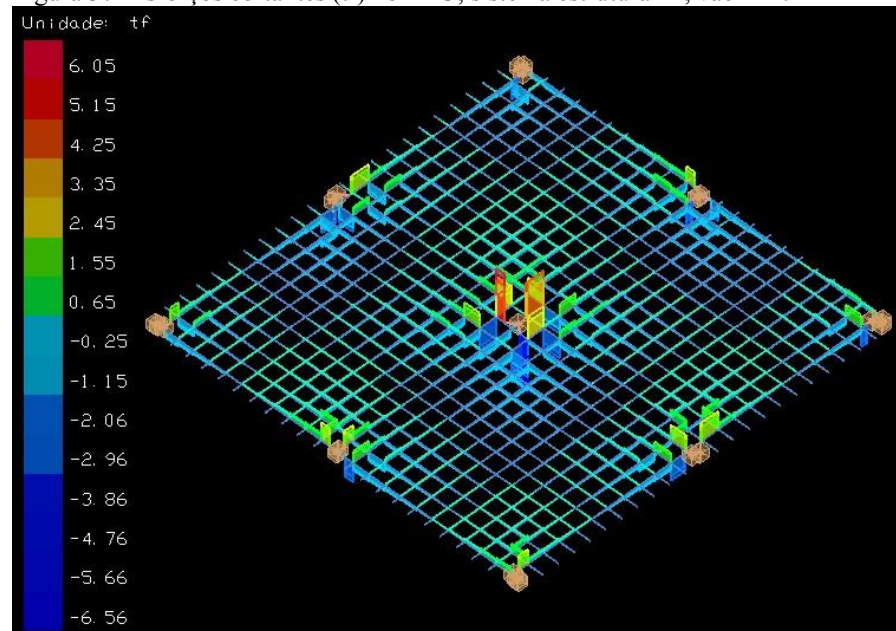
Tabela 6 - Momentos fletores máximos positivos e negativos (tfm) e esforço cortante máximo (tf) devido ao peso próprio para os três sistemas estruturais, para o vão de 4 m.

Sistema Estrutural	Momento fletor máximo positivo (tfm)	Momento fletor máximo negativo (tfm)	Esforço cortante máximo (tf)
A	0,50	1,42	6,05
B	0,64	1,23	2,12
C	0,80	1,84	4,00

Fonte: Autoria própria (2023).

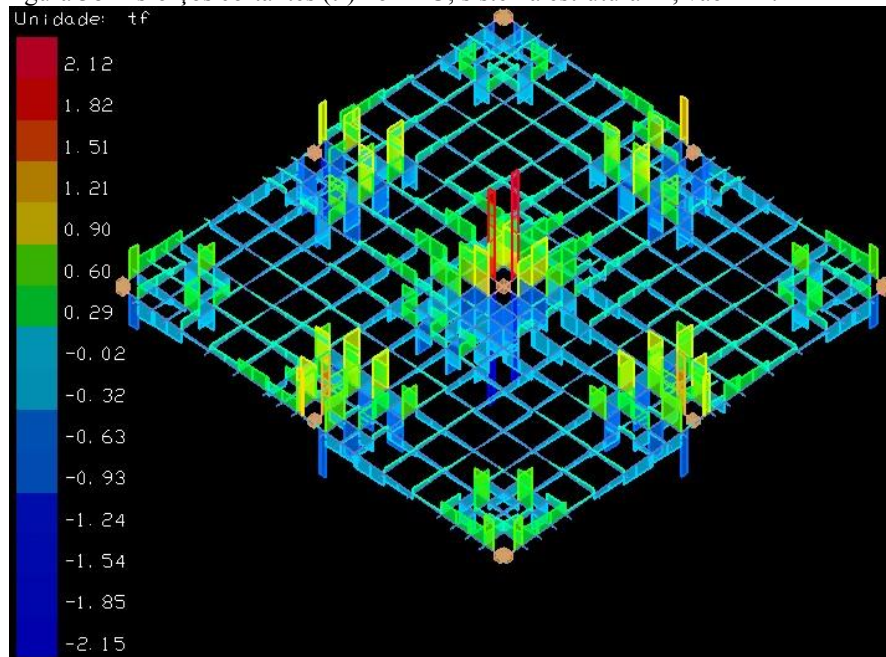
As Figura 37, 38 e 39 representam os esforços cortantes no ELU de cada sistema estrutural para o vão de 4 m.

Figura 37- Esforços cortantes (tf) no ELU, sistema estrutural A, vão 4 m.



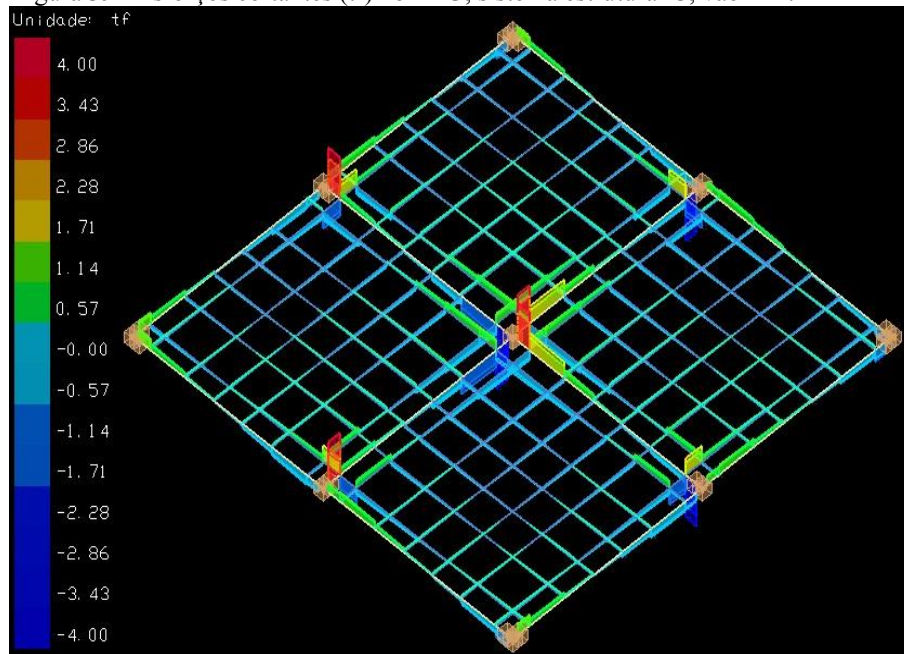
Fonte: TQS (2023).

Figura 38- Esforços cortantes (tf) no ELU, sistema estrutural B, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Figura 39 - Esforços cortantes (tf) no ELU, sistema estrutural C, vão 4 m.



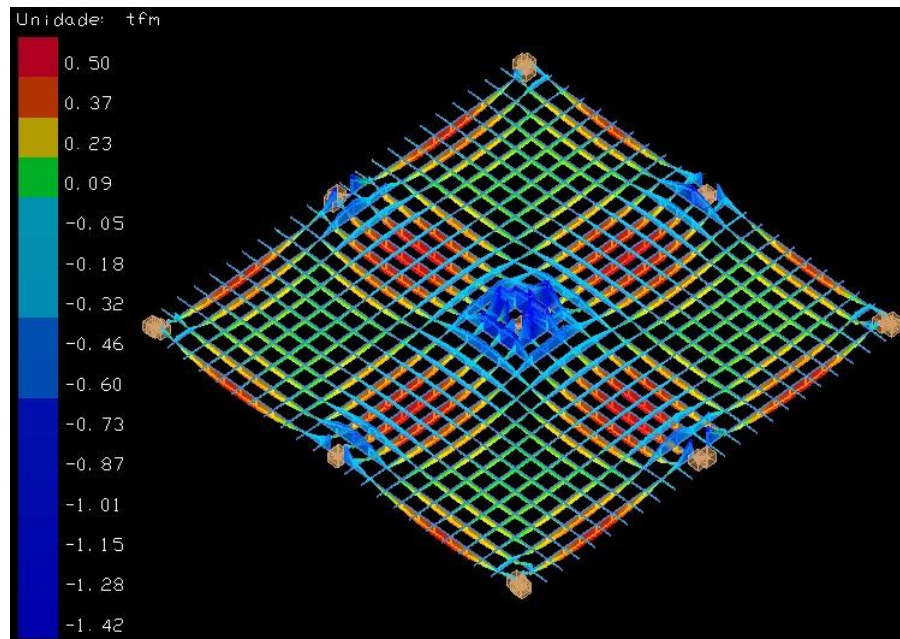
Fonte: TQS (2023).

Ao analisar as Figuras 37, 38 e 39 foi possível observar que, para os sistemas A e B, os esforços cortantes máximos ocorreram no apoio 5, enquanto para o sistema estrutural C, os maiores cortantes ocorreram nos apoios 2, 4 e 5. Conforme explicado anteriormente, os esforços concentram-se mais na laje lisa nervurada sem viga-faixa, seguido pela laje lisa maciça, e o sistema que apresentou menores concentrações de esforços cortantes foi o de laje

lisa nervurada com viga-faixa, pelo mesmo motivo explicado no tópico de esforços devido ao peso próprio.

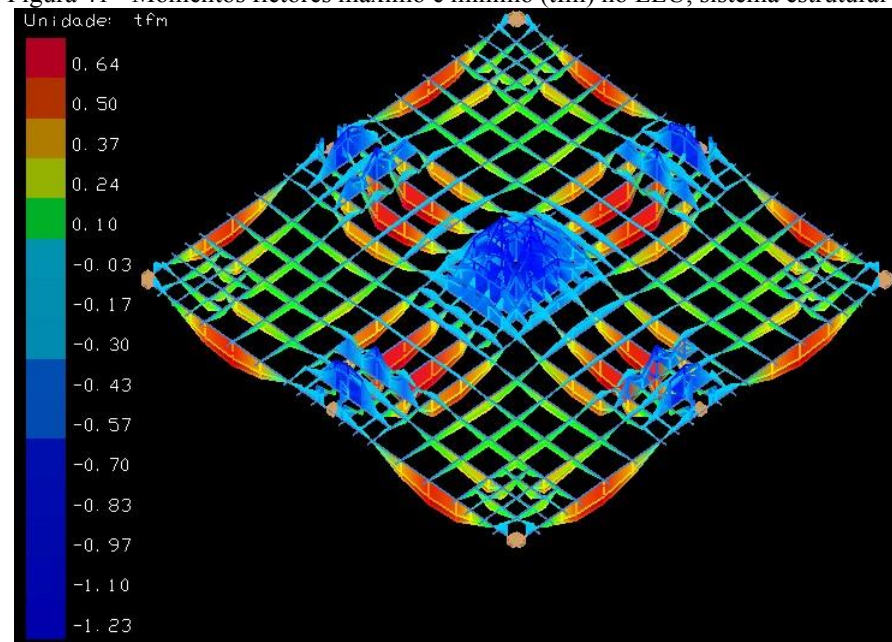
Os momentos máximos positivos e negativos no ELU estão representados nas Figuras 40, 41 e 42.

Figura 40 - Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELU sistema estrutural A, vão 4 m.



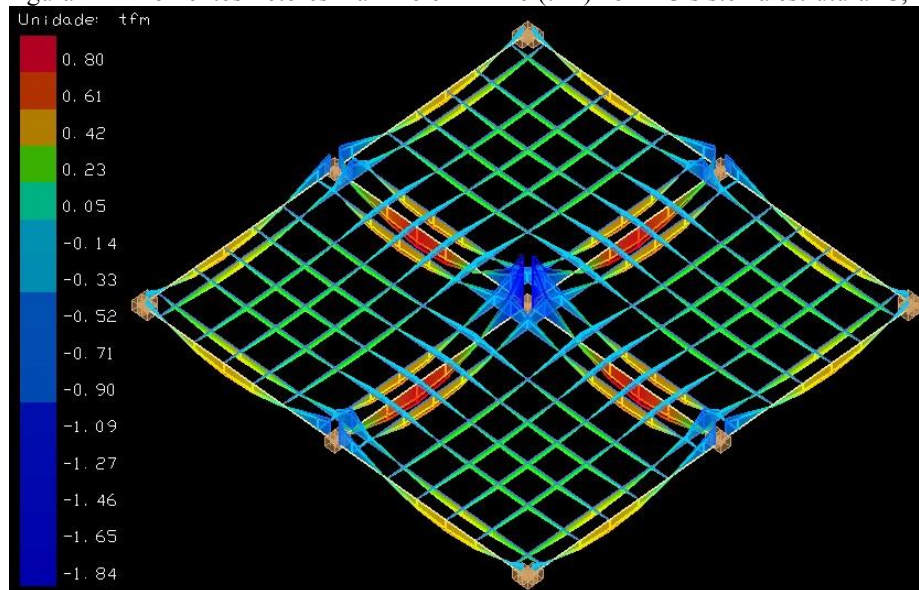
Fonte: TQS (2023).

Figura 41 - Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELU, sistema estrutural B, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Figura 42 - Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELU sistema estrutural C, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Ao observar as Figuras 40, 41 e 42, notou-se que os momentos fletores máximos negativos ocorreram nos apoios para os três modelos estudados, principalmente no apoio central, devido à sua maior área de influência. Portanto, é nesse apoio que grande parte dos carregamentos atuantes na área da laje são apoiados. Além disso, o sistema C apresentou momentos fletores máximos negativos superiores aos demais sistemas, sendo 49,6 % superior ao sistema B e 29,6 % mais elevado que o do sistema A. Ademais, o sistema A possui um momento superior de 15,44% em relação ao B.

Os momentos fletores positivos para os sistemas A e B ocorreram no meio do vão da laje, enquanto no sistema C esses carregamentos ocorreram na região das vigas-faixas. Ao comparar os sistemas A e B, percebeu-se que o segundo sistema apresentou um momento fletor máximo positivo 28% maior que o sistema A. Já ao analisar os sistemas B e C, o segundo apontou momento fletor máximo positivo cerca de 25 % superior ao do sistema B. Ao comparar o sistema A com o C, verificou-se que o segundo apresentou momento superior em 60% com relação ao sistema A.

4.5 Esforços no estado limitem de serviço

A Tabela 7 mostra os esforços no ELS para os três sistemas estruturais estudados com vãos de 4m.

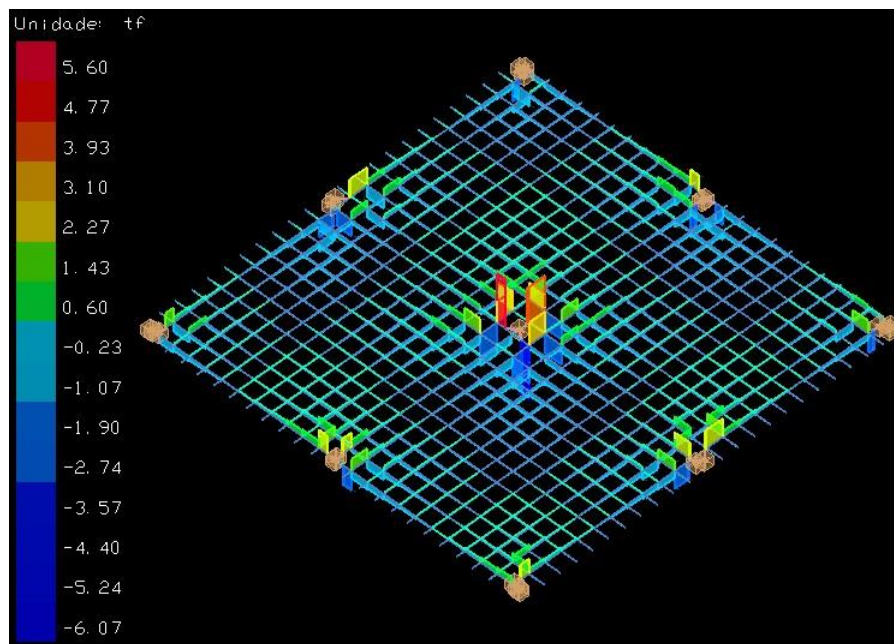
Tabela 7 - Momentos fletores máximos positivos e negativos e esforço cortante máximo no ELS para os três sistemas estruturais.

Sistema Estrutural	Momento fletor máximo positivo (tfm)	Momento fletor máximo negativo (tfm)	Esforço cortante máximo (tf)
A	0,47	1,31	5,6
B	0,58	1,12	4,25
C	0,73	1,69	3,69

Fonte: Autoria própria (2023).

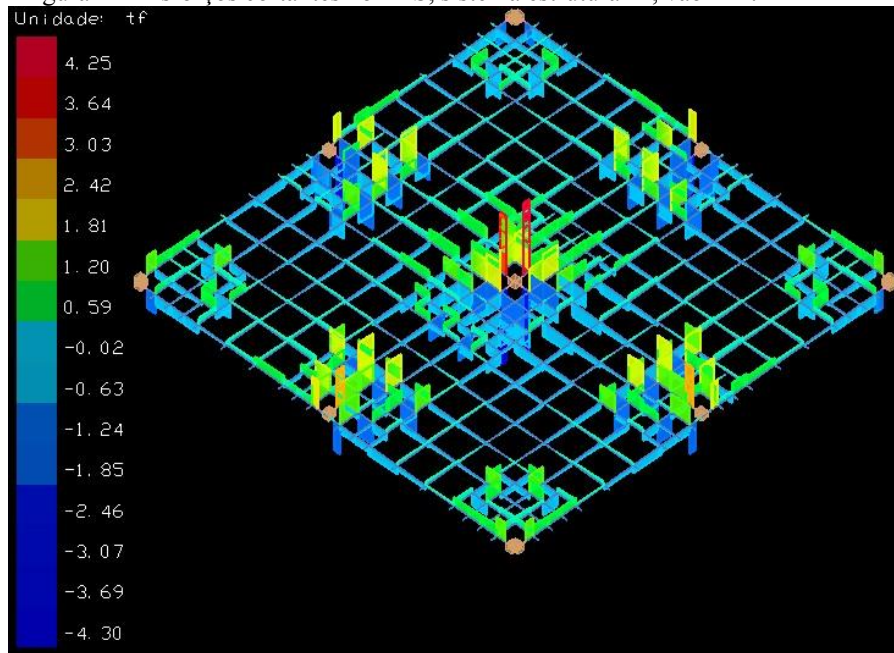
As Figuras 43, 44 e 45 representam os esforços cortantes no ELS de cada sistema estrutural para o vão de 4m.

Figura 43 - Esforços cortantes no ELS, sistema estrutural A, vão 4 m no ELS sistema estrutural A, vão 4 m.



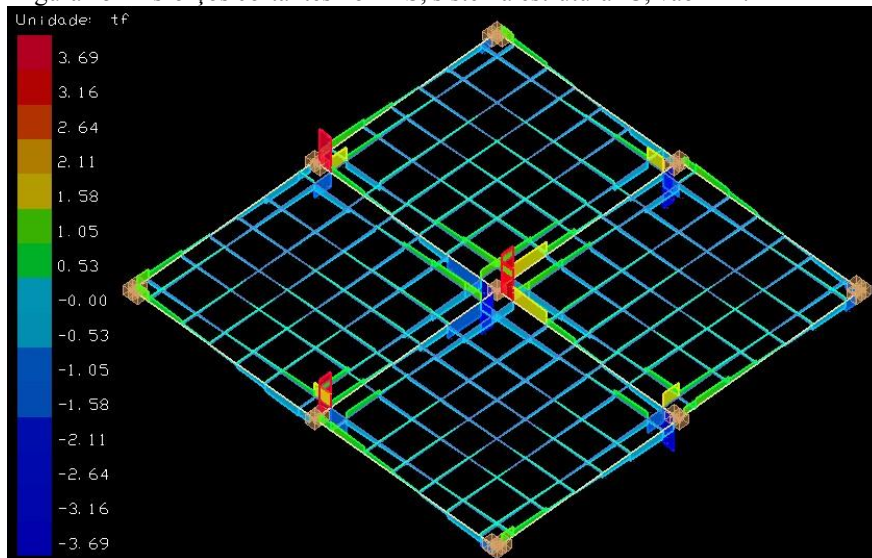
Fonte: TQS (2023).

Figura 44 - Esforços cortantes no ELS, sistema estrutural B, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Figura 45 - Esforços cortantes no ELS, sistema estrutural C, vão 4 m.



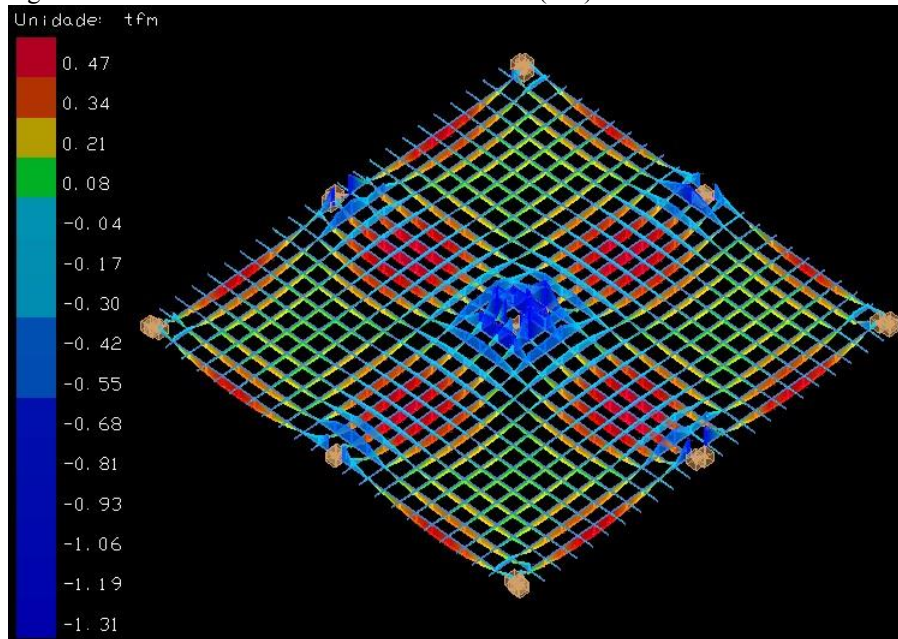
Fonte: TQS (2023).

Observou-se nas Figuras 43, 44 e 45 que os esforços cortantes máximos ocorreram no apoio central para os sistemas estruturais A e B, enquanto no sistema C, os maiores esforços foram registrados nos apoios 2, 4 e 5. Ficou evidente nas Figuras 43, 44 e 45, que houve uma menor concentração de esforços cortantes na laje lisa maciça, devido à necessidade de uma menor seção para resistir a esses esforços. No caso do sistema B, onde a laje não apresenta continuidade, os esforços são mais concentrados nas regiões dos pilares, o que requer seções maiores para resistir aos esforços cortantes. Por outro lado, o sistema C, por apresentar vigas-

faixas, distribui os esforços de forma mais uniforme, resultando em uma menor concentração dos mesmos.

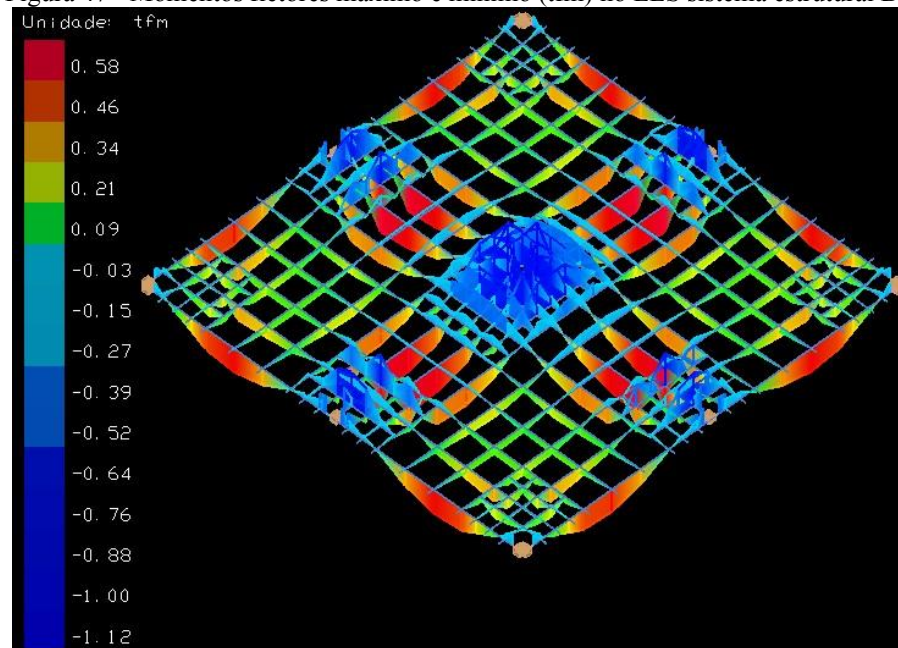
Os momentos fletores máximos e mínimos no ELS de cada sistema estrutural para o vão de 4 m estão representados nas Figuras 46, 47 e 48.

Figura 46 - Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELS sistema estrutural A, vão 4 m.



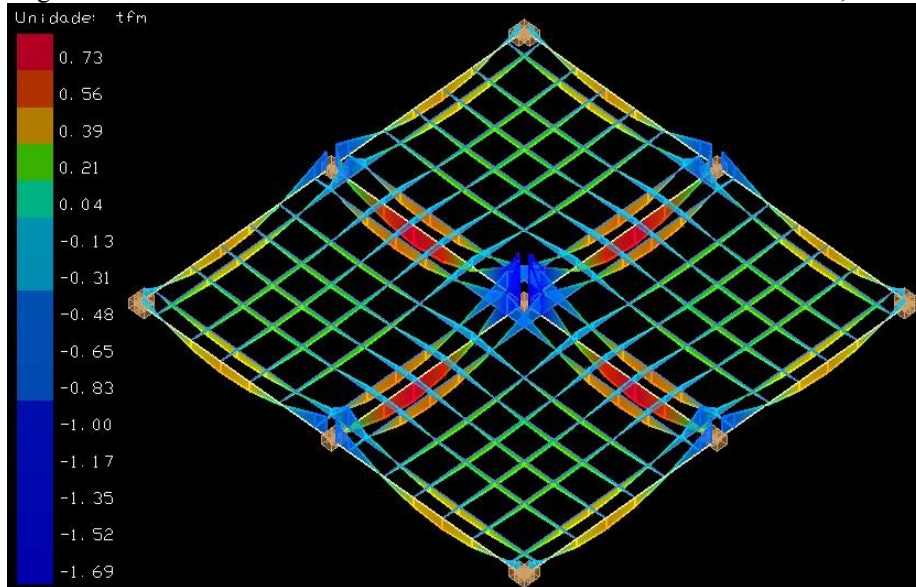
Fonte: TQS (2023).

Figura 47 - Momentos fletores máximo e mínimo (tfm) no ELS sistema estrutural B, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Figura 48- Momentos fletores máximo e mínimo no ELS sistema estrutural C, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Ao analisar as Figuras 46, 47 e 48, observou-se que os momentos fletores máximos negativos ocorreram nos apoios para os três modelos estudados, principalmente no apoio central, em decorrência da sua maior área de influência. O momento fletor máximo negativo do sistema C é aproximadamente 51% superior ao do sistema B e 29% ao do sistema A. Comparando os sistemas A e B, o primeiro foi superior em cerca de 16,96% em relação ao B.

Os momentos fletores positivos para os sistemas A e B ocorreram no meio do vão da laje, enquanto no sistema C esses carregamentos ocorreram na região das vigas-faixas. Ao comparar os sistemas A e B, o segundo apresentou um momento máximo positivo cerca de 23,5% maior que o sistema A. Ao comparar os sistemas B e C notou-se um aumento de aproximadamente 26% do sistema C em relação ao sistema B. Por fim, o sistema C foi aproximadamente 55,32% superior em comparação ao sistema A.

4.6 Deslocamentos no ELS

Através da Tabela 8 é possível observar os deslocamentos obtidos no ELS para os três sistemas estruturais adotados com vão de 4m.

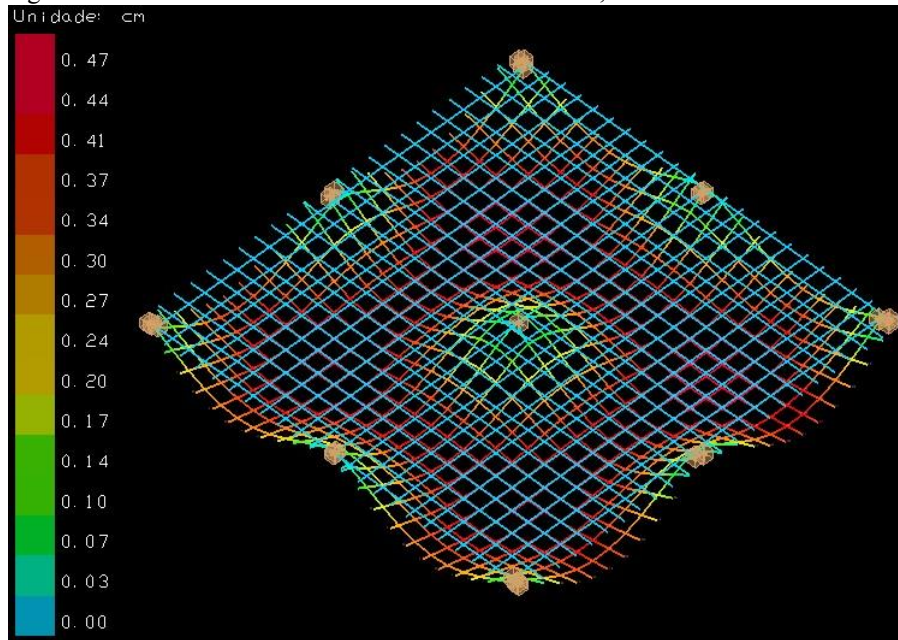
Tabela 8 - Deslocamentos máximos para cada sistema estrutural no ELS.

Sistema Estrutural	Deslocamento no ELS (cm)
A	0,47
B	0,46
C	0,32

Fonte: Autoria própria (2023).

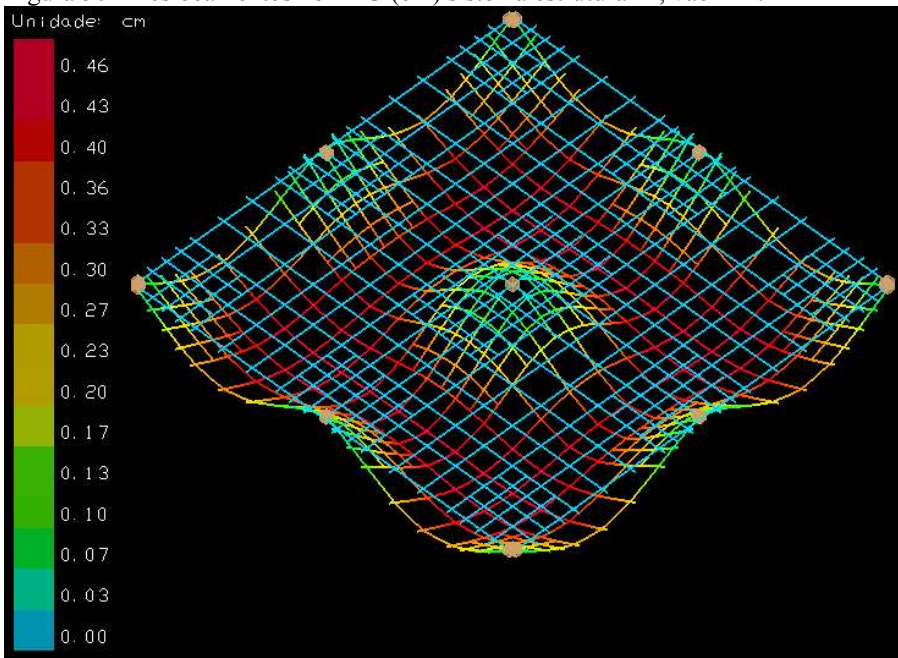
A Figura 49 representa os deslocamentos para o sistema A, a Figura 50 para o sistema B e a Figura 51 para o sistema C possuindo vãos de 4m.

Figura 49 - Deslocamentos no ELS sistema estrutural A, vão 4 m.



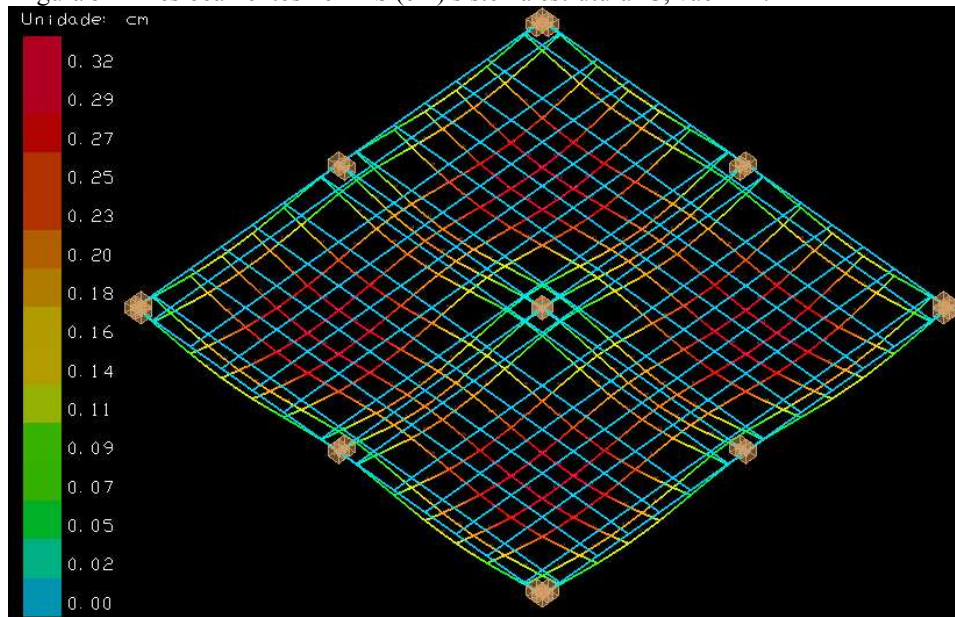
Fonte: TQS (2023).

Figura 50 - Deslocamentos no ELU (cm) sistema estrutural B, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

Figura 51 - Deslocamentos no ELS (cm) sistema estrutural C, vão 4 m.



Fonte: TQS (2023).

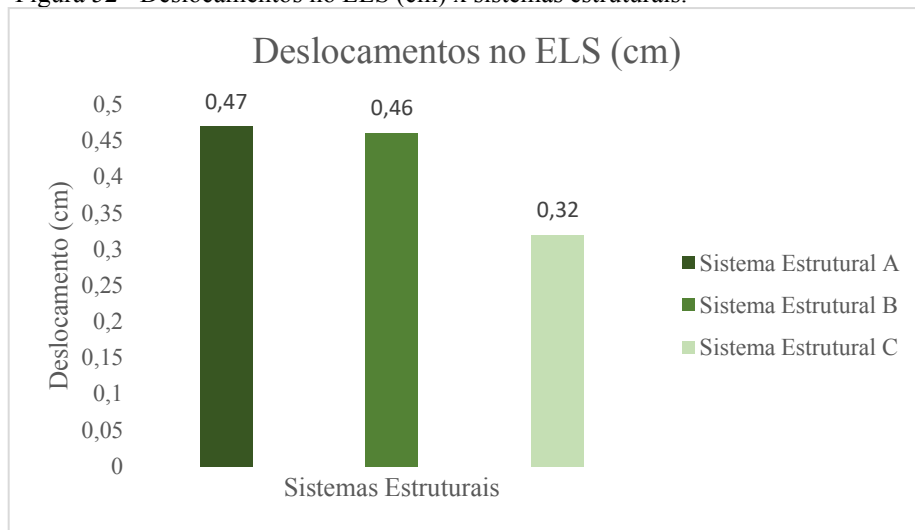
Ao explorar as Figuras 49, 50 e 51 e a Tabela 8, notou-se que o maior deslocamento ocorreu no sistema estrutural A, variando de 0 cm até 0,47 cm. O sistema B apresentou o segundo maior deslocamento, variando de 0 cm a 0,46 cm. Já a estrutura do sistema C apresentou o menor deslocamento, com variação entre 0 cm e 0,32 cm.

Apesar das lajes maciças em geral apresentarem maior rigidez e, portanto, menores deslocamentos, a laje lisa maciça do presente estudo apresentou maiores deslocamentos. Isso se justifica pelo fato de sua altura ser inferior às demais, reduzindo o momento de inércia e aumentando os deslocamentos.

Ao realizar uma analogia entre os sistemas estruturais B e C, foi possível notar que o sistema C apresentou menores deslocamentos, cerca de 43,75 % inferior ao deslocamento em B. Esse comportamento ocorreu devido ao sistema C apresentar vigas-faixas, que conferem maior rigidez à estrutura e, conseqüentemente, reduzem os deslocamentos.

Já o sistema A apresentou um acréscimo no deslocamento de 46,87% em relação ao sistema C. Ao comparar os sistemas A e B, o primeiro apresentou um aumento de 2,17%. O gráfico da Figura 52 ilustra de forma clara a comparação entre os deslocamentos no ELS para os três sistemas estruturais.

Figura 52 - Deslocamentos no ELS (cm) x sistemas estruturais.



Fonte: Autoria própria (2023).

De modo geral, os resultados obtidos revelaram que, em termos de economia de material, o sistema B foi o mais vantajoso, uma vez que o consumo de aço e concreto foi inferior em comparação aos demais. Ao analisar todos os esforços aos quais a estrutura foi submetida, constatou-se que o sistema A apresentou menores valores de momento fletor positivo, indicando um melhor desempenho estrutural para as lajes lisas maciças. Em relação aos momentos fletores negativos, o sistema B demonstrou menores valores, evidenciando um desempenho estrutural superior. Outro parâmetro importante são os deslocamentos, nos quais o sistema C apresentou valores menores. Isso indica que, em comparação com os demais sistemas, a estrutura em laje lisa nervurada com vigas-faixas possui maior rigidez, justificando sua superioridade nos momentos fletores positivos.

5 ESTUDO PARAMÉTRICO

Nesta seção, foi realizada a variação das dimensões do vãos das lajes, com valores de 3m, 4m, 5m, 6m, 7m e 8m, para o três sistemas estruturais abordados, a fim de analisar a influência dessa variação no consumo de concreto e aço, bem como nos esforços devido ao peso próprio, esforços no ELS e ELU e deslocamento no ELS.

É importante ressaltar que, para realizar este estudo, não foi fixado um parâmetro da seção da laje, considerando a possibilidade de dimensionamento das lajes pelo software TQS, o que exigiu o aumento da espessura da laje à medida que o vão foi ampliado.

Além disso, para o lançamento das estruturas, assim como para a estrutura padrão de 4 m, foram utilizadas as fôrmas da empresa Impacto, e os mesmos carregamentos para as lajes descritos na metodologia do presente trabalho foram considerados.

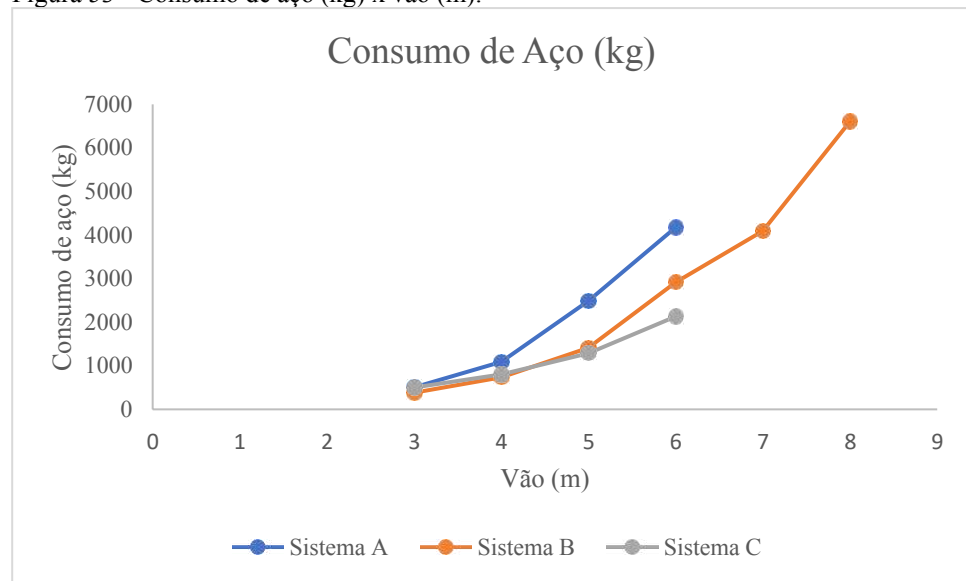
É válido elucidar que não foi possível analisar os parâmetros estudados para os vãos superiores a 6 m para os sistemas A e C. No caso do sistema A, essa limitação ocorreu devido à necessidade de alturas elevadas para dimensionar a laje à flexão no software TQS. Já no sistema C, essa restrição ocorreu devido à necessidade de uma altura superior às alturas disponibilizadas pelas fôrmas da empresa Impacto. Para a estrutura B, foi possível prosseguir com o estudo até o vão de 8 m, porém acima desse valor seria necessário utilizar fôrmas maiores que as disponíveis.

Após o lançamento das estruturas no software TQS, foram extraídos os resultados de consumo de concreto e aço, bem como esforços e deslocamentos para todos os sistemas estruturais com vãos variados. A seguir, serão apresentadas as análises dos parâmetros estudados.

5.1 Análise do consumo de aço

A variação do consumo de aço para os sistemas estruturais abordados quando os vãos são variados está representada na Figura 53.

Figura 53 - Consumo de aço (kg) x vão (m).

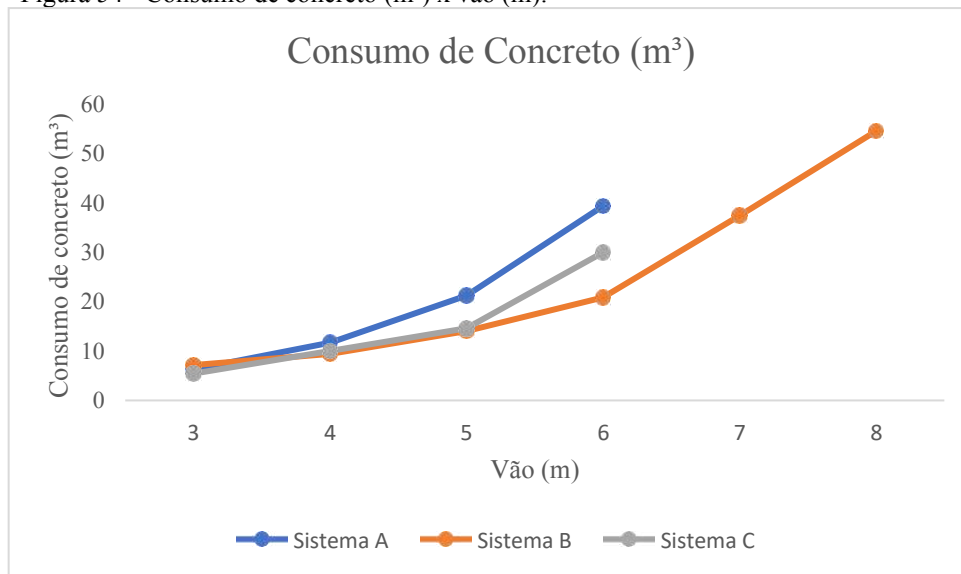


Fonte: Autoria própria (2023).

A análise da Figura 53 revela que, para os menores vãos (3 m e 4 m), o consumo de aço foi semelhante nos três sistemas estruturais. No entanto, à medida que os vãos foram ampliados, o consumo de aço no sistema A tornou-se consideravelmente superior aos demais sistemas. Por exemplo, para o vão de 4 m, o consumo de aço do sistema A é cerca de 47,83% maior do que no sistema B e 35,36 % maior do que no sistema C. Já para o vão de 5 m, o consumo no sistema A é aproximadamente 75,8% maior do que no sistema B e 93,00% maior do que no sistema C. Para o vão de 6 m, o peso de aço para no sistema A é 43,04% maior do que no sistema B e 95,87% maior do que no sistema C.

5.2 Análise do consumo de concreto

A Figura 54 apresenta o consumo de concreto para cada sistema estrutural quando os vão são variados de 3 m a 6 m para os sistemas A e C e de 3 m a 8 m para o sistema B.

Figura 54 - Consumo de concreto (m³) x vão (m).

Fonte: Autoria própria (2023).

Observou-se que para o vão de 3 m, o consumo de concreto foi bastante semelhante nos três sistemas, porém o sistema B apresentou um consumo maior desse material. Isso se deve ao fato de que, ao lançar as cubetas, não foi possível distribuí-las em toda a dimensão da laje, levando o software a considerar as regiões não ocupadas pelas fôrmas como regiões maciças.

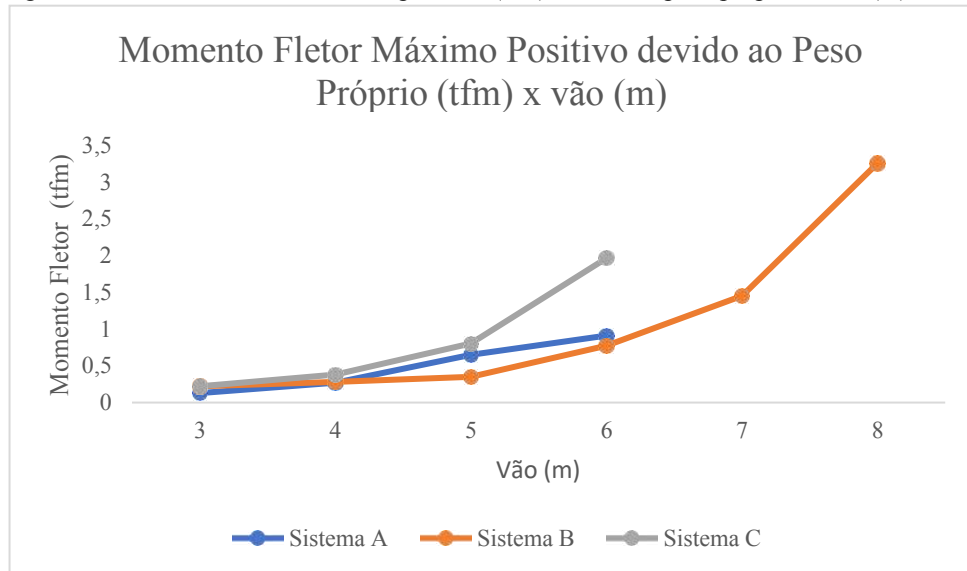
Ademais, para os outros vãos, sistema em laje lisa maciça apresentou consumos superiores aos sistemas B e C, o que era esperado, já que para laje maciça toda sua espessura é preenchida por concreto. Um outro ponto a ser considerado é que para vãos maiores, a partir de 4 m, o consumo de concreto do sistema A tornou-se consideravelmente superior ao consumo dos demais sistemas. Isso fica evidente nos vãos de 5 m e 6 m, nos quais o consumo de concreto do sistema A foi superior ao do sistema B em aproximadamente 51,53% e ao do sistema C em 45,61%, para o vão de 5 m. Já para o vão de 6 m, o consumo de concreto do sistema A foi cerca de 88,97% maior do que o do sistema B e 31,37% maior do que o do sistema C.

Adicionalmente, é importante mencionar que para vãos menores o consumo de concreto dos sistemas B e C é bastante semelhante. No entanto, para o vão de 6 m, o consumo de concreto da laje lisa nervurada com viga-faixa é 43,84% superior ao do sistema B, devido ao fato do sistema C possuir regiões maciças maiores e a alturas das lajes serem distintas para os dois sistemas.

5.3 Análise dos momentos fletores

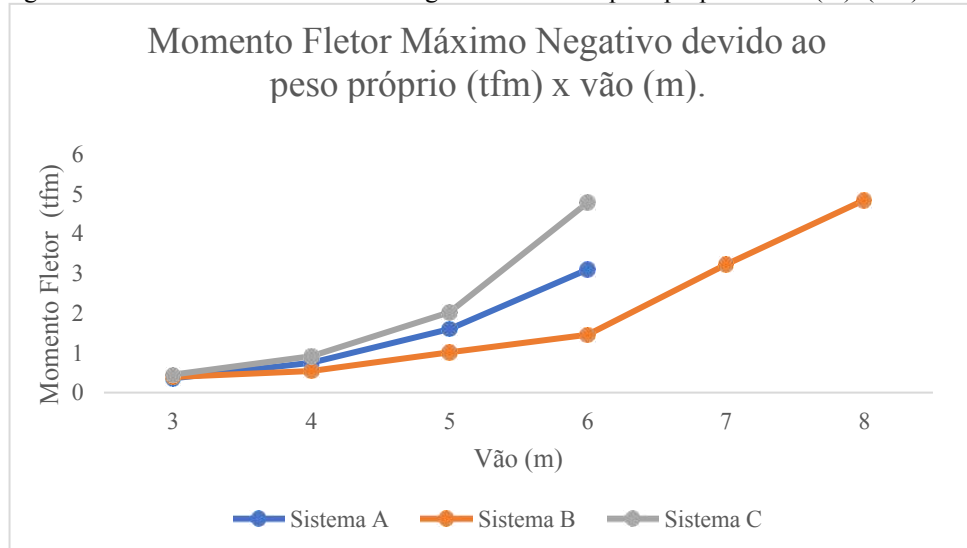
Para analisar o comportamento dos momentos fletores máximo positivo e máximo negativo, foram desenvolvidos os gráficos presentes nas Figuras 55 e 56, considerando os esforços devido ao peso próprio, ELU e ELS, todos os esforços foram localizados no meio do vão das lajes.

Figura 55 – Momento fletor máximo positivo (tfm) devido ao peso próprio x vão (m).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 56 – Momento fletor máximo negativo devido ao peso próprio x vão (m). (tfm)



Fonte: Autoria própria (2023).

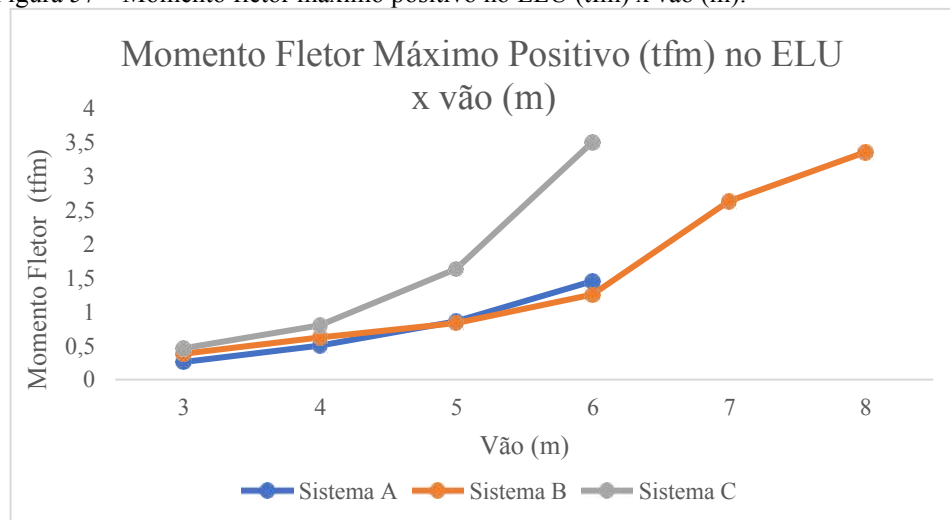
Observando a Figura 55, é possível notar que os momentos fletores máximos positivos devido ao peso próprio foram superiores no sistema estrutural C. Essa diferença se torna mais evidente a partir do vão de 5 m, onde se observou uma superioridade de 23,07% em

relação ao sistema A e 28,57% em relação ao sistema B. É importante destacar que os momentos positivos máximos ocorreram na região das vigas-faixas. À medida que o vão da laje aumenta, é necessário elevar a altura, o que resulta em um aumento no peso próprio e, conseqüentemente, nos esforços.

Já em relação aos momentos fletores máximos negativos (Figura 56), estes se comportaram de maneira semelhante, apresentando valores aproximados para os três sistemas em vãos menores. No entanto, para vãos maiores, o sistema estrutural C apresentou considerável aumento em relação aos demais sistemas.

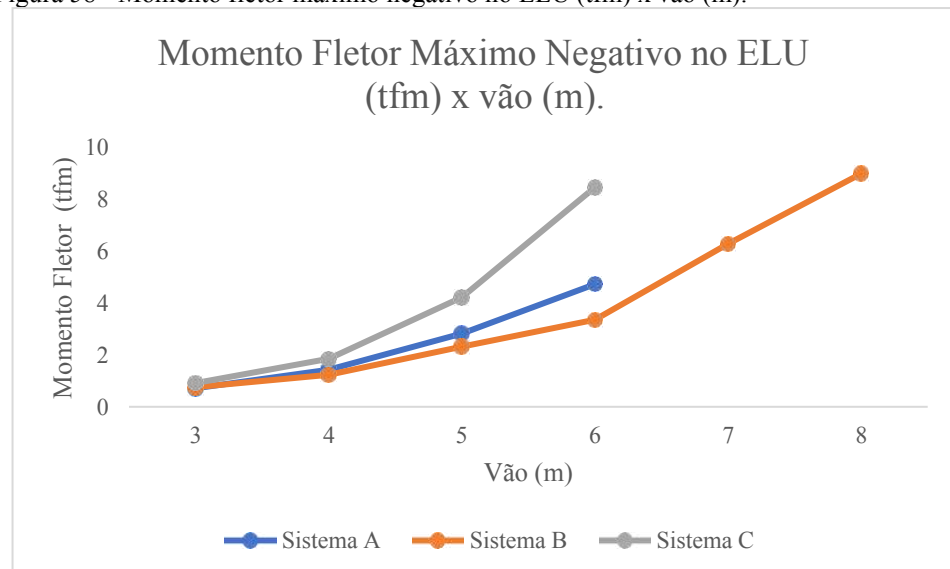
O comportamento dos esforços no ELU quando os vãos são variados para cada sistema estrutural podem ser observados nas Figuras 57 e 58.

Figura 57 – Momento fletor máximo positivo no ELU (tfm) x vão (m).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 58 - Momento fletor máximo negativo no ELU (tfm) x vão (m).

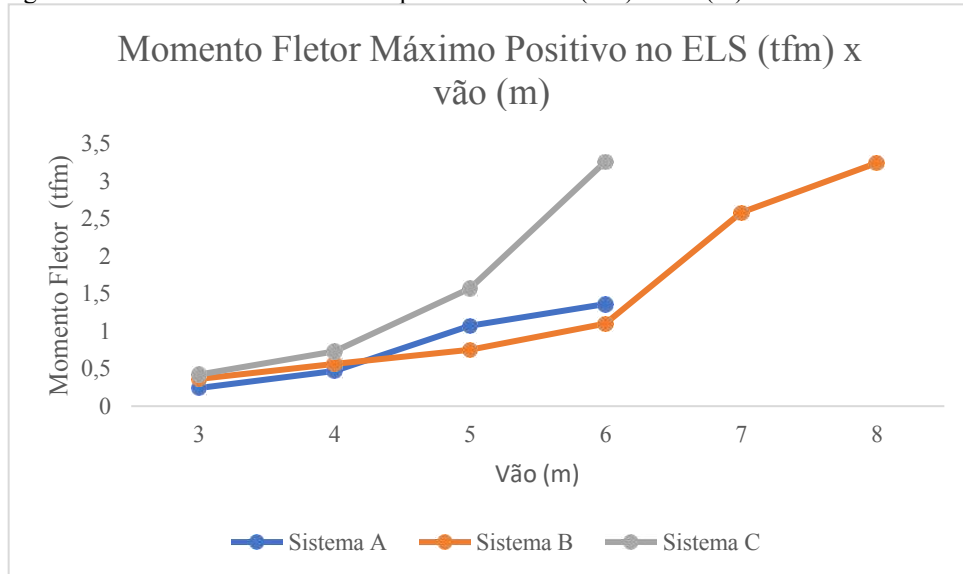


Fonte: Autoria própria (2023).

Ao verificar as Figuras 57 e 58, foi possível notar que tanto o padrão de comportamento do momento fletor máximo positivo quanto do momento fletor máximo negativo foi semelhante ao comportamento dos sistemas estruturais devido ao peso próprio.

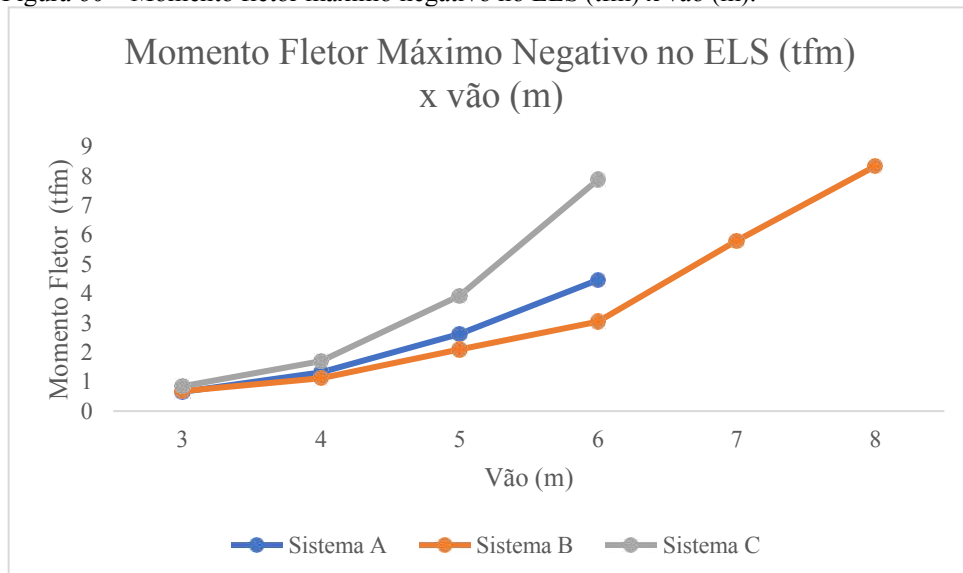
As Figuras 59 e 60 mostraram o mesmo comportamento observado no parágrafo acima.

Figura 59 – Momento fletor máximo positivo no ELS (tfm) x vão (m).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 60 – Momento fletor máximo negativo no ELS (tfm) x vão (m).



Fonte: Autoria própria (2023).

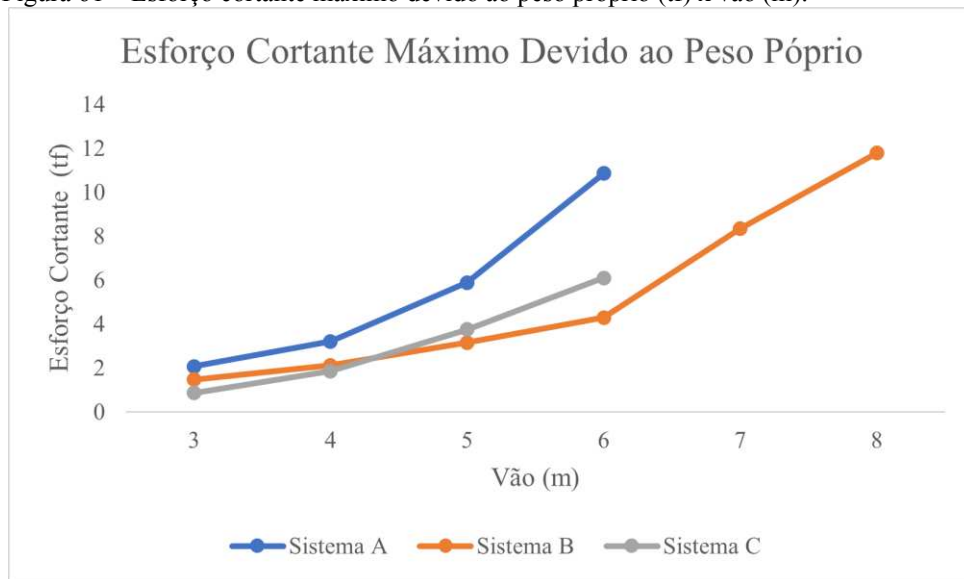
Outro aspecto importante a ser analisado é a superioridade dos esforços no ELU em relação aos esforços no ELS. Essa diferença ocorre devido às diferentes combinações de ações

consideradas para cada estado. No ELU, a combinação de ações a ser considerada é a última, ou seja, refere-se ao limite da capacidade resistente da estrutura. Já no ELS, são utilizadas combinações de serviços, relacionadas ao uso e ocupação da estrutura.

5.4 Análise dos esforços cortantes

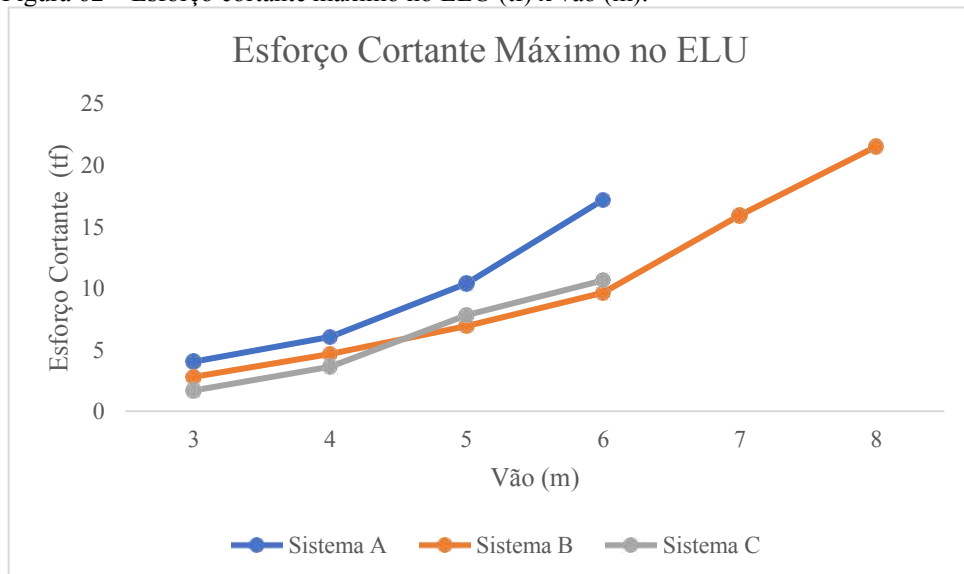
O comportamento das estruturas com relação aos esforços cortantes máximos devido ao peso próprio, no ELU e ELS estão representadas nas Figuras 61, 62 e 63.

Figura 61 – Esforço cortante máximo devido ao peso próprio (tf) x vão (m).



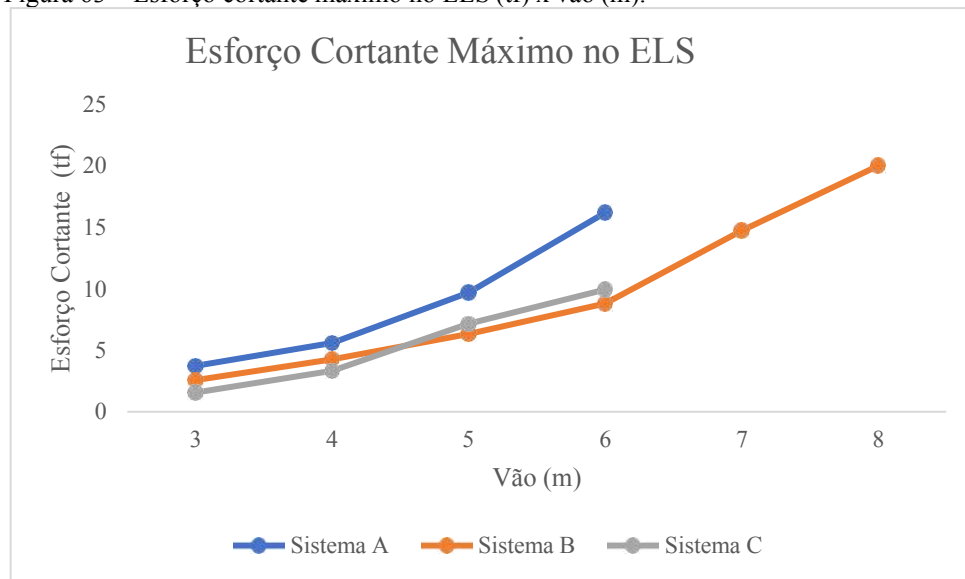
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 62 – Esforço cortante máximo no ELU (tf) x vão (m).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 63 – Esforço cortante máximo no ELS (tf) x vão (m).



Fonte: A autoria própria (2023).

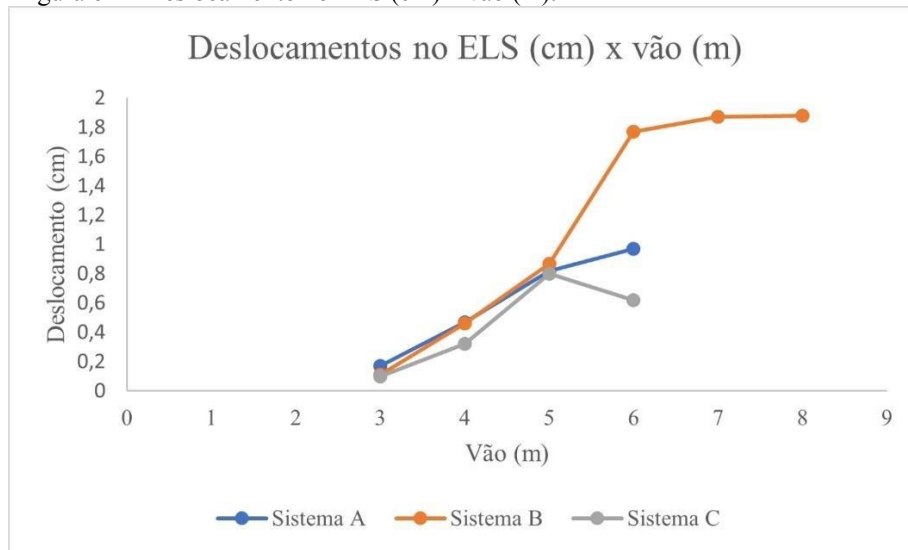
Realizando uma análise dos esforços cortantes, percebeu-se que existiu um padrão como apresentado pelos momentos fletores. Além disso, é importante analisá-lo para esse tipo de estrutura, pois devido à ausência de vigas nos sistemas estudados, os esforços são diretamente transmitidos aos pilares, gerando altas concentrações de tensões e podendo levar ao puncionamento das lajes.

Observou-se que os esforços cortantes máximos foram superiores no sistema estrutural A para todos os vãos. Tratando-se dos sistemas B e C, para menores vãos o sistema B apresentou superioridade em relação ao sistema C, no entanto para maiores vãos o sistema estrutural C foi superior.

5.5 Análise dos deslocamentos

Na análise dos deslocamentos, é importante destacar que as alturas não foram mantidas para os três sistemas estruturais de mesmo vão. Isso se deve ao fato de que foi necessário aumentar a altura para viabilizar o dimensionamento das lajes, principalmente em relação à flexão. A Figura 64 ilustra o comportamento de cada sistema estrutural com a variação dos vãos.

Figura 64 – Deslocamento no ELS (cm) x vão (m).



Fonte: Autoria própria (2023).

Observou-se através da Figura 64 que o sistema A apresentou deslocamentos superiores para vãos menores em comparação com os outros dois sistemas. No entanto, para vãos maiores, como o de 6 m, o sistema B teve deslocamentos maiores, cerca de 93,81% a mais que o sistema A e 185,5% a mais que o sistema C.

Isso se justifica devido às alturas diferentes entre os três sistemas estruturais para um mesmo vão. Enquanto a laje do sistema B tinha altura de 23 cm, a laje do sistema A tinha altura de 26 cm e a laje do sistema C tinha altura de 35 cm. Portanto, quanto menor a altura, menor o momento de inércia e, conseqüentemente, a rigidez, levando a maiores deslocamentos.

6 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados obtidos neste estudo, observa-se que a laje lisa maciça (sistema A), para a estrutura padrão estudada, apresentou um consumo maior de aço e concreto em comparação com os sistemas estruturais com e sem viga-faixa. No entanto, ao comparar os sistemas em lajes lisas nervuradas sem viga-faixa (sistema B) e com viga-faixa (sistema C), verificou-se que o sistema B teve o menor consumo de materiais.

Portanto, conclui-se que, para um vão de 4 m, a estrutura mais eficiente em termos de consumo de aço foi a B, que apresentou um menor consumo desse material. Por outro lado, o sistema menos vantajoso foi o A, com um maior consumo de aço. Em relação ao consumo de concreto, o sistema mais favorável foi o B, que teve um menor consumo desse material, enquanto o sistema A foi o menos conveniente, com um maior consumo de concreto. Assim, para a estrutura padrão adotada neste estudo (vão de 4 m), o sistema estrutural mais conveniente em termos de consumo de materiais é o sistema de lajes lisas nervuradas sem vigas-faixas.

Quanto à análise dos esforços, o sistema de lajes que apresentou melhor desempenho estrutural em relação aos momentos fletores positivos foi o sistema A. Já para os momentos fletores máximos negativos, a estrutura que se destacou foi a do sistema B. No que diz respeito aos deslocamentos, para a estrutura padrão com um vão de 4 m, observou-se que o sistema que teve melhor desempenho foi o sistema estrutural C.

No estudo paramétrico, verificou-se que as lajes lisas maciças são mais eficientes em vãos menores, pois o aumento do vão resultou em um considerável aumento no consumo de aço e concreto. Além disso, em vãos menores, os esforços foram inferiores nesse sistema em comparação com os outros. Outrossim, os sistemas estruturais B e C não se mostraram tão eficientes em termos de consumo de concreto em vãos menores, devido à impossibilidade de dispor as fôrmas de maneira contínua, o que aumentou o consumo de concreto ao utilizar esses sistemas.

Por outro lado, para maiores vãos, os sistemas estruturais B e C demonstraram melhor desempenho em termos de consumo de materiais. O sistema B foi mais eficiente no consumo de concreto, enquanto o sistema C apresentou melhor comportamento em relação ao consumo de aço. Em relação aos esforços, de maneira geral, à medida que o vão aumentou, o sistema B teve um melhor desempenho estrutural. Quanto aos deslocamentos, o sistema estrutural C foi o que apresentou melhor desempenho.

Após analisar os resultados, concluiu-se que, para os parâmetros estudados, o sistema A é mais adequado para estruturas com vãos menores. Por outro lado, para vãos

maiores, o sistema estrutural de lajes lisas nervuradas é mais recomendado. Vale ressaltar que o sistema B se destacou, apresentando bom desempenho nos parâmetros de consumo de materiais e esforços, além de ser o único capaz de atingir vãos maiores com menores alturas de lajes.

Durante o desenvolvimento do trabalho, ocorreram algumas limitações, como a impossibilidade de continuar com o estudo paramétrico devido às restrições das fôrmas utilizadas, que tinham altura máxima de 35 cm. Além disso, para o sistema A só foi possível variar o vão até 6 m, pois a partir desse vão as alturas foram elevadas, não sendo viável dimensionar algumas seções da laje ao esforço de flexão. Para o sistema B, variou-se o vão até 8 m. No entanto, para o sistema C, o estudo foi limitado a um vão de 6 m, pois ao aumentar para 7 m, o software emitiu avisos de erros graves, tornando inviável prosseguir com o estudo devido às restrições das fôrmas utilizadas.

Diante das limitações abordadas seguem-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Continuar o estudo paramétrico utilizando a estrutura padrão do presente trabalho com fôrmas que possuam alturas superior a 35 cm;
- Fixar um parâmetro, por exemplo, a altura, a fim de determinar de maneira mais precisa o comportamentos dos modelos estruturais abordados;
- Incluir no estudo paramétrico o sistema estrutural em lajes lisas protendidas;
- Realizar uma análise da punção para os sistemas abordados;
- Desenvolver um estudo abordando os custos tanto de materiais quanto de mão de obra para os sistemas abordados no presente trabalho, a fim de determinar qual o sistema é mais eficiente economicamente;
- Desenvolver um estudo comparativo entre os sistemas abordados neste trabalho com modelo arquitetônico possuindo lajes em balanço.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira de; PINHEIRO, Libânio Miranda. Viabilidade econômica de alternativas estruturais de concreto armado para edifícios. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 19, p. 1-19, 2002. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/0d8ae309-717f-4ecc-8f77987f8bc68c34/PROD_001172_SYSNO_1309820.pdf. Acesso em: 13 jun. 2023
- AQUE, Anderléia Depintor; BAVARESCO, Danicler; CARVALHO, João Dirceu Nogueira. Análise do momento fletor em laje lisa. **Revista Uningá Review**, v. 29, n. 1, p. 7 – 13, Dec.2017.
- ARAÚJO, Jaqueline Siqueira Gilcilene. Obra de shopping desaba e deixa uma pessoa ferida em Teresina. **G1**, Piauí, 17 ago. 2013. Disponível em: <https://g1.globo.com/pi/piaui/noticia/2013/07/obra-de-shopping-desaba-e-deixa-uma-pessoa-ferida-em-teresina.html>. Acesso em: Acesso em 28 jul. 2023.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. Rio Grande: Dunas, 2014. v.4, 4.ed.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2023. **Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120:2019. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.
- BARROS, Maria Tatianne Veloso; BARROS, Rodrigo; FILHO, José Neres da Silva. Análise da influência da altura do edifício no valor do parâmetro utilizando a inércia equivalente de Branson. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 3, 2020. Disponível em: <file:///C:/Users/Particular/Downloads/salete,+19+AN%C3%81LISE+DA+INFLU%C3%8ANCIA+DA+ALTURA+DO+EDIF%C3%8DCIO+NO+VALOR+DO+PAR%C3%82METRO+%EF%81%A7Z+UTILIZANDO+A+IN%C3%89RCIA+EQUIVALENTE+DE+BRANSON.pdf>. Acesso em 01 ago. 2023.
- BASTOS, Paulo Sérgio. **Fundamentos do concreto armado**. 2019. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.
- BASTOS, Paulo Sérgio. **Lajes de concreto armado**. 2021. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2021.
- CACOSSI, Leandro. Rádio Eldorado celebra os 465 anos de São Paulo com série especial. **Estadão**, São Paulo, 16 jan. 2019. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/eldorado/radio-eldorado-celebra-os-465-anos-de-sao-paulo-com-serie-especial/>. Acesso em 05 set. 2023.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 4. ed. São Carlos, 2021.
- CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2009.

Catálogos de Dados Técnicos. **Impacto**, 2018. Disponível em: <https://impactoprotensao.com.br/wp-content/uploads/2022/01/catalogo-formas-TRELICA-E-PAV-VIGA.2018.2.pdf>. Acesso em 07 ago.2023.

Como economizar na sua obra com diferentes estruturas de laje nervurada?. **Atex Brasil**, 2017. Disponível em: <https://atex.com.br/pt/economize-obra-estruturas-laje-nervurada/>. Acesso em 05 set. 2023.

DADALT, Leonardo Mendiondo; LAZZARI, Bruna Manica; LAZZARI, Paula Manica. Dimensionamento e análise comparativa entre diferentes métodos de cálculo de um pavimento de laje plana. *In: Congresso Brasileiro do Concreto. Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto*. Fortaleza, 2019. Disponível em: <file:///C:/Users/talit/Downloads/DADALT%202019.pdf>. Acesso em: 15 de out. 2023.

DANTAS, Lucas Guedes. **Proposta para o cálculo de carga de ruptura por punção em lajes de Concreto Reforçado com fibras**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.374>. Acesso em: 02 oct. 2023.

FILHO, Marcelo Debortoli; GUESSER JÚNIOR, Laércio. **Análise comparativa entre diferentes tipos de lajes quanto as cargas geradas pelo consumo de materiais**. Monografia (Graduação) - Engenharia Civil. Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2019.

GREGORIO, Graciele Rosana dos Santos. **Análise comparativa entre lajes lisas maciças e nervuradas**. 2017. Monografia (Graduação) - Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2017.

História e curiosidades sobre a simbólica Ponte da Amizade. **Rotas de Viagem**, 2020. Disponível em: <https://rotasdeviagem.com.br/historia-e-curiosidades-sobre-a-simbolica-ponte-da-amizade/>. Acesso em 16 jul. 2023.

KAESTNER, Camile Luana. Como determinar as dimensões necessárias para um capitel?. **QiSuporte**, 2022. Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360037961734-Como-determinar-as-dimens%C3%B5es-necess%C3%A1rias-para-um-capitel->. Acesso em: 03 set. 2023.

Laje Nervurada consome até 30% menos aço. **Mapa da Obra**, 2017. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/negocios/laje-nervurada-consome-menos-aco/>. Acesso em 11 jul. 2023.

Lajes Pré-moldadas. **Contanet**, 2018. Disponível em: <https://engenharia-construcao.cotanet.com.br/lajes-pre-moldadas/laje-pre-moldada-3>. Acesso em 24 jul. 2023.

MELO, Isabela Teixeira. **Estudo comparativo econômico entre os sistemas estruturais com laje lisa maciça e laje lisa nervurada de concreto armado para um pavimento tipo de um edifício comercial**. 2021. Monografia (Graduação) - Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

MOURA, José. Lajes Maciças: dimensionamento da armadura principal. **Guia da Engenharia**, 2020. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/lajes-macicas-dimensionamento/>. Acesso em 11 jul. 2023.

OLIVEIRA, Danielle Meireles; SILVA, Ney Amorim. Efficiency evaluation of Branson's equivalent inertia to consider physical nonlinearity of beams in simple form. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 3, p. 530 - 547, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952011000300009>. Acesso em 04 jul. 2023.

OLIVEIRA, Marcos Honorato et al. Punching resistance of internal slab-column connections with double-headed shear studs. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 6, n. 5, p. 681 - 714, oct. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000500002>. Acesso em 02 jul. 2023.

PAIVA, Luana Kívia Lima de. **Estudo comparativo entre sistemas estruturais com laje lisa maciça e lisa nervurada em um edifício comercial**. 2021. Monografia (Graduação) - Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2021.

PASSAMANI, Vinicius. **Análise comparativa de custo direto de sistemas estruturais de lajes de concreto armado e concreto protendido para pavimentos tipo de edifícios**. 2019. Monografia (Graduação) - Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

PAZ, Rudinei Silvestre da; BELLEI, Poliana; BARBISAN, Ailson Oldair. Comparativo de custos entre estruturas de aço e concreto armado em Xanxerê - SC. **UCEFF - Anais de Engenharia Civil**, v. 3, n. 2, p. 35 - 56, 2019. Disponível em: <https://uceff.edu.br/anais/index.php/ENGCIVIL/article/view/255>. Acesso em 03 jul. 2023.

PEREIRA FILHO, Manoel José Mangabeira. **Avaliação dos métodos normativos para previsão da resistência à punção de lajes sem armadura de cisalhamento e com conectores de aço**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

PEREIRA FILHO, Manoel José Mangabeira. **Resistência à punção de lajes lisas armadas ao cisalhamento com estribos treliçados pré-fabricados**. 2021. Tese (Doutorado) - Estruturas e Construção Civil. Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

PEREIRA, Matheus. Tipos de Lajes de concreto: vantagens e desvantagens. **ArchDaily**, 2022. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/889035/tipos-de-lajes-de-concreto-vantagens-e-desvantagens>. Acesso em 23 jul. 2023.

PEREIRA, Rodrigo Escolante. **Lajes lisas nervuradas em concreto armado: comparação entre diferentes metodologias de cálculos**. 2016. Tese (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 2016.

PINHEIRO, Igor. Lajes Treliçadas: Tudo o Que Você Precisa Saber. **Inova Civil**, 2022. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/lajes-trelicadas-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em 24 jul. 2023.

PINHEIRO, Libânio Miranda; MUZARDO, Cassiane D.; DOS SANTOS, Sandro Pereira. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.

PINHEIRO, Libânio Miranda; MUZARDO, Cassiane D.; DOS SANTOS, Sandro Pereira. **Lajes Maciças**. São Paulo: EESC- Departamento de Engenharia de Estruturas, São Paulo, 2003.

RHEINHEIMER, Lucas Carpenedo. **Análise de lajes nervuradas lisas usando o método dos pórticos múltiplos e métodos computacionais**. 2020. Monografia (Graduação) - Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2020.

SACRAMENTO, Paulo Victor Prazeres et al. Punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 5, n. 5, p. 659-691, out. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952012000500005>. Acesso em: 04 jul. 2023.

SACRAMENTO, Paulo Victor Prazeres et al. Reinforced concrete ribbed slabs with wide-beam. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 11, n. 5, p. 966-996, out. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952018000500005>. Acesso em: 22 jul. 2023.

SANTOS, Roberto Eustáquio dos. **A armação do concreto no Brasil: História da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. 2008. Tese (Doutorado) – Educação. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SILVA, Felipe Nascimento da. **Análise comparativa entre lajes em concreto armado e concreto protendido**. 2015. Monografia (Graduação) - Engenharia Civil. Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA, Gustavo Ribeiro da. **Análise da confiabilidade da ligação laje-pilar interno sob punção de acordo com a NBR6118:2014**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SILVA, Lucas Pergher. **Estudo comparativo entre lajes nervuradas e maciças em função dos vãos entre apoios**. 2010. Tese (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SILVA, Magali. **Estudo comparativo entre o método dos pórticos equivalentes e o método dos elementos finitos para análise de lajes nervuradas**. 2019. Tese (Graduação) – Engenharia Civil Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2019.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Construção Civil. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SOUZA, Maria Francisca Suassuna Mendes de; RODRIGUES Rafael Bezerra. **Sistema estrutural de edificações e exemplos**. 2008. Campinas: DES - Departamento de Estrutura, 2008.

SOUZA, Remo Magalhães de. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. 2003. Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

SPADONI, Francisco; TADDEI, Pedro. Centro Paulo Souza. **Revista Vitruvius**, São Paulo, v. 01, p. 159, mar. 2014. Disponível em:

<https://vitruvius.com.br/revistas/read/projetos/14.159/5075>. Acesso em 24 jul. 2023.

SPOHR, Valdir Henrique. **Análise Comparativa: Sistemas Estruturais Convencionais e Estruturas de Lajes Nervuradas**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TERRES, Laryssa. Laje Maciça de Concreto. **Carluc**, 2022. Disponível em:

<https://carluc.com.br/elementos-construtivos/laje-macica/>. Acesso em: 03 set. 2023.

TQS DOCS. **Análise Estrutural**. Versão 23, 2023. Disponível em:

<https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=707101606&language=pt-BR>. Acesso em 06 jul. 2023.