

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS SERTÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUANA KÍVIA LIMA DE PAIVA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS COM LAJE LISA
MACIÇA E LISA NERVURADA EM UM EDIFÍCIO COMERCIAL**

DELMIRO GOUVEIA – AL

2021

LUANA KÍVIA LIMA DE PAIVA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS COM LAJE LISA
MACIÇA E LISA NERVURADA EM UM EDIFÍCIO COMERCIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Vinícius Costa Correia

DELMIRO GOUVEIA – AL

2021

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4 2209

P149e Paiva, Luana Kívia Lima de

Estudo comparativo entre sistemas estruturais com laje lisa maciça e lisa nervurada em um edifício comercial / Luana Kívia Lima de Paiva. – 2021.

70 f. : il.

Orientação: Vinícius Costa Correia.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2021.

1. Construção civil. 2. Laje lisa maciça. 3. Laje lisa nervurada. 4. estudo comparativo. 5. Concreto armado. I. Correia, Vinícius Costa. II. Título.

CDU: 624.012.45

Folha de Aprovação

LUANA KÍVIA LIMA DE PAIVA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS COM LAJE LISA MACIÇA E LISA NERVURADA EM UM EDIFÍCIO COMERCIAL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão e aprovado em 8 de março de 2021.

Banca Examinadora:

Vinicius Costa Correia

Prof. MSc. Vinicius Costa Correia, UFAL – Campus do Sertão (Orientador)

David Leonardo N. de F. Amorim

Prof. DSc. David Leonardo Nascimento de Figueiredo Amorim, UFS
(Avaliador)

Eng. Iva Emanuella Pereira Lima

Eng. MSc. Iva Emanuella Pereira Lima, UFAL (Avaliadora)

À minha mãe, Marilene.

AGRADECIMENTOS

Aos professores e funcionários da UFAL pela contribuição e conhecimento transmitidos durante o curso. Em especial ao professor Vinícius, pela orientação na elaboração deste trabalho, e ao professor Salvatore, pela amizade e empatia durante momentos difíceis.

Aos meus amigos de graduação, que promoveram momentos inesquecíveis. Em especial Renan e Ana Karolayne, pela amizade que construímos durante o curso.

Às minhas amigas e companheiras de prédio, Rayanne e Ana Clara, pelos momentos que tivemos durante a graduação e principalmente por todos aqueles após ela. Vocês são muito importantes.

Às minhas amigas Daiana e Damilly, por serem tão especiais e terem contribuído tanto em minha vida.

Aos meus melhores amigos, Aryelle e Ewerson. Vocês são a certeza de que eu não estou sozinha no mundo. Agradeço a Deus pela existência de vocês e da família de vocês, obrigada por tudo.

Aos meus padrinhos e madrinhas por todo apoio durante a minha vida e principalmente no último ano.

À minha família que abriu as portas de casa para me acolher e largaram tudo para me apoiar nesse último ano. Davis, Aline, Tia Maria e Tio Beron, vocês são essenciais na minha vida. Obrigada pelo lar, pela paciência, pela amizade e por todos os dias que compartilhamos momentos felizes.

À Maria Luiza e à Izabella, por serem a alegria na minha vida. Vocês são as crianças mais especiais no mundo. Obrigada por existirem.

Ao Lucas, meu namorado, pela paciência e conhecimento transmitidos durante o curso. Mas, principalmente, pelo amor e companheirismo durante esses quase cinco anos. Obrigada por todo apoio e compreensão nesses últimos meses.

Ao meu pai, que mesmo longe, sempre se fez presente. Obrigada por todo amor, esforço e dedicação para me ver feliz.

Às minhas mães, *in memoriam*, Josefa e Marilene. As pessoas mais importantes na minha vida, aquelas sem as quais eu não seria nada. A primeira, minha avó, eu agradeço por toda educação e amor que me deu durante 16 anos. Agradeço por ter se doado tanto a mim. A segunda, minha mãe, eu agradeço por cada segundo da sua vida aqui na terra, por cada momento que enfrentamos nessa vida. Agradeço pela sua amizade, pela dedicação absurda e todo sacrifício, cada conquista minha devo totalmente a você. Agradeço por tudo que deixou aqui comigo, todas as coisas intangíveis.

Por fim, a Deus. Por ter colocado tanta gente especial na minha vida e permitir que tudo isso se tornasse possível.

RESUMO

Diante da expressiva evolução tecnológica no setor da construção civil, é possível observar a busca por soluções estruturais que visam suprir desvantagens deixadas por soluções e métodos antigos, garantindo ainda, mais economia e segurança aos projetos. Em vista disso, é de grande importância conhecer e analisar o comportamento das estruturas e como esse é modificado com o emprego das diversas configurações possíveis, com o propósito de compreender como essas se apresentam mais eficientes e definir a melhor solução a ser empregada em um projeto específico. Dito isso, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre dois sistemas estruturais, um com lajes lisas maciças e outro com lajes lisas nervuradas, para um edifício comercial de 6 pavimentos e obter a solução com menor consumo de materiais para o caso analisado. Para esse fim, o projeto estrutural foi elaborado com auxílio do *software* Eberick e o comparativo foi feito com base em parâmetros estruturais e, especialmente, no consumo de aço e concreto. De posse dos resultados, como deslocamentos, momentos fletores, esforço cortante e consumo de materiais, observou-se que o sistema composto por lajes lisas nervuradas foi o que apresentou o menor consumo de aço e concreto. Dessa forma, concluiu-se que as lajes lisas nervuradas são as mais viáveis para o edifício analisado.

Palavras-Chave: Concreto Armado. Laje lisa maciça. Laje lisa nervurada. Análise comparativa.

ABSTRACT

Given the significant technological evolution in the construction sector, it is possible to observe the search for structural solutions that aim to supply disadvantages left by old solutions and methods, also ensuring more economy and safety to projects. In view of this, it is of great importance to know and analyze the behavior of structures and how this is modified with the use of various possible configurations, with the purpose of understanding how they are more efficient and defining the best solution to be employed in a specific project. That said, this work aims to perform a comparative study between two structural systems, one with massive flat slabs and the other with ribbed flat slabs, for a commercial building of 6 floors and obtain the solution with lower consumption of materials for the case analyzed. To this end, the structural design was elaborated with the aid of the Eberick software and the comparison was made based on structural parameters and, especially, on the consumption of steel and concrete. With the results, such as displacements, flaming moments, cutting effort and consumption of materials, it was observed that the system composed of ribbed flat slabs was the one that presented the lowest consumption of steel and concrete. Thus, it was concluded that the ribbed flat slabs are the most viable for the analyzed building.

Key-words: Reinforced concrete. Massive flat slab. Ribbed flat slab. Comparative analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema construtivo convencional em laje maciça.	17
Figura 2 - Laje nervurada composta por material inerte e com nervuras aparentes.	18
Figura 3 - Laje nervurada com vigotas pré-moldadas treliçadas.	20
Figura 4 - Armação treliçada.	20
Figura 5 - Detalhe da vigota treliçada com armadura adicional.	21
Figura 6 - Vigota treliçada com armadura complementar longitudinal.	22
Figura 7 - Armadura transversal (laje bidirecional).	23
Figura 8 - Armadura transversal (laje unidirecional).	24
Figura 9 - Detalhe da laje bidirecional nervurada treliçada.	25
Figura 10 - Laje nervurada moldada in loco.	26
Figura 11 - Sistema estrutural de lajes sem vigas (laje maciça e nervurada).	28
Figura 12 - Superfície de ruína para os casos de lajes lisa com pilares simétricos.	29
Figura 13 - Perímetro crítico em pilares internos.	30
Figura 14 - Modos de ruptura por punção em lajes com armadura de cisalhamento.	31
Figura 15 - Colapso progressivo do edifício Ronan Point.	32
Figura 16 - Armadura contra colapso progressivo.	33
Figura 17 - Laje lisa com vigas de borda.	34
Figura 18 - Sistema estrutural composto por laje lisa maciça.	35
Figura 19 - Sistema estrutural composto por laje nervurada utilizando capitéis.	38
Figura 20 - Sistema estrutural composto por laje nervurada utilizando vigas-faixa.	38
Figura 21 - Planta-baixa do edifício-exemplo (medidas em metros).	41
Figura 22 - Planta de forma do pavimento-tipo	42
Figura 23 - Dimensões do bloco de EPS.	51
Figura 24 - Vista 3d do edifício (Eberick) – sistema estrutural 1.	55
Figura 25 - Vista 3d do edifício (Eberick) – sistema estrutural 2.	56
Figura 26 - Distribuição das cargas verticais – sistema estrutural 1.	56
Figura 27 - Distribuição das cargas verticais – sistema estrutural 2.	57
Figura 28 - Comparativo dos carregamentos atuantes nos sistemas analisados.	58
Figura 29 - Grelha - Momento fletor (sistema estrutural 1).	58
Figura 30 - Grelha - Momento fletor (sistema estrutural 2).	59
Figura 31 - Grelha – Cortante atuante (sistema estrutural 1).	61
Figura 32 - Grelha – Cortante atuante (sistema estrutural 2).	61
Figura 33 - Comparação do índice de concreto entre os sistemas.	64
Figura 34 - Comparação do índice de aço entre os sistemas.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área mínima e quantidade de armadura de distribuição.	25
Tabela 2 - Valores para γ_{corr} conforme posição do pilar analisado.	46
Tabela 3 - Pré-dimensionamento dos pilares.	52
Tabela 4 – Pré-dimensionamento das vigas (medidas em centímetros).	53
Tabela 5 - Dimensões finais obtidas para os pilares (medidas em cm).	54
Tabela 6 - Dimensões finais obtidas para as vigas (medidas em cm).	55
Tabela 7 - Deslocamentos imediatos e diferidos – cm (sistema estrutural 1).	59
Tabela 8 - Deslocamentos imediatos e diferidos - cm (sistema estrutural 2).	60
Tabela 9 - Armadura de punção - sistema estrutural 2.	62
Tabela 10 - Consumo de material - sistema estrutural 1.	63
Tabela 11 - Consumo de material - sistema estrutural 2.	63
Tabela 12 - Índice de concreto e aço nas lajes do edifício.	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo geral	14
1.3.2	Objetivo específico	15
1.4	Estrutura do trabalho	15
2	LAJES DE CONCRETO ARMADO	16
2.1	Lajes maciças	16
2.1.1	Considerações iniciais	16
2.2	Lajes nervuradas	18
2.2.1	Considerações iniciais	18
2.2.2	Laje nervurada com vigota treliçada	19
2.2.3	Laje nervurada convencional	26
2.2.4	Material de enchimento	26
2.3	Lajes lisas	28
2.3.1	Punção	28
2.3.2	Colapso Progressivo	32
2.3.3	Vigas de borda	33
2.3.4	Vantagens das lajes lisas	34
2.3.5	Desvantagens das lajes lisas	35
2.3.6	Laje lisa maciça	35
2.3.6.1	Definição, características e aplicação	35
2.3.6.2	Vantagens das lajes lisas maciças	36
2.3.6.3	Desvantagens das lajes lisas maciças	36
2.3.7	Laje lisa nervurada	37
2.3.7.1	Definição, características e aplicação	37
2.3.7.2	Vantagens das lajes lisas nervuradas	39
2.3.7.3	Desvantagens das lajes lisas nervuradas	39
3	METODOLOGIA	40
3.1	Considerações gerais	40

3.2	Projeto arquitetônico	40
3.3	Pré-dimensionamento da estrutura	41
3.3.1	Lajes	43
3.3.2	Pilares	44
3.3.3	Vigas	46
3.4	Lançamento do edifício comercial em programa computacional	46
3.5	Parâmetros de comparação utilizados	47
3.5.1	Índice de concreto <i>IC</i>	47
3.5.2	Índice de aço <i>IA</i>	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Pré-dimensionamento	48
4.1.1	Laje lisa maciça	48
4.1.2	Laje lisa nervurada	49
4.1.3	Pilares	51
4.1.4	Vigas	52
4.2	Análise da estrutura no Eberick	53
4.2.1	Distribuição das cargas verticais	56
4.2.1.1	Momento fletor	58
4.2.1.2	Deslocamentos	59
4.2.1.3	Cortante	60
4.2.1.4	Consumo de materiais	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5.1	Conclusões	65
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

No passado, as construções possuíam diversas limitações decorrentes da escassez de pesquisas e de soluções tecnológicas para os projetos. Dentre essas limitações, têm-se: os vãos não podiam ser grandes, as edificações necessitavam de uma grande quantidade de pilares e vigas para redistribuição dos esforços e os elementos deveriam possuir elevadas dimensões para garantir o mínimo de segurança à estrutura.

Com o crescimento no setor de construção civil, surgiu a necessidade de estruturas mais econômicas e versáteis que as estruturas convencionais, que pudessem se adaptar aos diversos usos aos quais elas estariam sujeitas, se adaptando cada vez mais aos projetos arquitetônicos. Porém, garantindo uma segurança ainda maior nas edificações. Esse crescimento no setor gerou um grande incentivo às pesquisas que buscassem por soluções aos problemas enfrentados.

Para soluções que gerassem economia no consumo de materiais, buscou-se por alternativas inovadoras às lajes, visto que são os elementos em sistemas convencionais que mais consomem aço e concreto em toda a edificação, e sua melhoria desencadeia uma economia nos demais elementos estruturais que as suportam. Esses elementos precisavam atender à necessidade de vãos maiores, mas de forma que não acarretasse no aumento excessivo das seções, o que gera, conseqüentemente, aumento no custo e no quantitativo de materiais, visto que, até então, grandes vãos eram sinônimo de estrutura antieconômica e estruturalmente inviável.

Dentre as diversas soluções encontradas, surgiram as lajes nervuradas. Essas buscaram suprir as desvantagens apresentadas pelas lajes maciças, como o elevado peso próprio e a condição de vencer pequenos vãos, de forma que o aço e o concreto sejam aproveitados ao máximo, vencendo vãos muito maiores sem acarretar em mais desvantagens à estrutura, como o aumento da espessura. Além disso, o crescimento de pesquisas mostrou a possibilidade de conceber sistemas estruturais sem a presença de vigas, garantindo ainda mais a versatilidade das estruturas, visto que

agora paredes e divisórias não necessitariam mais estar condicionadas às vigas, sem que gerasse prejuízo arquitetônico.

Porém, mesmo com as vantagens apresentadas pela laje nervurada, na prática, o que se encontra são projetos com alta variabilidade de vãos e com características que atendem ao uso de não apenas uma solução estrutural, de forma que se torna quase impossível julgar a melhor opção sem uma análise mais aprofundada. Diante disso, este trabalho realiza uma análise comparativa entre dois sistemas estruturais, um com lajes maciças e o outro com lajes nervuradas, ambos sem a utilização de vigas no interior da laje, apenas empregando-as no contorno da edificação, conhecidas como vigas de borda. Analisa-se, por fim, a viabilidade do emprego desses sistemas na edificação projetada, com base, principalmente, no consumo de aço e concreto.

1.2 Justificativa

Atualmente, existem diversas possibilidades de soluções estruturais, especialmente no que diz respeito às lajes, o que torna essencial uma análise minuciosa da melhor solução para cada projeto, visto que cada um possui particularidades que são melhores atendidas por soluções específicas.

Nesse sentido, este trabalho baseia-se nessas particularidades que cada sistema estrutural possui, de forma que seja possível confrontar soluções estruturais e definir a melhor opção para o caso em questão, com base no consumo de materiais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise comparativa entre dois sistemas estruturais com lajes lisas, um com lajes lisas maciças e o outro com lajes lisas nervuradas, visando obter uma estrutura com melhor desempenho estrutural.

1.3.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Apresentar as diferentes características e empregos dos sistemas estruturais adotados através da revisão bibliográfica;
- Compreender o comportamento da estrutura através da alteração dos sistemas estruturais empregados;
- Analisar e comparar o consumo de aço e concreto empregados nos sistemas;
- Obter a solução mais eficiente para o edifício analisado.

1.4 Estrutura do trabalho

No primeiro capítulo são apresentados a introdução, a justificativa e os objetivos (geral e específico).

No capítulo 2 são apresentados conceitos fundamentais, vantagens e desvantagens acerca de lajes de concreto armado, especialmente sobre os sistemas estruturais empregados na metodologia do trabalho (lajes lisas maciça e nervurada).

Após a abordagem teórica feita no capítulo 2, o capítulo 3 é destinado à apresentação do projeto que serve de base para as análises e à metodologia utilizada para realização dessas análises.

No capítulo 4 constam o dimensionamento, resultados e a comparação entre os sistemas estruturais.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com as análises realizadas e também algumas sugestões relevantes para trabalhos futuros.

2 LAJES DE CONCRETO ARMADO

As lajes ou placas são elementos estruturais bidimensionais que possuem duas de suas dimensões maiores que a terceira. Destinam-se a receber a maior parte dos carregamentos que, em geral, atuam perpendicularmente ao seu plano e então transmiti-los aos demais elementos estruturais que as suportam, como vigas e pilares.

Conforme menciona Bastos (2015), as ações perpendiculares ao plano da laje podem ser distribuídas na área (revestimento), distribuídas linearmente (paredes) ou concentradas (pilar sobre laje). Porém, ainda segundo Bastos (2015), também há ações externas geralmente atuantes nas bordas das lajes na forma de momento fletor.

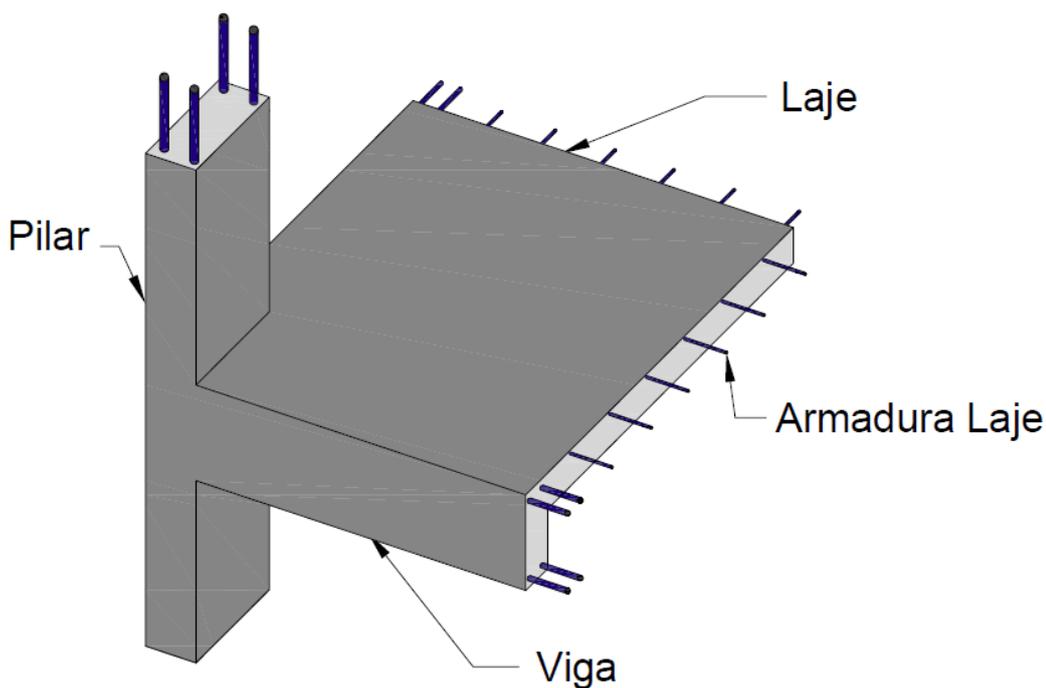
As lajes podem ser classificadas quanto a diversos critérios, dentre eles, pode-se destacar, quanto à forma da moldagem, quanto à direção ou quanto ao sistema estrutural empregado. No primeiro critério, as lajes podem ser *in loco*, quando moldadas no local da obra, ou pré-fabricadas quando produzidas em indústria. Quanto à direção, estes elementos podem ser unidirecionais ou bidirecionais, a depender de parâmetros como relação entre os comprimentos dos vãos. E por fim, podem ser classificadas quanto o seu sistema estrutural, variando de acordo com a maneira que as cargas são transmitidas aos demais elementos estruturais (laje lisa, laje convencional etc.).

2.1 Lajes maciças

2.1.1 Considerações iniciais

A laje maciça corresponde ao elemento estrutural plano onde todo seu volume é preenchido por concreto, armaduras longitudinais de flexão e, se necessário, armaduras transversais. Este tipo de elemento compõe um sistema estrutural convencional quando possui paredes ou vigas para o apoio, transmitindo os carregamentos de utilização somado ao seu peso próprio aos elementos de apoio, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Sistema construtivo convencional em laje maciça.



Fonte: Spohr (2008).

Quanto às especificações da NBR 6118 (2014), esta estabelece limites mínimos para a espessura, variando de 7 a 15 cm a depender da finalidade de uso. Quanto aos limites para o vão livre, há apenas recomendações práticas de 3,5 a 5 metros para que esse tipo de laje se torne economicamente viável.

Bastos (2015) menciona que as lajes maciças podem ser classificadas segundo diferentes critérios, dentre eles, um de grande relevância refere-se à direção da armadura principal. As lajes armadas em uma direção possuem a relação entre o maior e o menor lado superior a dois e considera-se a menor direção como a principal. Nesse tipo de laje, os maiores esforços ocorrem na direção principal e o dimensionamento é realizado considerando a laje como uma viga de largura unitária. As armaduras são dispostas nas duas direções, porém a armadura principal é calculada para resistir ao momento fletor na direção do menor vão. Já nas lajes armadas nas duas direções, quando a relação entre os vãos é menor ou igual a dois, as armaduras são calculadas para resistir aos momentos fletores decorrentes das duas direções.

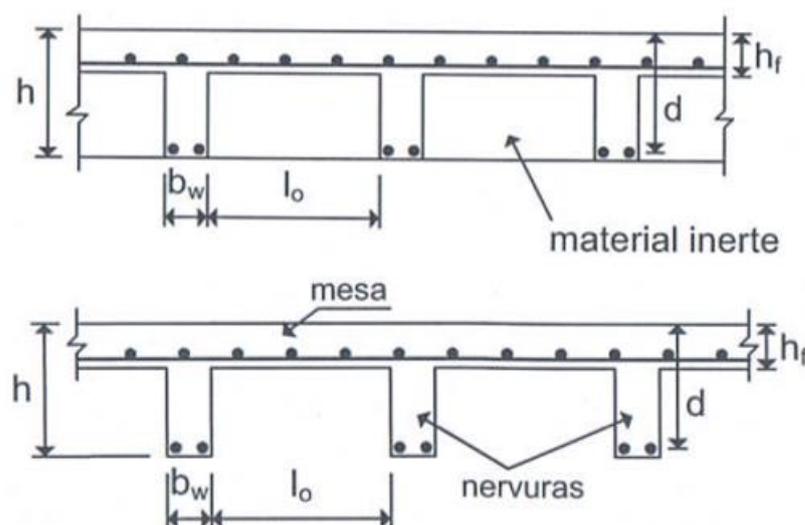
2.2 Lajes nervuradas

2.2.1 Considerações iniciais

Apesar da vasta utilização de lajes maciças em edificações, suas características deixam de ser vantajosas quando há necessidade de vencer grandes vãos e, por consequência, demandam elevada espessura para atender ao ELU, geralmente resultando em grande volume de concreto tracionado abaixo da linha neutra. Segundo Araújo (2010), a solução torna-se antieconômica nestes casos em que a maior parcela do carregamento advém do elevado peso próprio da estrutura. Logo, o sistema estrutural composto por nervuras torna-se vantajoso quando se necessita vencer vãos acima de 8 metros, como em um estacionamento ou edifício comercial. Desta forma, é possível reduzir o número de vigas e pilares e garantir maior abertura no ambiente.

Sobre o conceito de laje nervurada, NBR 6118 (2014, p. 97) discorre, “Lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte”. Portanto, o concreto que não contribui para resistência à flexão é substituído por material sem função estrutural, mais leve e barato ou a região é moldada com fôrmas industrializadas. Desta forma, a laje é comumente composta por uma mesa (zona de compressão) e nervuras (zona de tração), como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Laje nervurada composta por material inerte e com nervuras aparentes.



Fonte: Araújo (2010).

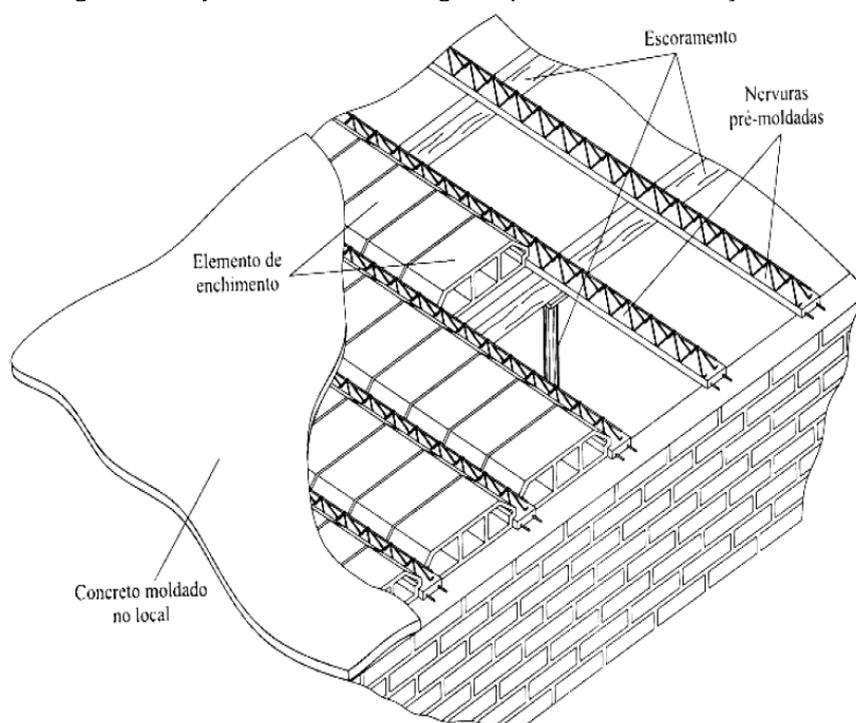
As lajes nervuradas também podem ser classificadas pelo modo que distribuem seus esforços. Assim como nas demais lajes, estas podem ser consideradas como unidirecionais quando a laje possuir aspecto retangular (razão entre o maior vão e o menor superior a 2). As nervuras principais longitudinais são dispostas apenas na direção do menor vão, porém também pode-se admitir algumas nervuras transversais perpendiculares às principais, objetivando a melhor distribuição transversal dos esforços nas vigotas, visando maior solidariedade entre as nervuras. Já as lajes bidirecionais (ou em cruz) possuem armaduras principais longitudinais nas duas direções e, com isso, distribuem os esforços de maneira ainda mais efetiva, reduzindo deslocamentos e, conseqüentemente, altura da laje. Porém, essas vantagens tornam-se mais evidentes quando a relação entre os comprimentos dos vãos é menor que 2, ou seja, quando a laje possui uma geometria menos retangular.

Outra forma de classificação é quanto à moldagem do concreto, as lajes nervuradas podem ser divididas em pré-fabricadas ou moldadas *in loco*. No primeiro grupo, encontram-se as nervuradas com vigotas pré-moldadas, que podem ser treliçadas (VT), em concreto armado (VC) ou em concreto protendido (VP). Já no segundo grupo, encontram-se as convencionais que comumente possuem nervuras inferiores aparentes.

2.2.2 Laje nervurada com vigota treliçada

O sistema de pré-moldados é uma evolução perante o sistema convencional, especialmente se tratando de lajes nervuradas. Isso devido à presença de um rigoroso controle de qualidade na execução do elemento, redução de perdas e otimização da estrutura com a utilização de material inerte. As lajes treliçadas são lajes nervuradas pré-fabricadas com elevada facilidade na fabricação, transporte e montagem, sendo bastante utilizadas em obras de pequeno a médio porte. São compostas basicamente por vigotas pré-moldadas espaçadas em uma direção, material de enchimento sobre essas, armaduras complementares e concreto moldado em obra (capeamento de concreto), conforme a Figura 3.

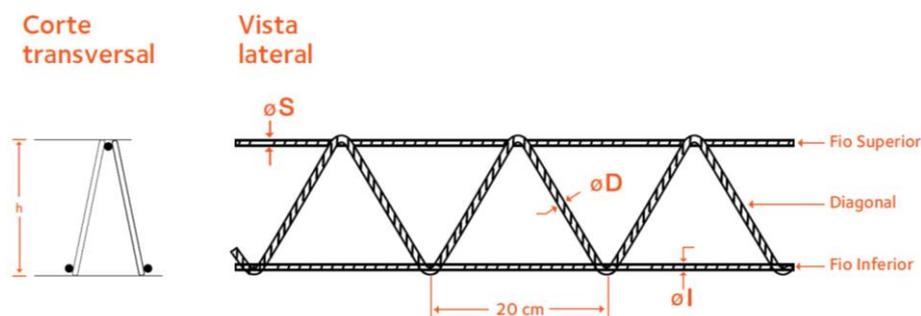
Figura 3 - Laje nervurada com vigotas pré-moldadas treliçadas.



Fonte: El Debs (2000).

As armaduras são pré-fabricadas e dispostas em forma de estrutura espacial prismática, sendo compostas por dois fios de aço longitudinais inferiores (banzo inferior), um fio de aço no topo ($\emptyset S$) e unidos por barras diagonais inclinadas, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Armação treliçada.



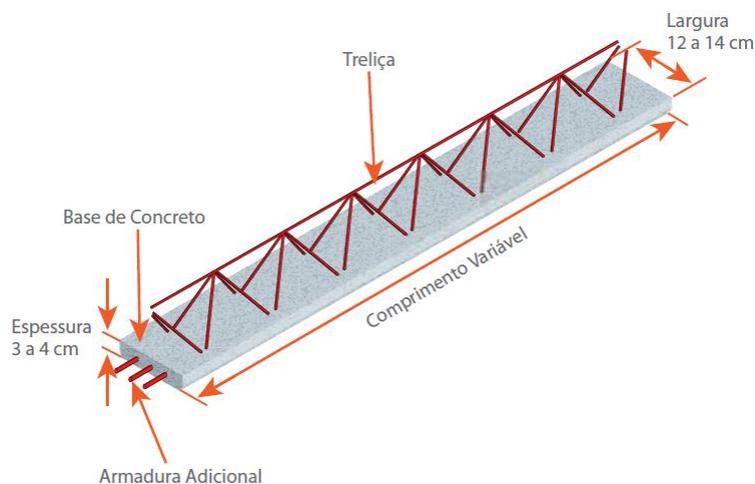
Fonte: Catálogo Treliças nervuradas – ArcelorMittal (2017).

Devido o arranjo da armadura, a presença da treliça nas bases de concreto traz maior rigidez em comparação a demais lajes pré-moldadas. Spohr (2008) menciona as funções e contribuições de cada elemento presente na vigota com armação treliçada. Segundo o autor, o fio superior ($\emptyset S$) possui três grandes funções: garantir

rigidez às vigotas, contribuir para a resistência do momento fletor negativo que surge após a retirada das escoras e servir como armadura de compressão durante a montagem e concretagem da estrutura treliçada. As diagonais ($\emptyset D$) contribuem para resistência à força cortante e promovem a perfeita adesão entre o concreto que constitui o conjunto pré-moldado e o concreto de capeamento. Os fios inferiores ($\emptyset I$) contribuem para a resistência à força de tração decorrente do momento fletor positivo.

A armadura treliçada é integrada à base da vigota e essa tem função de proteger e manter os fios inferiores estáveis, tem comprimento variável e é comercializada geralmente por três medidas padrão: 8, 10 e 12 metros. Os demais comprimentos necessários em projeto são gerados a partir desses. Ainda na base, é possível o emprego de armadura adicional localizada entre os fios inferiores, sendo prevista no cálculo estrutural quando as solicitações são maiores e as armaduras inferiores de tração ($\emptyset I$) não são suficientes, conforme Figura 5.

Figura 5 - Detalhe da vigota treliçada com armadura adicional.

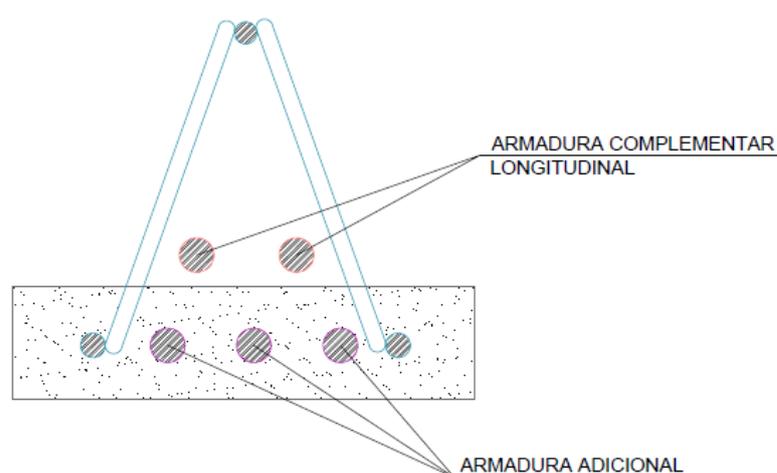


Fonte: Catálogo Treliças nervuradas – ArcelorMittal (2017).

Além dos elementos já descritos presentes na vigota, a laje também é composta por armadura complementar, material de enchimento e a capa de concreto. Conforme a NBR 14859-1 (2002), armaduras complementares referem-se aquelas adicionadas durante a execução do elemento na obra e essas podem ser: longitudinal, transversal, de distribuição, superior de tração, entre outras a depender a particularidade de cada projeto.

Segundo Silva (2012), a armadura longitudinal é empregada na laje quando há impossibilidade de incluir toda a armadura de tração apenas na vigota e tem como finalidade acrescentar à armadura passiva inferior de tração. Ao contrário das vigotas de concreto armado e concreto protendido, a vigota com armação treliçada possui uma grande vantagem quando há necessidade de armaduras longitudinais complementares, isso porque permite o uso da armadura complementar graças ao arranjo que a armação da vigota possui, o que facilita a passagem das barras. A Figura 6 apresenta a vigota treliçada com armadura adicional na base e longitudinal fora da seção pré-moldada.

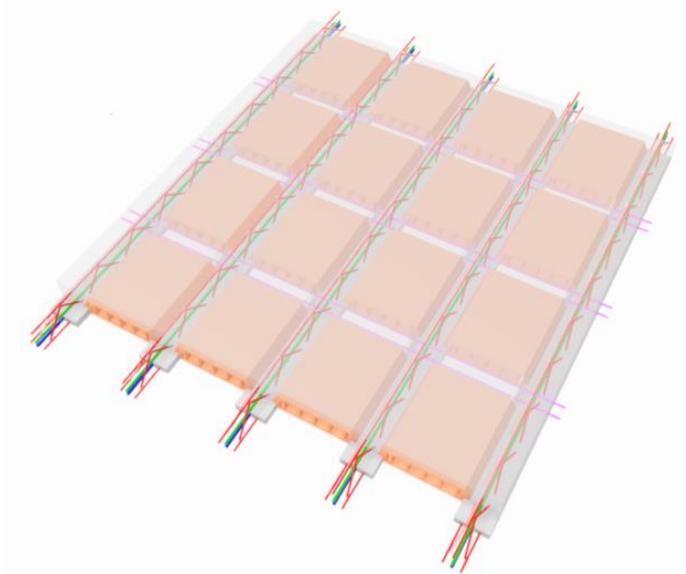
Figura 6 - Vigota treliçada com armadura complementar longitudinal.



Fonte: Autora (2021).

Já armadura transversal, quando necessária, é posicionada ortogonalmente à armadura principal e entre os elementos utilizados como material inerte, servindo como nervura secundária de travamento. É empregada e dimensionada em lajes bidirecionais e todo o carregamento passa a ser suportado por ambas as armaduras, principais em uma direção e transversais na outra. Assim como para a armadura longitudinal utilizada na obra, dentre as vigotas pré-moldadas existentes, a treliçada é a única que também permite o emprego de armadura transversal às vigotas devido à configuração no arranjo da armação na vigota, conforme Figura 7.

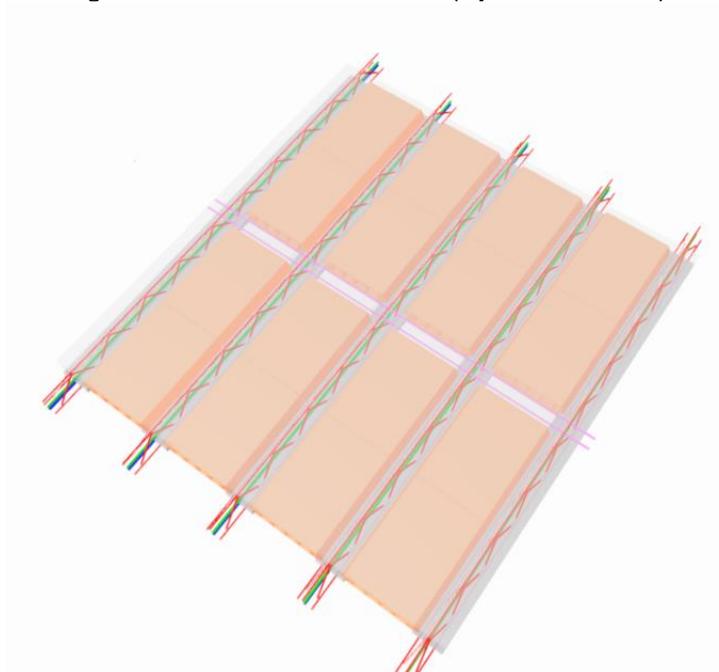
Figura 7 - Armadura transversal (laje bidirecional).



Fonte: AltoQi, 2019.

Entretanto, mesmo quando a laje é armada em apenas uma direção, há a recomendação do emprego de nervuras transversais por especialistas da área e em manuais técnicos atuais. A NBR 6118 (2014) não faz menção quanto à necessidade do emprego de nervuras transversais em lajes unidirecionais. Porém, a versão da mesma em 1980 recomendava a utilização de nervuras de travamento em lajes nervuradas com cargas concentradas a distribuir ou com vão teórico superior a 4 metros, exigindo-se pelo menos duas nervuras, caso o vão ultrapasse 6 metros. Avilla Junior (2009) recomenda ainda que, para evitar surgimento de fissuras, utiliza-se nervuras de travamento espaçadas a cada 2 metros, bem como em pontos onde há variação de geometria do painel de laje. A Figura 8 apresenta a utilização da nervura de travamento em laje unidirecional.

Figura 8 - Armadura transversal (laje unidirecional).



Fonte: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360000068033-Tipos-de-lajes-dispon%C3%ADveis-no-Eberick>.

A armadura de distribuição é a armadura posicionada nas direções transversal e longitudinal na capa de concreto e independe da laje ser unidirecional ou bidirecional. Conforme a NBR 14859-1 (2002), a utilização desse tipo de armadura complementar visa o controle da fissuração na retração do concreto e o reforço na distribuição de tensões decorrentes de cargas concentradas. Segundo Silva (2012), a armadura de distribuição pode ser constituída por barras uniformemente dispostas entre os elementos de enchimento e a mesa da laje (capa de concreto sobre o material inerte) ou por tela soldada. Porém, estas não devem ser presas ao fio superior da armação treliçada, mas localizada no meio da capa de concreto.

A NBR 14859-1 (2002) determina uma área mínima de aço (Tabela 1) para compor a armadura de distribuição, a variar conforme a tensão de escoamento do aço e com o emprego ou não de tela soldada.

Tabela 1 - Área mínima e quantidade de armadura de distribuição.

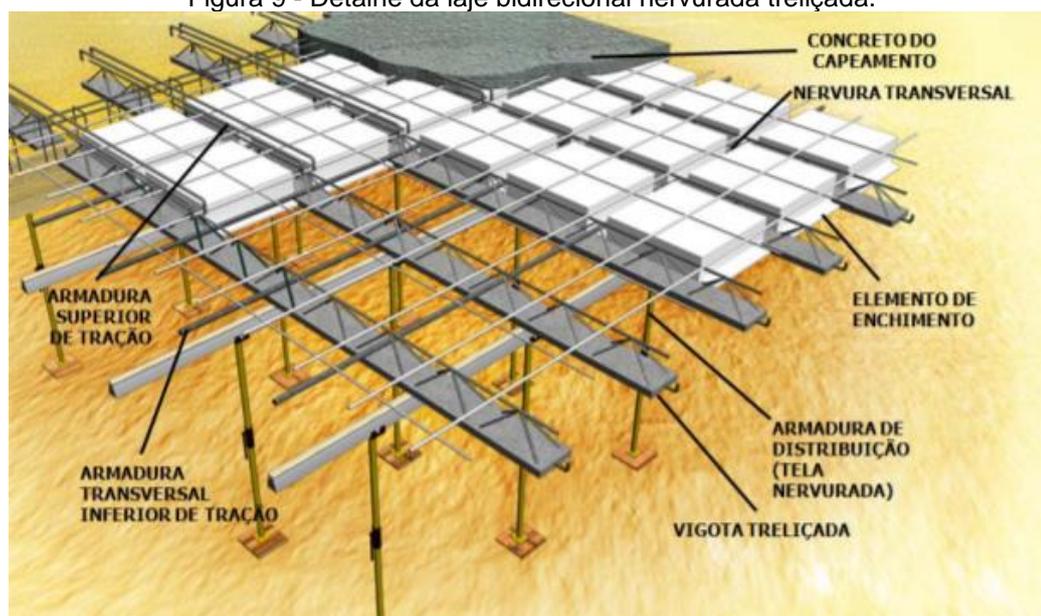
Aço	Área mínima	Número de barras/m	
		Ø 5,0 mm	Ø 6,3 mm
CA 25	0,9 cm ² /m	5	3
CA 50, CA 60 e tela soldada	0,6 cm ² /m	3	3

Fonte: ABNT NBR 14859-1 (2002).

Por fim, pode-se prever a armadura superior de tração, que visa dar continuidade as nervuras longitudinais com o restante da estrutura, combater a fissuração e garantir resistência ao momento fletor negativo. É empregada na capa de concreto sobre os apoios nas extremidades das vigotas e no mesmo alinhamento das nervuras transversais.

Após a montagem da laje, uma capa de concreto é lançada sobre todos os componentes e passa a interligá-los, trazendo monoliticidade ao conjunto (ver Figura 9). Conforme a NBR 14859-1 (2002), a espessura da placa é medida a partir da face superior do elemento de enchimento e é função da altura total da laje, possuindo espessura mínima de 3,0 cm.

Figura 9 - Detalhe da laje bidirecional nervurada treliçada.



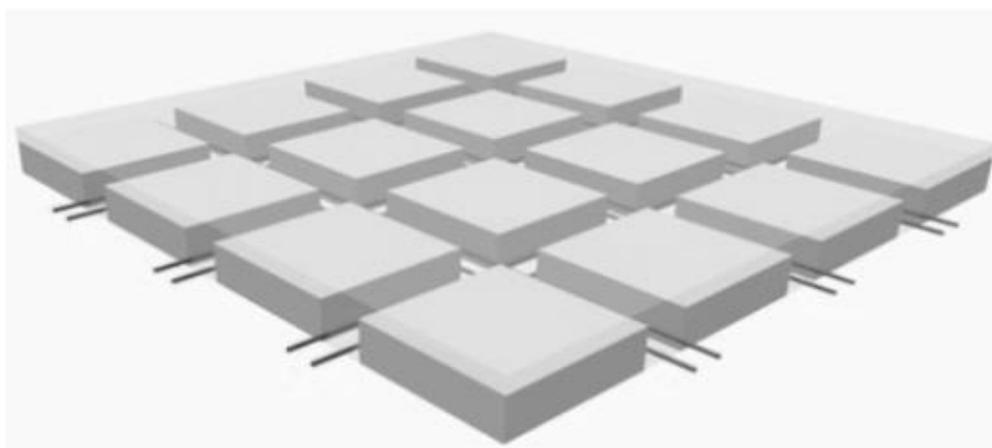
Fonte: Vizotto (2010).

2.2.3 Laje nervurada convencional

A laje nervurada convencional refere-se basicamente ao tipo de placa que envolve a utilização de concreto moldado no local, aço e material para enchimento (opcional), geralmente resultando em uma estrutura com nervuras em uma ou duas direções na parte inferior e mesa na parte superior da laje.

Na laje nervurada convencional, todas as etapas são realizadas *in loco*. Com isso, há necessidade do uso de fôrmas e escoramentos, ao contrário das lajes nervuradas com vigotas treliçadas que fazem uso apenas de cimbramentos intermediários. Na obra, as armaduras são distribuídas e concretadas entre as nervuras e o espaçamento entre elas é definido com base na escolha do material de enchimento utilizado e sua largura, como na Figura 10.

Figura 10 - Laje nervurada moldada *in loco*.



Fonte: AltoQi, 2019.

2.2.4 Material de enchimento

Uma grande vantagem que as lajes nervuradas possuem é a redução do peso-próprio através do emprego de material com peso específico menor que o do concreto entre as nervuras. Deve-se lembrar que o material utilizado na substituição do concreto não possui qualquer função estrutural, sendo utilizado apenas com o objetivo de reduzir o consumo de concreto na laje. Porém, mesmo que não seja considerado material resistente, deve ter resistência suficiente para suportar as ações de construção e do peso advindo da capa de concreto lançada sobre ele.

Os elementos utilizados podem ter uma única utilização, quando compõem definitivamente a estrutura da laje, ou podem ser reutilizados, como as fôrmas removíveis após a concretagem. Dentre os elementos mais empregados, pode-se destacar os blocos de EPS ou cerâmicos e as fôrmas reaproveitáveis.

- Blocos de EPS

O enchimento em EPS (Poliestireno Expandido), popularmente conhecido como isopor, é um material extremamente leve, isolante (térmico e acústico), com pouca permeabilidade de água e com uma ruptura dúctil. Em geral, observa-se o emprego de blocos de EPS em lajes nervuradas, especialmente com vigotas treliçadas, visto que dispensa a regularização da superfície por proporcionar uma superfície inferior plana.

Dentre as vantagens, Pinheiro (2003) menciona algumas delas: Coeficiente de absorção muito baixo, o que favorece a cura do concreto moldado *in loco*; vedação eficiente; disponibilidade de execução de teto plano.

- Blocos cerâmicos

Trata-se de elementos vazados produzidos segundo variadas dimensões. Este elemento, assim como o EPS, é bastante utilizado em lajes nervuradas com vigotas treliçadas devido à facilidade de execução. Dentre as características mais importantes, os blocos possuem bom isolamento térmico e acústico, além de serem impermeáveis. Apesar de ser um material de baixo custo e amplamente utilizado em lajes nervuradas, uma de suas restrições é o peso específico elevado para um material com a finalidade exclusiva de enchimento.

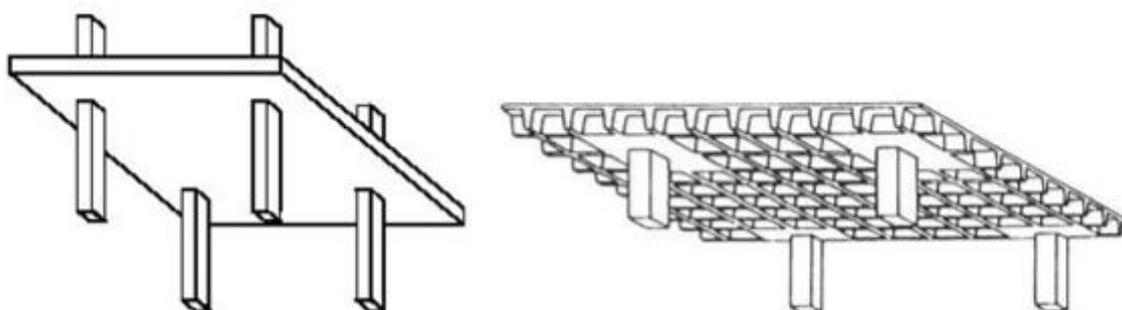
- Fôrmas reaproveitáveis

Também denominados de cubetas, podem ser fabricadas em polipropileno ou metal. São elementos leves que dispensam a utilização de compensados de madeira tradicionais para escoramento, resultando em obra produtiva e com menor geração de resíduos devido ao elevado reaproveitamento das fôrmas.

2.3 Lajes lisas

As lajes lisas referem-se, de forma geral, a lajes que compõem sistemas estruturais sem a presença de vigas para transferência de esforços. De acordo com a NBR 6118 (2014), as lajes sem vigas podem ser classificadas em dois tipos: Lajes-cogumelo e lajes lisas. A primeira classificação refere-se às lajes apoiadas em pilares com capitel, elemento obtido através do engrossamento da seção transversal do pilar próximo da ligação com a laje. Conforme Vargas (1997), este elemento proporciona a ligação entre laje e pilar, com a finalidade de reduzir as altas tensões de cisalhamento da região. Já o segundo tipo, lajes lisas, possui pilares sem capitéis para o apoio, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 - Sistema estrutural de lajes sem vigas (laje maciça e nervurada).



Fonte: Melges (1995).

A ausência de vigas no sistema estrutural permite maior flexibilidade na locação de paredes e, conseqüentemente, maior flexibilidade para modificações arquitetônicas. Desta forma, o ambiente torna-se versátil para diversos usos. Porém, a ausência deste elemento estrutural provoca a existência de um ponto de elevada concentração de esforços entre a laje e o pilar, com grandes implicações na fase de projeto, como é o caso do fenômeno de punção.

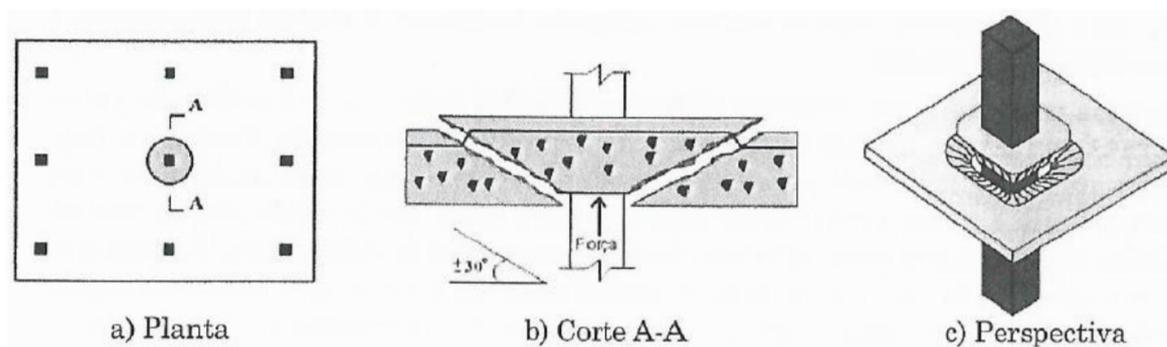
2.3.1 Punção

Dentre as restrições impostas pelo sistema de laje lisa, Araújo (2010) menciona a necessidade de que a região no entorno do pilar seja obrigatoriamente maciça, seja

a laje lisa maciça ou nervurada. Isso se deve às elevadas tensões de cisalhamento no entorno dos pilares, ocasionando o puncionamento da estrutura.

Segundo Melges (1995), a punção da placa refere-se à perfuração da mesma devido às elevadas tensões de cisalhamento provocadas por forças concentradas ou estas agindo em pequenas áreas. No caso de lajes lisas, a reação do pilar pode provocar a ruína da estrutura devido à perfuração brusca na placa. A ruptura decorrente se dá pela propagação de fissuras inclinadas na espessura da laje e, ainda conforme o mesmo autor, dependendo da posição do pilar e da armadura para combate à punção, estas se dão entre 30° e 35° em relação ao plano da laje, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 - Superfície de ruína para os casos de lajes lisa com pilares simétricos.



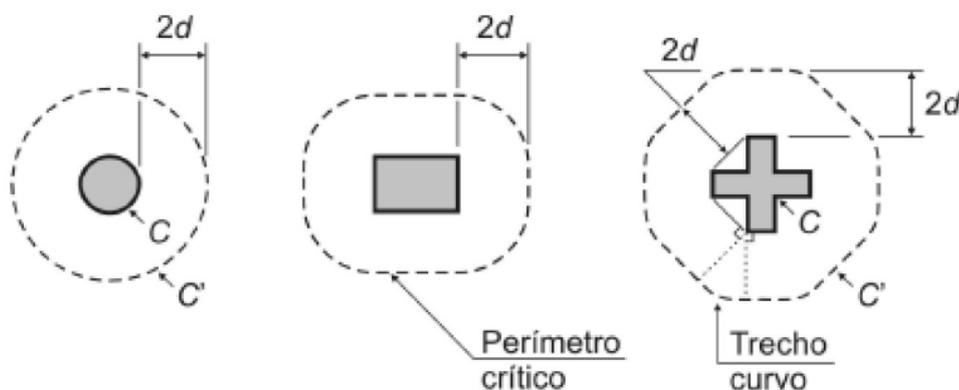
Fonte: ABECE/IBRACON (2015).

Visando solucionar este problema, Araújo (2010) cita que os capiteis são projetados para reduzir as tensões que ocorrem no entorno dos pilares, visto que proporciona um alargamento da seção no topo do pilar, aumentando a área de contato e, conseqüentemente, reduzindo as tensões. Porém, devido os inconvenientes com execução da forma e a necessidade de recortes no layout dos pavimentos, o uso deste elemento entrou em desuso e deu lugar a análises mais criteriosas como: aumento da altura útil da laje; dimensões, formato da seção transversal e posição do pilar; resistência do concreto; utilização de armaduras transversais para combate à punção; entre outros.

Desta forma, devido à existência de inúmeros fatores que contribuem para resistência ao puncionamento da estrutura, a NBR 6118 (2014) apresenta uma formulação baseada na verificação das tensões de cisalhamento em superfícies

críticas no entorno de forças concentradas para pilares internos, de canto e de borda (ver Figura 13).

Figura 13 - Perímetro crítico em pilares internos.



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Conforme a Figura 13, considera-se a existência de até três superfícies para verificação de punção em pilares internos. Na primeira superfície crítica (contorno C), situada no entorno do pilar, verifica-se a tensão de compressão diagonal do concreto através da tensão de cisalhamento.

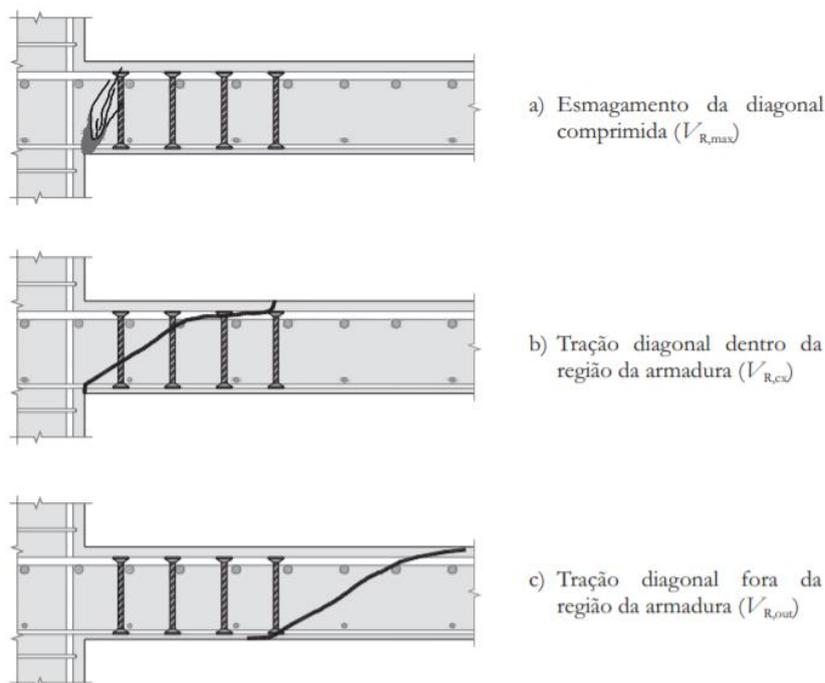
Na segunda superfície (contorno C'), que se encontra a uma distância $2d$ do pilar, verifica-se a resistência à tração diagonal através da tensão de cisalhamento atuante no contorno C'. Se necessário, a ligação é reforçada com armadura transversal (armadura de punção).

A última superfície (contorno C'') define o limite da armadura transversal, caso esta tenha sido empregada.

Quando as verificações das tensões de cisalhamento nas superfícies críticas resultam na necessidade do emprego de armadura transversal (de punção), a NBR 6118 (2014) sugere a utilização de conectores tipo pino, constituídos de pelo menos três linhas, com extremidades alargadas e ancoradas fora do plano da armadura de flexão, bem como dispostas radialmente a partir do perímetro do pilar. Ainda conforme a norma, mesmo que as verificações não resultem na necessidade de armadura de punção, esta deve ser prevista quando a ligação laje-pilar participar do sistema de contraventamento do pórtico, visto que colabora com a estabilidade global da estrutura.

Quanto ao modo de ruptura por punção na região, as lajes com armadura de cisalhamento podem sofrer três tipos e estas variam em função da taxa de armadura adotada por camada e o número de camadas. Conforme Oliveira (2013), o primeiro modo ocorre quando há o esmagamento da diagonal comprimida, os esforços compressão superam a resistência da biela de compressão e a ruptura ocorre antes da armadura iniciar (ver Figura 14a). O segundo ocorre quando há o escoamento plástico na armadura, ou seja, quando é solicitada ao máximo da sua capacidade (ver Figura 14b). O último modo de ruptura ocorre na região posterior à superfície crítica, após a distribuição das armaduras, comprovando que o número de camadas foi insuficiente (ver Figura 14c).

Figura 14 - Modos de ruptura por punção em lajes com armadura de cisalhamento.



Fonte: OLIVEIRA, 2013, p. 701.

Este e outros tipos de ruína podem ter um efeito progressivo e acabar propagando-se de um ponto específico da estrutura para os demais elementos, a isso, dá-se o nome de colapso progressivo.

2.3.2 Colapso Progressivo

De acordo com a norma ASCE 7-05 (2005), colapso progressivo ou desproporcional é a propagação de um dano local de um elemento a outro, resultando no colapso de toda ou uma grande parte da estrutura. Ou seja, é a extensão de uma falha local que se propaga desproporcionalmente para o restante da estrutura, ocasionando falha dos demais elementos que não foram projetados para resistir às solicitações decorrentes destes eventos. A Figura 15 ilustra um exemplo de estrutura com ocorrência de colapso progressivo, o edifício *Ronan Point*, onde uma explosão localizada gerou danos em uma parede externa e desencadeou a falha em diversos outros elementos.

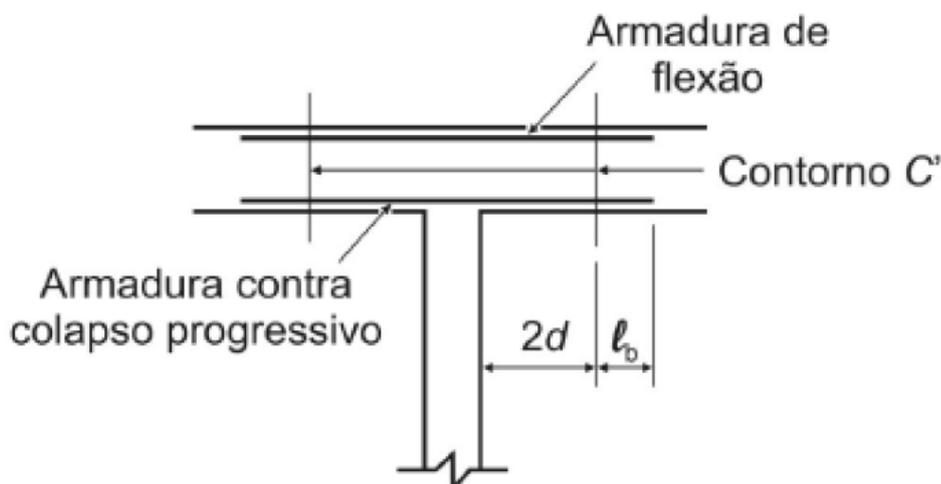
Figura 15 - Colapso progressivo do edifício *Ronan Point*.



Fonte: LARANJEIRAS, 2011, p. 36.

No caso de lajes lisas, uma ruptura local por puncionamento pode ocasionar a ruína da estrutura por colapso progressivo. Conforme a NBR 6118 (2014), a armadura de flexão inferior que atravessa o contorno C deve estar suficientemente ancorada além do contorno C' (ver Figura 16), garantindo a ductilidade da região e suportando a laje mesmo após uma possível ruptura por punção.

Figura 16 - Armadura contra colapso progressivo.



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

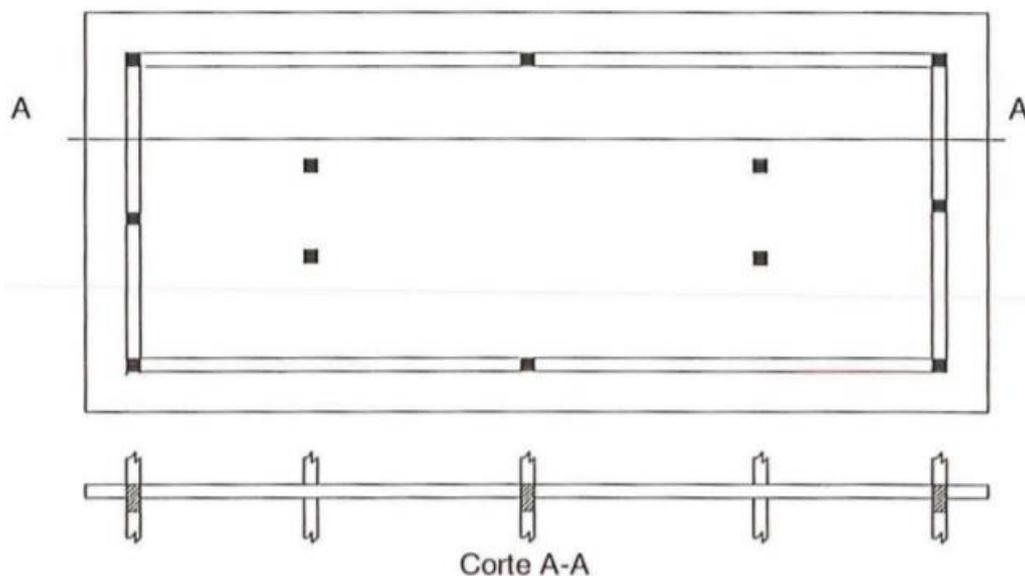
2.3.3 Vigas de borda

Este tipo de sistema estrutural associado à laje lisa é bastante empregado, pois para pilares de borda e de canto o fenômeno da punção se torna um pouco mais crítico, visto que há diminuição do perímetro que contribui para a resistência ao efeito de punção. Com isso, costuma-se empregar vigas em todas as bordas da laje. Dentre as vantagens do emprego destes elementos em lajes lisas, Vargas (1997) e Albuquerque (1998) mencionam algumas, tais como:

- Melhora na estabilidade global do edifício;
- Redução dos deslocamentos transversais nos pontos de descontinuidade da laje (bordas livres);
- Não prejudicam na arquitetura;
- Eliminação da necessidade de armadura para combate à punção nos pilares de canto e de extremidade.

De acordo com Fusco (1995), o emprego de um apoio contínuo, como as vigas de periferia, é providência sempre recomendável (ver Figura 17). Além das vantagens já citadas, o autor ainda menciona que a ausência destas vigas tem acarretado em manifestações patológicas no sistema estrutural.

Figura 17 - Laje lisa com vigas de borda.



Fonte: Vargas (1997).

2.3.4 Vantagens das lajes lisas

Algumas das vantagens que as lajes lisas possuem, especialmente quando comparadas às lajes de um sistema estrutural convencional, são mencionadas por Figueiredo Filho (1989):

- Alta adaptabilidade a diversas alterações ambientais, visto que as divisórias não estão condicionadas à localização das vigas, facilitando reformas e modificações;
- Simplificação das formas devido à ausência de vigas e, conseqüentemente, obstáculos no plano da laje que gerariam muitos recortes, ocasionando menor desperdício de material;
- Maior reaproveitamento de formas, visto que a ausência de vigas ocasiona maior facilidade para montagem e desmontagem e menos recortes;
- Simplificação da concretagem, visto que há poucos recortes que dificultem o acesso a determinadas regiões;
- Redução de revestimentos em função da área a ser revestida tornar-se menor com a ausência das vigas.

- Simplificação das instalações decorrente da menor quantidade de condutos e fios necessários, bem como a redução de cortes e emendas;
- Redução no tempo de execução em função da simplificação das tarefas de execução de formas, concretagem, instalações, entre outras.

2.3.5 Desvantagens das lajes lisas

Apesar das diversas vantagens vinculadas à utilização das lajes sem vigas, há algumas desvantagens que necessitam de análise para viabilização deste sistema estrutural. Dentre as desvantagens, algumas citadas por Figueiredo Filho (1989) são:

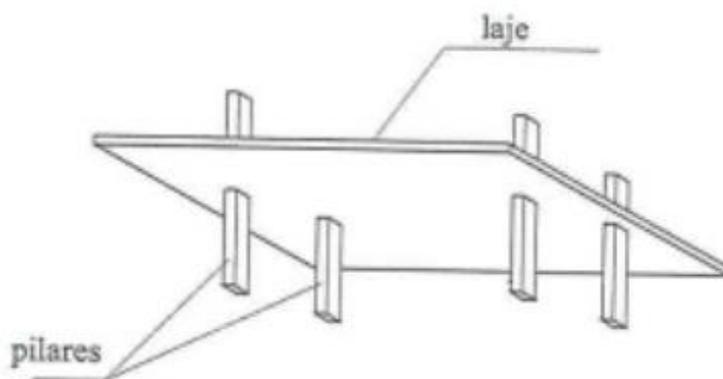
- Puncionamento das lajes;
- Maiores deslocamentos transversais das lajes;
- Redução da estabilidade global do edifício decorrente da ausência de vigas;

2.3.6 Laje lisa maciça

2.3.6.1 Definição, características e aplicação

A laje lisa maciça é uma laje maciça de concreto que não compõe um sistema estrutural convencional, mas sim um sistema em que não há vigas ou paredes para o apoio da placa e as cargas são transmitidas diretamente aos pilares (ver Figura 18).

Figura 18 - Sistema estrutural composto por laje lisa maciça.



Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009).

A utilização de lajes maciças sem vigas obteve crescimento decorrente da facilidade de execução e de mão de obra especializada para uma placa maciça, aliada à melhoria ou eliminação de algumas desvantagens apresentadas por lajes maciças em um sistema estrutural convencional, como o custo com formas e velocidade na execução. Porém, a ausência de vigas traz outras recomendações e preocupações, como o aumento da espessura mínima exigida e a disposição uniforme de pilares em filas ortogonais de forma a contribuir com o comportamento estrutural da laje.

Quanto às especificações da NBR 6118 (2014), esta preconiza limites mínimos para a espessura. Diferente das lajes maciças convencionais, com valores mínimos entre 7 e 15 cm, quando se trata de laje lisa maciça esse valor passa a ser 16 cm independente da finalidade de uso. Quanto aos valores usuais para vão livre, há recomendações práticas de 3,5 a 5 metros para que esse tipo de laje se torne viável, isso porque o grande volume de concreto empregado em lajes maciças eleva seu peso próprio e o torna a maior parcela do carregamento, inviabilizando a escolha do sistema estrutural.

2.3.6.2 Vantagens das lajes lisas maciças

Além das vantagens já mencionadas provenientes da ausência de vigas, a seguir serão listadas algumas das vantagens decorrentes do emprego de laje maciça em um sistema estrutural, conforme Nappi (1993):

- Alta resistência a fissuras;
- Facilidade no lançamento e adensamento do concreto;
- Possibilidade de emprego de telas soldadas;
- Não necessidade de área para material inerte.

2.3.6.3 Desvantagens das lajes lisas maciças

Ainda conforme Nappi (1993), algumas das desvantagens decorrentes do uso de placa maciça são:

- Elevado consumo de fôrmas;
- Uso desnecessário de concreto em zonas que não há solicitação deste, gerando maior consumo do material;
- Tempo maior para execução das formas.

2.3.7 Laje lisa nervurada

2.3.7.1 Definição, características e aplicação

Assim como as lajes maciças, as lajes nervuradas moldadas no local e as lajes com vigotas pré-fabricadas também podem compor um sistema estrutural sem a presença de vigas para transferência de esforços. Porém, conforme Figueiredo Filho (1989), esta solução é denominada como lajes aliviadas sem vigas, isso se deve aos vazios presentes no plano da placa que diminuem o peso próprio da estrutura e impactam diretamente na economia de concreto dos demais elementos estruturais, visto que aliviam os esforços transferidos para estes.

Segundo Araújo (2010), no caso usual de laje nervurada (nervuras inferiores), a mesa de compressão funciona como abas de viga T enrijecendo as nervuras para os momentos fletores positivos. Porém, caso a laje seja contínua, onde normalmente há surgimento de momentos negativos na região dos apoios, as zonas aliviadas não devem estar presentes na região no entorno do pilar, deve-se prever zonas maciças de concreto no entorno para enrijecer a ligação laje-pilar e contribuir para a resistência à altas tensões de cisalhamento típicas nas lajes lisas. Há duas alternativas comuns para atender à necessidade da região maciça, prever a zona maciça formando um ábaco (ver Figura 19) ou utilizar faixas maciças de concreto entre os apoios em uma ou duas direções, conhecidas como vigas-faixa (ver Figura 20).

Figura 19 - Sistema estrutural composto por laje nervurada utilizando capitéis.



Fonte: AltoQi, 2014.

Figura 20 - Sistema estrutural composto por laje nervurada utilizando vigas-faixa.



Fonte: Atex.

Segundo Sacramento (2018), o uso de vigas-faixa tem sido bastante utilizado por projetistas, pois proporcionam um horizonte único para fôrmas e escoramento. Porém, em alguns casos, há necessidade de um engrossamento na altura da viga-

faixa para que se evite a verificação das lajes à punção e ocorrência de flechas excessivas.

2.3.7.2 Vantagens das lajes lisas nervuradas

As lajes nervuradas são quase sempre vantajosas e Spohr (2008) menciona algumas dessas vantagens, além daquelas já citadas oriundas da ausência de vigas nas bordas das lajes, são elas:

- Viabilidade de vencer vão maiores e suportar maiores cargas em relação à laje convencional;
- Não há necessidade de alinhamento de pilares, sendo distribuídos conforme a necessidade;
- Facilidade de execução;
- O processo de execução se torna muito mais rápido quando estão associadas a um sistema de fôrmas industrializadas;
- Em prédios de salas de aula ou bibliotecas podem ser utilizadas apenas com acabamento superficial, contribuindo para o conforto acústico do ambiente.

2.3.7.3 Desvantagens das lajes lisas nervuradas

Dentre as desvantagens, Faria (2010) menciona algumas delas:

- Necessidade de mão de obra qualificada;
- Custo elevado com material inerte, a depender do tipo escolhido;
- Necessidade de espaço para estocagem de material inerte.

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações gerais

A metodologia aplicada a este trabalho se deu a partir da análise comparativa dos esforços de momento fletor e cortante, bem como o consumo de aço e concreto entre dois sistemas estruturais, são eles:

- Laje lisa maciça (Sistema 1);
- Laje lisa nervurada convencional (Sistema 2).

O sistema 1 corresponde ao composto por lajes sem vigas apoiadas diretamente sobre os pilares e com espessura constante em toda sua seção transversal. Já o sistema 2 compreende as lajes que também que não possuem vigas, porém, neste modelo, fez-se o uso de maciços na região dos pilares intermediários. Tal uso se justifica pelo modelo de laje nervurada necessitar de maciços no entorno dos pilares, conforme mencionado na seção 2.3.7.1 desse trabalho. Os dois modelos analisados possuem vigas em todo o contorno da laje, chamadas de vigas de borda.

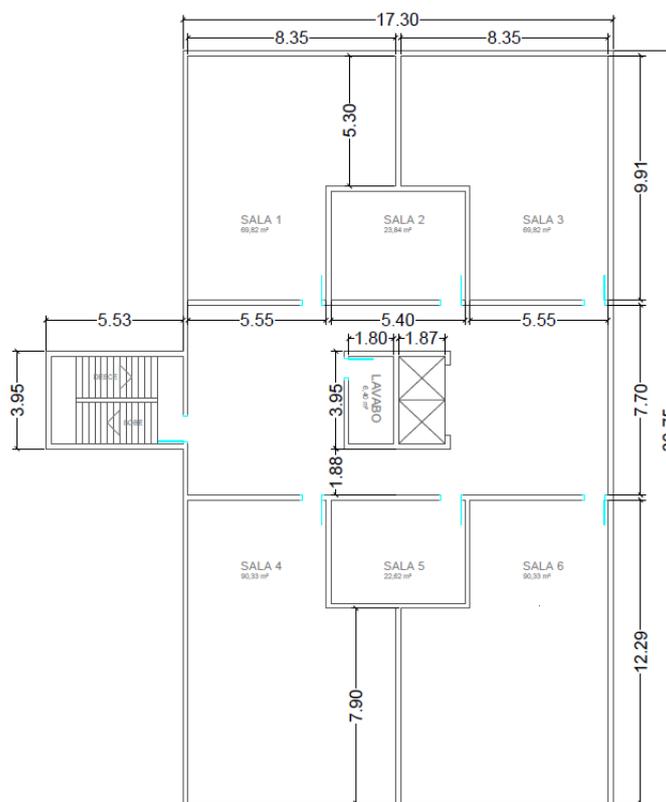
Inicialmente, o estudo se desenvolveu com a escolha dos sistemas estruturais a serem analisados. Optou-se pela comparação entre sistemas de laje lisa devido à crescente utilização destes e a necessidade atual de estruturas versáteis, que se adaptem à alta flexibilidade que os ambientes demandam. Na etapa seguinte, através da elaboração de uma planta baixa para o edifício, foi possível definir o posicionamento dos pilares, vigas e lajes e, conseqüentemente, realizar o pré-dimensionamento destes elementos estruturais. Por fim, realizou-se o lançamento da estrutura em *software* para projeto estrutural e foram obtidos os resultados necessários para análise e comparativo entre os sistemas estruturais adotados.

3.2 Projeto arquitetônico

O projeto elaborado e analisado neste trabalho é um edifício comercial de 6 pavimentos, térreo e 5 pavimentos-tipo, com 3,3 metros de pé-direito, sendo constituído de 6 salas comerciais por pavimento que totalizam 531,11 m², conforme a Figura 21. As plantas arquitetônicas e as referentes ao projeto estrutural foram elaboradas no *software* AutoCAD. Vale ressaltar que neste estudo foram

desconsideradas estruturas como: casa de máquinas, escadas e reservatórios. Isso porque tais estruturas não influenciariam nas análises e nos resultados obtidos neste trabalho.

Figura 21 - Planta-baixa do edifício-exemplo (medidas em metros).



Fonte: Autora (2021).

A escolha de um edifício com salas comerciais se justifica pelas elevadas modificações que cada ambiente estará sujeito a depender do uso. A utilização de um sistema estrutural sem a presença de vigas facilitará tais alterações, visto que a presença de divisórias nos ambientes não ficará condicionada à localização destas, caso houvessem.

3.3 Pré-dimensionamento da estrutura

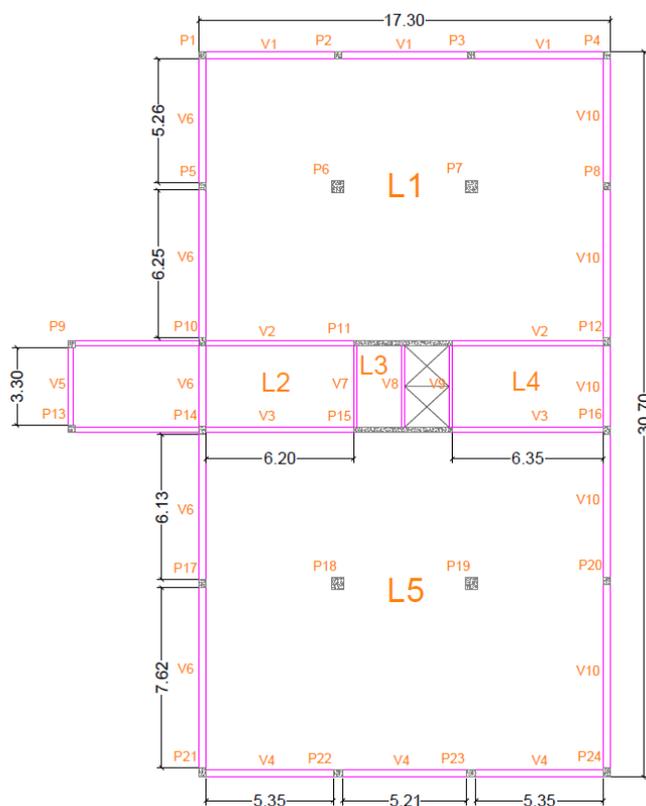
Após a escolha da arquitetura, foi realizada a locação e o pré-dimensionamento dos elementos estruturais. Esse último com o intuito de utilizar, inicialmente, as dimensões mínimas exigidas por norma e/ou de recomendações práticas para cada elemento estrutural e, posteriormente, redimensioná-las caso houvesse necessidade.

O projeto foi definido de forma que suas características fossem viáveis para as três alternativas de lajes lisas propostas. Desta forma, em todos os sistemas estruturais analisados, os pilares foram posicionados respeitando as condições impostas pela arquitetura do projeto e algumas outras condições, sendo elas:

- Presença dos pilares nos cantos da edificação, contorno da escada e do elevador;
- Disposição o mais regular possível;
- Evitar posicionamento em regiões de destaque;
- Dispor de forma que os vãos obtidos atendam ao valor econômico de vão usual de cada tipologia.

Após a locação dos pilares conforme recomendações acima citadas, foram posicionadas as vigas de borda, bem como as vigas centrais que dividem a estrutura em duas grandes lajes lisas nos extremos e em três lajes maciças apoiadas sobre essas vigas, conforme a Figura 22.

Figura 22 - Planta de forma do pavimento-tipo



Fonte: Autora (2021).

Dessa forma, a análise comparativa será direcionada às lajes lisas L1 e L5, visto que as lajes L2, L3 e L4, as vigas e os pilares serão idênticos nos dois casos analisados.

3.3.1 Lajes

Como visto, a arquitetura é a mesma para os sistemas estruturais analisados e, conseqüentemente, as lajes possuem as mesmas dimensões nestes dois. Porém, como os sistemas estruturais são distintos, utilizou-se de formulações distintas para o pré-dimensionamento desse elemento.

Para a definição das cargas permanentes e variáveis e demais carregamentos aplicados as lajes, tomou-se como referência a NBR 6120 (2019) e a NBR 6118 (2014).

- Laje lisa maciça

A estimativa da espessura da laje lisa maciça foi obtida, conforme Dias (2004), por meio do pré-dimensionamento em função do maior vão, visto que caracteriza a pior situação para a laje, conforme a equação 1.

$$\frac{l}{40} \leq h \leq \frac{l}{30} \quad (1)$$

Em que:

h – espessura da laje;

l – maior vão.

- Laje lisa nervurada

Ainda conforme Dias (2004), a estimativa da espessura total da laje lisa nervurada foi obtida conforme equação 2:

$$\frac{l}{30} \leq h \leq \frac{l}{25} \quad (2)$$

Em que:

h – espessura da laje;

l – maior vão.

A definição das dimensões das nervuras foi feita com base nos limites expostos pela NBR 6118 (2014), o qual define como dimensão mínima para a espessura da mesa, o maior valor entre 1/15 a distância entre as faces das nervuras ou 4 cm, conforme equação 3.

$$h_f \geq \begin{cases} \frac{1}{15} \cdot l_o \\ 4 \text{ cm} \end{cases} \quad (3)$$

Já as nervuras não devem ser menores que 5 cm.

Além das nervuras, foi necessário realizar o pré-dimensionamento do capitel, visto que há necessidade de uma região maciça no entorno do pilar, devido ao efeito da punção. Este foi feito de maneira arbitrária e, após o lançamento e processamento no *software*, é que as dimensões foram definidas de modo que a superfície crítica C', apresentada no diagrama de punção dos pilares, estivesse posicionada no interior do capitel.

O material inerte escolhido para utilização na laje nervurada foi o bloco de EPS. Tal escolha se deu pela leveza do material, alta adaptabilidade no momento da obra, bom isolamento térmico e acústico do ambiente, além de ser uma escolha sustentável.

3.3.2 Pilares

Os pilares foram pré-dimensionados da mesma maneira para as duas situações, com mesma altura e seção transversal. O processo iniciou-se com a estimativa da carga atuante no elemento por meio do processo de áreas de influência, conforme sugere Pinheiro (2003), a partir da equação 4.

$$A_c = \left(\frac{N_d}{\sigma_{id}} \right) \cdot \gamma_{corr} \quad (4)$$

Em que:

A_c – Área da seção transversal do pilar;

N_d – Carregamento de cálculo do pilar;

σ_i – Tensão ideal de cálculo do concreto;

γ_{corr} – Fator de correção para consideração do momento fletor.

O carregamento de cálculo é obtido a partir da equação 5:

$$N_d = 1,4 \cdot A_i \cdot \gamma_n \cdot [q_T \cdot (n_p + 0,7) + q_c] \quad (5)$$

Onde

A_i – Área de influência do pilar;

γ_n – Coeficiente de majoração da carga em função da menor dimensão da seção transversal do pilar;

q_T – Carga do pavimento tipo por unidade de área;

n_p – Número de pavimentos-tipo;

q_c – Carga do telhado por unidade de área.

A tensão ideal de cálculo do concreto é obtida, conforme equação 6, em função da resistência de cálculo do concreto, taxa de armadura e resistência de cálculo do aço para deformação 0,2%.

$$\sigma_{id} = 0,85 \cdot f_{cd} + \rho \cdot (f_{cd} - 0,85 \cdot f_{cd}) \quad (6)$$

Por fim, o parâmetro para correção do momento fletor (γ_{corr}) possui diversos valores apresentados na literatura, porém, neste trabalho, adotou-se os valores apresentados por Pinheiro (2003), os quais variam conforme a posição do pilar (canto, extremidade ou intermediário), como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores para γ_{corr} conforme posição do pilar analisado.

Pilar	γ_{corr}
Intermediário	1,3
Extremidade	1,5
Canto	1,8

Fonte: Autora (2021).

3.3.3 Vigas

Para o pré-dimensionamento das vigas, foi fixada a largura (b_w) e estimou-se a altura de acordo com o vão a vencer e com a condição de apoio, sendo adotada as seguintes recomendações práticas:

- $h = \frac{l}{10}$ para vigas bi-apoiadas de concreto armado;
- $h = \frac{l}{12}$ para vigas contínuas de concreto armado.

Assim como para as lajes, também foi considerada a carga de parede sobre esses elementos conforme a NBR 6118 (2014).

3.4 Lançamento do edifício comercial em programa computacional

Após a concepção do projeto arquitetônico e o pré-dimensionamento dos elementos estruturais, fez-se uso de *software* de análise estrutural para obtenção das análises almeçadas. Foi utilizado o *software* Eberick da empresa AltoQi. Tal escolha se deu pelo fato desse estar disponível em uma versão demonstrativa, acessível e gratuita, além de atender às necessidades deste trabalho. Vale mencionar que esse *software* faz uso de um modelo de grelha para análise das lajes.

A planta arquitetônica foi importada ao *software* e, inicialmente, realizou-se o lançamento das duas estruturas analisadas. Ao finalizar o lançamento, a estrutura foi processada para que se desse início às análises. O primeiro passo foi a verificação de possíveis erros na concepção ou no lançamento do edifício, bem como a análise de avisos emitidos pelo *software*. Corrigidos os erros e avisos emitidos, foram

realizados pequenos ajustes na estrutura a fim de obter melhores resultados. Dentre esses ajustes, nas lajes L1 e L2, optou-se pela utilização da armadura conhecida por malha base, visto que é uma solução amplamente adotada em lajes de grandes dimensões, especialmente lajes lisas e nervuradas.

3.5 Parâmetros de comparação utilizados

Com a estrutura definida, foi possível verificar os resultados e realizar as análises dos esforços de momento fletor e cortante, flechas e, por fim, o consumo dos materiais em cada modelo.

Para comparação do consumo de material entre os sistemas e uma melhor visualização dos resultados, foram utilizados índices que relacionam o consumo de determinado material e a área total da edificação. Tais índices já foram utilizados em algumas pesquisas, tal como em Spohr (2008).

3.5.1 Índice de concreto I_C

Corresponde à razão entre o consumo total de concreto na edificação e a área da mesma, conforme equação 7.

$$I_C = \frac{V}{A} \quad (7)$$

Sendo:

V – Volume de concreto (m³);

A – Área real global da edificação (m²).

3.5.2 Índice de aço I_A

Corresponde à razão entre o consumo total de aço na edificação e a área da mesma, conforme equação 8.

$$I_A = \frac{P}{A} \quad (8)$$

Sendo:

P – Consumo de aço (kg);

A – Área real global da edificação (m²).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Pré-dimensionamento

O pré-dimensionamento dos elementos estruturais foi realizado em planilha eletrônica e foram obtidos os resultados apresentados a seguir.

4.1.1 Laje lisa maciça

A altura foi obtida com o uso do maior vão, que ocorre na laje L5 entre os pilares P18 e P19 e a viga V4, visto que se configura como a pior situação do projeto.

$$\frac{8}{40} \leq h \leq \frac{8}{30}$$

$$0,2 \leq h \leq 0,27$$

Dentre os valores obtidos optou-se por $h = 0,25 \text{ m} = 25 \text{ cm}$.

As ações atuantes na estrutura foram obtidas com base nas normas NBR 6120 (2019) e NBR 6118 (2014). Para as ações permanentes, foi considerado: peso próprio do elemento, contrapiso, argamassa revestimento do teto, revestimento cerâmico e paredes. Já para as ações variáveis, utilizou-se dos valores fornecidos pela norma de acordo com uso e ocupação do edifício. O resultado obtido com cada uma das ações é apresentado abaixo.

- Peso próprio:

$$PP = h \cdot \gamma_{\text{conc}} \quad (9)$$

$$PP = 0,25 \cdot 25$$

$$PP = 6,25 \text{ kN/m}^2$$

- Contrapiso:

$$g_{\text{contrapiso}} = e \cdot \gamma_{\text{contrapiso}} \quad (10)$$

O peso específico adotado ($\gamma_{\text{contrapiso}}$) foi o valor médio de 21 kN/m^3 . Já a espessura foi de 3 cm , visto que é o valor mínimo presente em diversas recomendações práticas. Sendo assim, obteve-se:

$$g_{\text{contrapiso}} = 0,03 \cdot 21$$

$$g_{\text{contrapiso}} = 0,63 \text{ kN/m}^2$$

- Argamassa de revestimento do teto:

$$g_{\text{arg.rev.teto}} = e \cdot \gamma_{\text{arg.rev.teto}} \quad (11)$$

O peso específico adotado foi o valor médio de 19 kN/m^3 e uma espessura de 2 cm.

$$g_{\text{arg.rev.teto}} = 0,02 \cdot 19$$

$$g_{\text{arg.rev.teto}} = 0,38 \text{ kN/m}^2$$

- Revestimento cerâmico:

Para esse projeto, foi adotado piso de mármore com carga de $0,85 \text{ kN/m}^2$.

- Paredes:

Conforme a NBR 6120 (2019), o peso específico para um bloco cerâmico vazado de 9 cm é $0,7 \text{ kN/m}^3$. Dessa forma, adotou-se esse valor para fins de pré-dimensionamento.

A carga variável adotada foi a de Salas de uso geral e Sanitários para edifícios comerciais, corporativos e de escritórios, $q = 2,5 \text{ kN/m}^2$. Dessa maneira, a carga total (permanente + variável) aplicada na laje foi de:

$$p + q = 11,31 \text{ kN/m}^2$$

4.1.2 Laje lisa nervurada

Para a laje nervurada também foi utilizado o maior vão, dessa maneira, tem-se:

$$\frac{8}{30} \leq h \leq \frac{8}{25}$$

$$0,27 \leq h \leq 0,32$$

Visto que se trata de um valor arbitrário para dar início ao dimensionamento de fato, o valor adotado para a altura total da laje nervurada foi de $h = 0,40 \text{ m} = 40 \text{ cm}$.

Quanto à altura da mesa, a esta foi fixada o valor de 5 cm, já para as nervuras adotou-se 40 cm como a distância entre as faces e 10 cm como a largura da nervura, totalizando o valor de 50 cm de eixo a eixo.

As cargas atuantes na laje lisa nervurada foram as mesmas aplicadas à laje do sistema estrutural 1, distinguindo-se apenas do peso próprio, visto que não possui seção transversal constante, e do peso do material inerte utilizado.

- Peso próprio:

Considerando DNX (ou DNY) como a distância entre faces da nervura, l_0 como a distância entre eixos da nervura, h_{total} como a altura total da laje, h_f como a altura da mesa, tem-se, através da equação 12:

$$PP = \gamma_{\text{conc}} \cdot \left[\frac{l_{0x} \cdot l_{0y} \cdot h_{\text{total}} - \text{DNX} \cdot \text{DNY} \cdot (h_{\text{total}} - h_f)}{l_{0x} \cdot l_{0y}} \right] \quad (12)$$

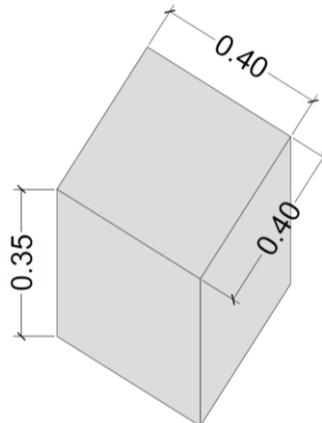
$$PP = 25 \cdot \left[\frac{0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,4 - 0,4 \cdot 0,4 \cdot (0,4 - 0,05)}{0,5 \cdot 0,5} \right]$$

$$PP = 4,4 \text{ kN/m}^2$$

- Blocos de EPS:

O bloco de EPS e as dimensões adotadas estão representados na Figura 23:

Figura 23 - Dimensões do bloco de EPS.



Fonte: Autora (2021).

O peso específico do material é de $0,17 \text{ kN/m}^2$, sendo assim:

$$P = \gamma_{\text{EPS}} \cdot h \quad (13)$$

$$P = 0,17 \cdot 0,35$$

$$P = 0,06 \text{ kN/m}^2$$

4.1.3 Pilares

Após o pré-dimensionamento das lajes e o cálculo do seu carregamento atuante, foi possível definir as dimensões iniciais dos pilares. Optou-se por manter as seções dos pilares constantes nas duas análises, para que a variável de análise desse estudo fosse apenas a laje. Assim, o dimensionamento dos pilares foi feito considerando a laje lisa maciça, visto que possui maior peso próprio, e apenas aplicou as mesmas seções de pilares para a laje lisa nervurada.

Para realizar o pré-dimensionamento, alguns parâmetros necessitaram ser definidos antes, sendo eles:

- $f_{ck} = 30\text{MPa}$;
- $\sigma_{id} = 230\text{MPa}$;
- $f_{sd} = 420\text{MPa}$ (para deformação de $0,2\%$ – CA – 50);
- $\rho = 2\%$;

No projeto analisado, foi fixado o valor de 30 cm em uma direção e variou a outra, conforme Tabela 3:

Tabela 3 - Pré-dimensionamento dos pilares.

PILAR	Nd	σ_{id} (kgf/cm ²)	A (cm ²)	B	H
P1	699,75	263	478,92	16	30
P2	1399,5	263	691,77	23	30
P3	1399,5	263	691,77	23	30
P4	699,75	263	478,92	16	30
P5	1538,37	263	760,41	26	30
P6	3062,31	263	1513,69	51	30
P7	3062,31	263	1513,69	51	30
P8	1538,37	263	760,41	26	30
P9	434,639	263	297,47	10	30
P10	1893,65	263	936,03	32	30
P11	4472,63	263	2550,93	85	30
P12	1771,92	263	1010,6	34	30
P13	434,639	263	297,47	10	30
P14	1933,33	263	955,64	32	30
P15	4473,53	263	2551,44	85	30
P16	1496,89	263	853,74	29	30
P17	1833,24	263	906,16	31	30
P18	3638,52	263	1798,51	60	30
P19	3638,52	263	1798,51	60	30
P20	1833,24	263	906,16	31	30
P21	1016,26	263	695,54	24	30
P22	2028,92	263	1002,89	34	30
P23	2028,92	263	1002,89	34	30
P24	1016,26	263	695,54	24	30

Fonte: Autora (2021).

4.1.4 Vigas

Como mencionado, as seções foram obtidas com base no vão a vencer e no tipo de apoio, fixando, inicialmente, a largura da viga. Para as vigas de borda e sobre pilares-parede (V1, V2, V3, V4, V6 e V10), a base adotada foi a seção dos pilares naquela direção. Para as demais, adotou-se base conveniente e que atendesse aos parâmetros mínimos de segurança (ver Tabela 4).

Tabela 4 – Pré-dimensionamento das vigas (medidas em centímetros).

VIGA	BASE ADOTADA	ALTURA	ALTURA ADOTADA
V1	30	47,92	50
V2	22	65,5	65
V3	22	65,5	65
V4	30	47,92	50
V5	19	37,5	40
V6	30	66,67	65
V7	14	37,5	40
V8	14	37,5	40
V9	14	37,5	40
V10	30	66,67	65

Fonte: Autora (2021).

4.2 Análise da estrutura no Eberick

Com as medidas iniciais definidas, a estrutura foi lançada no *software* estrutural. Inicialmente, foram posicionados os pilares, seguidos das vigas e, por fim, das lajes. Após o lançamento dos elementos estruturais, foi possível lançar os carregamentos atuantes sobre cada um deles.

Como as cargas obtidas no pré-dimensionamento tinham apenas a função de aproximar o resultado à realidade, de forma que pudesse obter as dimensões iniciais dos elementos, os valores de carga utilizados para obtenção das análises foi o fornecido pelo *software*.

Para as lajes do sistema estrutural 1 (laje lisa maciça), foi aplicada a carga de 1,545 kN/m² referente ao total advindo de revestimentos, 2,5 kN/m² referente à carga accidental (salas de uso geral e sanitários), 0,85kN/m² referente as paredes existentes no interior da laje L1 e 0,76kN/m² para a laje L2, além do peso próprio de 6,25kN/m². Totalizando 11,15 kN/m² para a laje L1 e 11,05 kN/m² para a laje L2. Para as lajes do sistema estrutural 2 (laje lisa nervurada), a diferença foi no peso próprio da estrutura, 4,42 kN/m² e a carga de EPS que é pequena. Totalizando 9,28 kN/m² para a laje L1 e 9,11 kN/m² para a laje L2. Com os valores obtidos no *software*, pode-se perceber a diferença mínima entre esses e os considerados no pré-dimensionamento para os dois sistemas.

Antes do processamento da estrutura, foram feitas algumas alterações nas configurações pré-determinadas pelo *software*, dentre elas, a definição da classe de agressividade ambiental para II, considerando a estrutura localizada em área urbana com agressividade moderada, resistência característica do concreto como 30 MPa e vento com velocidade de 42m/s.

Como mencionado, após o lançamento da estrutura, foram analisados alguns resultados, como esforço de momentos fletores e cortantes e flechas. Com isso, diante de avisos e erros emitidos pelo *software*, verificou-se a necessidade de alteração nas seções dos elementos estruturais. A seguir, as Tabela 5 e Tabela 6 apresentam as dimensões finais obtidas com base no melhor desempenho possível para a estrutura.

Tabela 5 - Dimensões finais obtidas para os pilares (medidas em cm).

PILAR	B	H	B_{adotado}	H_{adotado}
P1	16	30	30	30
P2	23	30	30	30
P3	23	30	30	30
P4	16	30	30	30
P5	26	30	30	35
P6	51	30	50	50
P7	51	30	50	50
P8	26	30	30	35
P9	10	30	30	30
P10	32	30	30	35
P11	85	30	22	415
P12	34	30	30	35
P13	10	30	30	30
P14	32	30	30	35
P15	85	30	22	415
P16	29	30	30	35
P17	31	30	30	35
P18	60	30	50	50
P19	60	30	50	50
P20	31	30	30	35
P21	24	30	40	30
P22	34	30	40	30
P23	34	30	40	30
P24	24	30	40	30

Fonte: Autora (2021).

Tabela 6 - Dimensões finais obtidas para as vigas (medidas em cm).

VIGA	BASE ADOTADA	ALTURA ADOTADA
V1	30	50
V2	22	55
V3	22	55
V4	30	50
V5	19	40
V6	30	65
V7	14	40
V8	14	40
V9	14	40
V10	30	65

Fonte: Autora (2021).

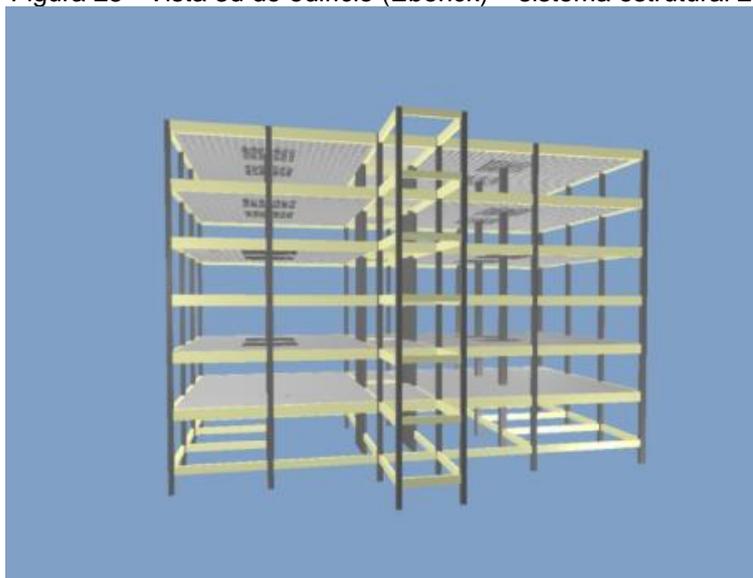
Conforme as Tabela 5 e Tabela 6, pode-se perceber que alguns valores adotados diferem bastante dos obtidos pelas formulações, isso ocorreu, pois notou-se que eram dimensões exageradas ou pequenas demais para a situação. Além do mais, a etapa de pré-dimensionamento consiste em um chute inicial para que se atinja o valor final de forma mais rápida, apenas modificando algumas seções, caso necessário. As Figura 24 e Figura 25 mostram o 3D dos dois sistemas estruturais.

Figura 24 - Vista 3d do edifício (Eberick) – sistema estrutural 1.



Fonte: Autora (2021).

Figura 25 - Vista 3d do edifício (Eberick) – sistema estrutural 2.



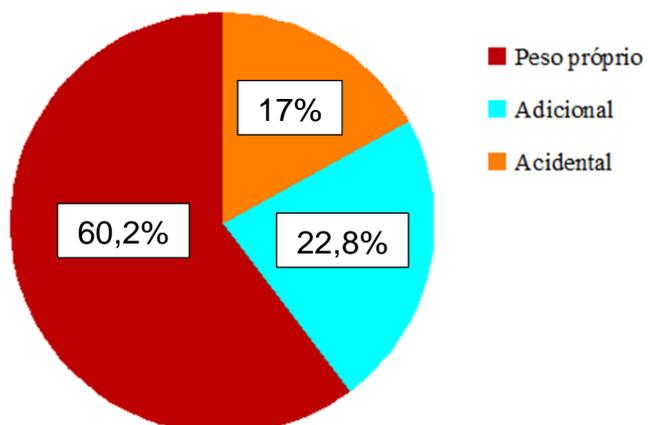
Fonte: Autora (2021).

Com as dimensões definitivas, as análises foram novamente realizadas, sendo possível observar os resultados finais apresentados a seguir, além de obter os índices de aço e concreto, para comparação do consumo de materiais entre os sistemas.

4.2.1 Distribuição das cargas verticais

- Sistema estrutural 1

Figura 26 - Distribuição das cargas verticais – sistema estrutural 1.

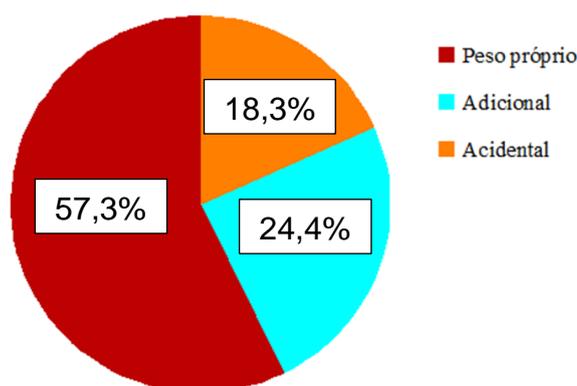


Fonte: Autora (2021).

Como já mencionado neste trabalho e na literatura, pode-se observar que a laje maciça tem como principal característica a predominância do peso próprio, especialmente no sistema estrutural adotado em que se optou pela ausência de vigas, acarretando na necessidade de uma espessura maior do que aquela que seria adotada no caso de um sistema estrutural convencional (com vigas).

- Sistema estrutural 2

Figura 27 - Distribuição das cargas verticais – sistema estrutural 2.

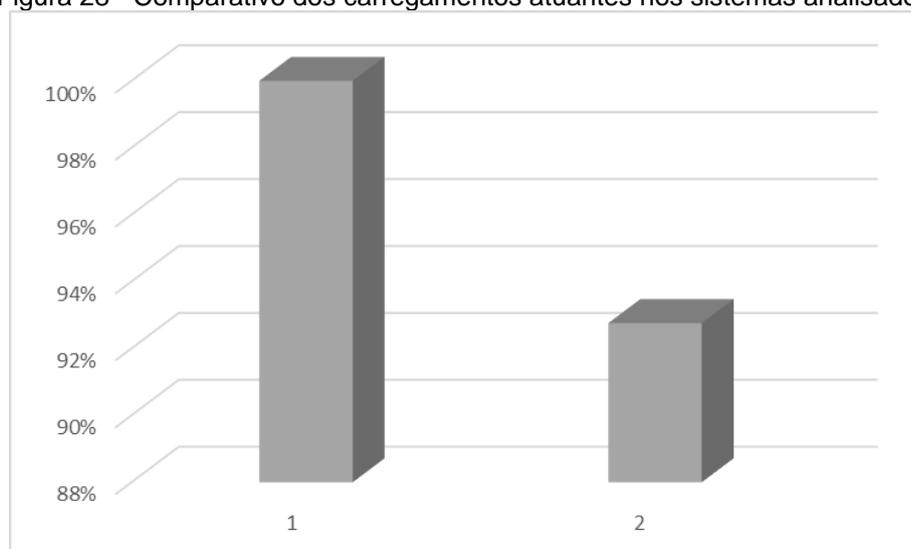


Fonte: Autora (2021).

Como já se esperava, em relação ao sistema estrutural 1, a laje do sistema estrutural 2 apresentou menor participação do peso próprio no total de cargas verticais devido à remoção de concreto em área tracionada (nervuras). Porém, o resultado não foi tão expressivo, devido à necessidade de elevada espessura da laje decorrente da ausência de vigas para apoio. A laje lisa nervurada foi dimensionada com 40 cm, já a laje lisa maciça com apenas 25 cm, o que acabou causando essa diferença relativamente pequena em relação à distribuição das cargas verticais.

Na Figura 28, pode-se observar o comparativo do carregamento total entre os sistemas estruturais. A comparação foi realizada considerando o carregamento atuante no sistema estrutural 1 como 100% e relacionando com o sistema estrutural 2.

Figura 28 - Comparativo dos carregamentos atuantes nos sistemas analisados.

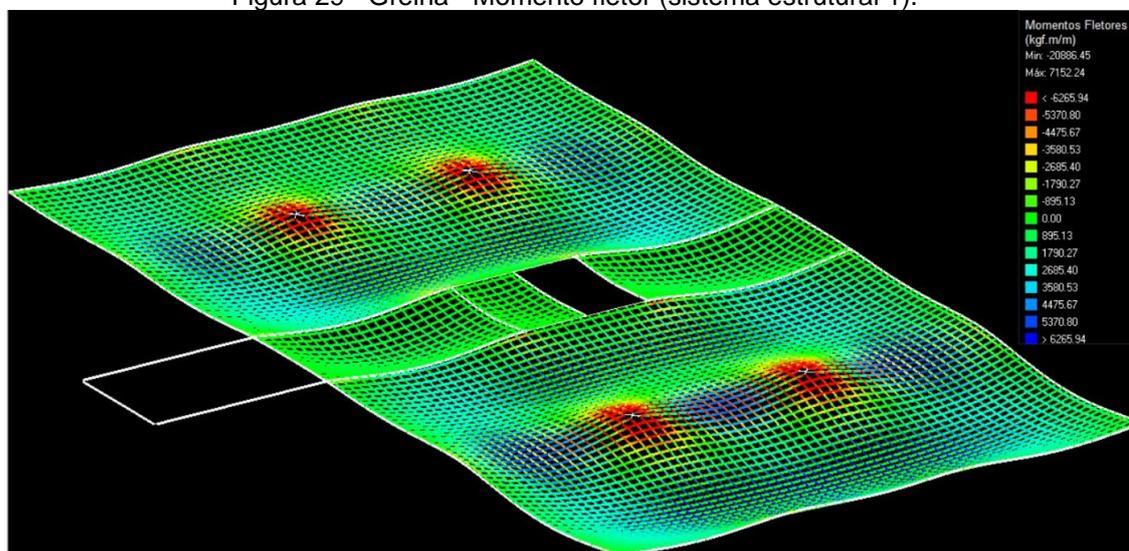


Fonte: Autora (2021).

4.2.1.1 Momento fletor

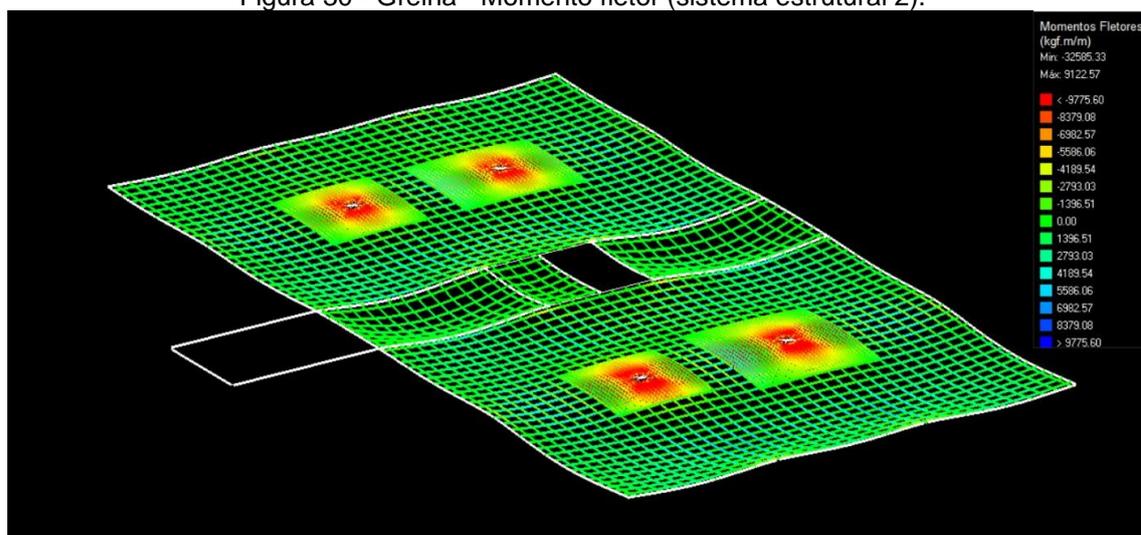
A seguir são apresentados os valores máximos para momento fletor nos dois sistemas estruturais

Figura 29 - Grelha - Momento fletor (sistema estrutural 1).



Fonte: Autora (2021).

Figura 30 - Grelha - Momento fletor (sistema estrutural 2).



Fonte: Autora (2021).

Como é possível observar nas Figura 29 e Figura 30, a laje do sistema estrutural 2 (laje lisa nervurada) apresentou os maiores momentos fletores. O momento positivo máximo foi 27,55% maior que o máximo positivo apresentado no sistema 1. Já o momento máximo negativo ocorreu na região dos pilares, como esperado, e foi 56,01% maior que o apresentado no sistema 1.

4.2.1.2 Deslocamentos

Os deslocamentos são analisados para o Estado Limite de Serviço de deformações excessivas e, segundo a NBR 6118 (2014), um dos tipos de deslocamento é a aceitabilidade sensorial, caracterizada, em seu limite, por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável nos elementos estruturais, tendo como valor-limite $l/250$. Os valores obtidos nesse trabalho são apresentados nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Deslocamentos imediatos e diferidos – cm (sistema estrutural 1).

Aceitabilidade sensorial - Visual			
Laje	Imediato	Diferido	Total
L1	0,49	0,47	0,96
L5	0,78	0,74	1,52

Fonte: Autora (2021).

Tabela 8 - Deslocamentos imediatos e diferidos - cm (sistema estrutural 2).

Aceitabilidade sensorial - Visual			
Laje	Imediato	Diferido	Total
L1	0,23	0,19	0,42
L5	0,40	0,34	0,74

Fonte: Autora (2021).

Comparando os resultados com os valores-limite para cada laje, tem-se:

- L1

Para L1, o maior vão é de 6,63m, sendo assim:

$$\frac{663}{250} = 2,65 \text{ cm} > \begin{cases} 0,96 \\ 0,42 \end{cases} \text{ cm}$$

- L5

Para L5, o maior vão é de 8m, sendo assim:

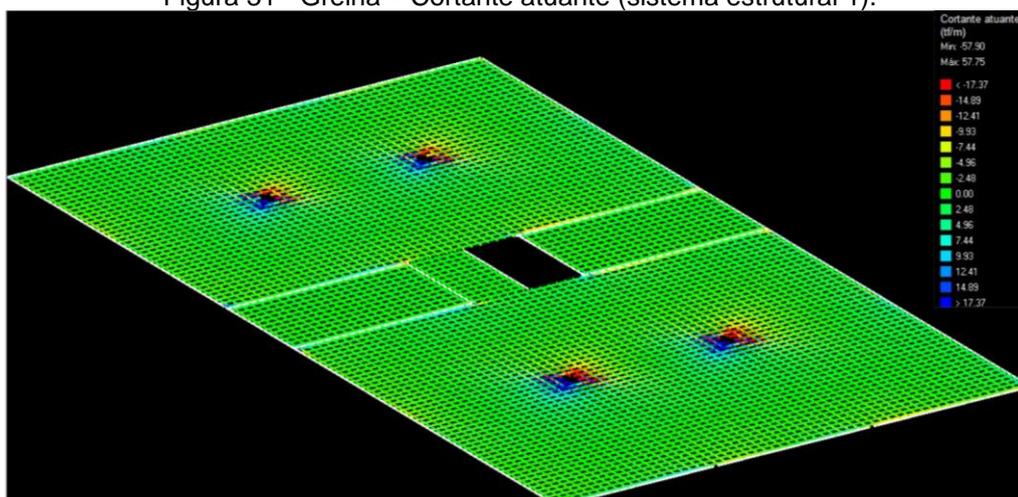
$$\frac{800}{250} = 3,2 \text{ cm} > \begin{cases} 1,52 \\ 0,74 \end{cases} \text{ cm}$$

Observa-se, pois, que os valores apresentados pelas lajes estão dentro do limite previsto em norma. Observa-se também que as flechas nas lajes do sistema estrutural 1 são maiores em 128,57% para a laje L1 e 105,41% para a laje L5. Isso decorre da maior espessura utilizada na laje nervurada e, também, do menor peso próprio dessa.

4.2.1.3 Cortante

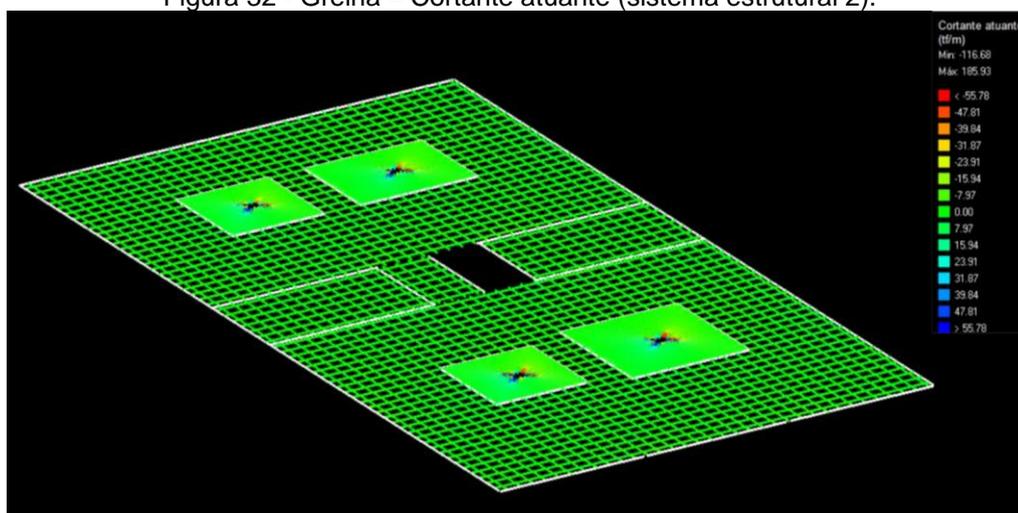
Uma das análises mais importantes em lajes lisas é a verificação do esforço cortante, visto que a ausência de vigas para transmissão dos esforços aos pilares provoca elevadas tensões nessa região, podendo resultar no puncionamento da laje, como já mencionado neste trabalho. Nas Figura 31 e Figura 32 é possível verificar os pontos críticos e os valores extremos para esse esforço.

Figura 31 - Grelha – Cortante atuante (sistema estrutural 1).



Fonte: Autora (2021).

Figura 32 - Grelha – Cortante atuante (sistema estrutural 2).



Fonte: Autora (2021).

Ao contrário do que se espera, como se pode perceber, a laje do sistema estrutural 2 apresentou esforços muito maiores, um aumento de 101,52% para o esforço máximo negativo e 221,96% para o máximo positivo. Na prática, isso não ocorre, pois a laje nervurada possui peso próprio menor. Porém, tal resultado se justifica pelo modelo de análise utilizado pelo *software*, analogia de grelhas. Em algumas situações, o método necessita de alguns ajustes, especialmente quando há recortes na laje ou em regiões próximas a pilares. O que ocorre é uma concentração de tensões elevadas e de maneira abrupta nesses pontos mencionados.

Dito isso, optou-se por manter a estrutura dessa forma, sem realizar ajustes, visto que não se trata de um erro e sim de uma situação que o método não aborda tão

perfeitamente o problema e acaba por não redistribuir os esforços adequadamente. A mesma situação ocorreu para os momentos fletores no tópicos 4.2.1.1.

Decorrente dos elevados esforços de cortante na região laje-pilar, especialmente no sistema 2, também houve maior preocupação com a possibilidade de punção dessa laje. Na laje do sistema estrutural 1, a ligação laje-pilar é feita diretamente, sem uso de elementos intermediários. Já no sistema estrutural 2, a ligação é feita por meio de capiteis embutidos na espessura da laje. Devido à situação exposta anteriormente acerca dos picos de tensão gerados pelo método de análise, foi necessário adotar capiteis de elevadas dimensões para que fosse possível garantir a segurança da estrutura. Nesse caso, foram utilizados capiteis de 360x360 cm nos pilares P6, P7 e P18, e de 460x460 cm no pilar P19, tendo suas dimensões definidas com base na resistência à punção.

No sistema estrutural 2, foram adotados 3 conectores por chapa, totalizando 216 conectores para os 4 pilares intermediários, conforme apresentado na Tabela 9 abaixo:

Tabela 9 - Armadura de punção - sistema estrutural 2.

Dimensões da chapa (cm)	Característica dos conectores				
	Aço	Diâmetro (mm)	L	S _p	S _c
26,5 x 2,5	CA25	6,3	21,6	8	12

Fonte: Autora (2021).

Onde:

S_p – Espaçamento do pilar (cm);

S_c – Espaçamento entre conectores (cm);

L – comprimento do conector.

4.2.1.4 Consumo de materiais

O quantitativo de materiais é obtido pelo próprio *software* e pode ser feito por material, por pavimento e por elemento. Nesse caso, optou-se pelo consumo por

material e elemento em todo o edifício. As Tabela 10 e Tabela 11 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 10 - Consumo de material - sistema estrutural 1.

	Vigas	Pilares	Lajes	Total
Aço (kg)	9.986,6	10.677,3	50.612,2	71.276,1
Volume concreto (m³)	141,7	92,8	694,6	929,1

Fonte: Autora (2021).

Tabela 11 - Consumo de material - sistema estrutural 2.

	Vigas	Pilares	Lajes	Total
Aço (kg)	8.943,5	9.619,4	33.416,5	51.979,4
Volume de concreto (m³)	141,7	92,8	585,5	820,0

Fonte: Autora (2021).

Para o índice de concreto e aço utilizou-se apenas o consumo originado das lajes, visto que são o foco desse trabalho. Dessa forma, com uma área de 531,11 m² por pavimento, tem-se:

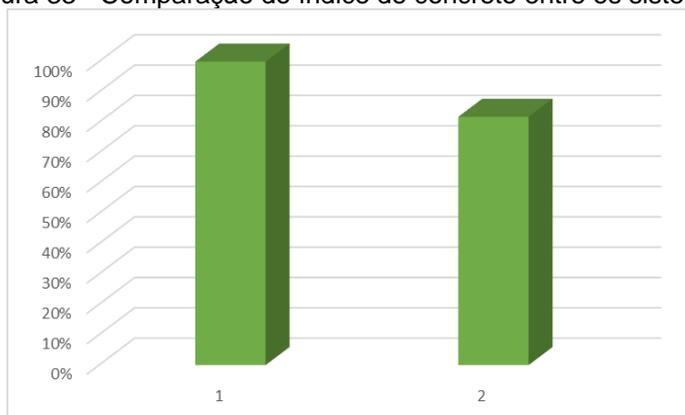
Tabela 12 - Índice de concreto e aço nas lajes do edifício.

	I_C	I_A
Sistema estrutural 1	0,22	15,88
Sistema estrutural 2	0,18	10,49

Fonte: Autora (2021).

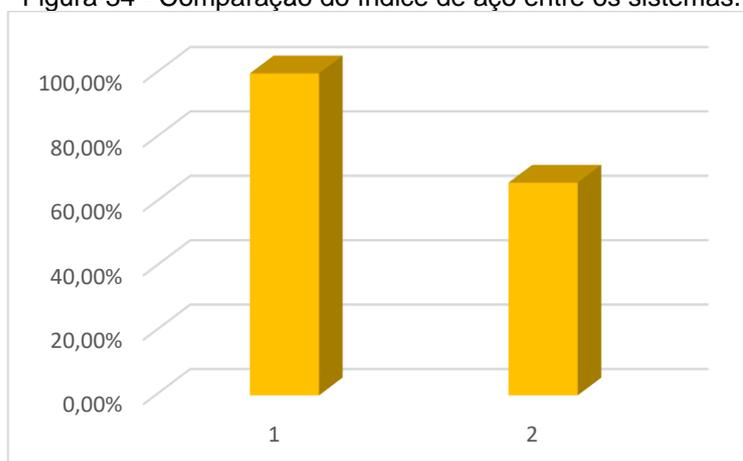
Com os dados obtidos, tem-se que o sistema estrutural 1 apresentou um índice de concreto e de aço maior quando comparado ao outro sistema. Tomando os resultados do sistema 1 como 100%, pode-se comparar os resultados por meio das Figura 33 e Figura 34:

Figura 33 - Comparação do índice de concreto entre os sistemas.



Fonte: Autora (2021).

Figura 34 - Comparação do índice de aço entre os sistemas.



Fonte: Autora (2021).

O sistema estrutural 2 apresentou um índice de concreto 18,18% menor quando comparado ao sistema estrutural 1 e um índice de aço 33,94% menor na mesma comparação. Tais resultados não são inesperados, visto que a laje lisa maciça apresentou um peso próprio maior que a nervurada, ocasionando em maiores carregamentos e, conseqüentemente, em uma maior área de aço.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Com base nos resultados expostos e discutidos, foi possível observar que o sistema estrutural 1 apresentou o maior peso próprio, o que é de se esperar, visto que a laje possui altura contínua totalmente preenchida por concreto. Decorrente disso, apresentou também os maiores deslocamentos e maior consumo de materiais.

O sistema estrutural 2 apresentou um índice de concreto 18,18% menor, o que pode ser relevante em um edifício de 6 pavimentos. Porém, esse parâmetro poderia ser ainda maior, caso os capiteis fossem menores. As elevadas dimensões dos capiteis foram adotadas para suportar o esforço atuante naquela região, o que acabou representando uma parcela expressiva no peso próprio da laje e interferiu negativamente em uma grande vantagem da laje nervurada: o peso próprio.

Quanto ao índice de aço, o sistema estrutural 2 apresentou um índice 33,94% menor em relação ao outro sistema, o que é razoável, visto que em lajes nervuradas há também um melhor aproveitamento do aço. Esse é aproveitado ao máximo devido a maior altura útil, proporcionando um aumento no braço de alavanca.

Porém, quanto à análise dos esforços cortantes, foi o sistema estrutural 2 que apresentou resultados elevados e distantes dos apresentados no sistema estrutural 1. Na prática, isso não é esperado, porém, como explicado, isso também decorre de deficiências no método de cálculo utilizado pelo *software* que acaba por não distribuir equilibradamente os esforços em algumas situações, dentre elas, em pontos de contato laje-pilar, gerando picos abruptos de tensão nas barras diretamente ligadas aos pilares. Essa situação pode ser corrigida de algumas maneiras, uma delas é a edição de rigidez das barras que apresentam o valor máximo do esforço, as quais contornam os pilares, diminuindo a rigidez da barra analisada e repassando os esforços às barras adjacentes. Porém, essa alteração necessita de uma criteriosa avaliação do projetista a fim de que não se desconsidere valores relevantes.

Por fim, analisando os resultados obtidos com os parâmetros utilizados, pode-se concluir que o sistema estrutural 2 é o mais viável para o edifício desse trabalho, devido à grande economia de material utilizado. Vale ressaltar que a laje nervurada

apresentou resultados melhores, como menor consumo de materiais, mesmo diante da fragilidade no método de análise do *software*.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se:

- No caso de utilização do método das grelhas, realizar uma análise mais criteriosa quanto às barras, editando a rigidez dessas;
- Além dos parâmetros utilizados para a análise comparativa, acrescentar os custos de materiais e de mão de obra, bem como o controle de HH (Homens/hora), visto que o tempo de execução de cada tipo de laje é diferente;
- Comparar demais tipos de laje, como por exemplo as lajes protendidas;
- Comparar com lajes sem vigas de borda, a fim de mensurar a influência que essas têm sobre o projeto.
- Incluir demais análises na comparação, como, por exemplo, a análise da estabilidade global do edifício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1983, **Building Code Requirements for Reinforced Concrete: ACI 318**. Detroit.

ALBUQUERQUE, A. T. **Análise de alternativas para edifícios em concreto armado**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1999.

ARAÚJO, J.M. **Curso de Concreto Armado**. 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010. v.4, 3.ed.

ARCELORMITTAL. **Treliças Nervuradas**. 2017. Catálogo técnico. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/construcao-civil/trelicas-nervuradas>>. Acesso em: 05 de Abril de 2020.

ASCE Standard ASCE/SEI 7-05, **Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**, American Society of Civil Engineers, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14859-1**: Laje pré-fabricada – Requisitos. Parte 1: Lajes unidirecionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

AVILLA JUNIOR, J. **Contribuição ao projeto e execução de lajes lisas nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2010.

BASTOS, P. S. S. **Lajes de concreto: Notas de aula**. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. v.2. São Paulo: PINI, 2009. 589p.

Como determinar as dimensões necessárias para um capitel?. **AltoQi**, 2014. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/274/1303/pt-br/como-determinar-as->

dimens%C3%B5es-necess%C3%A1rias-para-um-capitel.html>. Acesso em: 01 abr. 2020.

Como economizar na sua obra com diferentes estruturas de laje nervurada?. **ATEX**. Disponível em: <<https://www.atex.com.br/blog/laje/economize-obra-estruturas-laje-nervurada/>>. Acesso em: 15 abr. 2020.

DIAS, R. H. Sistemas estruturais para grandes vãos em pisos e a influência na concepção arquitetônica. **ARQUITEXTOS**. São Paulo, ano 04. Jan, 2004.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. v.1. São Carlos: EESC - USP, 2000. 441p.

FARIA, M. P. **Estruturas para edifícios em concreto armado: análise comparativa de soluções com lajes convencionais, lisas e nervuradas**. 2010. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Sistemas estruturais de lajes sem vigas: Subsídios para o projeto e execução**. 1989. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1989.

FUSCO, P.B. **Técnicas de armar as estruturas de concreto**. São Paulo, Pini, 1995.

LARANJEIRAS, A. C. R. Colapso progressivo dos edifícios – breve introdução. **TQS NEWS**. São Paulo, ano XV, n.33, p. 36-47. Ago, 2011.

LONGO, L. F. Tipos de lajes disponíveis no Eberick. **QiSuporte**, 2020. Disponível em: <<https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360000068033-Tipos-de-lajes-dispon%C3%ADveis-no-Eberick>>. Acesso em: 12 Abr. 2020.

MELGES, J. L. P. **Punção em lajes: exemplos práticos e análise teórico experimental**. 1995. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1995.

NAPPI, S. C. B. **Análise comparativa entre lajes maciças, com vigotes pré-moldados e nervuradas**. 1993. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, 1993.

OLIVEIRA, M. H. et al. Resistência à punção de ligações laje-pilar interno com conectores de cisalhamento. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. São Paulo, v.6, n.5, p.681-714. Out., 2013.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C.D.; SANTOS, S. P. **Pré-dimensionamento**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

PINHEIRO, L. M.; RAZENTE, J. A. **Lajes nervuradas**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

SACRAMENTO, P. V. P.; PICANÇO, M. S.; OLIVEIRA, D.R.C. Lajes nervuradas de concreto armado com viga-faixa. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. São Paulo, v.11, n.5, p.966-996 Out., 2018.

SILVA, B. R. **Contribuições à análise estrutural de lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Programa de pós-graduação Engenharia Civil, Santa Maria, 2012.

SPOHR, V. H. **Análise Comparativa: Sistemas Estruturais Convencionais e Estruturas de Lajes Nervuradas**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de pós-graduação Engenharia Civil, Santa Maria, 2008.

VARGAS, E. N. Z. **Punção em lajes-cogumelo de concreto de alta resistência reforçado com fibras de aço**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1997.

VIZZOTO, I.; SARTORTI, A. L. Soluções de lajes maciças, nervuradas com cuba plástica e nervuradas com vigotas treliçadas pré-moldadas: análise comparativa. **Revista Teoria e prática na Engenharia Civil**. Rio Grande, v.10, n.15, p19-28. Abril, 2010.