

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

DANIEL BUFFON ANDREAZZA

**ANÁLISE ENTRE O SISTEMA DE LAJE MACIÇA E LAJE NERVURADA EM UM
EDIFÍCIO COMPARANDO ASPECTOS TÉCNICOS E CUSTOS**

CAXIAS DO SUL

2023

DANIEL BUFFON ANDREAZZA

**ANÁLISE ENTRE O SISTEMA DE LAJE MACIÇA E LAJE NERVURADA EM UM
EDIFÍCIO COMPARANDO ASPECTOS TÉCNICOS E CUSTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II desenvolvido no curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Luciano Zatti

CAXIAS DO SUL

2023

DANIEL BUFFON ANDREAZZA

**ANÁLISE ENTRE O SISTEMA DE LAJE MACIÇA E LAJE NERVURADA EM UM
EDIFÍCIO COMPARANDO ASPECTOS TÉCNICOS E CUSTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II desenvolvido no curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Luciano Zatti

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Luciano Zatti

UCS - Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Gustavo Ribeiro da Silva

UCS - Universidade de Caxias do Sul

Prof. Esp. Maurício Monteiro Almeron

UCS - Universidade de Caxias do Sul

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classe de resistência do concreto.....	16
Figura 2 - Gráfico tensão deformação	18
Figura 3 - Cobrimento mínimo.....	20
Figura 4 - Classe de agressividade	20
Figura 5 – Cargas da Seção transversal da viga	27
Figura 6 – Tensões e Deformações na Seção Transversal devido a Momento Fletor.....	28
Figura 7 - Carga perpendicular a laje	30
Figura 8 - Vão teórico das lajes	32
Figura 9 - Valores do coeficiente adicional γ_n para lajes em balanço	34
Figura 10 - Figura de laje nervurada	35
Figura 11 - Laje nervurada Dupla.....	39
Figura 12 - Laje nervurada Invertida.....	39
Figura 13 - Laje nervurada Direta	39
Figura 14 - Representação de lajes Alveolares.....	41
Figura 15 - Dimensões para cálculo do vão efetivo	42
Figura 16 - Representação gráfica da fachada.....	46
Figura 17 - Representação gráfica pavimento térreo.....	47
Figura 18 - Representação gráfica segundo andar	47
Figura 19 - Representação gráfica terceiro andar	48
Figura 20 - Planta baixa pavimento térreo.....	49
Figura 21 - Planta baixa segundo pavimento.....	49
Figura 22 - Planta baixa terceiro pavimento.....	50
Figura 23- Pórtico da estrutura de lajes maciças	55
Figura 24 - Pórtico da estrutura de lajes nervuradas	61

Figura 25 - Análise comparativa do volume de concreto (m ³).....	71
Figura 26 - Análise comparativa do volume de concreto (kg)	71
Figura 27 - Armadura negativa nas lajes (kg)	72
Figura 28 - Armadura positiva nas lajes (kg)	72
Figura 29 - Taxa de aço nas vigas e pilares (kgf/m ³)	73
Figura 30 - Composição de custo do sistema de lajes maciças	74
Figura 31 - Composição de custo do sistema de lajes nervuradas.....	74
Figura 32 - Comparação Orçamentária Entre Sistemas.....	75
Figura 33 - Comparação de deformações máximas.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cobrimento de projeto.....	51
Tabela 02 - Peso específico dos materiais	52
Tabela 3 - Carga variável da estrutura.....	53
Tabela 4- Consumo de concreto global do sistema de lajes maciças	56
Tabela 5- Consumo de concreto das lajes por pavimento	57
Tabela 6 - Consumo global de aço nas lajes do sistema de lajes maciças.....	57
Tabela 7- Armadura negativa das lajes maciças.....	58
Tabela 8- Armadura positiva das lajes maciças.....	58
Tabela 9- Taxa de aço das vigas por pavimento no sistema de laje maciça.....	59
Tabela 10 - Consumo de formas de madeira	59
Tabela 11 - Deformações máximas por pavimento	60
Tabela 12 - Consumo de concreto global do sistema de lajes nervuradas	62
Tabela 13 - Consumo de concreto das lajes por pavimento	62
Tabela 14 - Consumo global de aço nas lajes do sistema de lajes Nervurada.....	63
Tabela 15 - Armadura positiva das lajes Nervuradas	64
Tabela 16 - Armadura positiva das lajes Nervuradas	64
Tabela 17 - Taxa de aço das vigas por pavimento no sistema de laje Nervurada	65
Tabela 18 - Consumo de formas de madeira	65
Tabela 19 - Deformações máximas	66
Tabela 20 - Orçamento dos quantitativos	67
Tabela 21 - Orçamento dos quantitativos	68
Tabela 22 - Tabela de orçamento	73

LISTA DE SIGLAS E ABREVEATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EPS	<i>Expanded PolyStyrene</i>
kN	Quilo Newton
m	Metro
m ²	metro quadrados
mm	Milímetro
Mpa	Mega pascal
NBR	Norma Brasileira regulamentadora
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de influência do pilar m^2
Ac	área de concreto
As	Área de aço
b	Base da seção transversa
bw	Espessura das nervuras
d	Altura útil da seção transversal
fcd	Resistência característica do concreto
fck	Resistência característica do aço
fyd	Resistência do cálculo do concreto
fyk	Resistência de cálculo do aço
H	Altura da laje
h	Altura da seção transversal
hf	Espessura da mesa
L	Vão teórico da laje
l0	Distância entre as faces das nervuras
L0	Vão face a face dos apoios
Md	Momento fletor de cálculo
n	Número de pavimento-tipo
S1	fator topográfico
S2	fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno

S_3	fator estatístico
v_0	Velocidade básica do vento
α	Coefficiente de excentricidade
γ_c	Coefficiente de minoração de resistência do concreto
γ_n	Coefficiente adicional de laje em balanço
γ_s	Coefficiente de minoração de resistência do aço
μ	Coefficiente do cálculo de ξ
ξ	Coefficiente do cálculo da área de aço
σ_{cd}	Resistencia de cálculo do concreto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	QUESTÃO DE PESQUISA.....	14
1.2	OBJETIVO.....	14
1.3	HIPÓTESES.....	14
1.4	DELIMITAÇÕES.....	14
1.5	PREMISSA	15
1.6	DELINEAMENTO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	CONCRETO SIMPLES.....	16
2.2	AÇO	17
2.3	CONCRETO ARMADO.....	19
2.4	NORMAS UTILIZADAS PARA O DIMENSIONAMENTO	19
2.4.1	Dimensões mínimas.....	19
2.4.2	Cobrimento das estruturas de concreto.....	19
2.4.3	Classe de agressividade	20
2.4.4	Coeficientes de minoração e majoração do aço e do concreto.....	21
2.4.5	Ações consideradas no dimensionamento	21
2.4.5.1	Ações Permanentes.....	22
2.4.5.2	Ações Variáveis.....	22
2.4.5.3	Ações Excepcionais.....	23
2.4.6	Estados Limites para Projeto de Estruturas	23
2.4.6.1	Combinações de Ações.....	24
2.4.6.2	Combinações Últimas.....	24
2.4.6.3	Estado Limite de Serviço.....	25
2.5	Elementos Estruturais	25
2.5.1	Pilares	25
2.5.2	Vigas.....	27
2.5.2.1	Pré-dimensionamento Vigas.....	27
2.5.3	Lajes	29
2.6	LAJES MACIÇAS BIDIRECIONAIS	30

2.6.1	Características.....	30
2.6.2	Sistema construtivo	30
2.6.3	Laje moldadas in loco.....	31
2.6.4	Laje Pré-moldada.....	31
2.6.5	Dimensionamento.....	32
2.6.5.1	Vão teóricos das lajes	32
2.6.5.2	Carga nas lajes maciças	33
2.6.5.3	Cálculo de lajes armadas em cruz.....	33
2.6.5.4	Normas para o dimensionamento de lajes	34
2.7	LAJE NERVURADA	35
2.7.1	Características.....	35
2.7.2	Materiais de aplicação do enchimento	36
2.7.3	Vantagens das Lajes Nervuradas	36
2.7.4	Desvantagens da Laje Nervurada	37
2.7.5	Sistema construtivo das Lajes Nervuradas	37
2.7.5.1	Unidirecionais.....	38
2.7.5.2	Bidirecionais.....	38
2.7.5.3	In loco.....	38
2.7.5.4	Laje nervurada Pré-moldada.....	40
2.7.6	Dimensionamento.....	41
2.7.6.1	Condições de apoio.....	41
2.7.6.2	Vão efetivo	42
2.7.3.3	Especificações normativas.....	43
2.8	ORÇAMENTOS	44
2.8.1	Normas sobre orçamentação.....	44
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	DESCRIÇÃO DO ARQUITETÔNICO	45
3.2	LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA EDIFICAÇÃO E DOS AMBIENTES	46
3.3	PLANTA BAIXA CORTE	48
3.4	MODELOS.....	50
3.5	PARÂMETROS DE PROJETO	51
3.5.1	Cobrimento	51
3.5.2	Resistência do concreto	51

3.5.3	Resistência do aço	52
3.5.4	Parâmetros de vento	52
3.5.5	Carregamentos	52
3.6	PRÉ-DIMENSIONAMENTO	53
3.7	DIMENSIONAMENTO.....	54
3.8	ORÇAMENTO	54
3.9	ANÁLISE DOS DADOS.....	54
4	RESULTADOS.....	55
4.1	SISTEMA DE LAJES MACIÇAS.....	55
4.1.1	Quantitativo de concreto.....	56
4.1.2	Quantitativo de aço.....	57
4.1.3	Formas	59
4.2	SISTEMA DE LAJES NERVURADAS	61
4.2.1	Quantitativo de concreto.....	62
4.2.2	Quantitativo de aço.....	63
4.2.3	Formas	65
4.2.5	Deformações.....	66
4.3	ORÇAMENTO SISTEMA DE LAJES MACIÇAS.....	67
4.4	ORÇAMENTO SISTEMA DE LAJES NERVURADAS.....	68
5	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	70
5.1	QUANTITATIVOS.....	70
5.2	ORÇAMENTO	73
5.3	DEFORMAÇÕES.....	75
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO.....	78

1 INTRODUÇÃO

Dentro das últimas décadas podemos observar uma mudança drástica no comportamento das estruturas e das edificações nas grandes cidades. Observa-se, por exemplo, que em grandes metrópoles há uma tendência de construções mais verticalizadas a fim da otimização do espaço escasso nos grandes centros populacionais. Pode-se observar, portanto, que as edificações e suas estruturas devem atender de forma eficiente as necessidades do mercado.

Mediante o aumento da construção de edificações modernas, com tendências arquitetônicas tais como maiores vãos, esbeltez das estruturas e menores custos, é observado uma limitação das estruturas convencionais de concreto armado para atender essas necessidades. Desta forma, a construção civil busca desenvolver novas tecnologias para estruturas que se adequam melhor às necessidades arquitetônicas, econômicas e estruturais da edificação.

No escopo das estruturas o elemento que possui maior vantagem para modificação são as lajes. Nelas são concentrados a maior parte dos esforços de sobrecarga e ocupação da estrutura, possuem maior rigidez, são os elementos responsáveis por boa parte do peso próprio da edificação e também são responsáveis por realizar parte da transmissão de esforços horizontais entre os elementos. Assim, suas modificações e otimizações podem trazer diversos benefícios à estrutura.

Atualmente, há diversos sistemas construtivos para lajes de concreto armado, como lajes protendidas, maciças, nervuradas pré-fabricadas, nervuradas moldadas *in loco*, alveolares, mistas, entre outras. Deve-se observar que cada um dos sistemas possui suas vantagens e desvantagens com diferentes especificações e aplicações.

Os *softwares* de cálculo estrutural auxiliam no processo de análise e dão mais agilidade e produtividade ao projetista, tanto para o detalhamento dos projetos quanto para a análise dos diversos sistemas estruturais existentes. Portanto, torna-se viável um estudo sobre os vários métodos construtivos de lajes por meio da comparação entre seus diferentes métodos e particularidades. No entanto, cabe ao engenheiro de estruturas, juntamente com o arquiteto, escolher as opções mais adequadas para um determinado tipo de obra, levando em consideração os aspectos estruturais, técnicos e econômicos do empreendimento.

Pensando nisso, esse trabalho teve por objetivo realizar um estudo comparativo entre dois sistemas estruturais de lajes. O estudo foi realizado por meio do dimensionamento da estrutura e comparação quantitativa dos materiais a serem utilizados em uma obra.

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A utilização de um sistema de lajes nervuradas ao invés de lajes maciças pode trazer benefícios para a estabilidade global, redução os deslocamentos horizontais da estruturas e também redução de custos quanto ao total de material utilizado?

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal do trabalho será estabelecer uma análise comparativa de deformações, consumo de aço e consumo de concreto variando-se o tipo de laje utilizada. A análise será realizada em um centro de eventos com a necessidade de grandes vão livres. Os métodos construtivos a serem comparados serão entre lajes maciças e lajes nervuradas.

1.3 HIPÓTESES

Ao substituímos o sistema de lajes maciças pelo sistema de lajes nervuradas, por se tratar de uma estrutura com grandes vãos livres, teremos uma economia no volume de concreto e no consumo de aço total de estrutura.

1.4 DELIMITAÇÕES

Para o desenvolvimento deste trabalho optou-se pela utilização do *software* TQS, versão V23, como ferramenta para modelagem das estruturas. A análise da estrutura foi limitada somente à superestrutura, não abordando as questões de fundação e nem o solo do local.

A análise de custo foi abordada somente nos aspectos quantitativos de materiais. Não foram abordados tópicos como tempo de execução ou qualquer análise referente a execução dos dois métodos construtivos.

1.5 PREMISSA

O *software* TQS já possui base legal na normativa brasileira, como por exemplo as normas 6118 e 6120. Portanto os parâmetros utilizados e os resultados obtidos estão de acordo com as normas.

1.6 DELINEAMENTO

Em um primeiro capítulo foi realizado uma análise das possíveis hipóteses a serem alcançadas com o desenvolvimento do projeto. Os aspectos abordados foram a questão de pesquisa, o objetivo, hipóteses, delineamento e a premissa do trabalho.

No segundo capítulo é apresentado a fundamentação teórica do trabalho. Nesse capítulo foram abordadas as teorias para o dimensionamento de estruturas em concreto armado com seus principais elementos estruturas como vigas, pilares e fundações. Ainda no segundo capítulo foi referida a fundamentação sobre os dois sistemas de lajes comparadas, a laje maciça e a nervurada, com suas características, tipologia, histórico, especificações técnicas, dimensionamento e a normativa brasileira sobre o assunto. Também foram analisados os principais métodos de orçamentação de obras a fim de fundamentar a análise comparativa financeira entre os dois métodos aplicados.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia aplicada para a realização da comparação de todos parâmetros acima. Nesse capítulo que foi descrito a forma com que foram realizados os cálculos de dimensionamento e orçamentação.

Em seguida no quarto e quinto capítulo, foram apresentados os resultados obtidos e a análise desses resultados respectivamente. E por fim, no sexto capítulo foi apresentado a conclusão que apresentou a interpretação dos resultados obtidos e confirmação da questão de pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCRETO SIMPLES

Segundo José Milton de Araújo (2014), o concreto é um material que resulta da combinação de água, agregados inertes e cimento. Quando se deseja aprimorar suas propriedades na fase fresca ou endurecida, é possível incorporar aditivos químicos com capacidade de acelerar ou retardar o tempo de pega, ou ainda melhorar a plasticidade da mistura, além de adições minerais que reforçam a resistência do concreto. Em suma, o papel do concreto é absorver as cargas de compressão e salvaguardar as armaduras contra a corrosão.

Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 8953:2015, os concretos utilizados para fins estruturais são divididos em dois grupos, denominados Grupo I e Grupo II, com base em suas resistências características à compressão (f_{ck}), como ilustrado na Figura 1. É importante destacar que a referida norma dispõe que os concretos cuja classe de resistência seja inferior a C20 não são considerados como estruturais.

Figura 1- Classe de resistência do concreto

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão MPa	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: ABNT NBR 8953:2015.

Conforme estabelecido pela NBR 6118:2014, faz-se necessário adotado um coeficiente de minoração da resistência (γ_c). Esse coeficiente é utilizado para considerar as variações e incertezas inerentes ao processo de produção, amostragem e ensaio do concreto, visando

garantir a segurança estrutural. Equação 01 apresenta a formulação da norma 6118:2023 referente a minoração da resistência.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} *$$

(01)

Onde:

f_{cd} = Resistencia minorada do concreto;

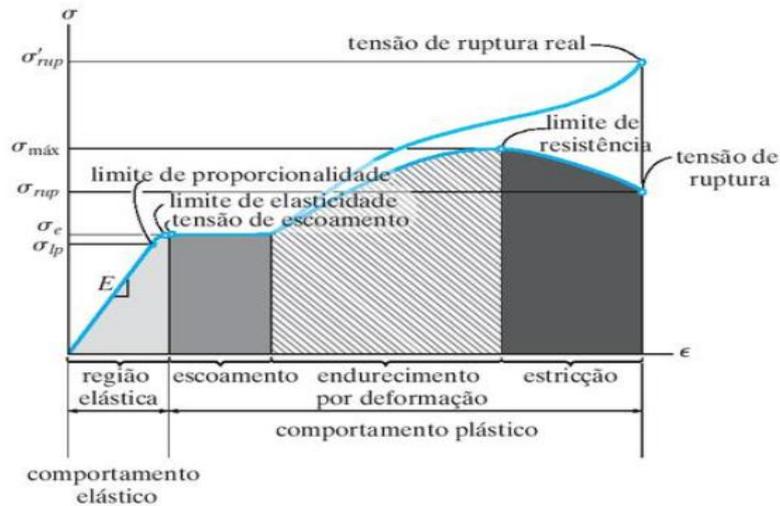
f_{ck} = Resistencia característica do concreto.

2.2 AÇO

Segundo Russell Charles Hibbeler (2018), no livro “Resistência dos materiais”, a resistência do aço depende da capacidade inerente do material de suportar cargas sem se deformar. Para a medição desses parâmetros utilizamos testes de tração e compressão, uma vez determinado esse parâmetro pode-se determinar uma relação de tensão-deformação.

A partir dos ensaios é possível definir o diagrama tensão deformação. O diagrama é de extrema importância para o dimensionamento de uma estrutura de concreto armado pois, segundo Russell Charles Hibbeler no livro Resistência dos materiais, o diagrama determina as cargas máximas que o aço suporta sem que haja uma deformação permanente. O diagrama tensão deformação está representado na Figura 2.

Figura 2 - Gráfico tensão deformação



Fonte: Russell Charles Hibbeler (2018).

A associação do concreto simples com o aço para a construção de estruturas em concreto armado é possível devido a diversos fatores. Um deles é a boa aderência entre esses materiais, que permite a transferência de cargas e a resistência a esforços. Além disso, seus coeficientes de dilatação térmica são semelhantes, o que minimiza as tensões e as deformações nas estruturas em situações de variação de temperatura. Outra característica importante é o alto desempenho de proteção contra corrosão, que é proporcionado pela alcalinidade do concreto e pelo revestimento de óxido de ferro que se forma na superfície do aço em contato com o concreto. Esses fatores são fundamentais para garantir a durabilidade e a segurança das estruturas em concreto armado (AZEREDO, 1997).

De maneira similar ao concreto a ABNT NBR 6118:2014 também estabelece parâmetros de minoração do aço para conferir segurança a estrutura em relação a uma possível variação do aço, espessura incorreta das barras, entre outros fatores. Como demonstrado na Equação 02.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_c}$$

(2)

Onde:

f_{yd} = Resistência de cálculo;

f_{yk} = Resistência característica do aço.

2.3 CONCRETO ARMADO

O concreto armado é um sistema estrutural para a construção civil, o modelo traz a união entre o aço que vai suportar toda a tensão de tração nos elementos e o concreto que suportará a tensão de compressão. O concreto também servirá como uma camada protetora físico-química para o aço, segundo Araújo (2014).

Essa tecnologia foi desenvolvida por Joseph Monier em 1849 e vem sendo desenvolvida e aprimorada até os dias atuais. O desenvolvimento tecnológico desse material no Brasil é extremamente relevante por conta de ser o método construtivo mais utilizado.

2.4 NORMAS UTILIZADAS PARA O DIMENSIONAMENTO

Nesse item serão apresentadas as normas técnicas utilizadas para o dimensionamento das duas estruturas. Serão apresentadas as normas para o dimensionamento de estruturas em concreto armado e também as normas que trazem referências a cargas e coeficientes de segurança.

2.4.1 Dimensões mínimas

A ABNT de 2014 define na NBR 6118:2014 as dimensões mínimas permitidas para todos os elementos estruturais em concreto, com o objetivo de garantir um desempenho satisfatório da estrutura e condições adequadas de esbeltez, estabilidade e também de execução.

2.4.2 Cobrimento das estruturas de concreto

A distância livre entre uma face da peça estrutural e a camada de barras mais próxima, também conhecida como cobrimento mínimo, é estabelecida com o propósito de proteger a

armadura da corrosão causada pelos efeitos do ambiente (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2007). O cobrimento nominal, por sua vez, é determinado adicionando uma tolerância ao cobrimento mínimo, levando em conta as variações que podem ocorrer durante a execução. A Figura 3 retirada da NBR 6118:2014 permite a obtenção dos valores de cobrimento nominal para diferentes elementos estruturais, e em diferentes ambientes baseados na Classe de Agressividade Ambiental.

Figura 3 - Cobrimento mínimo

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT NRB 6118:2014.

2.4.3 Classe de agressividade

De acordo com o item 6.4 da ABNT NBR 6118:2014, a classe de agressividade do ambiente é determinada por fatores externos ambientais físicos e químicos que afetam estruturas de concreto, independentemente das forças mecânicas. Com base na tabela 6.1 da mesma norma, é possível determinar a classe de agressividade ambiental na qual o projeto se enquadra, utilizando o tipo de ambiente no qual a construção está localizada como entrada. Pode-se observar as diferentes classes de agressividade, de acordo com o local em que a estrutura está localizada, na Figura 4 retirada da norma ABNT NBR 6118:2014.

Figura 4 - Classe de agressividade

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NRB 6118:2014.

2.4.4 Coeficientes de minoração e majoração do aço e do concreto

Para resistência de cálculo do aço e do concreto, segundo a ABNT NBR 8681:2004 é utilizado um coeficiente de minoração gama (γ). O valor de minoração da resistência é diferente do utilizado para o aço e para o concreto, visto que o aço é um material mais confiável, levando em consideração vários fatores, como o processo de produção, por exemplo.

Os valores utilizados para o cálculo das ações, assim como as resistências, são expressos em termos de valores característicos. Esses valores são determinados levando em consideração a variabilidade das intensidades das ações e representam as ações quantificadas por seus valores representativos conforme descrito na ABNT NBR 6118:2014.

No entanto, diferentemente das resistências que são minoradas, os valores das ações são majorados por meio de um coeficiente. Esse coeficiente é definido como um fator que aumenta os valores das ações para considerar situações desfavoráveis ou incertezas no projeto estrutural.

2.4.5 Ações consideradas no dimensionamento

A definição de ações, segundo a ABNT NBR 8681:2004, é tudo que causa esforço ou deformação em uma estrutura. Podemos considerar também que, as cargas que ocorrem por

conta de uma deformação também são consideradas como ações. As deformações que agem na estrutura são designadas como ações indiretas, e as forças são consideradas ações diretas.

Segundo a ABNT NBR 8681:2004 deve-se trabalhar com dois estados limites para o dimensionamento, o estado limite último e o estado limite de serviço. A norma em seu item 4.1 descreve que os estados limites a serem considerados no dimensionamento da estrutura, deve ser inferido de acordo com o método estrutural e materiais utilizados. A norma estabelece ainda que cada sistemas construtivo deve possuir suas considerações de estado limite citado em norma própria.

A análise de estruturas em concreto armado se dá primariamente pela utilização na ABNT NBR 6118:2014, que trata todo o assunto de dimensionamento e estado limites para a estrutura. A norma delimita o dimensionamento no escopo do estado limite último e estado limite de serviço para o dimensionamento das estruturas de concreto armado.

2.4.5.1 Ações Permanentes

As ações permanentes são carregamentos constantes que possuem uma variabilidade desprezível e possui sua aplicação durante toda a vida útil de uma estrutura, como descrito pela norma ABNT NBR 8681:2003.

Segundo a norma ABNT NBR 8681:2003, temos ainda uma classificação de ações permanentes que se diferenciam entre ações permanentes diretas e indiretas. As ações permanentes diretas são aquelas decorrentes da ação do peso próprio da estrutura, de todos elementos construtivos permanentes, peso de equipamentos fixos e empuxos decorrentes do peso próprio de materiais não removíveis, como terra ou água. Já as indiretas são aquelas decorrentes de deformações geradas por imperfeições geométricas, fluência, retração e proteção.

2.4.5.2 Ações Variáveis

Segundo a ABNT NBR 8681:2004 as cargas variáveis são aquelas que não atuam ações direta na estrutura durante toda sua vida útil, essas cargas ocorrem de maneira ocasional e de forma não constante. As cargas variáveis podem ser cargas acidentais das construções, esforços

do vento, dilatação térmica, ações de frenagem, impactos e pressões hidráulicas. Pode-se classificar as ações variáveis em ações normais e específicas.

As ações variáveis normais são aquelas que ocorrem com uma frequência relevante suficiente para que sejam adotadas no dimensionamento da estrutura, pode-se pontuar ações como a do vento. Já as ações variáveis especiais são aquelas que ocorrem com baixa frequência e não geram carregamentos esperados na estrutura, são exemplos de ações especiais as ações sísmicas e cargas acidentais.

2.4.5.3 Ações Excepcionais

Segundo Pinheiro, Muzardo e Santos (2003), as ações excepcionais são aquelas que ocorrem em um curto espaço de tempo e duração, já segundo a ABNT NBR 6118:2014, as excepcionais são as quais os efeitos não podem ser controlados por outros meios (ABNT, 2014). Apesar dessas ações serem improváveis de ocorrer devem ser levadas em consideração para o dimensionamento. Como caracterização dessas ações podemos citar incêndios, enchentes, sismos atípicos, explosões e choques de veículos.

2.4.6 Estados Limites para Projeto de Estruturas

Quando os critérios de durabilidade e de resistência não são atendidos, a estrutura é considerada em um estado limite e não está apta para uso ou é imprópria. É importante que a estrutura atenda a dois estados limites diferentes, que representam valores distintos que não podem ser ultrapassados. O primeiro é o estado limite último, relacionado à possibilidade de colapso da estrutura, que é utilizado no dimensionamento. O segundo é o estado limite de serviço, que se refere ao conforto do usuário e à aparência da estrutura.

Para ser considerada segura, a resistência calculada deve ser maior do que a solicitação para ambos os estados limites, levando em consideração os coeficientes de ponderação aplicados nos cálculos, que criam uma margem de segurança na estrutura.

Para ser considerada segura, a resistência calculada deve ser maior do que a solicitação para ambos os estados limites, levando em consideração os coeficientes de ponderação aplicados nos cálculos, que criam uma margem de segurança na estrutura.

2.4.6.1 Combinações de Ações

Norma técnica ABNT NBR 6118:2014 define com precisão um carregamento como a combinação de ações que apresentam uma probabilidade não desprezível de agir simultaneamente sobre a estrutura em um determinado período. É importante salientar que essa combinação deve ser considerada de forma que os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura sejam identificados. Para tanto, é necessário que haja uma avaliação detalhada de todas as forças envolvidas nessa combinação.

No que se refere à verificação da segurança da estrutura, a norma técnica ABNT NBR 6118:2014 estabelece que a mesma deve ser realizada com base em dois estados limites distintos: os estados limites últimos e os estados limites de serviço. A verificação da segurança em relação aos estados limites últimos deve ser realizada com base em combinações últimas, enquanto que a verificação da segurança em relação aos estados limites de serviço deve ser analisada com base em combinações de serviço.

É importante ressaltar que as cargas permanentes devem ser consideradas em sua totalidade, já que são consideradas cargas que estão presentes constantemente na estrutura. Por outro lado, no caso das cargas variáveis, somente as parcelas que geram efeitos prejudiciais à segurança da estrutura devem ser consideradas, uma vez que essas cargas são caracterizadas por sua variação ao longo do tempo.

2.4.6.2 Combinações Últimas

As combinações últimas são uma das formas de avaliar a segurança de uma estrutura, de acordo com a norma técnica ABNT NBR 6118:2014. Essas combinações são utilizadas para verificar se a estrutura é capaz de resistir a todos os esforços máximos que podem atuar simultaneamente sobre ela.

De acordo com a norma, as combinações últimas devem levar em consideração todos os esforços atuantes, tanto as cargas permanentes quanto as variáveis, como cargas de vento, terremoto, tráfego, sobrecarga, entre outras. As combinações últimas são compostas por uma série de fatores de ponderação, que levam em conta a importância relativa dos diferentes esforços e a sua probabilidade de ocorrência simultânea.

Vale ressaltar que as combinações últimas devem ser utilizadas para verificar se a estrutura é capaz de suportar as cargas máximas que podem atuar simultaneamente sobre ela, sem que ocorra a ruptura ou colapso da estrutura. O objetivo é garantir que a estrutura seja segura para o uso previsto, mesmo em condições extremas.

2.4.6.3 Estado Limite de Serviço

As combinações de serviço são outra forma de avaliar a segurança de uma estrutura, de acordo com a norma técnica ABNT NBR 6118:2014. Essas combinações são utilizadas para verificar se a estrutura é capaz de resistir a todas as cargas que podem atuar sobre ela durante sua vida útil, sem que ocorra um comprometimento de seu desempenho, segurança e também deformações excessivas.

2.5 Elementos Estruturais

O sistema estrutural de concreto armado possui elementos distintos que desempenham uma função estrutural. Os principais elementos utilizados nesse método são os pilares, vigas e lajes que são responsáveis por suportar e transmitir as cargas da estrutura até a fundação, já os elementos estruturais de fundação por sua vez tem a função de transmitir os esforços da estrutura para o solo, como descrito por Fritz Leonhardt (1977)

2.5.1 Pilares

Segundo Araújo (2014), os pilares são elementos esbeltos com uma dimensão muito maior que as outras duas posicionados usualmente na vertical. São utilizados para transmitir os

esforços de vigas e lajes para a fundação e usualmente são elementos submetidos a flexão e compressão.

Segundo Murilo A. Scadelai, Libânio M. Pinheiro (2004), juntamente com as vigas, os pilares compõem os pórticos que, em grande parte dos edifícios, assumem a função de suportar as forças verticais e horizontais, assegurando a estabilidade geral da estrutura.

2.5.1.1 Pré-dimensionamento pilar

Segundo Libânio M. Pinheiro o pré-dimensionamento dos pilares é iniciado pela estimativa de sua carga, utilizando, por exemplo, o processo das áreas de influência. Esse processo envolve a divisão da área total do pavimento em áreas de influência correspondentes a cada pilar e, a partir disso, é possível estimar a carga que cada pilar irá suportar.

Segundo o autor, após a avaliação das forças nos pilares pelo processo das áreas de influência, é determinado um coeficiente de majoração da força normal (α). Esse coeficiente leva em consideração as excentricidades da carga e varia de acordo com a localização do pilar. Os valores adotados para os coeficientes são de 1,3 para pilares internos ou de extremidade, na direção da maior dimensão, 1,5 Para pilares de extremidade, na direção da menor dimensão e 1,8 para pilares de canto.

Em seguida, procede-se à consideração da compressão simples com a carga majorada pelo coeficiente α . Isso é realizado utilizando a Equação 03, desenvolvida por Libânio M. Pinheiro, conforme descrito.

$$A_c = \frac{30 * \alpha * A * (n + 0,7)}{fck + 0,01 * (69,2 - fck)} \quad (03)$$

Onde:

A_c = Área de concreto

α = Coeficiente de excentricidade da carga

A = Área de influência

n = Número de pavimentos

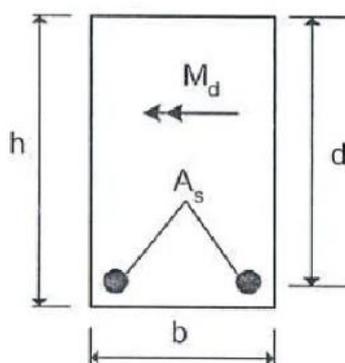
2.5.2 Vigas

As vigas são elementos estruturais esbeltos e alongados geralmente posicionados horizontalmente. Tem como principal objetivo suportar altas cargas de flexão e transmissão dessas cargas para os pilares, como explicam Pinheiro, Muzardo e Santos (2004). As vigas são utilizadas para suportar o peso das paredes, receber as ações provenientes das lajes e suportar a flexão de grandes vãos.

2.5.2.1 Pré-dimensionamento Vigas

Para a realização do pré-dimensionamento das vigas utilizou-se o método de José Milton de Araújo (2014), que consiste em encontrar a carga máxima de flexão resistida de uma determinada seção transversal da viga, considerada para o pré-dimensionamento, está representada na Figura 05.

Figura 5 – Cargas da Seção transversal da viga

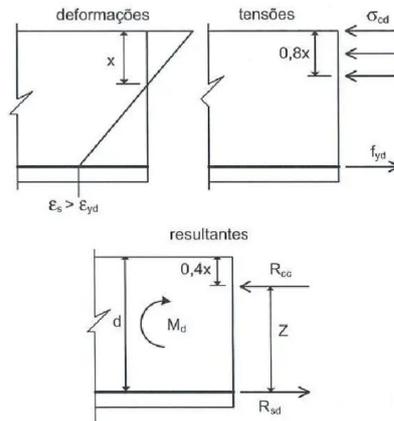


Fonte: José Milton de Araújo (2014).

Para que a estrutura seja estável é necessário que haja equilíbrio de forças internas, onde a força de tração do aço ($f_{yd} * A_s$) possua o mesmo valor e direção oposta da força resistente do concreto ($\sigma_{cd} * A_c$), como representado na figura 06.

O fator $0,8x$ representado na Figura 06 corresponde a seção máxima de compressão permitida, que no caso do projeto é de 40% da altura útil da seção transversal.

Figura 6 – Tensões e Deformações na Seção Transversal devido a Momento Fletor



Fonte: José Milton de Araújo (2014).

Segundo o autor, calcula-se os parâmetros μ e ξ , apresentados nas Equações 04 e 05 respectivamente, para posteriormente encontrar o valor de área de aço necessária para resistência do momento aplicado.

$$\mu = \frac{M_d}{bd^2 * \sigma_{cd}} \quad (04)$$

Onde:

M_d = Momento de cálculo (kN.cm);

σ_{cd} = $f_{cd} * 0,85$ (Minoração para cargas de longo prazo).

$$\xi = 1,25 * (1 - \sqrt{1 - 2 * \mu}) \quad (05)$$

Após a determinação dos coeficientes μ e ξ , calcula-se a área de aço através da Equação 06.

$$A_s = \xi * b * d * \frac{\sigma_{cd}}{f_{yd}}$$

(06)

Onde:

A_s = Área de aço (cm²);

2.5.3 Lajes

De acordo com Pinheiro, Muzardo e Santos (2010), as lajes são componentes planos, geralmente dispostos horizontalmente, que possuem duas dimensões significativamente maiores do que a terceira, que é conhecida como sua espessura. O propósito principal desses elementos é suportar as cargas provenientes do uso do edifício, tais como pessoas, mobília e equipamentos, peso próprio e transferi-las para os pontos de apoio. Em edifícios convencionais, essas lajes representam uma grande parcela do consumo de concreto, correspondendo a cerca de 50% do total.

Já segundo José Milton de Araújo (2014), as lajes são componentes estruturais que possuem a capacidade de absorver as cargas provenientes do uso da construção que são aplicadas nos pisos e transferi-las para as vigas, José Milton de Araújo ressalta também que o elemento tem a função de distribuir as ações horizontais entre os pórticos de contraventamento. O autor destaca também que há vários tipos de lajes, como as maciças, nervuradas, cogumelos e pré-moldadas, e que a escolha entre elas deve levar em conta aspectos econômicos e a segurança da edificação.

Outro conceito característico das lajes e importante para o dimensionamento da estrutura como um todo são as condições das ligações laje-viga. As lajes podem ser consideradas engastadas, dessa forma transmitindo momento e gerando torção nas vigas, ou apoiadas, impedindo a transmissão de momentos entre os elementos.

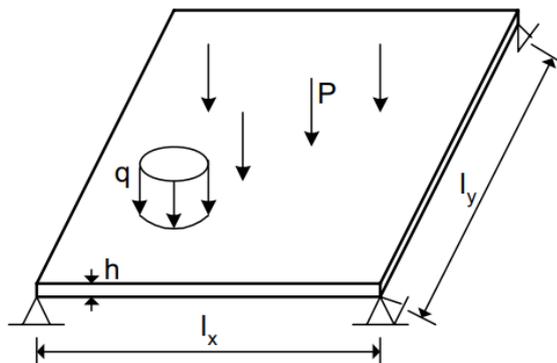
2.6 LAJES MACIÇAS BIDIRECIONAIS

2.6.1 Características

De acordo com Araújo (2014), as lajes desempenham um papel fundamental como elementos estruturais ao receber as cargas de utilização das edificações, transmitindo-as aos pisos e, subsequentemente, às vigas. Além dessa função essencial, Araújo destaca que as lajes também têm a responsabilidade de distribuir as ações horizontais entre os elementos de contraventamento, além de atuarem como mesa de compressão para vigas T.

O autor ressalta que as lajes são elementos planos com direcionamento definido e são principalmente solicitadas por cargas que incidem perpendicularmente ao seu plano médio, como demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Carga perpendicular a laje



Fonte: José Milton de Araújo (2014).

2.6.2 Sistema construtivo

Segundo Eduardo de Oliveira Boscaroli (2012), que em seu livro "Estruturas de Concreto Armado: Fundamentos e Aplicações" apresenta diversos tipos de lajes maciças, que se diferenciam devido ao seu sistema construtivo. A laje maciça plana e laje maciça cogumelo configura-se como uma variante das lajes maciças.

2.6.3 Laje moldadas in loco

Conforme exposto por Silva (2005), as lajes in loco referem-se àquelas que são integralmente construídas no local de sua implantação, assegurando que tanto as nervuras quanto as mesas permaneçam em suas posições finais. O sistema mais utilizado para lajes in loco hoje em dia no Brasil são as lajes maciças.

Segundo Eduardo de Oliveira (2012), laje maciça plana é um tipo amplamente empregado, caracterizado por possuir uma espessura uniforme ao longo de toda a sua extensão. Sua aplicação abrange diversos tipos de edifícios, incluindo residenciais, comerciais e industriais.

Por sua vez, a laje maciça cogumelo configura-se como uma variante da laje maciça plana, na qual a parte inferior apresenta uma superfície curva semelhante a um cogumelo. Essa configuração visa possibilitar a criação de vãos livres mais amplos, ao mesmo tempo em que reduz a quantidade de madeira necessário para a sua construção.

2.6.4 Laje Pré-moldada

De acordo com Antônio Carlos dos Santos (2007), a laje pré-moldada é um elemento estrutural amplamente utilizado na indústria da construção civil, oferecendo uma série de benefícios em comparação às lajes convencionais moldadas *in loco*. Dentre as principais vantagens destacadas, encontra-se a notável redução no tempo de execução da obra, uma vez que a fabricação das lajes ocorre de forma simultânea às demais etapas construtivas. Tal procedimento resulta em consideráveis ganhos de produtividade e economia de recursos.

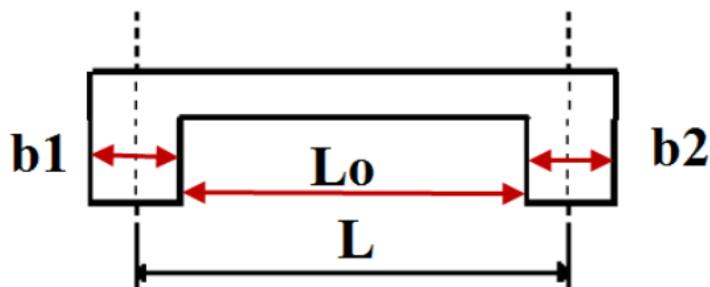
Como principal laje pré-moldada na engenharia civil tem-se a utilização de lajes maciças pré-moldadas. As lajes pré-moldadas maciças possuem características de maior deformação e possuem ligações puramente apoiadas em pilares.

2.6.5 Dimensionamento

2.6.5.1 Vão teóricos das lajes

Segundo Araújo (2014), o vão teórico também chamado de vão de cálculo (l), é a distância entre os centros dos apoios, nas lajes em balanço o comprimento teórico é o comprimento da extremidade livre até o centro do apoio. Entretanto de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 não é necessário adotar valores maiores que do vão livre acrescido de 60% da espessura da laje, para lajes isoladas e o vão livre acrescido de 60% da espessura da laje no painel considerado para lajes contínuas, como demonstrado na Figura 8 e descrito na Equação 07.

Figura 8 - Vão teórico das lajes



Fonte: José Milton de Araújo (2014).

$$L = L_0 + 0,6 * H$$

(07)

Onde:

L = Vão teórico da laje

L_0 = Vão face a face dos apoios

H = Altura da laje

2.6.5.2 Carga nas lajes maciças

Segundo Araújo (2014) em sua obra “Curso de concreto armado”, as cargas que atuam nas lajes das edificações podem ser categorizadas como cargas permanentes e cargas acidentais. As cargas permanentes são aquelas que apresentam valores constantes ou com pouca variabilidade ao longo de praticamente toda a vida útil da construção. Por outro lado, as cargas acidentais experimentam variações significativas durante a vida da construção.

Segundo o autor ainda, as cargas permanentes consistem no peso próprio da estrutura e na sobrecarga fixa, incluindo o peso dos revestimentos, alvenaria e enchimentos. As cargas acidentais atuam nas lajes em função da finalidade da edificação e englobam o peso de pessoas, móveis diversos, veículos, entre outros.

Os valores característicos das cargas permanentes podem ser determinados com base nos pesos específicos dos materiais de construção utilizados. Os pesos específicos dos materiais de construção mais comuns são fornecidos pela ABNT NBR 6120:2019. Essa mesma norma estabelece os valores característicos das cargas acidentais a serem consideradas no projeto.

2.6.5.3 Cálculo de lajes armadas em cruz

O cálculo das lajes armadas em cruz que não possuem rigidez a torção, ou que não sejam suficientemente acuradas nos cantos para evitar o seu levantamento, podem ser feitas de maneira simplificada por meio da denominada “Teoria das Grelhas”. Essa teoria considera a laje como uma grelha reticulada, composta por vigas que se cruzam formando células retangulares ou quadradas.

Segundo Araújo (2014), ao tratar a laje como uma grelha, é possível aplicar métodos de análise estrutural baseados em teorias de estruturas reticuladas, como a análise matricial ou a análise dos elementos finitos. Esses métodos permitem determinar as tensões e deformações na laje, levando em consideração as ações externas, como as cargas atuantes. Dessa forma, a teoria das grelhas no dimensionamento de lajes proporciona uma abordagem mais eficiente para calcular as forças internas na estrutura, facilitando a determinação da espessura e da quantidade de armadura necessárias para garantir a resistência e a segurança da laje. Além disso, essa abordagem permite considerar a interação entre as vigas e a laje de forma mais precisa, resultando em projetos mais otimizados e econômicos.

2.6.5.4 Normas para o dimensionamento de lajes

Nas lajes maciças devem ser respeitados os limites mínimos de espessura como estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014 descritos a seguir:

- a) para cobertura não em balanço, a espessura mínima é de 7 cm.
- b) para lajes de piso não em balanço, a espessura mínima é de 8 cm.
- c) lajes em balanço devem ter uma espessura mínima de 10 cm.
- d) para lajes que suportam veículos com peso total menor ou igual a 30 kN, a espessura mínima é de 10 cm.
- e) lajes que suportam veículos com peso total maior que 30 kN devem ter uma espessura mínima de 12 cm.

Ao realizar o dimensionamento de lajes em balanço, é necessário levar em consideração os esforços solicitantes de cálculo. Para isso, é aplicado um coeficiente adicional γ_n , conforme indicado na Figura 09 da ABNT NBR 6118:2014. Esse coeficiente tem a finalidade de considerar de maneira apropriada os efeitos específicos das lajes em balanço e ajustar os esforços a serem considerados no dimensionamento estrutural. É importante consultar e utilizar corretamente a tabela para garantir uma análise precisa e segura das lajes em balanço. Os valores desse coeficiente são apresentados na Figura 09.

Figura 9 - Valores do coeficiente adicional γ_n para lajes em balanço

h cm	≥ 19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45

onde

$$\gamma_n = 1,95 - 0,05 h;$$

h é a altura da laje, expressa em centímetros (cm).

NOTA O coeficiente γ_n deve majorar os esforços solicitantes finais de cálculo nas lajes em balanço, quando de seu dimensionamento.

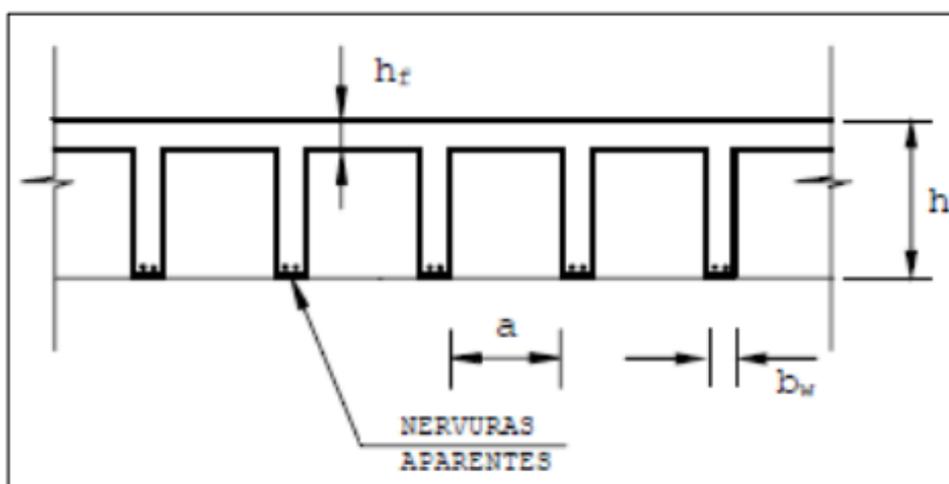
2.7 LAJE NERVURADA

2.7.1 Características

As lajes nervuradas, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 6118:2014, são distintas pela disposição das suas nervuras na região submetida à tração para momentos positivos como demonstrado na Figura 10. Essas lajes podem ser moldadas in loco ou possuir nervuras pré-moldadas, podendo ser unidirecionais ou bidirecionais, além de serem obrigadas a atender às diretrizes estabelecidas pelas Normas Brasileiras (ABNT, 2014).

De acordo com Fusco (2013), às lajes nervuradas são aquelas que apresentam nervuras em sua zona de tração, podendo ser preenchidas ou não por um material inerte, cuja função é proporcionar uma superfície inferior lisa. Além disso, essas lajes podem ser calculadas de maneira similar com as lajes maciças. Adicionalmente, conforme a definição de Bocchi Júnior (1995), esse tipo de laje é caracterizado pelas nervuras, as quais desempenham a função de unir a mesa estrutural à armadura, sendo que a mesa é responsável por resistir a esforços de compressão, enquanto as armaduras das nervuras têm a competência de resistir a esforços de tração.

Figura 10 - Figura de laje nervurada



Fonte: Bocchi Júnior e Giongo (1995).

2.7.2 Materiais de aplicação do enchimento

Pinheiro e Rezende (2003) mencionam os materiais de enchimento mais utilizados no mercado, sendo eles majoritariamente blocos cerâmicos ou blocos de concreto. Esses materiais são comumente empregados em lajes com vigotas pré-moldadas. Apresentam um peso específico elevado em comparação com outros materiais de enchimento. Utiliza-se também os caixotes reaproveitáveis que consistem de fôrmas de polipropileno ou metal contendo caixotes que formam as nervuras. Esses caixotes são reaproveitáveis e dispensam o uso de tabuleiros tradicionais, empregando apenas pranchas alocadas nas regiões das nervuras. E por fim temos também a utilização do EPS (poliestireno expandido) que é frequentemente utilizado em conjunto com as vigotas pré-moldadas. Esse material de enchimento possui características como facilidade de execução, alto desempenho térmico e de acabamento, porém usualmente mais caro que os demais. Esses materiais oferecem diferentes propriedades e características, permitindo a escolha adequada de acordo com as necessidades e especificidades de cada projeto de laje nervurada.

2.7.3 Vantagens das Lajes Nervuradas

Uma das principais vantagens do sistema de lajes nervuradas, de acordo com Pinheiro e Rezende (2003), é a redução da quantidade de concreto, o que resulta na diminuição do peso total da estrutura. Portanto, o material inerte utilizado para o preenchimento das nervuras deve ser leve, apresentando apenas resistência suficiente para suportar a execução, sem ser considerado no cálculo da laje. Da mesma forma, conforme Botelho e Marchetti (2010), várias técnicas podem ser empregadas para o preenchimento das nervuras com diferentes materiais inertes, a fim de obter uma superfície lisa, no entanto, suas resistências não devem ser levadas em consideração.

Para atender à evolução dos projetos arquitetônicos, que buscam cada vez mais flexibilidade de layout e vãos maiores, Souza (2007) considera as lajes nervuradas uma alternativa vantajosa. Bocchi Júnior (1995) também destaca que as estruturas de concreto armado com lajes nervuradas, além de oferecerem liberdade arquitetônica, são mais econômicas e eficientes, além de permitirem uma execução mais fácil das obras. Isso contribuiu para o

aumento do uso desses sistemas estruturais, sejam eles moldados in loco, pré-moldados ou protendidos.

Schwetz (2011) argumenta que, além da possibilidade de criar vãos maiores entre pilares na estrutura, as lajes nervuradas permitem maior liberdade na disposição das paredes de alvenaria, proporcionando enriquecimento arquitetônico nos layouts. Além disso, Schwetz (2011) destaca a capacidade de distribuição de cargas de forma diversificada, tornando-as adequadas para diferentes usos dos espaços.

2.7.4 Desvantagens da Laje Nervurada

No entanto, Souza (2007) apresenta algumas desvantagens das lajes nervuradas. Elas costumam aumentar a altura total do edifício e exigem cuidados especiais durante a execução para evitar a formação de vazios nas nervuras durante a concretagem. Além disso, Souza (2007) ressalta que, em lajes nervuradas lisas, há um aumento nos deslocamentos verticais, o que diminui a estabilidade global da estrutura em relação às ações horizontais, além de aumentar o risco de ruptura por cisalhamento nas nervuras próximas à região maciça ou por punção.

No caso das lajes nervuradas com vigotas pré-fabricadas, um inconveniente significativo são os altos valores de deslocamentos transversais em comparação com lajes maciças e lajes nervuradas moldadas in loco. Além disso, devido à sua natureza unidirecional, essas lajes apresentam a desvantagem de distribuir as cargas apenas em uma direção, o que aumenta os esforços solicitantes (SILVA, 2005).

2.7.5 Sistema construtivo das Lajes Nervuradas

As lajes nervuradas podem ser classificadas em diferentes modalidades. Em primeiro lugar, é possível distingui-las entre lajes construídas in situ ou lajes pré-moldadas. Além disso, é viável fazer a distinção entre lajes nervuradas unidirecionais e bidirecionais.

2.7.5.1 Unidirecionais

No que diz respeito à configuração das lajes nervuradas, quando as nervuras são dispostas em apenas uma direção, na qual a carga será distribuída, classifica-se como laje unidirecional ou armada em uma direção, de acordo com Schwetz (2005). Silva (2005) acrescenta que essa tipologia de laje geralmente apresenta as armaduras dispostas na direção do menor vão, além de comportar-se como um conjunto de vigas seção T simplesmente apoiadas que operam de forma independente. Além disso, existe a possibilidade de incorporar nervuras transversais com a finalidade de travamento das nervuras principais, bem como para a distribuição de cargas concentradas ou parcialmente distribuídas.

2.7.5.2 Bidirecionais

As lajes nervuradas bidirecionais são aquelas que distribuem as cargas em ambas as direções, com nervuras dispostas em ambas as direções da laje. Por ser uma laje bidirecional, ela é capaz de resistir a esforços em ambas as direções, resultando em menor deformação e menor solitação nas duas direções. Além disso, em comparação com as lajes unidirecionais, as lajes nervuradas bidirecionais tendem a ser estruturas mais rígidas, caracterizadas por alturas de nervuras reduzidas, menores valores de deformações e menor consumo de materiais, conforme mencionado por Schwetz (2005).

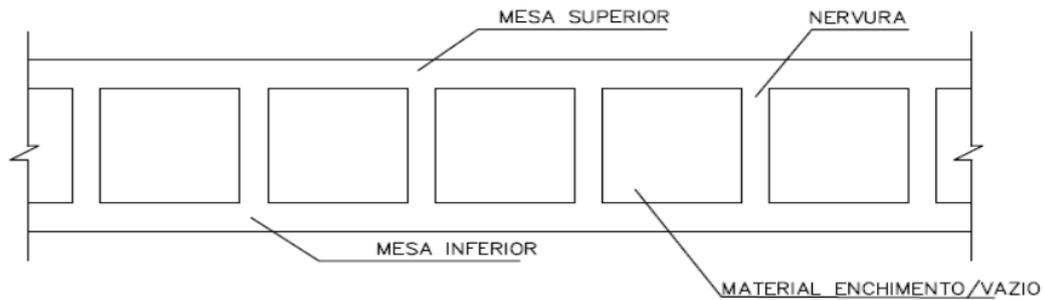
De acordo com Silva (2005), as lajes nervuradas bidirecionais serão eficientes quando a relação entre o menor e maior vão da laje for inferior a dois, o que resulta na redução das solitações e deformações transversais. Ao ultrapassarmos esse limite a rigidez das nervuras no maior vão começam a ser muito pequenas e vão absorver uma quantidade muito pequena da carga.

2.7.5.3 In loco

De acordo com Silva (2005), as lajes in loco são aquelas que são completamente construídas no local onde serão implantadas, garantindo que as nervuras e mesas permaneçam em suas posições definitivas. O autor ainda ressalta a possibilidade de posicionar as nervuras em uma ou duas direções, e classifica essas lajes como duplas, invertidas ou diretas.

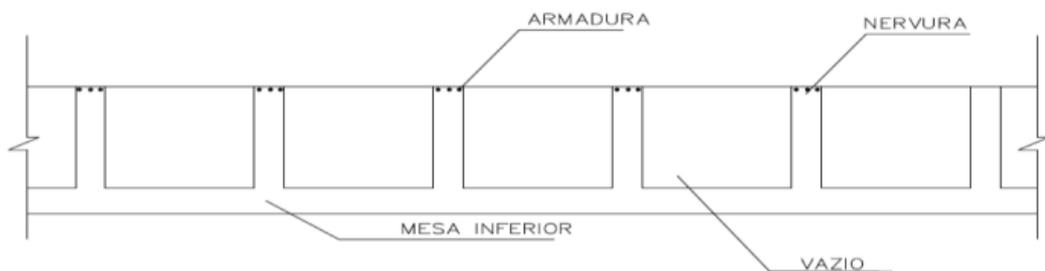
As lajes duplas são aquelas que possuem mesas superiores e inferiores, já as lajes nervuradas diretas são aquelas com somente uma mesa e com as nervuras na parte inferior e por fim as lajes nervuradas invertidas são aquelas com as nervuras na parte superior e a mesa na parte inferior como demonstrado nas Figuras 11, 12 e 13.

Figura 11 - Laje nervurada Dupla



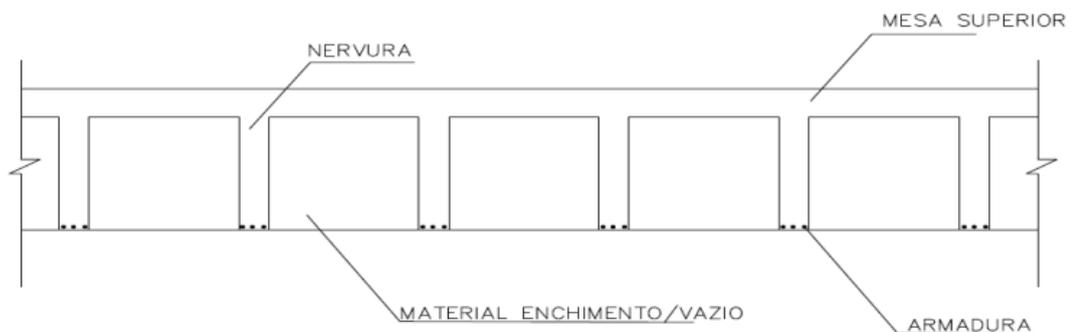
Fonte: Renata Barreira Maciel (2018).

Figura 12 - Laje nervurada Invertida



Fonte: Renata Barreira Maciel (2018).

Figura 13 - Laje nervurada Direta



Fonte: Renata Barreira Maciel (2018).

2.7.5.4 Laje nervurada Pré-moldada

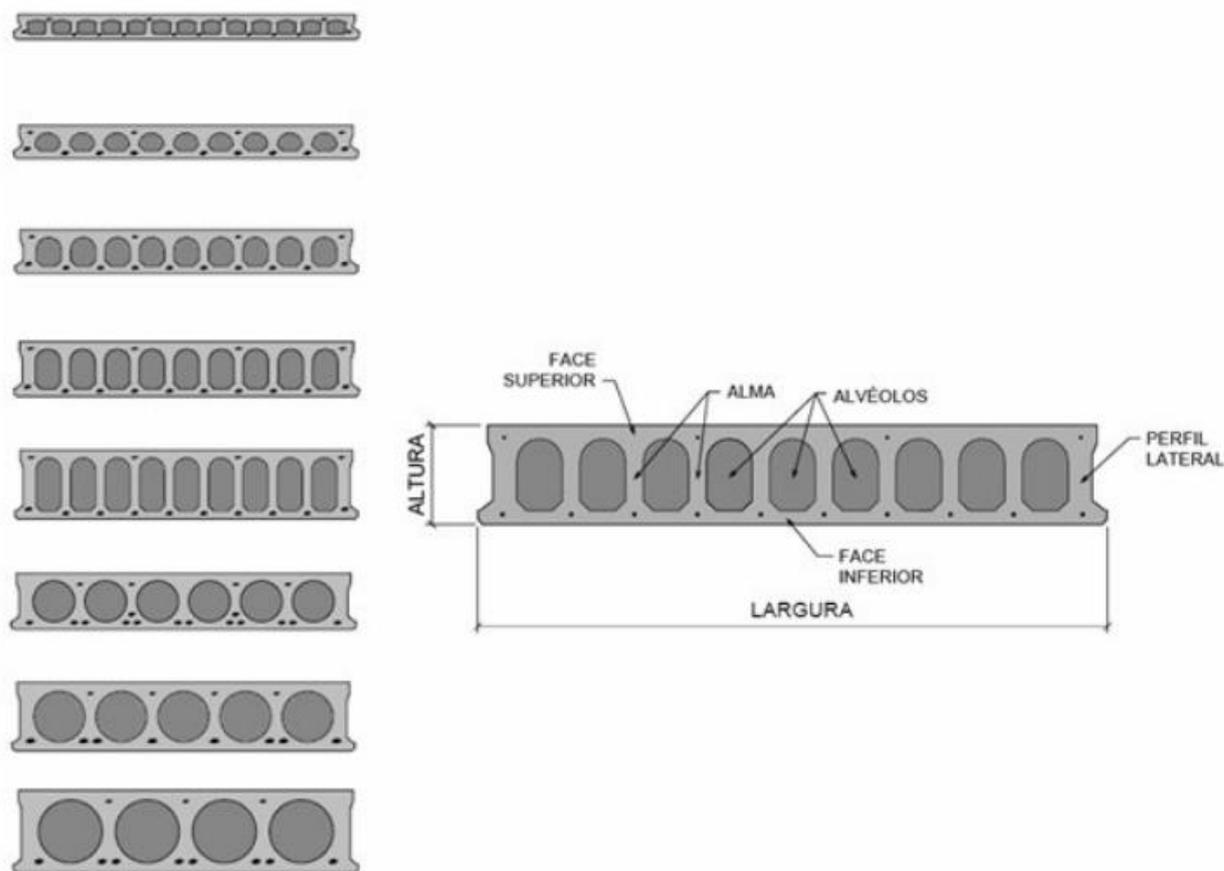
De acordo com Antônio Carlos dos Santos (2007), a laje pré-moldada é um elemento estrutural utilizado na construção civil que proporciona agilidade e eficiência na execução de obras, a laje pré-moldada apresenta diversas vantagens em relação às lajes convencionais moldadas in loco. Entre as principais vantagens, destaca-se a redução do tempo de execução da obra, pois a fabricação das lajes é realizada simultaneamente à execução das demais etapas construtivas. Isso resulta em ganhos significativos em termos de produtividade e economia de recursos.

Temos diversos tipos diferentes de lajes nervuradas pré-moldadas, primeiramente pode-se destacar as lajes de vigotas pré-moldadas. Nesse sistema construtivo, como descrito por Silva (2005), utilizava-se vigotas pré-fabricadas unidirecionais, como vigotas tipo trilho ou tipo treliça, as vigotas são posicionadas lado a lado, com um material de enchimento entre elas, usualmente tabelas cerâmicas ou painéis EPS.

Pode-se observar também lajes nervuradas de painéis pré-fabricados, que segundo Silva (2005), é utilizado um painel pré-fabricado completo, que pode ser treliçado ou protegido. Esses painéis podem ou não ter material de enchimento e são considerados uma extensão das vigotas.

Por fim pode-se citar também o sistema estrutural, apesar de menos utilizadas, painéis de laje alveolar, que são caracterizados por terem furos circulares ou ovais ao longo de toda a extensão da laje. Esses painéis são protendidos e fabricados totalmente de forma pré-fabricada. Além disso, há a opção dos painéis de lajes nervuradas integralmente pré-fabricadas, que podem ter seções em forma de T, duplo T ou U. Ambas as tipologias são unidirecionais e geralmente consideradas como lajes simplesmente apoiadas, de acordo com Silva (2005), como demonstrado na Figura 14.

Figura 14 - Representação de lajes Alveolares



Fonte: Carlos Antônio Menegazzo Araújo (2007).

2.7.6 Dimensionamento

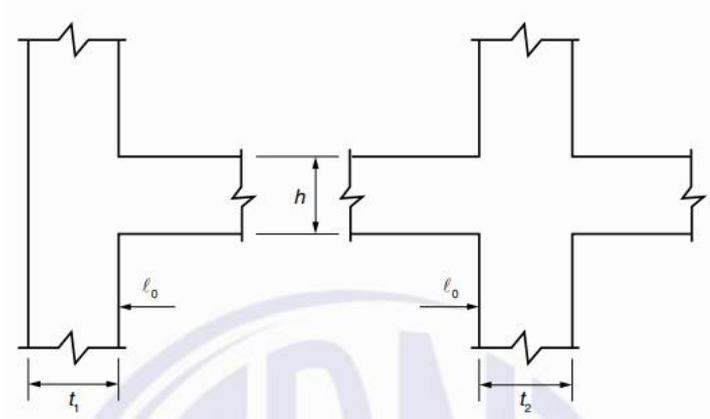
2.7.6.1 Condições de apoio

De acordo com Pinheiro e Rezende (2003), é recomendado evitar engastes e balanços sempre que possível. Isso se deve ao fato de que, nessas situações, ocorrem esforços de compressão na parte inferior da laje, onde a quantidade de concreto é reduzida, e esforços de tração na parte superior, onde o concreto predomina. Além disso, os autores afirmam que, quando for necessário utilizar engastes, é necessário limitar o valor do momento fletor para que seja igual à resistência à compressão da nervura. Outra alternativa seria utilizar uma laje do tipo dupla ou até mesmo uma região maciça com dimensões adequadas.

2.7.6.2 Vão efetivo

Segundo José Milton (2014), é possível aplicar os mesmos critérios de dimensionamento utilizados para as lajes maciças e vigas no caso das lajes nervuradas, desde que sejam consideradas as limitações pertinentes. Conforme estabelecido pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014), o vão efetivo das lajes pode ser calculado utilizando a Equação 08, conforme ilustrado na Figura 15 retirada da norma.

Figura 15 - Dimensões para cálculo do vão efetivo



Fonte: ABNT, NBR 6118:2014.

$$L_{ef} = L_0 + a_1 + a_2$$

(08)

Onde:

L_{ef} = Vão efetivo

L_0 = Vão face a face entre apoios

a_1 = Comprimento do apoio

a_2 = Comprimento do apoio

2.7.3.3 Especificações normativas

Conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 6118:2014, às lajes nervuradas podem ser dimensionadas de acordo com todas as prescrições aplicáveis à lajes maciças contidas na mesma norma. No entanto, é necessário atender às condições dimensionais específicas descritas na norma.

Segundo a norma ABNT NBR 6118:2014 na seção 13.2.4.2 “Lajes nervuradas”, a espessura da mesa (h_f) deve ser igual ou superior a $1/15$ da distância entre as faces das nervuras (l_o) e também maior que 4 cm, desde que não haja tubulações horizontais embutidas. Quando houver tubulações horizontais embutidas com diâmetro igual ou menor que 10 mm, a espessura da mesa (h_f) deve ser igual ou superior a 5 cm, se houver tubulações horizontais embutidas com diâmetro maior que 10 mm, a espessura da mesa (h_f) deve ser igual ou superior a 4 cm acrescidos do diâmetro da tubulação.

A norma determina também que quando existirem tubulações horizontais embutidas com diâmetro maior que 10 mm e ocorrer cruzamento entre essas tubulações, a espessura da mesa (h_f) deve ser igual ou superior a 4 cm acrescidos do dobro do diâmetro da tubulação.

A norma estabelece também dimensões mínimas para a espessura das nervuras, que deve seguir um (b_w) mínimo de 5 cm ou superior. Referente às nervuras temos também que, nervuras com espessura menor que 8 cm não podem conter armaduras de compressão.

No dimensionamento a flexão da mesa e cisalhamento das nervuras das lajes nervuradas, são estabelecidas as seguintes diretrizes segundo a ABNT NBR 6118:2014:

- a) quando o espaçamento entre os eixos das nervuras é menor ou igual a 65 cm, é permitido dispensar a verificação da flexão da mesa. Para a verificação do cisalhamento na região das nervuras, é possível considerar os critérios aplicáveis às lajes.
- b) para lajes com espaçamento entre os eixos das nervuras entre 65 cm e 110 cm, é exigida a verificação da flexão da mesa, e as nervuras devem ser verificadas quanto ao cisalhamento como vigas. Porém, é permitido realizar essa verificação considerando as nervuras como lajes se o espaçamento entre os eixos das nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for superior a 12 cm.
- c) no caso de lajes nervuradas com espaçamento entre os eixos das nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como uma laje maciça apoiada em uma grelha de

vigas, respeitando os limites mínimos de espessura estabelecidos para essa configuração.

2.8 ORÇAMENTOS

De acordo com González (2008), o orçamento paramétrico é caracterizado como uma estimativa aproximada, sendo especialmente útil para análises preliminares de viabilidade de construção e consulta aos clientes. Este tipo de orçamento é baseado na concepção inicial da edificação, não sendo necessário ter projetos definidos, e tem como finalidade fornecer uma estimativa do custo total. Os valores unitários utilizados são obtidos a partir de obras previamente realizadas ou através de referências de entidades reconhecidas, como o Custo Unitário Básico (CUB) e o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI).

2.8.1 Normas sobre orçamentação

A ABNT NBR 12721:2004 estabelece critérios para avaliação de custos unitários, cálculo do rateio de construção e outras disposições necessárias, levando em consideração as disposições e exigências da Lei Federal 4.591/64. De acordo com a norma, sua aplicação abrange edifícios com unidades autônomas em pavimentos, conjuntos de residências unifamiliares isoladas ou geminadas, edificações de incorporação imobiliária e edificações de forma condominial (ABNT, 2006).

González (2008) explica que, nesse tipo de orçamento, o Custo Unitário Básico (CUB) é utilizado por meio de ponderações, considerando as características específicas da edificação. O objetivo principal é fornecer um detalhamento para registro em cartório, de modo a estabelecer um parâmetro de controle da obra tanto para os condôminos quanto para os construtores. O CUB desempenha um papel fundamental na função de controle dos custos durante a construção.

3 METODOLOGIA

O objetivo da metodologia que foi apresentada a seguir é exemplificar os procedimentos utilizados no desenvolvimento do estudo de caso deste trabalho. Após a elaboração do projeto arquitetônico, foram realizadas duas abordagens de dimensionamento que foram analisadas: uma envolvendo o sistema de lajes maciças e outra com o sistema de lajes nervuradas.

Em seguida, foram determinados os valores das cargas permanentes e variáveis, bem como as características dos materiais e os parâmetros de projeto necessários. Com base nessas informações, foi possível realizar o pré-dimensionamento e dimensionamento da estrutura de cada um dos modelos. O desenvolvimento do pré-dimensionamento e do dimensionamento contou com o auxílio de um *software* de planilhas eletrônicas e um de dimensionamento para estruturas de concreto armado respectivamente.

3.1 DESCRIÇÃO DO ARQUITETÔNICO

A construção é projetada com uma arquitetura moderna, caracterizada por linhas limpas, formas geométricas e materiais contemporâneos. O objetivo é criar um ambiente esteticamente agradável, funcional e integrado com o entorno.

Para atender aos requisitos de ambientes amplos e abertos, os espaços internos são projetados de forma a proporcionar uma sensação de amplitude e fluidez. As áreas comuns, como o hall central, as áreas de convivência e os espaços de trabalho, são planejadas com pé-direito alto e amplas aberturas, permitindo a entrada de luz natural e uma conexão visual com o exterior.

A construção possui cinco andares, cada um com sua própria funcionalidade e *layout*. Os vãos internos (distâncias entre pilares) variam entre 3 metros e 6,7 metros, proporcionando flexibilidade no arranjo dos espaços e permitindo a criação de áreas amplas e sem obstruções.

Destaca-se também o maior vão em balanço, com 5 m, que é utilizado para criar áreas de varanda e gerar destaque arquitetônico. Além disso, a escolha de materiais modernos, como vidro, aço, concreto aparente e elementos de fachada envidraçados, contribui para a estética contemporânea da construção e permite a entrada de luz natural, reduzindo a dependência de iluminação artificial. O projeto arquitetônico pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Representação gráfica da fachada



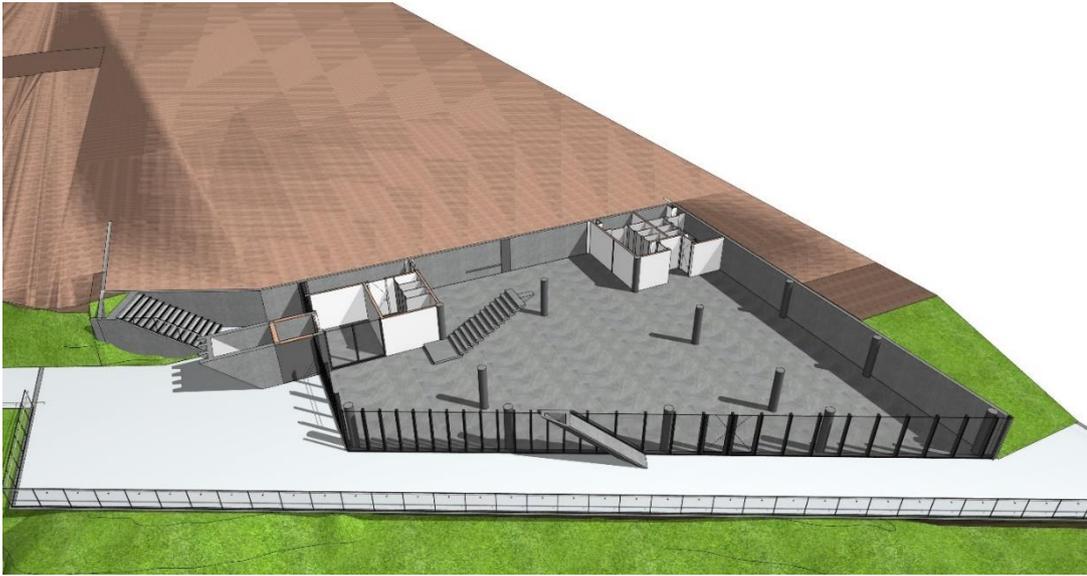
Fonte: Gabriel Paiva Arquitetura (2021).

3.2 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA EDIFICAÇÃO E DOS AMBIENTES

A edificação localiza-se na cidade de Caxias do Sul (RS), afastada do centro urbano. Ela será implantada em um terreno com alta declividade e próxima de uma talude (aproximadamente 15 m).

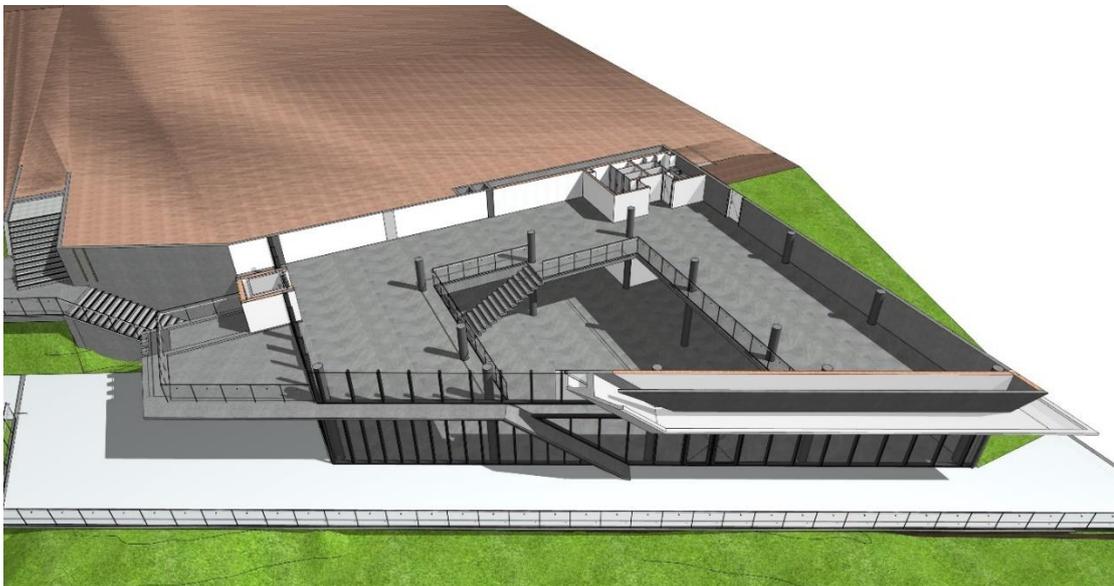
O edifício possui cinco andares com diversos ambientes de convívio e integração. O primeiro pavimento, como demonstrado na Figura 17, é o *hall* de entrada e possui área de integração, recepção, banheiros e área de elevador. A escadaria, representada na Figura 17, leva ao mezanino do segundo andar que é composto somente por uma área de socialização, banheiros e varandas como demonstrado na Figura 18.

Figura 17 - Representação gráfica pavimento térreo



Fonte: Gabriel Paiva Arquitetura (2021).

Figura 18 - Representação gráfica segundo andar



Fonte: Gabriel Paiva Arquitetura (2021).

O terceiro, quarto e quinto andares são similares e possuem utilidade de centro de eventos e salão de festas. Os ambientes desses andares são compostos por cozinhas, banheiros, varandas e salão para eventos. Como exemplo desses pavimentos utilizou-se o terceiro andar demonstrado na Figura 19.

Figura 19 - Representação gráfica terceiro andar

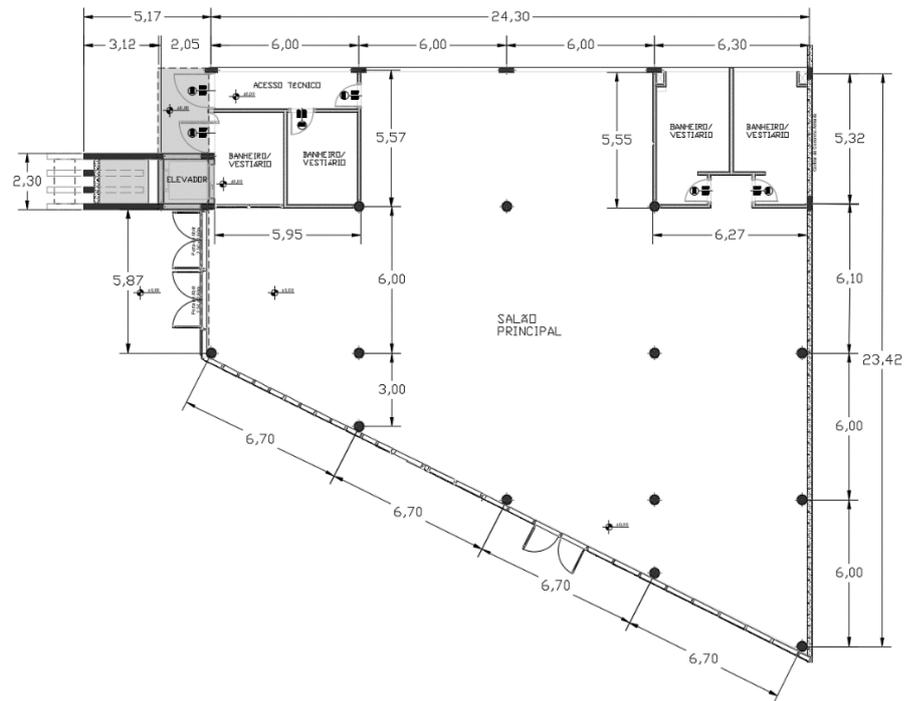


Fonte: Gabriel Paiva Arquitetura (2021).

3.3 PLANTA BAIXA CORTE

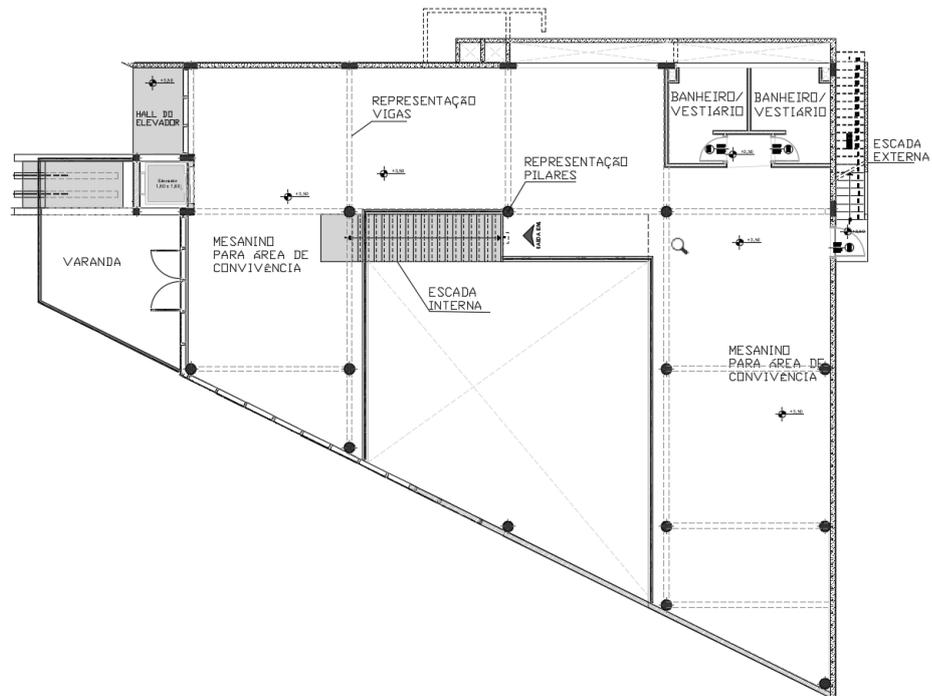
A planta baixa, junto das medidas globais da estrutura, está representada na Figura 20. Nas Figuras 21 e 22 pode ser observado a planta baixa dos andares junto da descrição de cada ambiente. As figuras apresentam também a disposição das estruturas de vigas e pilares.

Figura 20 - Planta baixa pavimento térreo



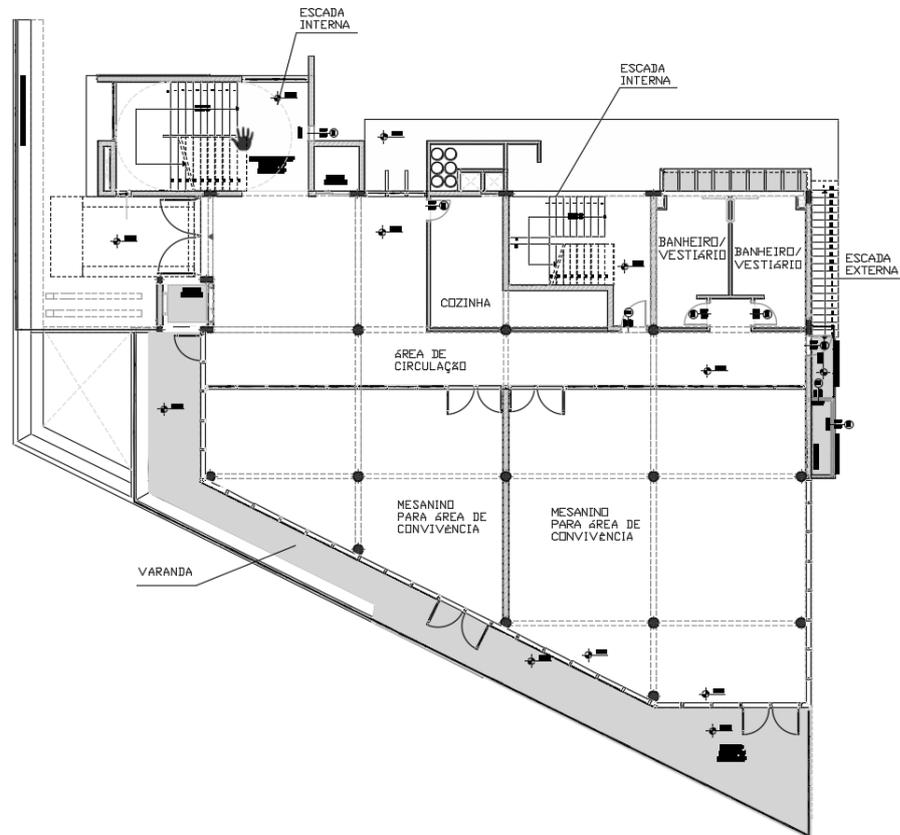
Fonte: Gabriel Paiva Arquitetura (2021).

Figura 21 - Planta baixa segundo pavimento



Fonte: Gabriel Paiva Arquitetura (2021).

Figura 22 - Planta baixa terceiro pavimento



Fonte: Gabriel Paiva Arquitetura (2021).

3.4 MODELOS

O projeto arquitetônico foi dimensionado usando dois sistemas de lajes diferentes. O primeiro sistema é composto por lajes maciças planas e é denominado Modelo de Lajes maciça, enquanto o segundo sistema é composto por lajes nervuradas e é chamado de Modelo Nervurado. É importante destacar que os modelos foram dimensionados levando em consideração concepções estruturais distintas, de acordo com as suas características, peculiaridades, pré-dimensionamento, dimensionamento e otimização. Os maiores vãos livres necessários para a edificação são de aproximadamente seis metros. É válido ressaltar que as fundações da edificação não foram consideradas. Além disso, os lances de escadas e rampas foram excluídos do projeto, sendo aplicadas apenas lajes no local, de acordo com o sistema de cada um dos modelos.

3.5 PARÂMETROS DE PROJETO

3.5.1 Cobrimento

Através do levantamento de dados, levando em consideração o ambiente urbano com agressividade moderada em que a edificação será construída, foi utilizada a Classe de Agressividade Ambiental II (CAA II) para determinar os parâmetros de projeto. Conseqüentemente, como demonstrado na Tabela 01, o valor nominal de cobrimento para as lajes foi estabelecido em 25 mm, enquanto para vigas, pilares e elementos em contato com o solo foi adotado um valor de 30 mm, seguindo a ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 1 - Cobrimento de projeto

Elementos	Cobrimento
Laje	25 mm
Viga / Pilar	30 mm
Elementos estruturais em contato com o solo	30 mm

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118:2014.

3.5.2 Resistência do concreto

A resistência do concreto é a mesma nos dois modelos, sendo de classe de resistência CA35, com um valor característico de resistência à compressão (f_{ck}) de 35 MPa. Como fator de segurança foi adotado um coeficiente de minoração da resistência do concreto de (γ_c) igual a 1,4. Utilizou-se, portanto, o valor da resistência do concreto para fins de cálculo e de pré-dimensionamento 35 MPa.

3.5.3 Resistência do aço

O aço utilizado para o projeto, tanto nas armaduras longitudinais das vigas, pilares e lajes quanto para as armaduras transversais desses mesmos elementos, foi o aço CA50. O aço CA50 possui resistência aproximada de 500 MPa, porém para a utilização da resistência em cálculos utilizou-se o coeficiente de minoração da resistência (γ_s) de 1,15. Portanto, para fins de cálculo e pré-dimensionamento tem-se o valor de 434,8 MPa como resistência do aço.

3.5.4 Parâmetros de vento

A determinação da velocidade característica do vento na região em que a edificação se encontra foi realizada considerando os parâmetros estabelecidos na norma ABNT NBR 6123:1988. A velocidade básica do vento (v_0) adotada foi de 45 m/s, de acordo com as informações contidas no mapa de isopleias. O fator topográfico S1 foi fixado em 1.23, o que corresponde a terrenos próximos de taludes e morros e possui variabilidade em seu valor. Para o fator S2, que leva em consideração a rugosidade do terreno, dimensões e altura da edificação, foi realizado um cálculo individual para cada altura considerando a classificação da edificação na Categoria III e Classe A. O fator estatístico S3 foi adotado como 1.

3.5.5 Carregamentos

Para as cargas permanentes observa-se o peso próprio dos elementos estruturais, forro, paredes de alvenaria e revestimento. Para a determinação dos pesos específicos utilizou-se os valores da ABNT NBR 6120:2019 como demonstrado na Tabela 02.

Tabela 02 - Peso específico dos materiais

(Continua)

Material	Peso específico materiais aparentes (kN/m ²)
Concreto armado	25

Tabela 02 - Peso específico dos materiais

(Conclusão)	
Material	Peso específico materiais aparentes (kN/m ²)
Tijolo Furado	13
Argamassa de cal e cimento	19
Lajotas cerâmicas	18

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6120:2019.

As cargas acidentais do edifício, que são determinadas de acordo com o uso da edificação, foram adotadas com base nos valores apresentados na ABNT NBR 6120:2019. Os valores de sobrecarga estão demonstrados na Tabela 03.

Tabela 3 - Carga variável da estrutura

Ambientes	Carga (KN/m ²)
Cozinhas não residenciais	3
Centro de eventos	5
Garagens e estacionamentos	3

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6120:2019.

3.6 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

O pré-dimensionamento foi realizado para a identificação da viabilidade do sistema estrutural e para obter uma estimativa inicial das dimensões e capacidades necessárias para um projeto estrutural. Dessa forma, foi realizado o dimensionamento dos elementos estruturais como vigas, pilares, lajes maciças e lajes nervuradas por meio de seus respectivos cálculos citados nos capítulos de pré-dimensionamento.

3.7 DIMENSIONAMENTO

Os dois modelos foram escalados utilizando o *software* TQS V23. Todos os parâmetros de projeto foram definidos de acordo com o que foi mencionado anteriormente. Além disso, foram levados em consideração os valores das cargas permanentes e das cargas variáveis.

Para o dimensionamento da estrutura, primeiramente realizou-se o pré-dimensionamento dos elementos estruturais e em seguida foram lançados os elementos no *software* para que fosse realizado o dimensionamento completo da estrutura.

O conjunto de configurações utilizadas no *software* será abordados na próxima etapa do projeto.

3.8 ORÇAMENTO

O levantamento de quantitativo de materiais da obra foi realizado por meio de tabelas quantitativas geradas pelo *software* TQS. O relatório abrange a quantia de aço, volume de concreto, área de formas e número de cubetas para todos os elementos estruturais como as lajes, vigas e pilares. O levantamento de custo dos materiais se deu por meio dos modelos da tabela SINAPI de Julho de 2023.

3.9 ANÁLISE DOS DADOS

Após realizar o dimensionamento e obter os resultados, procedeu-se a análise dos dados relacionados aos carregamentos totais da estrutura, seções dos pilares, pé-direito e orçamento de custo dos materiais utilizados. Essa análise teve como objetivo identificar a possível vantagem do uso de lajes do tipo nervurada, em comparação com lajes maciças planas na obtenção de grandes vãos livres em edificações semelhantes àquela do estudo de caso. As plantas de forma apresentados no Apêndice A, trazem as dimensões das estruturas calculadas junto com as distancias entre elementos.

4 RESULTADOS

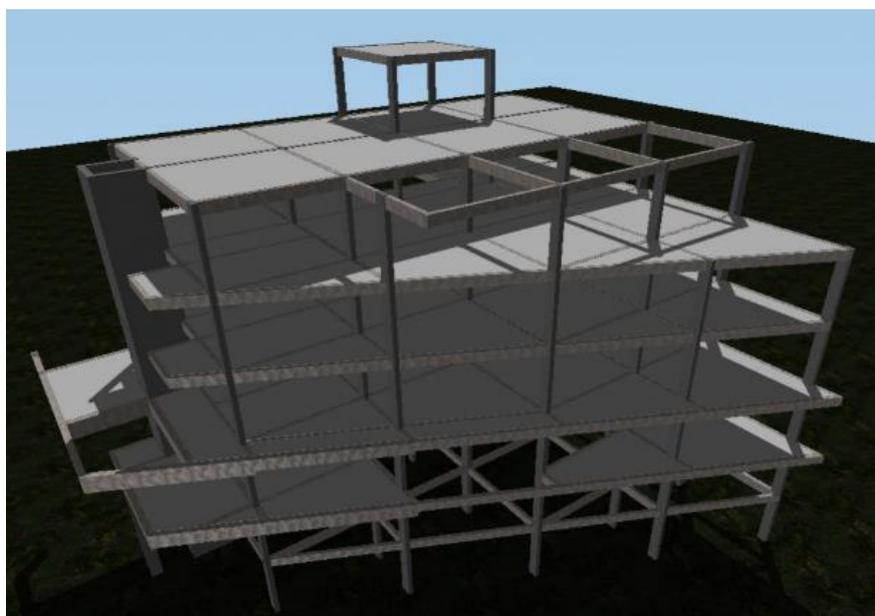
Após a fase do lançamento dos elementos e cálculo das duas estruturas de lajes maciças e nervuradas, foi realizado o dimensionamento da edificação através da utilização do *software* TQS V23. Os resultados extraídos do modelo estrutural para posterior análise e comparação de sistemas se deu pelos fatores quantitativos de materiais, deformações, quantitativos de formas e custo material utilizados.

A partir da extração dos dados, realizou-se uma análise comparativa entre os dois sistemas a fim de obter uma conclusão da pesquisa, identificando qual seria o sistema estrutural mais eficiente para essa edificação.

4.1 SISTEMA DE LAJES MACIÇAS

O pórtico tridimensional da estrutura foi criado por meio de uma configuração otimizada do modelo de lajes maciças, como ilustrado na Figura 24. O Anexo A deste trabalho conta a representação das fôrmas desse modelo, contendo a localização e dimensões dos elementos estruturais.

Figura 23- Pórtico da estrutura de lajes maciças



Fonte: Autoral (2023).

4.1.1 Quantitativo de concreto

Na tabela 04, é possível observar o consumo global de concreto do sistema de lajes maciças. A tabela demonstra a quantidade total de concreto, obtida pela soma do consumo de concreto em todos os elementos estruturais da edificação, incluindo lajes, vigas, pilares e capitéis.

Tabela 4- Consumo de concreto global do sistema de lajes maciças

Sistema de lajes maciças	
Pavimento	Consumo de concreto (m ³)
Térreo	35,52
01	91,46
02	111,48
03	95,94
04	94,9
Cobertura	63,29
Total:	492,59

Fonte: Autoral (2023).

Para a análise do consumo de concreto nas lajes é possível verificar, na Tabela 05, o consumo global de concreto do sistema de laje maciças. A tabela em questão apresenta o volume total de concreto das lajes por pavimento.

Tabela 5- Consumo de concreto das lajes por pavimento

Sistema de lajes maciças	
Pavimento	Consumo de concreto (m ³)
01	49,02
02	60,44
03	56,02
04	56,13
Cobertura	32,05
Total:	253,66

Fonte: Autoral (2023).

4.1.2 Quantitativo de aço

Foram desenvolvidas diversas análises do consumo de aço da edificação. Inicialmente realizou-se uma avaliação do consumo de aço nas lajes em cada um dos pavimentos, como mostrado na Tabela 06.

Tabela 6 - Consumo global de aço nas lajes do sistema de lajes maciças

Pavimento	Consumo de aço (kg)
01	3310
02	3911
03	3328
04	3409
Cobertura	1752
Total:	15710

Fonte: Autoral (2023).

O consumo de aço nas lajes é um parâmetro importante, portanto esse foi subdividido para uma análise mais aprofundada. Na Tabela 07 destaca-se o consumo de aço das armaduras positivas, já na Tabela 08 é apresentado o consumo de aço das armaduras negativas no sistema de lajes maciças.

Tabela 7- Armadura negativa das lajes maciças

Armadura negativa Laje Maciça	
Pavimento	Consumo de aço (kg)
01	1392
02	1692
03	1371
04	1430
Cobertura	686
Total	6571

Fonte: Autoral (2023).

Tabela 8- Armadura positiva das lajes maciças

Armadura positiva Laje Maciça	
Pavimento	Consumo de aço (kg)
1	1918
2	2219
3	1957
4	1979
Cobertura	1066
Total:	9139

Fonte: Autoral (2023).

Pode-se observar a taxa de aço das vigas por pavimento do sistema de lajes maciças na Tabela 09. A tabela apresenta também a taxa média de consumo das vigas de toda edificação.

Tabela 9- Taxa de aço das vigas por pavimento no sistema de laje maciça

Taxa de aço das vigas (kgf/m ³)	
Térreo	62,1
01	97,4
02	93,1
03	88,5
04	78,9
Cobertura	80,1
Média:	84,3

Fonte: Autoral (2023).

4.1.3 Formas

Outro parâmetro analisado é o consumo de formas no sistema de lajes maciças. A Tabela 10 apresenta o consumo de formas por pavimento e o consumo de formas de toda edificação.

Tabela 10 - Consumo de formas de madeira

(Continua)

Sistema de laje maciça	
Pavimento	Área de formas (m ²)
Térreo	389,37
01	700,92
02	908,48
03	758,03

Tabela 10 – Consumo de formas de madeira

(Conclusão)

Sistema de laje maciça	
Pavimento	Área de formas (m ²)
04	755,21
Cobertura	573,97
Total:	4085,98

Fonte: Autoral (2023).

4.1.5 Deformações

Referente às deformações do sistema de lajes maciças, a Tabela 12 apresenta as deformações máximas de cada pavimento. No Apêndice C são expostas as deformações ao longo de todo o pavimento dos 5 andares em ambos os sistemas estruturais.

Tabela 11 - Deformações máximas por pavimento

(Continua)

Sistema laje maciça	
Pavimento	Deformações máximas (mm)
01	12,8
02	13,1
03	13,4

Tabela 12 - Deformações máximas por pavimento

(Conclusão)

Sistema laje maciça

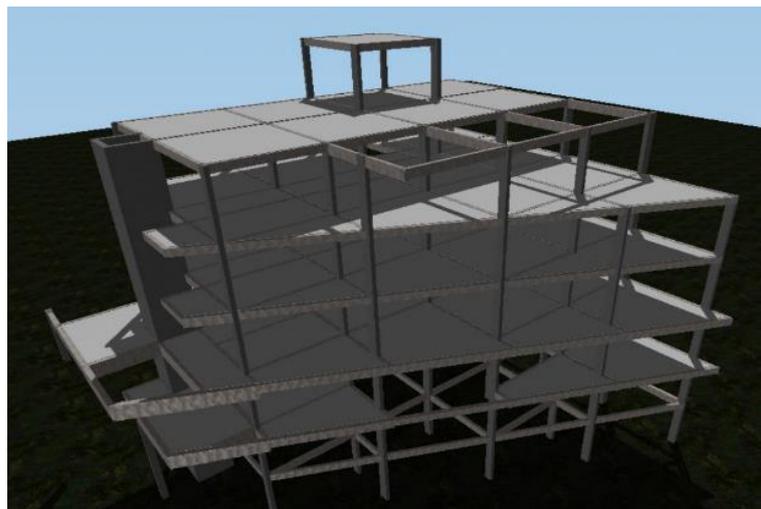
Pavimento	Deformações máximas (mm)
04	13,3
Cobertura	10,8

Fonte: Autoral (2023).

4.2 SISTEMA DE LAJES NERVURADAS

O pórtico tridimensional da estrutura foi criado por meio de uma configuração otimizada do modelo de lajes nervuradas, como ilustrado na Figura 25. O Apêndice B deste trabalho conta a representação das fôrmas desse modelo, contendo a localização e dimensões dos elementos estruturais.

Figura 24 - Pórtico da estrutura de lajes nervuradas



Fonte: Autoral (2023)

4.2.1 Quantitativo de concreto

Destaca-se o consumo global de concreto do sistema de lajes nervuradas na Tabela 13. A tabela apresenta a quantidade total de concreto por pavimento e também da estrutura como um todo.

Tabela 12 - Consumo de concreto global do sistema de lajes nervuradas

Sistema de lajes Nervuradas	
Pavimento	Consumo de concreto (m ³)
Térreo	35,86
01	81,73
02	104,47
03	90,94
04	90,66
Cobertura	69,69
Total:	473,35

Fonte: Autoral (2023).

Além do consumo total de concreto, foi analisado também o consumo nas lajes em cada pavimento da edificação, demonstrado na Tabela 14.

Tabela 13 - Consumo de concreto das lajes por pavimento

(Continua)

Sistema de lajes Nervurada	
Pavimento	Consumo de concreto (m ³)
01	41,03
02	57,03

Tabela 14 - Consumo de concreto das lajes por pavimento

(Conclusão)

Sistema de lajes Nervurada	
Pavimento	Consumo de concreto (m ³)
03	50,39
04	49,84
Cobertura	40,68
Total:	238,97

Fonte: Autoral (2023).

4.2.2 Quantitativo de aço

Para a análise do consumo de aço do sistema de lajes nervuradas, iniciou-se com os quantitativos de consumo de aço nas lajes, apresentado na Tabela 15.

Tabela 14 - Consumo global de aço nas lajes do sistema de lajes Nervurada

Pavimento	Consumo de aço (kg)
01	2299
02	3147
03	2601
04	2590
Cobertura	1911
Total:	12548

Fonte: Autoral (2023).

De maneira similar ao analisado no sistema de lajes maciças, foram realizadas análises mais aprofundadas nos parâmetros de consumo de aço das lajes. Nas Tabelas 16 e 17 são apresentados os consumos de aço positivo e negativo respectivamente.

Tabela 15 - Armadura positiva das lajes Nervuradas

Armadura negativa Laje Nervurada	
Pavimento	Consumo de aço (kg)
01	1270
02	1889
03	1509
04	1497
Cobertura	955
Total	7120

Fonte: Autoral (2023).

Tabela 16 - Armadura positiva das lajes Nervuradas

Armadura positiva Laje Nervurada	
Pavimento	Consumo de aço (kg)
01	1029
02	1258
03	1092
04	1093
Cobertura	956
Total:	5428

Fonte: Autoral (2023).

Quanto ao consumo de aço nas vigas, podemos observar na Tabela 18 a taxa de aço em kgf/m³ de cada pavimento da edificação e a taxa de aço média de todas as vigas da edificação.

Tabela 17 - Taxa de aço das vigas por pavimento no sistema de laje Nervurada

Taxa de aço das vigas (kgf/m ³)	
Térreo	60,9
01	98,2
02	90,1
03	94,3
04	80,1
Cobertura	60,5
Média:	85,1

Fonte: Autoral (2023).

4.2.3 Formas

A figura 19 apresenta o consumo, total e por pavimento, de formas do sistema de lajes nervuradas. A tabela apresenta também o consumo de cubetas utilizadas no sistema.

Tabela 18 - Consumo de formas de madeira

(Continua)

Sistema de laje Nervurada		
Pavimento	Área de formas (m ²)	Cubetas Atex 610 21 + 5
Térreo	392,39	0
01	654,97	741
02	711,49	986
03	705,94	834

Tabela 19 - Consumo de formas de madeira

(Conclusão)

Sistema de laje Nervurada		
Pavimento	Área de formas (m ²)	Cubetas Atex 610 21 + 5
04	670,46	834
Cobertura	519,12	612
Total:	3654,37	4007

Fonte: Autoral (2023).

4.2.5 Deformações

Referente às deformações do sistema de lajes maciças, a Tabela 21 apresenta as deformações máximas de cada pavimento. No Apêndice C são expostas as deformações ao longo de todo o pavimento dos 5 andares em ambos os sistemas estruturais.

Tabela 19 - Deformações máximas

Sistema laje nervurada	
Pavimento	Deformações máximas (mm)
01	13,3
02	13,4
03	9,6
04	10,3
Cobertura	8,8

Fonte: Autoral (2023).

4.3 ORÇAMENTO SISTEMA DE LAJES MACIÇAS

Para efeito de elaboração do orçamento deste modelo, foi levado em consideração as tabelas do SINAPI do Rio Grande do Sul, com valores de referência para julho de 2022. A Tabela 11 destaca o fato de que nem todos os materiais da obra foram englobados no orçamento, foram considerados somente aço, concreto e formas.

Tabela 20 - Orçamento dos quantitativos

Material	Referência SINAPI	Preço Unitário	un.	Quant.	Preço total (R\$)
Aço CA - 60 Ø 5 - Vergalhão	39	8,52	kg	355,51	3513,56
Aço CA - 50 Ø 6.3 - Vergalhão	32	11,35	kg	4052,79	53359,03
Aço CA - 50 Ø 8 - Vergalhão	33	11,42	kg	1363,54	18063,09
Aço CA - 50 Ø 10 - Vergalhão	34	10,76	kg	6697,00	83589,28
Aço CA - 50 Ø 12.5 - Vergalhão	43055	9,32	kg	6076,71	65696,49
Aço CA - 50 Ø 16 - Vergalhão	43055	9,32	kg	6477,48	70029,33
Aço CA - 50 Ø 20 - Vergalhão	43056	10,75	kg	5840,08	72825,74
Material	Referência SINAPI	Preço Unitário	un.	Quant.	Preço total (R\$)
CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C35, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	103904	482,00	m ³	492,59	237428,38
Chapa de madeira compensada resinada para fôrma de concreto e = 17 mm	1358	26,21	m ²	4085,98	107093,54

4.4 ORÇAMENTO SISTEMA DE LAJES NERVURADAS

Esse modelo utilizou valores de referência das tabelas do SINAPI para o estado do Rio Grande do Sul (julho de 2022), que foram então utilizados para o cálculo do orçamento. Apenas os insumos referentes a estrutura da edificação foram considerados na Tabela 20. O gasto com a construção da estrutura com esse sistema específico de lajes, que inclui aço, concreto e fôrmas conforme previsto no orçamento, é de R\$ 597.741,34.

Tabela 21 - Orçamento dos quantitativos

(Continua)

Material	Referência SINAPI	Preço Unitário	um.	Quant.	Preço total (R\$)
Aço CA – 60 Ø 5 – Vergalhão	39	8,52	kg	288,76	2460,26
Aço CA – 50 Ø 6.3 – Vergalhão	32	11,35	kg	3291,89	37363,01
Aço CA – 50 Ø 8 – Vergalhão	33	11,42	kg	1107,54	12648,12
Aço CA – 50 Ø 10 – Vergalhão	34	10,76	kg	5884,25	63314,50
Aço CA – 50 Ø 12.5 – Vergalhão	43055	9,32	kg	5433,56	50640,79
Aço CA – 50 Ø 16 – Vergalhão	43055	9,32	kg	5488,94	51156,89
Material	Referência SINAPI	Preço Unitário	um.	Quant.	Preço total (R\$)
Aço CA - 50 Ø 20 - Vergalhão	43056	10,75	kg	4950,89	53222,02
CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C35, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	103904	482,00	m ³	473,35	228154,70

Tabela 20 - Orçamento dos quantitativos

(Conclusão)

Chapa de madeira compensada resinada para fôrma de concreto e = 17 mm	1358	26,21	m ²	3654,37	95781,04
Cubeta ATEX 610 (26 = 21 + 5) 700 unidades	-	12,90	mês	4	36120

Fonte: Autoral (2023).

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Nessa etapa será apresentada uma análise comparativa entre os resultados dos dois sistemas estruturais. Essa análise discorre sobre o quantitativo de materiais, orçamento e deformações.

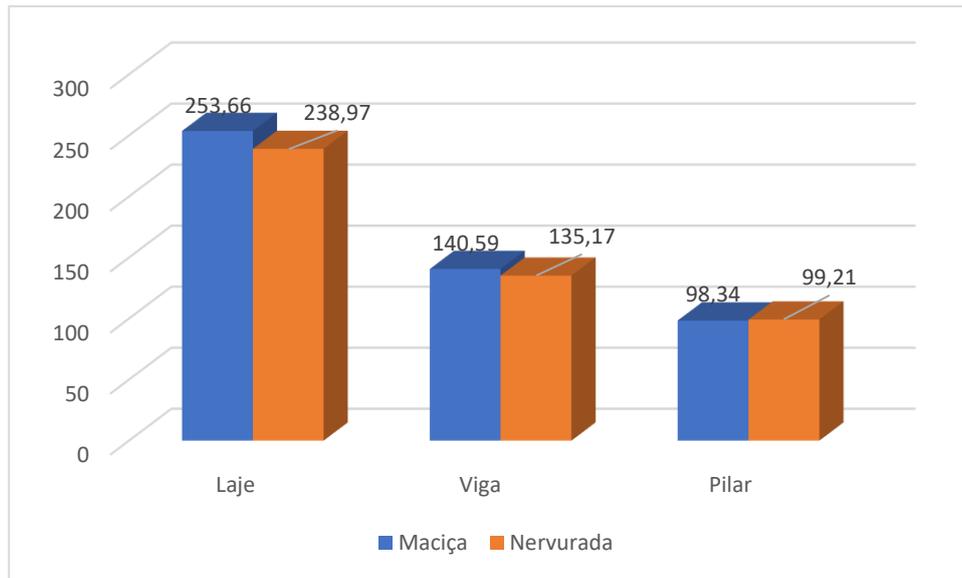
5.1 QUANTITATIVOS

A Figura 26 mostra o volume total de concreto da edificação, levando em conta vigas, pilares e lajes em cada modelo. Destaca-se que o volume de concreto das vigas e dos pilares permaneceu similar entre os dois sistemas, contudo ao se analisar os elementos de lajes podemos observar a maior diferença entre sistemas.

Com a mudança do modelo de laje maciça para o modelo de laje nervuradas, a quantidade de concreto nas vigas foi reduzida em 0.72% e o volume de concreto nos pilares foi aumentado em 0.3%. Já o volume de concreto nas lajes apresentou uma mudança maior, de aproximadamente 4% do volume total de concreto. Quando analisado o volume total de concreto da edificação, ele chega a 495,59 m³ no modelo de lajes maciças, enquanto no modelo de laje nervurada chega a 473,35 m³, o que representa uma redução do consumo de concreto de 4,58%.

A redução do volume de concreto do modelo de lajes maciças para o modelo de lajes nervuradas ocorre devido ao sistema alveolar das lajes e também através da redução das larguras e seções dos elementos, o que leva à redução do peso da estrutura.

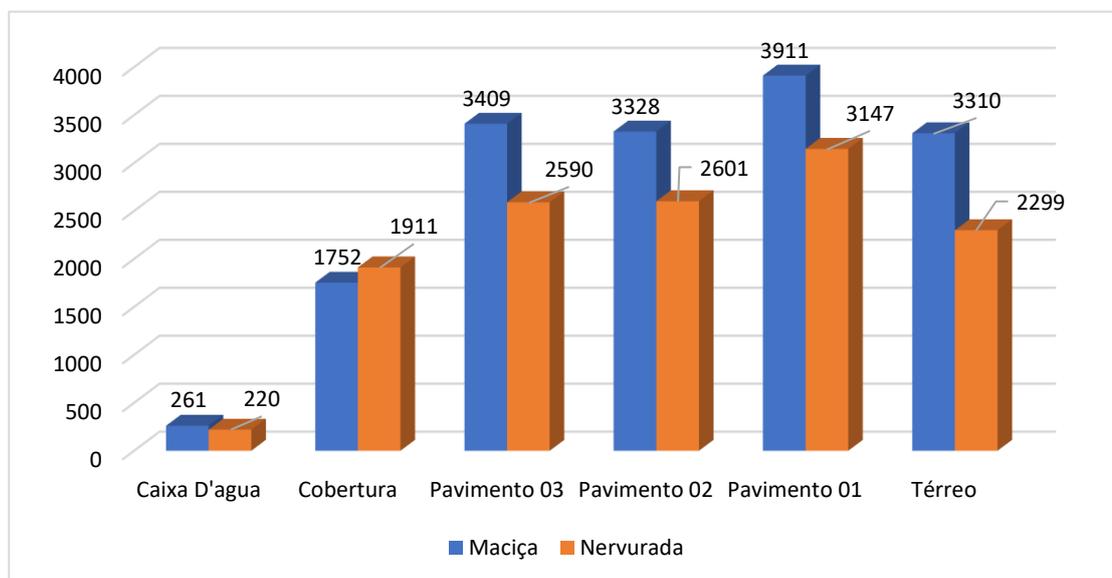
Figura 25 - Análise comparativa do volume de concreto (m³)



Fonte: Autoral (2023).

Da mesma forma que observamos a diferença do volume de concreto, a maior diferença entre os dois modelos quanto ao consumo de aço se encontra nos elementos de laje. O modelo de lajes maciças apresenta uma redução de 21,13% no consumo de aço como demonstrado na Figura 26. Enquanto o modelo de lajes maciças apresenta um peso de aço de 15.710 kg nas lajes, por outro lado o sistema de lajes nervuradas apresenta somente 12.548 kg de aço.

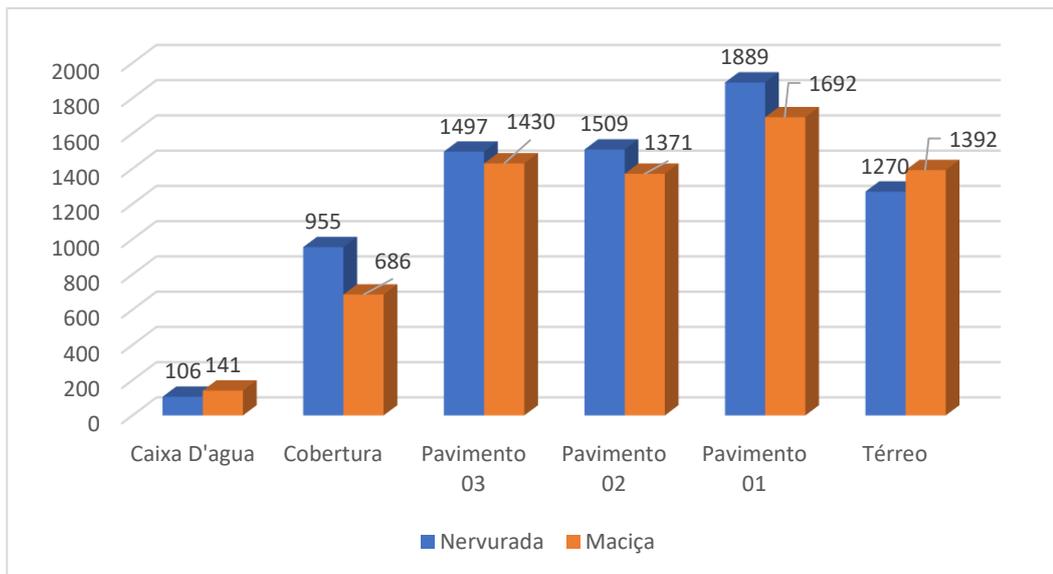
Figura 26 - Análise comparativa do volume de concreto (kg)



Fonte: Autoral (2023).

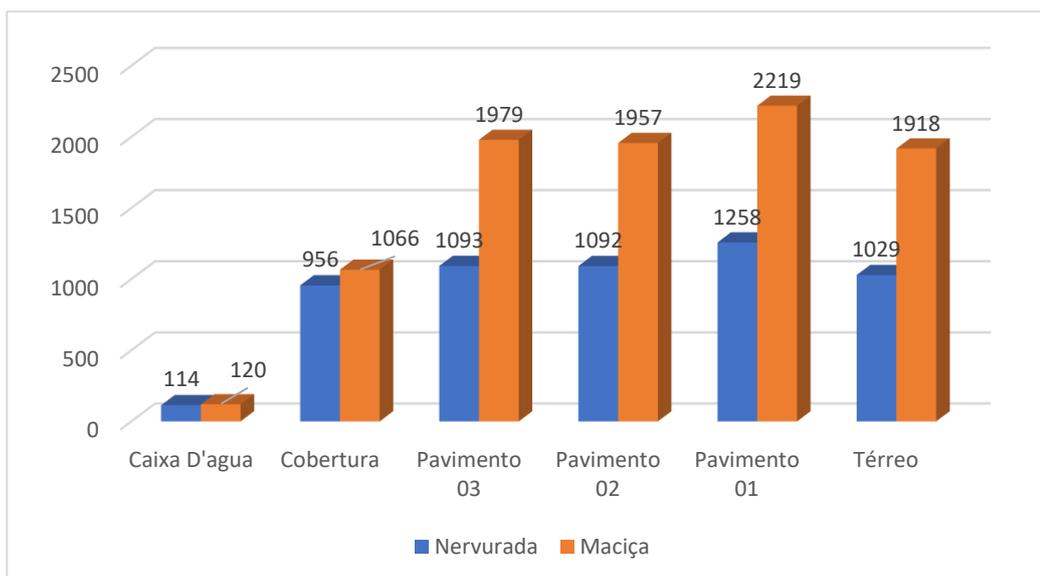
Ao observarmos os dados de consumo de aço nas lajes mais a fundo, podemos observar que o consumo de aço negativo se mantém praticamente igual entre os dois sistemas, porém quando observamos o consumo de aço positivo é evidenciado a grande diferença entre os dois sistemas, como demonstrados nas figuras 27 e 28

Figura 27 - Armadura negativa nas lajes (kg)



Fonte: Autoral (2023).

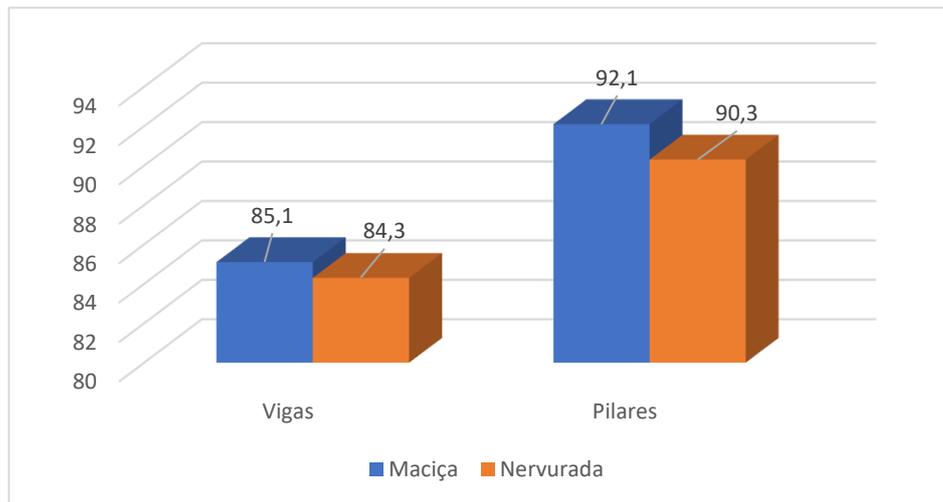
Figura 28 - Armadura positiva nas lajes (kg)



Fonte: Autoral (2023).

Ainda dentro do contexto de consumo de aço da estrutura, podemos observar na Figura 29 que o consumo de aço tanto nas vigas quanto nos pilares permanece praticamente inalterado.

Figura 29 - Taxa de aço nas vigas e pilares (kgf/m³)



Fonte: Autoral (2023).

5.2 ORÇAMENTO

A análise de custos do modelo de lajes maciças e nervuradas é apresentado na Tabela 22. Os valores calculados para cada um dos sistemas estruturais são relativos ao peso do aço, volume de concreto, área de fôrma e cubetas.

Tabela 22 - Tabela de orçamento

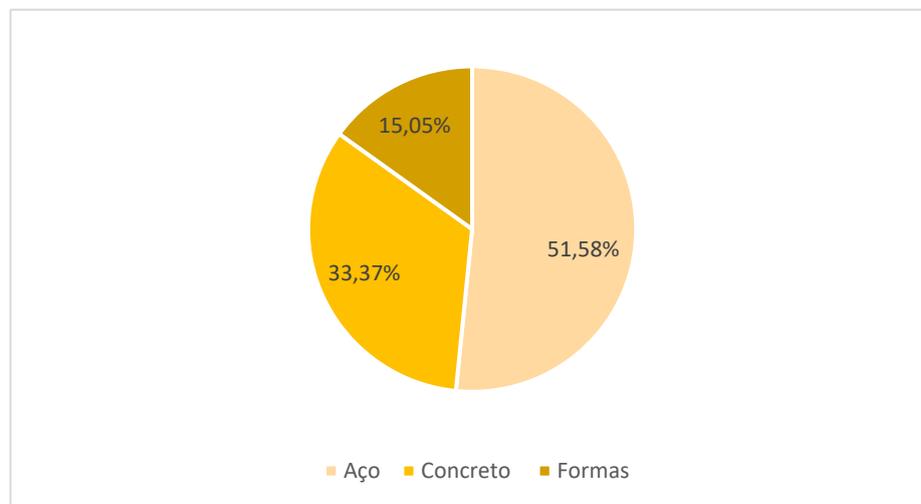
Material	Modelo lajes maciças	Modelo lajes Nervuradas
Aço	R\$ 367.076,51	R\$ 270.805,60
Concreto	R\$ 237.428,38	R\$ 228.154,70
Formas	R\$ 107.093,54	R\$ 95.781,04
Cubetas	-	R\$ 36.120,00
Total	R\$ 711.598,43	R\$ 630.861,34

Fonte: Autoral (2023).

A partir da análise comparativa de orçamento entre os dois sistemas estruturais podemos observar que o sistema de lajes nervurada apresenta uma vantagem de 11,34% no total do custo de materiais em relação ao sistema de lajes nervuradas.

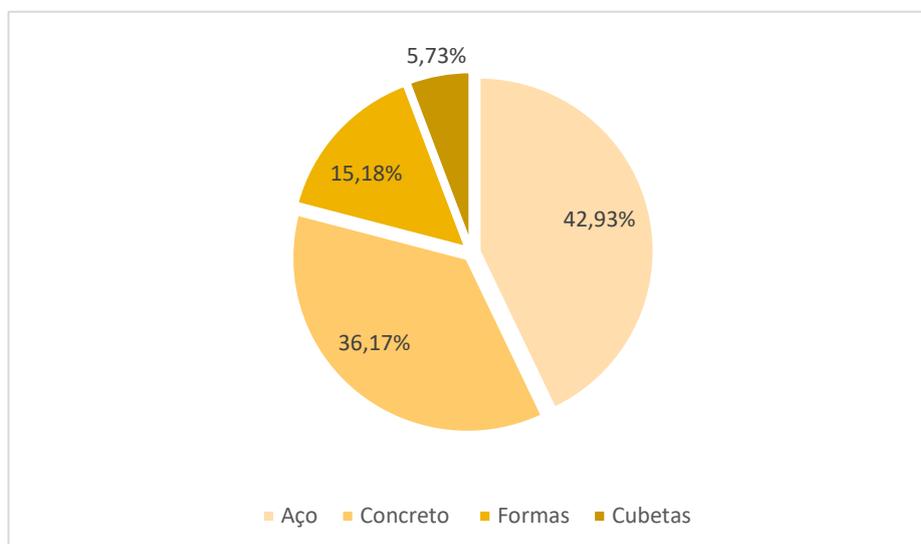
A Figura 30 para o Modelo de lajes maciças e a Figura 31 para o Modelo de lajes nervuradas apresentam a porcentagem do custo total de cada um dos materiais. Esses valores englobam o custo de aço, concreto, fôrmas e cubetas no caso do Modelo Nervurada.

Figura 30 - Composição de custo do sistema de lajes maciças



Fonte: Autoral (2023).

Figura 31 - Composição de custo do sistema de lajes nervuradas



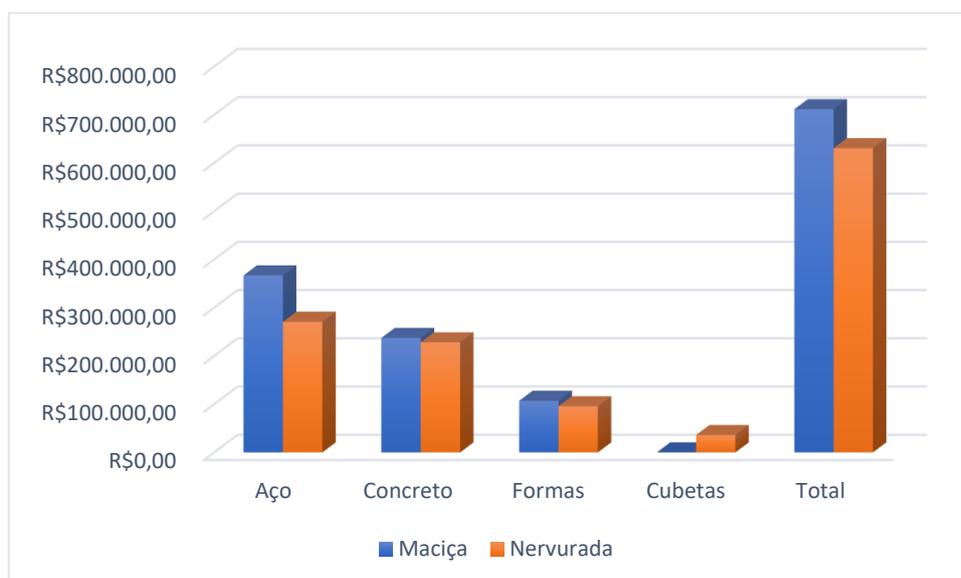
Fonte: Autoral (2023).

Podemos observar uma redução da composição de custos da estrutura em todos os aspectos, porém a maior diferença entre os dois sistemas é o custo total de aço que passou de 51,58% para 42,93%. Observa-se também uma redução de 3% da composição de custo do preço de concreto.

Com base na análise comparativa dos resultados, serão apresentadas as considerações finais a fim de chegar a uma conclusão sobre se a utilização do sistema de laje nervurada é vantajosa em edifícios que requerem grandes vãos livres, em comparação com o sistema de lajes maciças.

A Figura 32 mostra a comparação de custos de cada um dos elementos do quantitativo e também o custo total entre os dois sistemas.

Figura 32 - Comparação Orçamentária Entre Sistemas



Fonte: Autoral (2023)

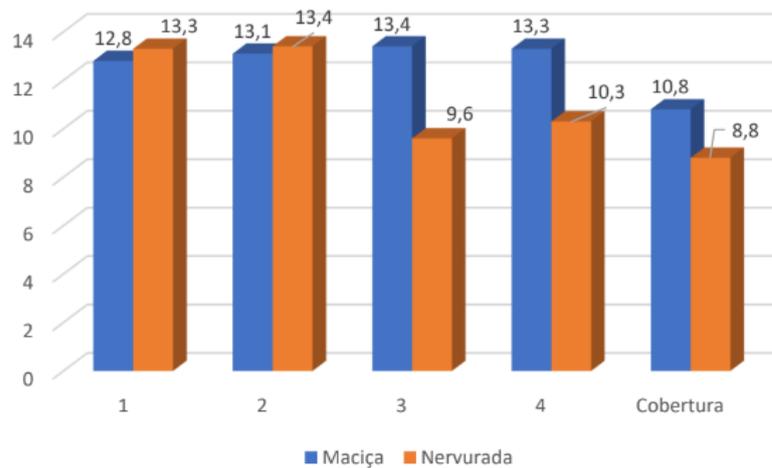
5.3 DEFORMAÇÕES

A Figura 32 apresenta a comparação de deformações máximas entre sistemas. O sistema de lajes maciças apresenta desvantagens quanto a suas deformações em relação ao sistema de lajes Nervuradas. Os dois primeiros pavimentos possuem deformações máximas muito

próximas, isso ocorre pois temos grandes vãos em balanço. Contudo nos pavimentos 3, 4 e cobertura, onde não temos vãos críticos, podemos observar uma redução de mais de 25% da deformação máxima.

Pode-se observar também no Apêndice C que as deformações médias dos panos das lajes também tiveram redução significativa de um sistema para outro. O sistema de lajes maciças apresenta uma quantidade maior de picos de deformação por possuir menor inercia na laje. Já o sistema de lajes nervuradas possui um pico de deformação somente nos vãos críticos da edificação, observa-se portanto uma redução drástica de deformação no centro das lajes por conta de sua maior inercia.

Figura 33 - Comparação de deformações máximas



Fonte: Autoral (2023).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi realizado um estudo dos aspectos gerais do concreto armado e de suas estruturas, assim como as características, comportamentos e parâmetros de dimensionamento dos sistemas de lajes nervuradas e maciças. Também foi feito um dimensionamento de dois modelos de um centro de eventos de cinco pavimentos em Caxias do Sul/RS utilizando o *Software* TQS. No primeiro modelo foram utilizadas lajes maciças e no segundo, lajes nervuradas.

Os dois modelos estruturais, tanto no sistema de lajes maciças como no de lajes nervuradas, foram pré-dimensionado, dimensionados e depois otimizado, em seguida foram submetidos a uma comparação. Foram realizadas diversas análises entre os dois sistemas, tanto de aspectos técnicos, quantitativos e orçamentários. Dentro dos aspectos técnicos foram avaliados a redução de elementos estruturais e também as deformações de cada pavimento, já para os aspectos quantitativos e orçamentários foram analisados o consumo de aço, consumo de concreto, formas de madeira e cobertas.

O sistema de lajes nervuradas apresentou vantagens sobre o sistema de lajes maciças em ambas análises. Pode-se observar que apesar de os pilares possuírem a mesma seção, foi possível realizar uma redução dos tamanhos das vigas. Isso ocorre pois há uma laje com inércia muito maior no sistema Nervurado auxiliando a viga na resistência à flexão. Quanto aos aspectos de deformação, o sistema de lajes nervuradas apresentou uma redução de aproximadamente 17% das deformações máximas em cada pavimento e também uma redução de deformações em todo o sistema de lajes.

Quanto ao consumo de materiais das estruturas, pode-se observar que o sistema de nervurado apresenta também vantagens quanto ao consumo de aço. Apesar de as lajes maciças apresentarem uma vantagem nas armaduras negativas, o sistema de lajes nervuradas se sobressai ao oferecer uma redução drástica no consumo de aço das armaduras positivas. É possível observar também uma redução de 5% do consumo global de concreto da edificação no sistema de lajes nervuradas.

O sistema de lajes maciças apresenta algumas vantagens quanto as deformações máximas. Nos dois primeiros pavimentos temos deformações máximas menores no sistema de lajes maciças, contudo nos outros pavimentos é possível observar uma clara vantagens do sistema nervurado. Apesar de termos vantagens para os dois sistemas, as lajes nervuradas se

sobressaem por terem vantagens não somente nas deformações máximas, mas também uma drástica redução das deformações médias dos pavimentos.

Mediante o aumento da construção de edificações modernas, com tendências arquitetônicas tais como maiores vãos, esbeltez das estruturas e menores custos, é observado uma limitação das estruturas convencionais de concreto armado para atender essas necessidades. Visto isso importante destacar que é necessário buscar informações e inovações tecnológicas para desenvolvimento do setor e na oferta de soluções que atendam às necessidades dos usuários.

Em resumo com base nos resultados analisados nesse trabalho, podemos concluir que a utilização do sistema de lajes Nervurada para essa edificação que possui vãos médios entre pilares de 6 metros é vantajosa em comparação com o sistema de lajes maciças. Este trabalho demonstrou que o sistema de lajes Nervurada resulta em redução de custos de insumos, diminuição nas cargas totais e diminuição das deformações médias e máximas dos pavimentos.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Como dito anteriormente, as estruturas de vigas e pilares se mantiveram idênticos entre os dois projetos a fim de identificar o potencial da laje nervurada para os vão dessa estrutura.

Dessa forma, pode-se sugerir para futuros trabalhos a modificação das estruturas de pilares e vigas a fim de uma maior otimização. As lajes nervuradas conseguem atuar de forma a suportar vãos maiores em comparação a lajes maciças, portanto seria possível a realização de um trabalho com o aumento dos vãos entre pilares e conseqüentemente um aumento da espessura das lajes. Nesse caso seria necessária uma avaliação mais aprofundada quanto a deformação e estabilidade global da edificação visto que as mesmas seriam maiores devido a redução da quantidade de pilares. Ainda dentro do escopo estrutural, pode-se destacar um trabalho voltado para a utilização de lajes nervuradas sem a presença de vigas.

Para a realização deste trabalho foram analisados somente os orçamentos referentes aos quantitativos de materiais. Para futuros trabalhos pode-se realizar o controle e orçamento dos aspectos que diferenciam as lajes nervuradas como custo de mão de obra, tempo de execução, entre outros possíveis parâmetros desse sistema estrutural.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - procedimento. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721**: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014a. 1 v.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014a. 2 v

AZEREDO, Hélio Alves de. **O edifício até sua cobertura**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 10 ed. Pearson, 2019a.

BOCCHI JÚNIOR, Carlos Fernando; GIONGO, José Samuel. **Concreto armado: Projeto e construção de lajes nervuradas**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2007.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado eu te amo**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 2 v.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2003**. São Carlos, SP: 2007.

SILVA, Marcos Alverto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. 245 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SOUZA, Shirley do Socorro Melo de. **Análise experimental de lajes nervuradas de concreto armado com armadura de cisalhamento**. 2007. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

ARAUJO, Carlos Antonio Menegazzo. **Estudo de lajes alveolares pré-tracionadas com auxílio de programa computacional**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 136. 2007.

MACIEL, Renata Barreira **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJE NERVURADA E PROTENDIDA: aspectos técnicos, aplicabilidade e produtividade**. CENTRO UNIVERCITÁRIO LUTERANO DE PALMAS p.72, junho, 2018.

PINHEIRO, L. et al. **Estruturas de concreto** - capítulo 1. São Carlos, SP: EESC, 2010.