

**ESTUDO COMPARATIVO ECONÔMICO ENTRE OS SISTEMAS
ESTRUTURAIS COM LAJE LISA MACIÇA E LAJE LISA NERVURADA DE
CONCRETO ARMADO PARA UM PAVIMENTO TIPO DE UM EDIFÍCIO
COMERCIAL**

ISABELA TEIXEIRA DE MELO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 02 EM ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF:NOVEMBRO 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO COMPARATIVO ECONÔMICO ENTRE OS SISTEMAS
ESTRUTURAIS COM LAJE LISA MACIÇA E LAJE LISA
NERVURADA DE CONCRETO ARMADO PARA UM PAVIMENTO
TIPO DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL**

ISABELA TEIXEIRA DE MELO

ORIENTADOR: VLADIMIR VILLAVERDE BARBÁN

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 02 EM ESTRUTURAS

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO/ 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO COMPARATIVO ECONÔMICO ENTRE OS SISTEMAS
ESTRUTURAIS COM LAJE LISA MACIÇA E LAJE LISA
NERVURADA DE CONCRETO ARMADO PARA UM PAVIMENTO
TIPO DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL**

ISABELA TEIXEIRA DE MELO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 02 SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

Prof. Vladimir Villaverde Barbán, D.Sc (UnB)
(Orientador)

Prof. Marcos Honorato de Oliveira, D.Sc (UnB)
(Examinador interno)

Eng. Yasser Vasconcelos Soares, M.Sc (PROEST)
(Examinador externo)

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 de NOVEMBRO de 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

MELO, ISABELA TEIXEIRA

Estudo comparativo econômico entre os sistemas estruturais com laje maciça e laje lisa nervurada de concreto armado para um pavimento tipo de um edifício comercial.

[Distrito Federal] 2020.

(ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2020)

Monografia de Projeto Final 01 - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Sistemas Estruturais

2. Concreto Armado

3. Lajes Lisas

4. Comparativo Econômico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO, I.T. (2021). Estudo comparativo econômico entre os sistemas estruturais com laje lisa maciça e laje lisa nervurada de concreto armado para um pavimento tipo de um edifício comercial. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Isabela Teixeira de Melo.

TÍTULO: Estudo comparativo econômico entre os sistemas estruturais com laje lisa maciça e laje lisa nervurada de concreto armado para um pavimento tipo de um edifício comercial.

GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Isabela Teixeira de Melo

Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

CEP 70910-900 – Brasília/DF – Brasil

isa-ha@hotmail.com

Dedico esse trabalho aos meus pais que sempre me incentivaram e acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe por toda paciência, cuidado, carinho e apoio durante esses anos de curso.

Ao meu pai por sempre me incentivar, acreditar em mim e apoiar as minhas escolhas.

Aos meus irmãos por todo amor e carinho.

Ao professor Vladimir Villaverde por ter aceitado me orientar, por todo o ensinamento como professor e posteriormente como orientador.

Ao engenheiro Pedro Porto por tudo que tem me ensinado durante os últimos dois anos.

À empresa PROEST e ao engenheiro Yasser Vasconcelos por ter cedido seu projeto e se colocado à disposição.

À empresa TECNA Construtora, pelo fornecimento de dados importantes para o desenvolvimento dessa pesquisa. Aproveito para agradecer à engenheira Izadora Uchôa e engenheiro Lucas Diego pelo suporte nessa etapa.

À Universidade de Brasília por ter sido como uma casa para mim durante todos esse anos.

Aos professores da UnB por todo conhecimento transmitido. Vocês foram extremamente importantes para o meu crescimento profissional e pessoal.

À todos os amigos que fiz durante essa caminhada, sem eles seria tudo mais difícil. Em especial à minha grande amiga Yasmin Duarte, que dividiu comigo grande parte desse percurso, incluindo ônibus, noites de estudo em claro, desesperos pré-prova, felicidade pós-provas, e por aí vai, tornando-o mais leve.

Ao Centro Acadêmico que me proporcionou momentos de muita alegria e me trouxe pessoas que eu vou guardar comigo para todo o sempre, serei eternamente grata.

Aos meus amigos e familiares pela paciência, por entender a minha falta diversas vezes, pelo apoio e carinho.

Ao meu namorado, por toda paciência e cuidado principalmente nessa etapa tão difícil e importante para mim.

Por fim, à todas as pessoas que passaram na minha vida e contribuíram de alguma forma para minha chegada até aqui.

Isabela Melo

ESTUDO COMPARATIVO ECONÔMICO ENTRE OS SISTEMAS ESTRUTURAIS COM LAJE LISA MACIÇA E LAJE LISA NERVURADA DE CONCRETO ARMADO PARA UM PAVIMENTO TIPO DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL

RESUMO

Com as diversas transformações que o mercado da construção civil vem sofrendo com o passar dos anos, sabe-se que a construção com laje maciça convencional, ou seja, lajes apoiadas em vigas, tornou-se um método construtivo pouco utilizado quando se trata de grandes obras, como edifícios comerciais e até mesmo residenciais de maior porte. Isso deve-se ao fato de que esse sistema dificulta a passagem de instalações, reduz o pé direito, limita reformas pós obra, possui uma maior dificuldade na desforma e no adensamento do concreto, além de um maior gasto com formas de madeira e escoramento. Dessa forma, sistemas estruturais como o de lajes lisas maciças e nervuradas vem ganhando cada vez mais espaço no mercado. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo principal comparar esses dois sistemas, laje lisa maciça e laje lisa nervurada de concreto armado, com e sem vigas faixas, com relação ao consumo de materiais: Concreto, aço e formas, para um pavimento tipo de um edifício comercial, atendendo a todas as normativas da ABNT NBR 6118-2014.

Palavras-chave: Laje lisa maciça, concreto armado, laje lisa nervurada, punção, sistemas estruturais de lajes.

COMPARATIVE ECONOMIC STUDY BETWEEN STRUCTURAL SYSTEM WITH SOLID SMOOTH SLAB AND REINFORCED CONCRETE SMOOTH RIBBED SLAB FOR A TYPE FLOOR OF A COMMERCIAL BUILDING

ABSTRACT

With the various transformations that the civil construction market has suffered over the years, it is known that construction with conventional solid slab (slabs supported by beams) has become a construction method not very used when it comes to large works, such as commercial buildings and even larger residential buildings. This happens due to the fact that this system does not help to move facilities, supports a reduced ceiling height, requires more complex execution and there is a bigger expense of wood shapes. Thus, structural systems such as flat solid slabs and waffle slabs are growing. In this context, the main objective of this research is to compare these two systems, flat solid slab and waffle slab of reinforced concrete, in relation to the consumption of concrete, steel and shapes, for the default floor of a commercial building, following all the regulations of ABNT NBR 6118-2014.

Keywords: Flat solid slab, reinforced concrete, waffle slab, puncture, slab structural systems.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	18
1.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	PESQUISAS REALIZADAS NO BRASIL SOBRE O TEMA	20
2.1.1	PAIVA, Luana Kívia Lima de (2021).....	20
2.1.2	GREGORIO, Graciele R.S (2017).....	22
2.1.3	MARQUES, Eduardo Dias (2017)	24
2.2	MATERIAIS	26
2.2.1	CONCRETO	26
2.2.1.1	Resistência à Compressão.....	27
2.2.1.2	Resistência à Tração	27
2.2.1.3	Módulo de Elasticidade.....	28
2.2.1.4	Diagrama tensão-deformação	29
2.2.2	AÇO PARA ARMADURA PASSIVA	30
2.2.2.1	Diagrama tensão-deformação	30
2.2.3	CONCRETO ARMADO	31
2.3	MÉTODOS DE CÁLCULO	33
2.3.1	Método das Linhas de Ruptura	33
2.3.2	Método do Pórtico Equivalente	34
2.3.3	Método de Elementos Finitos	35
2.3.4	Método da Analogia de grelhas	36
2.4	CARGAS E COMBINAÇÕES DE CARGAS.....	37
2.4.1	Coefficiente de ponderação das Ações.....	38
2.4.2	Combinações das ações.....	40
2.5	PARÂMETROS DE PROJETO.....	41
2.5.1	Agressividade Ambiental.....	41
2.5.2	Cobrimento Nominal	42
2.6	LAJES LISAS	43
2.7	LAJES NERVURADAS	45
2.7.1	Incêndio.....	47
2.7.2	Acústica.....	47
2.8	ESTADO LIMITE ÚLTIMO	47
2.8.1	Resistência à Flexão em lajes de concreto armado	47
2.8.2	Resistência ao Cisalhamento em lajes lisas de concreto armado.....	49
2.8.3	Verificação de cisalhamento em lajes nervuradas de concreto armado.....	51
2.8.4	Punção em lajes de concreto armado	51
2.8.4.1	Determinação da tensão solicitante.....	54

2.8.4.2	Capitel	57
2.8.4.3	Determinação da tensão resistente	58
2.8.4.4	Colapso Progressivo	60
2.9	ESTADO LIMITE DE SERVIÇO	61
2.9.1	Estado limite de deformação	61
2.9.2	Estado limite de fissuração	63
2.10	PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	63
2.10.1	Armaduras mínimas	64
2.10.2	Armaduras máximas	66
2.10.3	Recomendações para lajes maciças	66
2.10.4	Recomendações para lajes nervuradas	67
2.11	FÔRMAS	67
2.12	SOFTWARE UTILIZADO	70
3	METODOLOGIA.....	71
3.1	PROJETO ARQUITETÔNICO PROPOSTO PARA ANÁLISE.....	71
3.2	SOLUÇÃO PROPOSTA PELA PROEST.....	74
3.3	SISTEMA ESTRUTURAL DA LAJE PROPOSTO PARA O ESTUDO.....	76
3.3.1	PROPOSTA COM LAJE LISA MACIÇA.....	77
3.3.2	PROPOSTA COM LAJE LISA NERVURADA.....	77
3.4	ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS.....	78
3.5	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO SUPERIOR COM LAJE MACIÇA	82
3.5.1	Dimensionamento da laje.....	83
3.5.2	Dimensionamento das vigas	83
3.6	DETALHAMENTO DO PAVIMENTO SUPERIOR COM LAJE NERVURADA SEM VIGAS-FAIXA.....	84
3.6.1	Dimesionamento da laje.....	84
3.6.2	Dimensionamento das vigas	86
4	RESULTADOS	86
4.1	Quantitativos	86
4.1.1	Aço.....	87
4.1.2	Quantitativos totais	88
4.1.2.1	Análise do Consumo de Aço.....	90
4.1.2.2	Análise do Consumo de concreto	91
4.1.2.3	Análise do consump de formas de lajes e vigas.....	92
4.2	CUSTOS FINAIS.....	92
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
5.1	Conclusões	96

5.2	Limitações	97
5.3	Sugestões	98
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de forma do pavimento tipo. (PAIVA, 2021).	21
Figura 2. Gráfico comparativo do índice de concreto e de aço, respectivamente. (PAIVA, 2021).	22
Figura 3. Representação das lajes escolhidas para estudo. (MARQUES,2017).	24
Figura 4. Comparação entre o volume de concreto nas lajes estudadas. (MARQUES, 2017).25	25
Figura 5. Comparação entre as taxas de aço nas lajes estudadas. (MARQUES, 2017).	25
Figura 6. Diagrama de tensão-deformação idealizado. (NBR 6118:2014).	29
Figura 7. Diagrama tensão-deformação bilinear de tração. (NBR 6118:2014).	30
Figura 8. Diagrama tensão-deformação simplificado para aços de armaduras passivas. (NBR 6118:2014)	30
Figura 9. Perspectiva de um pavimento de concreto armado. (SILVA., 2005)	32
Figura 10. Linhas de Ruptura de uma laje quadrada apoiada nos quadros bordos.(MONTEIRO, <i>et.al.</i> , 1980).....	33
Figura 11. Definição dos pórticos múltiplos. (ARAÚJO, 2003).....	34
Figura 12. Faixa de laje para distribuição dos esforços nos pórticos múltiplos (NBR 6118:2014).	35
Figura 13. Representação de laje em elementos finitos. (TQS Docs, 2021).....	36
Figura 14. Grelha de lajes e vigas. (TQS Docs, 2021).....	36
Figura 15. Perspectiva esquemática de lajes lisas. (CARVALHO <i>et al.</i> , 2009)	43
Figura 16. Lajes cogumelo com capitel e ábaco nas ligação com o pilar. (CARVALHO <i>et al.</i> ,2009)	44
Figura 17. Laje nervurada com vigas-faixa e laje nervurada com engrossamento na região dos pilares, respectivamente. (ESTEACHE, 2008)	46
Figura 18. Comportamento do concreto na flexão pura, estágio III. (PINHEIRO <i>et.al</i> , 2003)48	48
Figura 19. Representação do domínio 3. (PINHEIRO, <i>et.al</i> , 2003).....	48
Figura 20. Representação da ruptura de uma laje sem armadura de cisalhamento (CEB/MC90).	52
Figura 21. Perímetro crítico em pilares internos. (NBR 6118:2014).	53
Figura 22. Perímetro crítico de laje com abertura. (NBR 6118:2014).	53
Figura 23. Exemplo de pilar interno com carregamento excêntrico. (Autora, 2021).	55
Figura 24. Perímetro crítico em pilares de borda. (NBR 6118:2014)	55
Figura 25. Perímetro crítico em pilares de canto. (NBR 6118:2014).	57
Figura 26. Definição da altura útil para lajes com capitel. (NBR 6118:2014).....	57
Figura 27. Contorno da superfície C'' e disposição da armadura de punção. (NBR 6118:2014).	60
Figura 28. Disposição da armadura de punção em corte. (NBR 6118:2014).....	60
Figura 29. Armadura contra colapso progressivo. (NBR 6118:2014).	61
Figura 30. Dimensões das fôrmas ATEX800.....	68
Figura 31. Exemplos de régua Linear e Cabetex. (ATEX)	68
Figura 32. Posicionamento dos elementos de aplicação das Fôrmas ATEX. (ATEX).....	69
Figura 33. Corte Esquemático do edifício. (TQS, versão 2021).	71
Figura 34. Edificação em estudo executada e ocupada pelo Colégio Objetivo. (PROEST, 2020).	72

Figura 35. Planta de arquitetura do Pavimento Superior. (RR Roberto Arquitetura, modificada)	73
Figura 36. Corte AA da planta de arquitetura. (RR Roberto Arquitetura, modificada)	73
Figura 37. Solução com laje nervurada e vigas faixa executada. (PROEST, 2020).	75
Figura 38. Laje nervurada em planta – Detalhe Genérico. (TQS, versão 2021).	76
Figura 39. Corte HH – Vista em corte das nervuras da laje. (TQS, versão 2021).	76
Figura 40. Indicação da região de análise dos deslocamentos em um dos vãos mais solicitados da laje. (TQS, versão 2021).	81
Figura 41. Recorte da forma antes da alteração do tamanho do maciço dos pilares P16, P17, P22, P23. (TQS, versão 2021).	85
Figura 42. Recorte da forma depois da alteração do tamanho do maciço dos pilares P16, P17, P22, P23. (TQS, versão 2021).	85
Figura 43. Consumo de Aço dos sistemas estruturais em estudo. (Autora, 2021).	90
Figura 44. Consumo de concreto dos sistemas estruturais em estudo. (Autora, 2021).	91
Figura 45. Quantitativo de formas dos sistemas estruturais em estudo. (Autora, 2021).	92
Figura 46. Composição dos custo final do sistema estrutural com laje lisa nervurada com vigas-faixa. (Autora, 2021)	94
Figura 47. Composição dos custo final do sistema estrutural com laje lisa maciça. (Autora, 2021).	95
Figura 48. Composição dos custo final do sistema estrutural com laje lisa nervurada sem vigas-faixa. (Autora, 2021)	95
Figura 49. Custos finais dos três sistemas estruturais. (Autora,2021)	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Consumo de materiais para lajes lisas maciças (h=25cm). (PAIVA, 2021).	21
Tabela 2. Consumo de materiais para lajes lisas nervuradas (h=40 cm). (PAIVA, 2021).	21
Tabela 3. Resumo do consumo de materiais do modelo estrutural com Laje lisa maciça (h=24cm) sem vigas de borda. (GREGORIO, 2017, adaptada).	23
Tabela 4. Resumo do consumo de materiais do modelo estrutural com Laje lisa maciça (h=24cm) com vigas de borda (20x80). (GREGORIO, 2017, adaptada).	23
Tabela 5. Resumo do consumo de materiais do modelo estrutural com Laje lisa nervurada (h=26cm) com vigas de borda (20x80). (GREGORIO, 2017, adaptada).	23
Tabela 6. Valores mínimos das cargas verticais. (NBR 6120:2019)	37
Tabela 7. Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f3}$. (NBR 6118:2014)	39
Tabela 8. Valores do coeficiente γ_{f2} . (NBR 6118:2014).	39
Tabela 9. Combinações de serviço. (NBR 6118:2014).	41
Tabela 10. Classes de agressividade ambiental. (NBR 6118:2014).	42
Tabela 11. Cobrimento Nominal baseado na classe de agressividade ambiental para tolerância de execução de 10 mm. (NBR 6118:2014).	43
Tabela 12. Valores do coeficiente K. (NBR 6118:2014).	55
Tabela 13. Limites para deslocamentos. (NBR 6118:2014).	62
Tabela 14. Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental. (NBR 6118:2014)	63
Tabela 15. Valores mínimos para armaduras passivas aderentes. (NBR 6118:2014).	64
Tabela 16. Taxas mínimas de flexão para vigas. (NBR 6118:2014).	65
Tabela 17. Valores do coeficiente adicional γ_n para lajes em balanço. (NBR 6118:2014).	66
Tabela 18. Tabela de moldes para laje nervurada (ATEX).	69
Tabela 19. Valores do coeficiente ξ em função do tempo. (NBR6118:2014).	79
Tabela 20. Deslocamentos das lajes em estudo na região indicada.	81
Tabela 21. Descrição da utilização do aço na laje nervurada com vigas-faixa.	87
Tabela 22. Descrição da utilização do aço na laje lisa maciça.	87
Tabela 23. Quantitativo final dos materiais da laje nervurada com vigas-faixa.	89
Tabela 24. Quantitativo final dos materiais da laje lisa maciça.	89
Tabela 25. Quantitativo final dos materiais da laje nervurada sem vigas-faixa.	89
Tabela 26. Custo do sistema estrutural constituído por laje nervurada com vigas-faixa.	93
Tabela 27. Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça.	93
Tabela 28. Custo do sistema estrutural com laje nervurada sem vigas-faixa.	94

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

ELU – Estado Limite Último

ELS – Estado Limite de Serviço

ELS – W – Estado limite máximo de fissuração.

ELS – F – Estado limite em que se inicia a formação e fissuras.

ELS- D – Estado limite em que a tensão normal na seção é nula.

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{cmj} - Resistência à compressão média.

f_{cd} - Resistência de cálculo à compressão do concreto.

f_{ck} - Resistência característica à compressão do concreto.

γ_C - Coeficiente de ponderação da resistência.

$f_{ct,sp}$ - Resistência à tração indireta.

$f_{ct,f}$ - Resistência à tração na flexão.

f_{ct} - Resistência à tração direta.

$f_{ckt,inf}$ - Resistência característica inferior de tração do concreto.

$f_{ckt,sup}$ - Resistência característica superior de tração do concreto.

$f_{ct,m}$ - Resistência média de tração do concreto.

E_{ci} - Módulo de elasticidade inicial.

α_E - Coeficiente para estimar o módulo de elasticidade.

f_{ck} - Resistência do concreto.

E_{CS} - Módulo de elasticidade secante.

α_i - Coeficiente baseado na classe de resistência do concreto.

g - Cargas permanentes.

q - Cargas acidentais.

γ_f - Coeficiente de ponderação das ações.

F_d - Valor de cálculo das ações para combinação última.

F_{gk} - Representa as ações permanentes diretas.

F_{ek} - Representa as ações permanentes indiretas.

F_{qk} - Representa as ações variáveis diretas.

A_s - Área de aço.

M_d - Momento de cálculo.

z - Braço de alavanca.

f_{yd} - Tensão de escoamento do aço.

V_{Rd} - Força resistente de cálculo.

V_{sd} - Força cortante de sollicitação.

A_s - Área da armadura de tração.

b_w - Largura mínima da seção ao longo da altura útil.

N_{sd} - Força longitudinal devido a protensão.

τ_{Rd} - Tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento.

f_{ywd} - Resistência dos estribos.

d - Altura útil da laje.

F_{sd} - Força ou reação concentrada de cálculo.

M_{sd} - Momento sollicitante de cálculo.

τ_{sd} - Tensão sollicitante de cálculo.

M_{sd} - Momento sollicitante de cálculo.

w_p - Módulo de resistência plástica.

ρ - Taxa geométrica de armadura de flexão aderente.

S_r - Espaçamento radial entre as linhas da armadura de punção.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um ramo que vive em constante mudança e evolução. É desafiador e exige diariamente adaptação visando atender às diversas solicitações do mercado, que são cada vez maiores.

Comumente, durante muitos anos, utilizou-se o método convencional de lajes apoiadas em vigas para construção de edifícios residenciais e comerciais. No entanto, com o passar dos anos e aumento das exigências construtivas, como por exemplo, desejo por maiores vãos e potencial construtivo, começou-se a estudar outras soluções para construção dessas estruturas, aumentando a partir disso o uso de lajes apoiadas diretamente nos pilares, podendo ser lisa maciça ou lisa nervurada.

A principal vantagem do uso desses dois métodos construtivos quando comparados ao método convencional de lajes apoiadas em vigas é a possibilidade de vencer vãos maiores, entre 7 e 8 metros, e utilização de um maior pé direito. Além disso, esses métodos construtivos também possuem vantagens na execução, como por exemplo simplificação nas formas, maior facilidade na utilização do escoramento, maior facilidade no lançamento e adensamento do concreto, além de facilidade na desforma, o que torna mais rápida e limpa essa etapa da obra.

No entanto, apesar das diversas vantagens citadas anteriormente, ainda existem alguns problemas que estão sendo estudados quando se trata desse tipo de laje. Como por exemplo, a punção e a resistência ao cisalhamento. Além disso, essas lajes costumam possuir maiores deslocamentos verticais quando comparadas às estruturas convencionais, e apresentam redução na rigidez global do edifício devido a ausência de vigas com altura superior a espessura da laje. Está em estudo também o desempenho desses sistemas estruturais quanto a acústica e a norma de incêndio.

De acordo com Carvalho *et al.* (2009) a definição do processo construtivo e sistema estrutural mais adequado a ser utilizado na construção de uma determinada edificação, deve ser feita considerando os seguintes parâmetros:

- Finalidade da edificação;
- Projeto arquitetônico;

- Cargas de utilização;
- Tamanhos do vão a vencer;
- Disponibilidade de equipamentos, materiais e mão-de-obra;
- Custos e interação com os demais subsistemas construtivos da edificação, como por exemplo, instalações, alvenarias, forros, impermeabilizações, entre outros.

Com isso, é possível notar que a escolha do processo construtivo é baseada em diversos parâmetros, tornando-se muitas vezes uma decisão difícil para o projetista da edificação. O estudo que segue faz uma comparação entre dois sistemas estruturais muito utilizados atualmente, visando apresentar qual o mais vantajoso e econômico para a construção de um edifício comercial de dois pavimentos.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O estudo em questão tem como objetivo geral comparar economicamente os sistemas estruturais de laje lisa maciça e laje lisa nervurada de concreto armado, com e sem vigas faixas, de forma que estes sistemas apresentem uma rigidez igualitária quanto ao deslocamento, comparando o consumo de materiais, sendo eles: concreto, fôrma e aço, de um pavimento de um edifício comercial, atendendo a todas as normativas da ABNT NBR 6118:2014.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar breve revisão bibliográfica apresentando as principais características e vantagens e desvantagens dos sistemas estruturais com laje lisa maciça e com laje lisa nervurada, utilizando ou não vigas faixa.
- Apresentar os critérios de dimensionamento e análise de lajes lisas maciças e nervuradas de concreto armado, utilizando o programa de dimensionamento TQS, atendendo a todas as especificações normativas da ABNT NBR 6118:2014.
- Analisar e comparar o consumo de materiais (concreto, aço e fôrmas) utilizados nos sistemas estruturais com laje lisa maciça e laje lisa nervurada de concreto armado.
- Definir custo-benefício dos dois sistemas estruturais em estudo.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro apresenta a introdução à pesquisa realizada, os objetivos principais e os objetivos específicos desta. Logo em seguida, no segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica completa sobre os assuntos abordados na pesquisa, esse capítulo está dividido em doze partes principais, sendo elas:

- a) Pesquisas realizadas no Brasil sobre o tema, onde é apresentado os resultados de trabalhos já realizados semelhantes a este.
- b) Materiais. Esse item fala sobre as propriedades dos materiais aço e concreto, além da junção dos dois na construção civil, o conhecido concreto armado.
- c) Métodos de cálculo, onde é apresentado os métodos de cálculo mais utilizados para o dimensionamento de lajes de concreto armado. Sendo eles: linhas de ruptura, pórtico equivalente e método das grelhas.
- d) Cargas e combinações de cargas. É apresentado nesse item as cargas a serem utilizadas no projeto e suas combinações de acordo com a norma brasileira.
- e) Parâmetros de projeto, onde é apresentado alguns parâmetros de projeto como a classe de agressividade ambiental a ser utilizada e as recomendações da norma para o cobrimento nominal.
- f) Estado Limite Último. Nesse tópico é mostrado como dimensionar uma laje considerando o estado limite último, tanto aos esforços de flexão quanto ao cisalhamento.
- g) Estado limite de Serviço, onde é descrito sobre os dois principais tipos de estado-limite de serviço: Fissuração e deslocamentos.
- h) Lajes Lisas, onde é abordado os conceitos, vantagens e desvantagens do sistema construtivo, apresenta os problemas que podem ocorrer com o uso desse tipo de laje.
- i) Lajes Nervuradas, nessa parte é também abordado os conceitos, vantagens e desvantagens além dos tipos de lajes nervuradas.
- j) Prescrições Normativas. Esse item trata da norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 “Projeto de estruturas de concreto - Procedimento”, que é base para projetos e construções, apontando suas principais recomendações à respeito do tema em estudo.
- k) Catálogos, esse item apresenta o catálogo selecionado para escolha das formas a serem utilizadas.

- 1) Software utilizado, descreve como é feita a análise no software escolhido para auxílio da pesquisa.

O terceiro capítulo é referente a metodologia utilizada na pesquisa, apresentando o projeto escolhido para análise e as soluções propostas para comparação.

O quarto capítulo apresenta os resultados do dimensionamento no Estado Limite Último (ELU) e análise do Estado Limite de Serviço (ELS), além dos quantitativos dos materiais e custos para execução destes. Por fim, este capítulo contém também a análise dos resultados.

O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas com os resultados desse trabalho, as limitações presentes e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PESQUISAS REALIZADAS NO BRASIL SOBRE O TEMA

Sabe-se que o tema em estudo é abordado atualmente em diversas pesquisas realizadas no Brasil, visto que, este busca encontrar as maneiras mais econômicas para a construção de edificações. Dessa forma, apresenta-se a seguir algumas destas discussões à respeito do tema visando apresentar os resultados esperados para essa pesquisa, baseado nos resultados que foram obtidos com trabalhos anteriores, podendo a partir daí fazer uma comparação com os resultados que serão obtidos posteriormente com esse trabalho.

2.1.1 PAIVA, Luana Kívia Lima de (2021)

Paiva (2021) em seu trabalho de conclusão de curso nomeado como “*Estudo comparativo entre sistemas estruturais com laje lisa maciça e lisa nervurada em um edifício comercial*” realizou o dimensionamento de um edifício comercial composto por 6 pavimentos utilizando laje lisa maciça e laje lisa nervurada. Para a modelagem da estrutura nesse trabalho utilizou-se o auxílio do software Eberick e atendeu às normativas brasileiras. Nesse estudo foi feita uma análise comparativa dos materiais concreto e aço visando obter qual dos dois sistemas estruturais é mais econômico para o edifício em questão. A laje lisa maciça utilizada foi de 25 centímetros e a laje nervurada foi de 40 centímetros de altura. Em que o maior vão possui aproximadamente 9 metros, como pode ser observado na Figura 1.

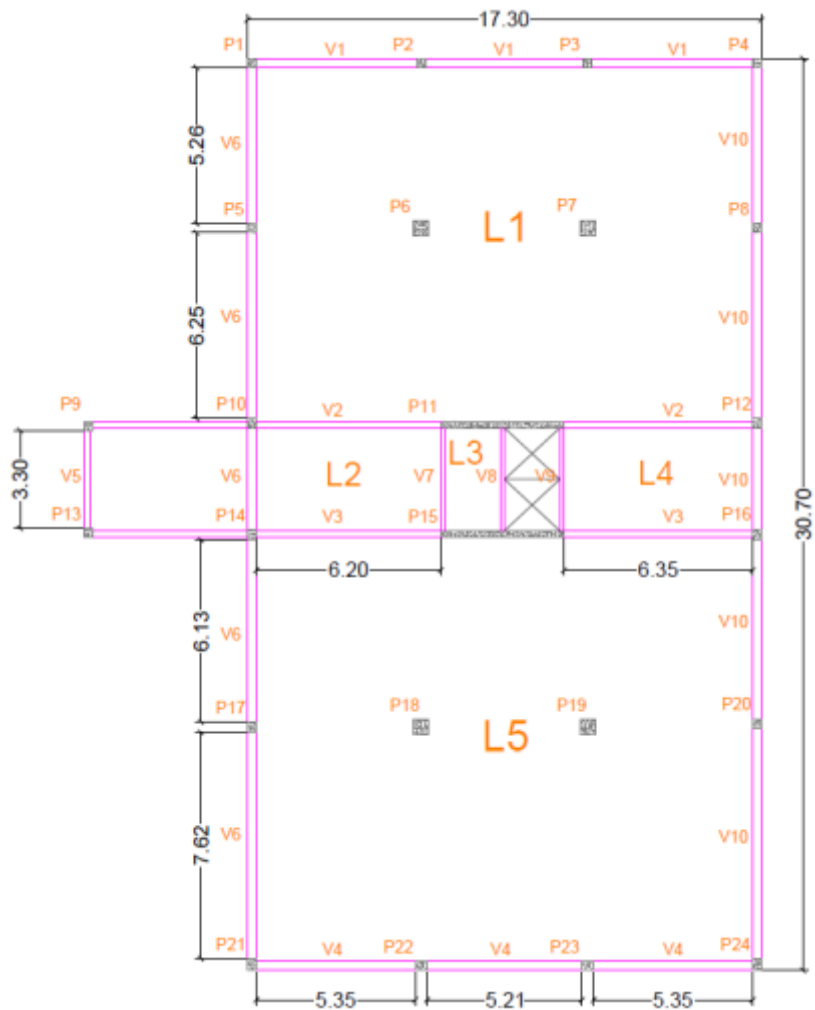


Figura 1. Planta de forma do pavimento tipo. (PAIVA, 2021).

Tabela 1. Consumo de materiais para lajes lisas maciças (h=25cm). (PAIVA, 2021).

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

Tabela 2. Consumo de materiais para lajes lisas nervuradas (h=40 cm). (PAIVA, 2021).

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

Como é possível observar na Tabela 1 e Tabela 2 tanto o peso do aço quanto o volume de concreto foi reduzido com o uso de lajes lisas nervuradas quando comparados aos valores com o uso de laje lisa maciça, como era esperado de acordo com a literatura.

Essa redução foi de aproximadamente 11,74% no volume de concreto e uma redução no peso do aço de aproximadamente 27,07%. Esses dados estão apresentados nos gráficos abaixo de forma a facilitar a visualização.

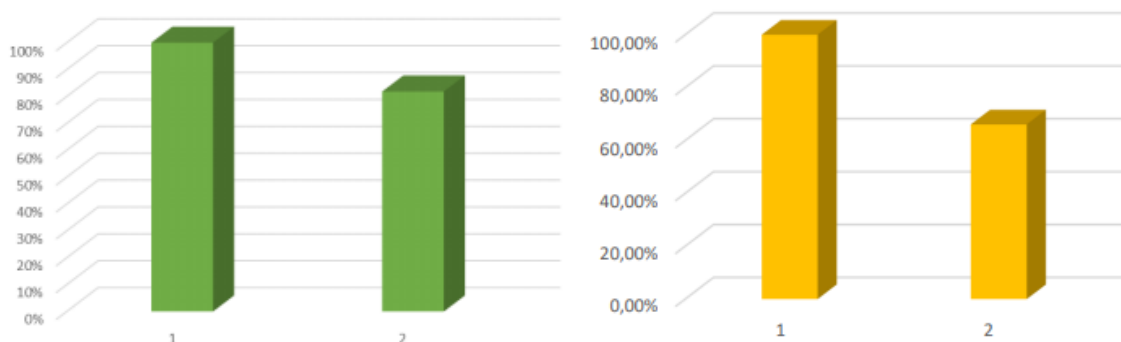


Figura 2. Gráfico comparativo do índice de concreto e de aço, respectivamente. (PAIVA, 2021).

É válido observar que nesse estudo não houve nenhum parâmetro de comparação utilizado como referência. A rigidez das duas lajes por exemplo são bem distintas, a laje nervurada apresenta valores de deslocamento reduzidos em aproximadamente duas vezes quando comparados aos deslocamentos da laje maciça.

2.1.2 GREGORIO, Graciele R.S (2017)

Gregorio (2017) em seu trabalho de conclusão de curso nomeado como “*Análise Comparativa entre Lajes Lisas Maciças e Nervuradas*” realizou o dimensionamento de três modelos estruturais baseado em um mesmo projeto arquitetônico piloto. O primeiro modelo foi laje lisa maciça sem viga de borda, o segundo foi laje lisa maciça com viga de borda e o terceiro foi laje lisa nervurada com maciço ao redor dos pilares e vigas de borda. Para a modelagem da estrutura nesse trabalho utilizou-se o software Eberick e atendeu às normativas brasileiras. Nesse estudo foi feita tanto uma análise de desempenho das três lajes, comparando as flechas, esforços cortantes, momentos fletores e torsões, quanto uma comparação com relação ao consumo de materiais, aço e concreto visando definir qual sistema estrutural é mais vantajoso. O principal parâmetro de comparação utilizado como referência foi a flecha admissível, o autor realizou várias iterações até atender à esse parâmetro.

No dimensionamento analisado as lajes lisas maciças, tanto com vigas de borda quanto sem estas, possuem 24 centímetros de altura, enquanto a laje lisa nervurada com vigas de borda possui uma altura total de 26 centímetros. Todas as vigas de borda possuem dimensão de 20x80 centímetros.

A partir desse estudo o autor concluiu que se obteve um melhor desempenho estrutural com relação aos esforços cortantes, momentos fletores e torsões para o modelo em que utilizou-se laje lisa maciça sem vigas de borda. O segundo caso, laje lisa maciça com vigas de borda, proporcionou apenas uma menor flecha quando comparada aos demais casos. É importante observar que as denominadas vigas de borda não funcionam de fato como apoios para a laje como as demais vigas, estas funcionam como carga para a laje em questão.

Tabela 3. Resumo do consumo de materiais do modelo estrutural com Laje lisa maciça (h=24cm) sem vigas de borda. (GREGORIO, 2017, adaptada).

Pavimento	Elemento	Peso do aço + 10% (kg)	Volume de concreto (m³)	Consumo de aço (kg/m³)
Tipo 3	Lajes	19543.4	108.0	181.0
	Total	19543.4	108.0	181.0

Tabela 4. Resumo do consumo de materiais do modelo estrutural com Laje lisa maciça (h=24cm) com vigas de borda (20x80). (GREGORIO, 2017, adaptada).

Pavimento	Elemento	Peso do aço + 10% (kg)	Volume de concreto (m³)	Consumo de aço (kg/m³)
Tipo 3	Vigas	1013.7	13.8	73.7
	Lajes	18226.5	104.0	175.3
	Total	19240.2	117.8	163.4

Tabela 5. Resumo do consumo de materiais do modelo estrutural com Laje lisa nervurada (h=26cm) com vigas de borda (20x80). (GREGORIO, 2017, adaptada).

Pavimento	Elemento	Peso do aço + 10% (kg)	Volume de concreto (m³)	Consumo de aço (kg/m³)
Tipo 3	Vigas	842.0	13.8	61.2
	Lajes	8160.4	80.3	101.6
	Total	9002.4	94.1	95.7

Com relação ao consumo de materiais, aço e concreto, o resultado encontrado nesse trabalho foi o esperado baseado em revisões bibliográficas. O modelo mais econômico foi o com laje

lisa nervurada, visto que parte do concreto na laje é substituído por blocos de enchimento, obtendo, como é possível observar na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, uma redução no volume total de concreto de aproximadamente 20,1% quando comparada a laje lisa maciça com vigas nas bordas e de aproximadamente 12,9% quando comparada a laje lisa maciça sem vigas nas bordas. Já com relação ao peso do aço, essa redução foi de aproximadamente 53,2% para o primeiro caso e de aproximadamente 53,9% para o segundo caso.

2.1.3 MARQUES, Eduardo Dias (2017)

Marques (2017) em seu trabalho de conclusão de curso nomeado como “*Análise Comparativa de um edifício de múltiplos pavimentos, com adoção de três diferentes tipos de lajes em concreto armado (Maciça, nervurada e treliçada)*” realizou o dimensionamento de três modelos estruturais baseado em um mesmo projeto arquitetônico. Esse projeto arquitetônico trata-se de um edifício residencial com dois apartamentos por pavimento, sendo 16 pavimentos no total. O dimensionamento foi realizado utilizando o auxílio do software Eberick v8 e seguiu as prescrições normativas brasileiras, estudou para quais vãos livres cada tipo de laje seria mais adequado.

Uma parte da planta de formas apresentando a posição dos pilares, vigas e dimensões dos principais vãos escolhidos para o estudo em questão se encontra na Figura 3 abaixo.

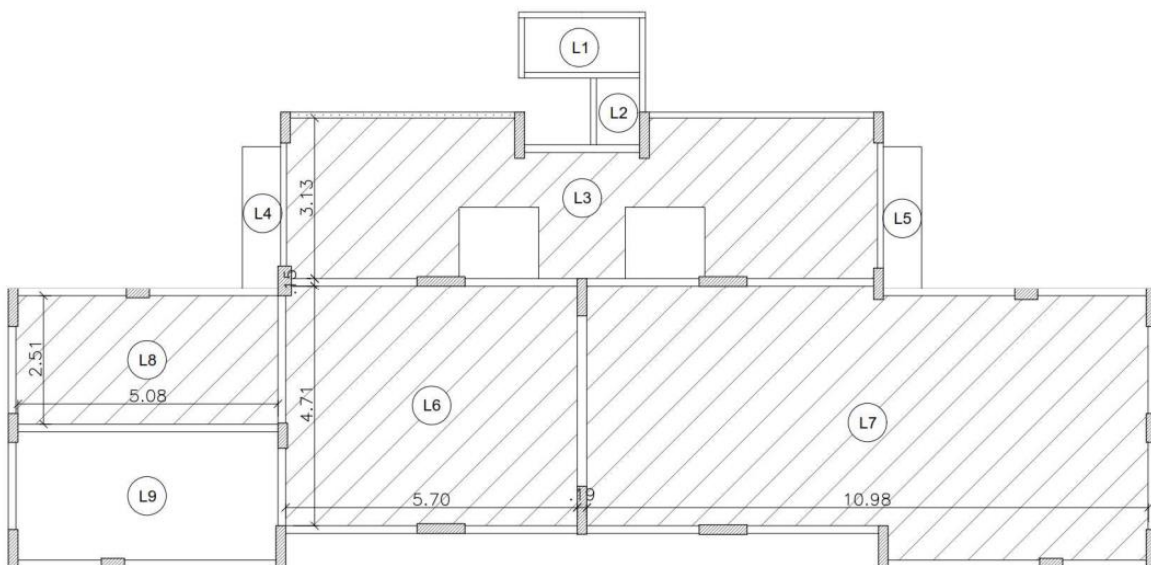


Figura 3. Representação das lajes escolhidas para estudo. (MARQUES, 2017).

O autor comparou os três modelos estruturais quanto ao deslocamento imediato, volume de concreto, forma, peso do aço, gama Z e deslocamentos horizontais. No entanto, não teve nenhum parâmetro de comparação pré-definido e não analisou os custos das construções.

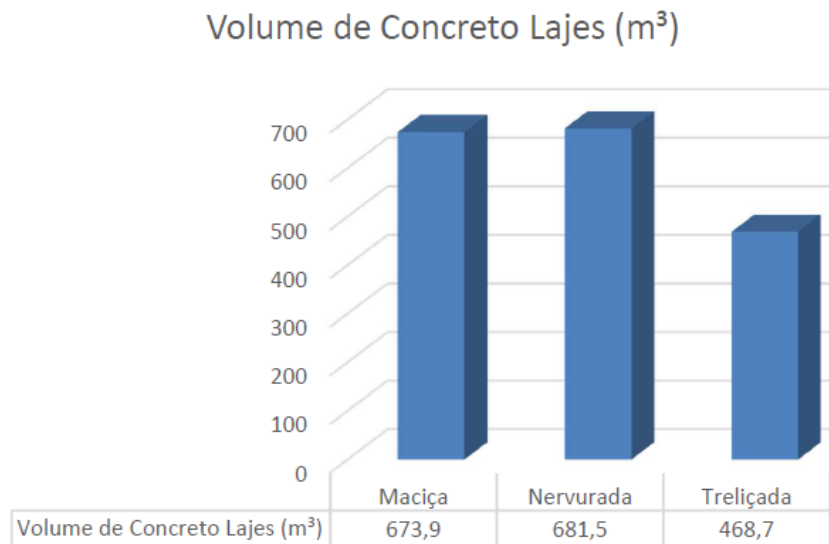


Figura 4. Comparação entre o volume de concreto nas lajes estudadas. (MARQUES, 2017).

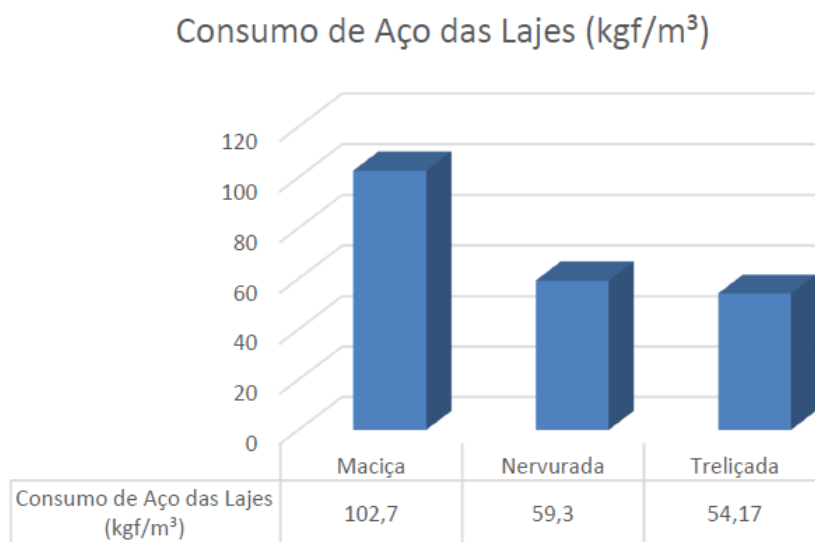


Figura 5. Comparação entre as taxas de aço nas lajes estudadas. (MARQUES, 2017).

Nessa análise o autor concluiu que para esse projeto, visando o menor consumo de materiais, a melhor opção é usar laje treliçada, visto que essa apresentou um valor de redução significativo tanto de concreto quanto de aço. Além disso, essa laje treliçada possui uma rigidez ao deslocamento até 50% menor que as demais.

Como pode ser observado na Figura 4 e Figura 5, para esse edifício houve uma redução de aproximadamente 42,3% no consumo de aço com o uso de laje nervurada quando comparada a laje maciça. No entanto, para essa mesma comparação, o volume de concreto na laje nervurada foi maior em aproximadamente 1,1%, resultado que diverge um pouco do esperado, contrariando a afirmação de que a laje nervurada reduz o volume de concreto quando comparado a laje maciça. Segundo o autor, esse fato ocorreu devido a adoção de apenas dois tipos de cubeta para o dimensionamento das lajes, sendo a cubeta utilizada nos vão mais solicitados com dimensão 30x80x80 e com espaçamento de 6,2 centímetros entre essas cubetas, o que levou a um alto volume de concreto. Dessa forma, nota-se que não necessariamente haverá uma redução no volume de concreto com o uso de laje nervurada, é necessário um dimensionamento adequado para obtenção dessa redução.

2.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados para os três sistemas estruturais analisados são os mesmos: aço para armadura passiva e concreto. Os itens que seguem discorrem sobre as características e propriedades de ambos separadamente e em seguida sobre a associação dos dois na construção civil, o conhecido Concreto Armado.

2.2.1 CONCRETO

De acordo com Carvalho *et al.*(2014) concreto é um material composto de água, cimento e agregados. A partir disso, têm-se que a junção de cimento e água forma o que é chamado de pasta. Pasta e agregados miúdos forma o que é chamado de argamassa. Por fim, argamassa e agregados graúdos é que forma o que é denominado concreto.

A norma brasileira utilizada (NBR 6118:2014) se aplica apenas a concretos entre as classes C20 e C90. Os concretos de classe abaixo de C20 e acima de C50 não se enquadram nas configurações descritas a seguir.

Segundo a NBR 6118:2014 para efeito de análise estrutural, o coeficiente de dilatação térmica do concreto pode ser admitido como sendo igual a $10^{-5}C^{-1}$.

2.2.1.1 Resistência à Compressão

De acordo com as prescrições da ABNT NBR 6118:2014, a resistência à compressão média do concreto (f_{cmj}) deve ser feita conforme indicações da ABNT NBR 12655:2015 . Já a evolução dessa resistência com a idade deve ser obtida por ensaios com essa finalidade. Caso esses resultados experimentais não existam, deve ser calculado, segundo a ABNT NBR 6118:2014, da seguinte maneira:

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

Onde,

f_{cd} = Resistência de cálculo à compressão do concreto.

f_{ck} = Resistência característica à compressão do concreto..

γ_c = Coeficiente de ponderação da resistência.

Observação: Essa verificação é feita aos 28 dias para confirmar o valor de f_{ck} adotado no projeto. Caso essa verificação seja feita em data inferior a 28 dias deve-se adotar outra expressão, indicada no item 12.3.3 da ABNT NBR 6118:2014.

2.2.1.2 Resistência à Tração

Tratando-se da resistência à tração do concreto, seguindo as prescrições da ABNT NBR 6118:2014, deve-se realizar ensaios segundo a ABNT NBR 7222:2011 para obter a resistência a tração indireta ($f_{ct,sp}$) e segundo a NBR 12142 para obter a resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$). Já a resistência à tração indireta (f_{ct}) pode se calculado como sendo 90% da resistência a tração indireta ou 70% da resistência à tração na flexão.

Caso esses ensaios não sejam realizados, pode-se avaliar o valor médio ou característico da resistência à tração indireta e da resistência à tração na flexão através das equações abaixo.

$$f_{ckt,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m}$$

$$f_{ckt,sup} = 1,3 \cdot f_{ct,m}$$

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

Onde,

$f_{ckt,inf}$ = Resistência característica inferior de tração do concreto.

$f_{ckt,sup}$ = Resistência característica superior de tração do concreto.

$f_{ct,m}$ = Resistência média de tração do concreto.

2.2.1.3 Módulo de Elasticidade

De acordo com ABT NBR 6118:2014 o módulo de elasticidade (E_{ci}) por meio de ensaios seguindo as prescrições da NBR 8522, sendo considerado nesta Norma o módulo de deformação tangente inicial aos 28 dias.

Caso esses ensaios não sejam realizados, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial através da equação abaixo.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}$$

Onde,

α_E = Coeficiente que assume os seguintes valores: 1,2 para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaisse; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.

E_{ci} = Módulo de elasticidade inicial.

Já o módulo de elasticidade secante, utilizado nas análises elásticas e verificação dos estados limites de serviço, de acordo com NBR 6118:2014, pode ser determinado da seguinte maneira:

$$E_{CS} = \alpha_i \cdot E_{ci}$$

Em que,

$$\alpha_i = 0,8 \pm 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0$$

Onde,

E_{CS} = Módulo de elasticidade secante.

α_i = Coeficiente baseado na classe de resistência do concreto.

Segundo a norma utilizada (ABNT NBR 6118:2014) para avaliar o comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal pode ser adotado um módulo de elasticidade único para tração e compressão, sendo esse módulo igual ao módulo de elasticidade secante (E_{CS}).

2.2.1.4 Diagrama tensão-deformação

De acordo com a ABT NBR6118:2014 para análises no estado limite último, pode ser empregado o diagrama tensão-deformação idealizado mostrado na Figura 6.

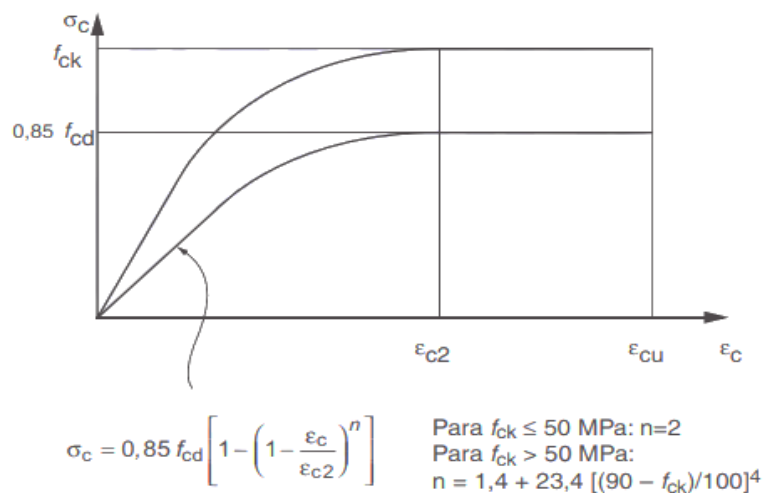


Figura 6. Diagrama de tensão-deformação idealizado. (NBR 6118:2014).

Sendo, para concretos de classes até C50:

- $\epsilon_{c2} = 2 \text{ ‰}$
- $\epsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$

Já para o concreto não fissurado, pode ser adotado, seguindo a mesma Norma, o diagrama de tensão-deformação bilinear de tração.



Figura 7. Diagrama tensão-deformação bilinear de tração. (NBR 6118:2014).

2.2.2 AÇO PARA ARMADURA PASSIVA

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 armadura passiva é qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, ou seja, que não seja previamente alongada.

Essa norma diz ainda que pode-se adotar para a massa específica do aço de armadura passiva o valor de 7850 kg/m^3 e coeficiente de dilatação térmica 10^{-5} C^{-1} para temperaturas entre -20°C e 150°C . Já o módulo de elasticidade, caso não existam ensaios específicos, pode ser usado o valor de 210 GPa .

2.2.2.1 Diagrama tensão-deformação

De acordo com a ABNT NBR6118:2014, para o cálculo nos estados-limite de serviço e último, pode-se utilizar o diagrama de tensão-deformação simplificado, tanto para aços com patamar de escoamento quanto para aços sem. Além disso, esse diagrama pode ser aplicado tanto para tração quanto para compressão em intervalos de temperatura de -20°C a 150°C .

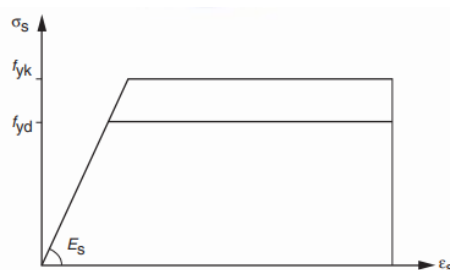


Figura 8. Diagrama tensão-deformação simplificado para aços de armaduras passivas. (NBR 6118:2014)

2.2.3 CONCRETO ARMADO

Como foi observado no item 2.2.1 o concreto é um material que possui elevada resistência à compressão, no entanto, este possui baixa resistência à tração, cerca de 1/10 da sua resistência à compressão, segundo Carvalho *et al.*(2014). Dessa forma, sua utilização sozinho não é interessante para construção civil estrutural.

Visando aumentar essa resistência à tração viu-se a necessidade de associar o concreto à um material com boa resistência à tração, dessa forma, associou-se o concreto ao aço que é também um material mais deformável.

Dessa forma, Carvalho *et al.*(2014) denomina concreto armado como a “Associação entre concreto simples e armadura convenientemente colocada (armadura passiva), de tal forma que ambos resistam solidariamente aos esforços solicitantes.”

Outro ponto importante é o fato do concreto e do aço possuírem coeficientes de dilatação muito próximos. Sendo aproximadamente $1 * 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ o do concreto e $1,2 * 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ o do aço. O que é de extrema importância para trabalhabilidade dos dois materiais juntos.

Seguindo as prescrições da ABNT NBR 6118:2014 quando a massa específica do concreto não for conhecida pode-se adotar, para efeito de cálculo, 2500 kg/m^3 . Já quando essa massa é conhecida, pode-se considerar para valor de massa específica do concreto armado a massa específica do concreto simples acrescida de 100 kg/m^3 a 150 kg/m^3 .

A ABNT NBR 6118:2014 recomenda ainda que para os projetos de estruturas de concreto armado deve ser utilizado aço com valor característico de resistência de escoamento nas categorias CA-25, CA-50 E CA-60, e com diâmetros e seções transversais nominais estabelecidos na ABNT NBR 7480:2007.

O concreto armado, como a maior parte dos sistemas estruturais, possui algumas vantagens e desvantagens. Segundo Carvalho *et al.*(2014), suas principais vantagens são:

- Apresentar boa resistência à maioria das solicitações;
- Boa trabalhabilidade, o que têm como consequência maior liberdade ao projetista;

- Permitir obter estruturas monolíticas;
- Técnicas de execução razoavelmente dominadas no ramo da construção;
- Pode competir financeiramente com estruturas metálicas em diversas situações;
- No geral , quando bem executado, é um material durável;
- Durabilidade e resistência ao fogo maior quando comparado a madeira e ao aço, desde que o cobrimento e a qualidade do concreto esteja de acordo com as condições do meio em que está inserido.
- Permite a utilização da pré-moldagem o que proporciona maior rapidez e facilidade de execução;
- É resistente a choques e vibrações, efeitos térmicos e atmosféricos.

Além disso, de acordo com os mesmos autores, as desvantagens desse sistema estrutural são:

- Possui um peso específico relativamente elevado, de aproximadamente 2500 Kg/m³, o que acaba levando a um peso próprio da estrutura grande, limitando seu uso em algumas situações;
- Dificuldade para realizar reformas;
- Por ser um bom condutor de som e calor, é necessário muitas vezes associá-lo à outros materiais para que não ocorra problemas relacionados à isso;
- Requer o uso de fôrmas e utilização de escoramentos, quando não é pré-moldado, que geralmente precisa permanecer no local até o concreto alcançar a resistência desejada.

As estruturas de concreto armado são compostas por elementos estruturais, como pilares, vigas, lajes, etc, como mostra a Figura 9.

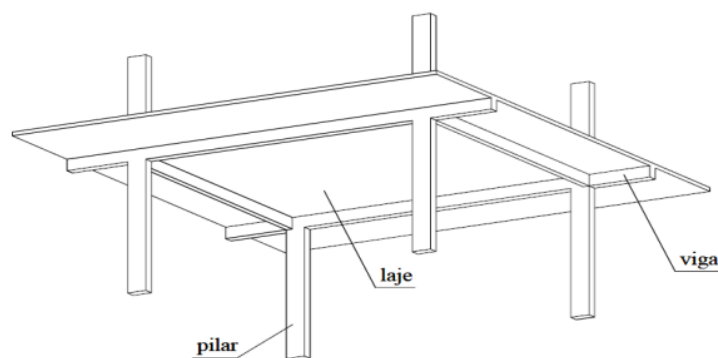


Figura 9. Perspectiva de um pavimento de concreto armado. (SILVA., 2005)

Esses elementos podem ser pré-moldados, situação em que o funcionamento não é monolítico ou moldados no local, nesse caso o funcionamento da estrutura é monolítico, ou seja, funciona como um só elemento. Essa escolha é feita de acordo com a necessidade e as condições da construção. No estudo em questão, os três sistemas estruturais analisados trabalham com elementos moldados no local. Dessa forma, será utilizada a técnica de discretização para analisar os elementos, para isso será utilizado o auxílio do software de cálculo estrutural chamado TQS.

2.3 MÉTODOS DE CÁLCULO

2.3.1 Método das Linhas de Ruptura

A teoria das linhas de ruptura é utilizada para determinar a capacidade última das lajes quando o mecanismo de ruptura é válido. Essa teoria é vantajosa por ser mais simples quando comparada as demais e além disso, apresentar ensaios que comprovam a validade dos valores teóricos. No entanto, com a tecnologia e análise de estruturas por meio do método de elementos finitos, essa tem caído em desuso.

Também conhecida como Método das Charneiras Plásticas, proposta por JOHANSEN, 1962, baseia-se no princípio de que ocorrem deformações plásticas ao longo das linhas de ruptura nas quais o momento fletor se iguala ao momento de plastificação da laje. Para determinar essa figura, deve ser feito o equilíbrio das partes isoladas da laje que se encontram divididas pelas linhas de ruptura, essas linhas variam de acordo com os apoios desse elemento estrutural. Esse equilíbrio pode ser analisado pelo método do equilíbrio, que é feito através da obtenção de forças nodais ou pelo princípio dos trabalhos virtuais, que analisa a laje como um todo.

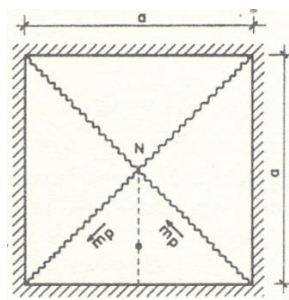


Figura 10. Linhas de Ruptura de uma laje quadrada apoiada nos quadros bordos.(MONTEIRO, *et.al.*, 1980)

2.3.2 Método do Pórtico Equivalente

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 esse método de determinação dos esforços em estruturas pode ser utilizado quando os pilares estiverem dispostos em fileiras ortogonais, de maneira regular e com vão pouco variáveis. Essa restrição torna o método muito limitado e pouco usado atualmente.

O método consiste em adotar para cada direção pórticos múltiplos e obter os esforços pelo processo elástico aproximado, com redistribuição. Para cada pórtico, considera-se a carga total.

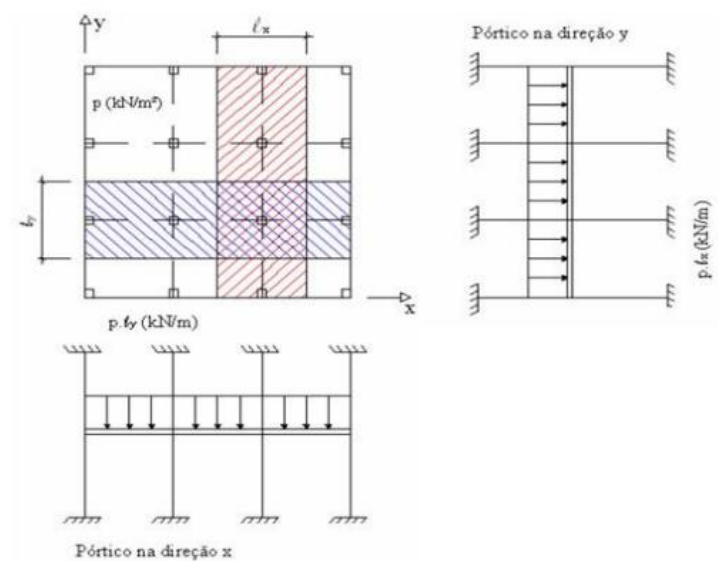


Figura 11. Definição dos pórticos múltiplos. (ARAÚJO, 2003).

Calcula-se os momentos fletores nas barras dos pórticos equivalentes como é apresentado na Figura 11. Segundo ARAÚJO, 2003 a inércia das barras pode ser calculada usando a largura da faixa da metade da distância entre os pilares, como pode ser observado na figura acima. Com os valores desses esforços é possível distribuir os momentos nas faixas como recomenda a norma.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, a distribuição dos momentos obtidos em cada direção deve ser feito da seguinte maneira:

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

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

As faixas citadas estão mostradas na Figura 12. Além disso, a ABNT NBR 6118:2014 afirma que deve-se, obrigatoriamente, considerar os momentos de ligação entre laje e pilares extremos.

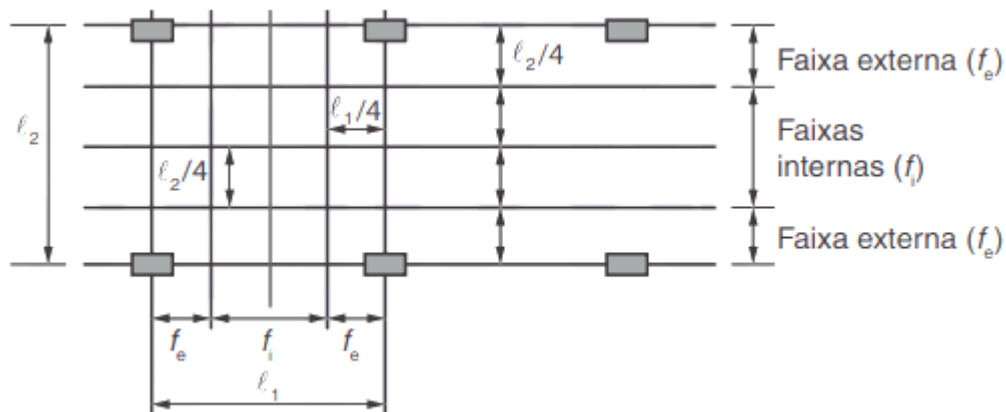


Figura 12. Faixa de laje para distribuição dos esforços nos pórticos múltiplos (NBR 6118:2014).

Segundo ARAÚJO, 2003 para encontrar as forças normais nos pilares pode-se fazer a média entre os valores obtidos em cada uma das direções.

2.3.3 Método de Elementos Finitos

De acordo com NEVES, 2010 esse método consiste na divisão do elemento como um todo em um número finito de elementos menores de forma simples e dimensões variadas, denominados elementos finitos, assumindo-se no seu interior leis simples de comportamento, dependentes das variáveis em estudo.

É considerado atualmente um dos melhores métodos para análise do pavimento de um edifício pois é possível analisar praticamente qualquer geometria definida através desse método, o que o torna muito utilizado na análise de estruturas com lajes de concreto armado, tanto maciças, sendo apoiadas em vigas ou não, quanto nervuradas.

A Figura 13 apresenta uma laje discretizada em elementos finitos utilizando o software TQS.

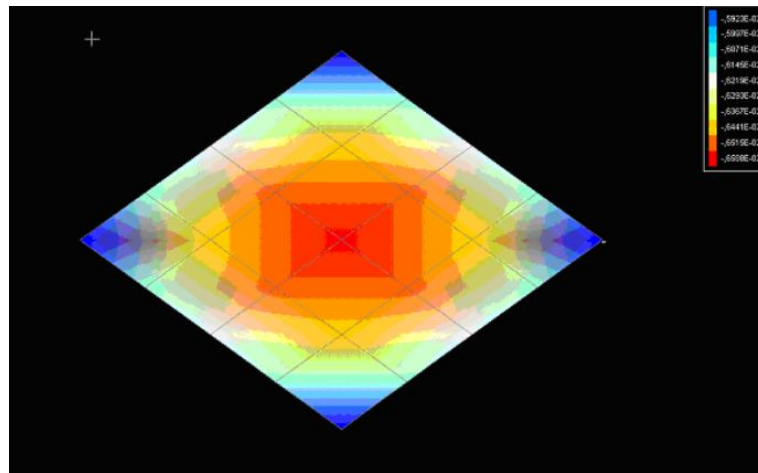


Figura 13. Representação de laje em elementos finitos. (TQS Docs, 2021)

2.3.4 Método da Analogia de grelhas

A análise por esse método consiste na divisão da placa em elementos de dimensão finita conectados por nós, onde ocorre a compatibilidade dos esforços solicitantes e deslocamentos. Grande parte dos programas utilizados por projetistas para dimensionamento estrutural trabalham com base nesse método, inclusive o software TQS utilizado nesse trabalho. No item 2.12 esses conceitos são apresentados de forma mais detalhada.

De acordo com o manual do TQS a grelha é um modelo composto por elementos lineares dispostos num mesmo plano horizontal, que possibilita a avaliação do comportamento do pavimento formado pelas vigas e lajes, perante atuação de ações verticais.

A Figura 14 apresenta um exemplo de grelha formada por lajes e vigas, os pilares são simulados por apoios.

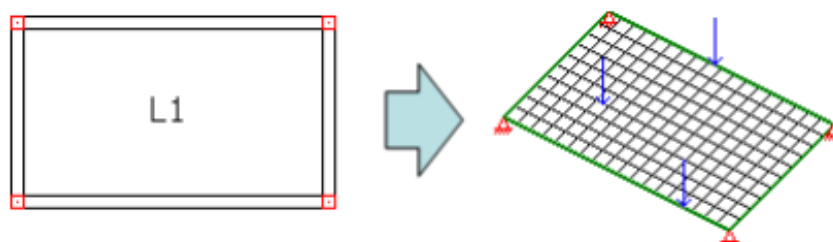


Figura 14. Grelha de lajes e vigas. (TQS Docs, 2021)

2.4 CARGAS E COMBINAÇÕES DE CARGAS

De acordo com a ABNT NBR 6120:2019 as cargas são classificadas em cargas permanentes (g) e cargas acidentais (q). A carga permanente é constituída pelo peso próprio da estrutura somada ao peso de todos os elementos construtivos fixos de instalações permanentes. Já a carga acidental é aquela que pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso.

A Tabela 6 apresenta os valores mínimos de cargas verticais a serem usados dependendo da finalidade da edificação.

Tabela 6. Valores mínimos das cargas verticais. (NBR 6120:2019)

		Unid.: kN/m ²	
Local		Carga	
1	Arquibancadas	4	
2	Balcões	Mesma carga da peça com a qual se comunicam e as previstas em 2.2.1.5	
3	Bancos	Escritórios e banheiros Salas de diretoria e de gerência	
4	Bibliotecas	Sala de leitura	2,5
		Sala para depósito de livros	4
		Sala com estantes de livros a ser determinada em cada caso ou 2,5 kN/m ² por metro de altura observado, porém o valor mínimo de	6
5	Casas de máquinas	(incluindo o peso das máquinas) a ser determinada em cada caso, porém com o valor mínimo de	7,5
6	Cinemas	Platéia com assentos fixos	3
		Estúdio e platéia com assentos móveis	4
		Banheiro	2
7	Clubes	Sala de refeições e de assembleia com assentos fixos	3
		Sala de assembleia com assentos móveis	4
		Salão de danças e salão de esportes	5
		Sala de bilhar e banheiro	2
8	Corredores	Com acesso ao público	3
		Sem acesso ao público	2
9	Cozinhas não residenciais	A ser determinada em cada caso, porém com o mínimo de	3
10	Depósitos	A ser determinada em cada caso e na falta de valores experimentais conforme o indicado em 2.2.1.3	-
11	Edifícios residenciais	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro	1,5
		Dispensa, área de serviço e lavanderia	2
12	Escadas	Com acesso ao público	3
		Sem acesso ao público (ver 2.2.1.7)	2,5
13	Escolas	Anfiteatro com assentos fixos	3
		Corredor e sala de aula	3
		Outras salas	2
14	Escritórios	Salas de uso geral e banheiro	2
15	Forros	Sem acesso a pessoas	0,5
16	Galerias de arte	A ser determinada em cada caso, porém com o mínimo	3
17	Galerias de lojas	A ser determinada em cada caso, porém com o mínimo	3

Baseado nas recomendações da ABNT NBR 6120:2019 apresentadas na Tabela 6 e considerando o edifício comercial, sendo futuramente ocupado por uma escola, utilizou-se a seguintes cargas nas lajes para entrada no software:

- 170 Kg/m² de carga permanente. Essa carga é referente a um revestimento de aproximadamente 8,5 centímetros, retirado da arquitetura.
- 500 Kg/m² de carga accidental. Carga recomendada pela norma, mostrada na Tabela 6, para um edificio comercial ocupado por uma escola.
- 260 Kg/m² de carga de alvenaria. Essa carga foi distribuída de forma linear nas regiões em que haverá a ocorrência de alvenaria. Considerou-se a utilização de blocos de 14 centímetros e altura da parede de 3,8 metros.

O software TQS já calcula automaticamente o peso próprio dos elementos estruturais, portanto, este valor não está incluso nos dados em questão. Além das cargas citadas acima, em pontos específicos foram lançadas as cargas pontuais referentes as reações das escadas nas vigas, visto que, esta estrutura não foi modelada associada ao edifício no software e sim calculada separadamente.

Esses valores foram retirados do projeto realizado pela PROEST e utilizados nas demais lajes para obter futuramente resultados comparativamente adequados.

A ABNT NBR 6118:2014 classifica ainda as ações em ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais. Sendo as ações permanente constituídas pelas cargas permanentes e empuxos permanentes e as ações variáveis pelas cargas variáveis, sobrecarga de utilização, ações do vento, da água, ações dinâmicas, etc.

2.4.1 Coeficiente de ponderação das Ações

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 as ações descritas anteriormente devem ser majoradas pelo coeficiente γ_f cujo os valores variam para ações no ELU e ações no ELS. Esse coeficiente é obtido através do produto de três outros:

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot \gamma_{f3}$$

Onde,

γ_{f1} = Considera a variabilidade das ações.

γ_{f2} = Considera a simultaneidade das ações.

γ_{f3} = Considera os possíveis desvios gerados nas construções e as aproximações feitas no projeto do ponto de vista das solicitações.

Os valores de coeficientes de ponderação para verificação no estado-limite último, de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, são os indicados na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7. Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f3}$. (NBR 6118:2014)

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ^a	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

onde
D é desfavorável, *F* é favorável, *G* representa as cargas variáveis em geral e *T* é a temperatura.

^a Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

Tabela 8. Valores do coeficiente γ_{f2} . (NBR 6118:2014).

Ações		γ_{f2}		
		ψ_0	ψ_1^a	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

^a Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.
^b Edifícios residenciais.
^c Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Já para as verificações no estado-limite de serviço, de acordo com a NBR 6118:2014 o coeficiente de ponderação é dado por:

$$\gamma_f = \gamma_{f2}$$

Onde,

γ_{f2} é determinado conforme a Tabela 8.

$\gamma_{f2} = 1$ para combinações raras.

$\gamma_{f2} = \Psi_1$ para combinações raras.

$\gamma_{f2} = \Psi_2$ para combinações quase permanentes.

2.4.2 Combinações das ações

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 para o estado-limite último normal, considerando o esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado, as combinações de cargas podem ser feitas utilizando a seguinte equação:

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \Psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{\varepsilon q} \Psi_{0\varepsilon} F_{\varepsilon qk}$$

Onde,

F_d = Valor de cálculo das ações para combinação última.

F_{gk} = Representa as ações permanentes diretas.

$F_{\varepsilon k}$ = Representa as ações indiretas permanentes como a retração $F_{\varepsilon gk}$ e variáveis como a temperatura $F_{\varepsilon qk}$.

F_{qk} = Representa as ações variáveis diretas das quais F_{q1k} é escolhida principal.

$\gamma_g, \gamma_{\varepsilon g}, \gamma_q, \gamma_{\varepsilon q}$ = Expressos na Tabela 7.

$\Psi_{0j}, \Psi_{0\varepsilon}$ = Expressos na Tabela 8.

Já as combinações de serviço usuais são divididas em três, de acordo com a sua permanência na estrutura, sendo elas:

- **Quase permanentes:** Podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura. Considerada na verificação do estado-limite de deformações excessivas.

- **Frequentes:** Repetem-se muitas vezes durante o período de vida da estrutura. Considerada na verificação do estado-limite de formação de fissuras e de abertura de fissuras.
- **Raras:** Ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura. Considerada na verificação do estado-limite de formação de fissuras.

Essas combinações estão descritas na tabela abaixo:

Tabela 9. Combinações de serviço. (NBR 6118:2014).

Combinações de serviço (ELS)	Descrição	Cálculo das solicitações
Combinações quase permanentes de serviço (CQP)	Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \Sigma F_{gi,k} + \Sigma \psi_2 F_{qj,k}$
Combinações frequentes de serviço (CF)	Nas combinações frequentes de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor frequente $\psi_1 F_{q1k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + \psi_1 F_{q1k} + \Sigma \psi_2 F_{qjk}$
Combinações raras de serviço (CR)	Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor característico F_{q1k} e todas as demais ações são tomadas com seus valores frequentes $\psi_1 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + F_{q1k} + \Sigma \psi_1 F_{qjk}$

Onde,

$F_{d,ser}$ = Valor de cálculo das ações para combinações de serviço.

F_{q1k} = Valor característico das ações variáveis principais diretas.

ψ_1 = Fator de redução de combinação frequente para ELS.

ψ_2 = Fator de redução de combinação quase permanente para ELS.

2.5 PARÂMETROS DE PROJETO

2.5.1 Agressividade Ambiental

A classe de agressividade ambiental é um parâmetro de extrema importância no dimensionamento de estruturas de concreto armado, principalmente no Estado-limite de serviço quando relacionado ao controle de fissurações.

Segundo a ABNT NBR6118:2014 essa agressividade está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre a estrutura, independentemente de outras ações como a mecânica. Dessa forma, esta deve ser classificada de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10. Classes de agressividade ambiental. (NBR 6118:2014).

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

^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.

De acordo com a localização em que será construída a edificação e baseada na tabela acima, para o dimensionamento em questão seria utilizado a classe de agressividade ambiental II – Moderada, urbana com pequeno risco de deterioração da estrutura, considerando que esta não se encontra em ambiente marinho ou industrial. No entanto, devido a baixa umidade média do ar (menor que 65%) em Brasília, região da construção, existe uma exceção descrita no item b da Tabela 10 que permite a utilização de uma classe de agressividade mais branda, ou seja, uma classe acima. Dessa forma, será considerado para o dimensionamento a classe de agressividade ambiental I – Fraca.

2.5.2 Cobrimento Nominal

Baseado no tipo de estrutura e na classe de agressividade ambiental, a norma recomenda os cobrimentos a serem utilizados. Para o caso em questão, construção de concreto armado e classe de agressividade ambiental I, o cobrimento nominal recomendado considerando uma tolerância

de execução de 10 milímetros é 20 mm para lajes e 25 mm para vigas e pilares. Isso pode ser confirmado na Tabela 11 retirada da ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 11. Cobrimento Nominal baseado na classe de agressividade ambiental para tolerância de execução de 10 mm. (NBR 6118:2014).

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

2.6 LAJES LISAS

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 “lajes-cogumelo são lajes apoiadas diretamente em pilares com capitéis, enquanto lajes lisas são apoiadas nos pilares sem capitéis”.

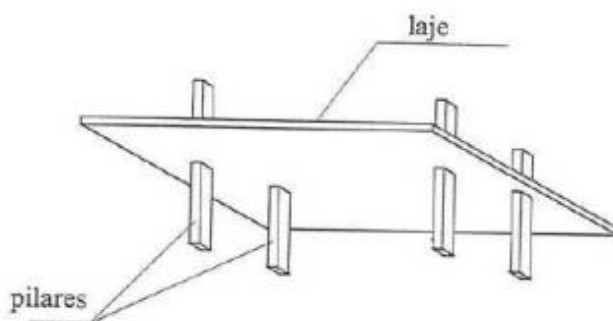


Figura 15. Perspectiva esquemática de lajes lisas. (CARVALHO *et al.*, 2009)

Diferentemente do sistema convencional, em que as cargas são aplicadas nas lajes, transferidas às vigas e posteriormente aos pilares, nesse método construtivo as vigas são retiradas, ou seja, as lajes são apoiadas diretamente sobre os pilares e dessa forma as cargas aplicadas nestas são transferidas para os pilares diretamente.

Existem diversas vantagens do método construtivo sem vigas quando comparado ao método convencional, de acordo com Carvalho *et al.*(2009), as principais delas são:

- Adaptabilidade a diversas formas ambientais;
- Simplificação das fôrmas e do cimbramento;
- Simplificação das armaduras e da concretagem;
- Melhoria da qualidade final e diminuição de revestimentos;
- Redução da altura total do edifício;
- Simplificação das instalações prediais;
- Redução do tempo e custos de execução.

No entanto, apesar de todos os pontos positivos citados anteriormente, ao se trabalhar com esse método construtivo é necessário atentar-se à alguns esforços que surgem decorrentes dessa ligação direta entre as lajes e os pilares. O principal esforço que surge se tratando desse sistema é o esforço cortante na própria ligação, o que gera tensões cisalhantes de grande intensidade podendo levar a ruína da laje através de um fenômeno chamado punção, esse conceito está exposto de maneira mais clara nos itens que seguem.

De acordo com Carvalho *et al.* (2009), visando diminuir essas tensões e evitar que ocorra punção, faz-se o que é chamado de capitel, o engrossamento da seção na região da ligação com a laje. Além disso, com o mesmo intuito, pode-se aumentar a espessura da laje nessa região, essa solução é chamada de ábaco, pastilha ou “Drop Panel”. É possível também associar essas duas soluções, como mostra a Figura 16.

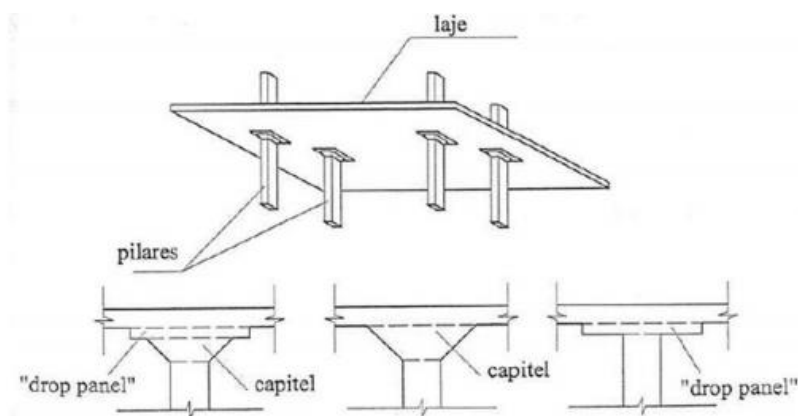


Figura 16. Lajes cogumelo com capitel e ábaco nas ligação com o pilar. (CARVALHO *et al.*,2009)

De acordo com Trawtuein (2016), esse método construtivo quando comparado ao convencional, as lajes lisas podem apresentar maiores deslocamentos verticais, também chamados de flechas,

para um mesmo vão. Devido à isso, normalmente é necessário um aumento na espessura da laje visando diminuir os deslocamentos.

A NBR ABNT 6118:2014 recomenda que as lajes lisas e cogumelos devem ser analisadas através de procedimentos numéricos adequados, como diferenças finitas, elementos de contorno ou elementos finitos. Afirma ainda que caso os pilares estejam dispostos em filas ortogonais, de maneira regular, com vão poucos diferentes, pode-se adotar o método dos Pórticos Equivalentes explicado no item 2.3.2.

2.7 LAJES NERVURADAS

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 “lajes nervuradas são lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte”.

De acordo com Carvalho, *et al.* (2009), as lajes nervuradas são consideradas um avanço quando comparadas as lajes maciças pois normalmente necessitam de uma menor quantidade de material. Estas funcionam de forma semelhante às lajes lisas, no entanto, com a eficiência das vigas na flexão, ou seja, possuem grande inércia e um peso próprio pequeno.

Já Leonhardt, *et al.* (2007) cita como principal vantagem desse método construtivo o baixo peso próprio para grande altura útil. Além disso, afirmam que são lajes adequadas para vãos de 5 a 15 metros.

As principais vantagens das lajes nervuradas são:

- Possibilidade de vencer grandes vãos;
- Consomem menos concreto e aço que outros sistemas similares, o que diminui o peso próprio;
- São adequadas aos sistemas de lajes sem vigas;
- Apresentam pequenos deslocamentos transversais.

Apesar de apresentar muitas vantagens, as lajes nervuradas possuem também desvantagens a serem consideradas, são elas:

- Normalmente aumentam a altura total da edificação por possuírem uma maior altura de laje, mesmo apresentando um menor peso próprio;
- Maior dificuldade de compatibilização com os outros projetos, como passagem de tubulações e afins;
- Resistência da seção transversal diferenciada com relação aos momentos fletores positivos e negativos, exigindo um cálculo mais elaborado.
- Possibilidade de ruptura por cisalhamento nas nervuras próximo às regiões maciças, além do fenômeno de punção.

Segundo Carvalho *et al.* (2009) esse tipo de sistema construtivo pode ser chamado de lajes aliviadas ou nervuradas. Estes autores frizam o fato de que a zona aliviada, ou seja, com nervuras ou vazios internos, não devem incluir a região dos pilares, pois nessa região há uma grande concentração de esforços, o que faz com que necessite da espessura total da laje para combatê-los.

Estes afirmam também que nas regiões centrais é possível eliminar parcela do concreto abaixo da linha neutra, que por estar tracionado não contribui na resistência aos esforços de flexão. Devido ao fato dessas lajes possuírem uma altura maior, a resistência é aumentada e os deslocamentos transversais reduzidos.

É possível ainda, criar regiões mais rígidas na região de alinhamento entre os pilares, criando o que é chamado de “faixa” e surge aí o conceito de “lajes faixas” ou “lajes com vigas faixas”. Nesse caso, o alívio é feito na parte central de cada região entre quatro pilares. Essa proposta foi adotada na construção da edificação em questão como será mostrado adiante.

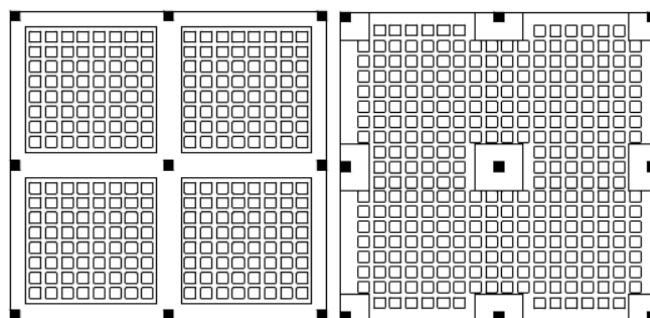


Figura 17. Laje nervurada com vigas-faixa e laje nervurada com engrossamento na região dos pilares, respectivamente. (ESTECHE, 2008)

As lajes nervuradas podem ser com cubetas ou com vigotas e painéis treliçados, em que para o segundo caso possuem enchimentos em sua composição, podendo utilizar, por exemplo, blocos como poliestireno expandido.

2.7.1 Incêndio

De acordo com a NBR 15200:2012 a resistência ao fogo é medida através de um TRRF explícito na NBR 14432:2001, em que deve-se possuir uma largura mínima da nervura e um internamento mínimo das armações. Além disso, baseado nesse tempo requerido de resistência ao fogo determina-se um valor mínimo para espessura da capa da laje nervurada.

Através do Anexo A denominado “ Método do Tempo Equivalente” contido na ABNT NBR 15200:2012 é possível calcular um tempo equivalente para cada estrutura de concreto armado e reduzir em até 30 minutos o tempo requerido de resistência ao fogo. Para o estudo em questão utilizou-se esse método obtendo um TRRF final de 30 minutos.

2.7.2 Acústica

De acordo com a pesquisa denominada “Laje nervurada: Análise da performance acústica para ruído de impacto” de Daniel Pereyron e Luiz Pizzuti dos Santos, o desempenho acústico de uma laje nervurada com capa de 5,5 centímetros é muito próximo de uma laje de 12 centímetros, e portanto, aceitável.

2.8 ESTADO LIMITE ÚLTIMO

De acordo com Araújo *et al.*(2014) o estado limite último é aquele relacionado ao colapso ou qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação, no todo ou em parte, do uso da estrutura.

2.8.1 Resistência à Flexão em lajes de concreto armado

O dimensionamento da armadura necessária para resistir ao momento fletor é feito no estado limite-último de ruína, podendo este ser alcançado tanto pelo excesso de deformação da armadura que está trabalhando à tração quanto pela ruptura do concreto comprimido.

O dimensionamento apresentado a seguir pode ser aplicado tanto à lajes quanto à vigas, desde que submetidas à flexão normal simples e pura, ou seja, não existe esforço normal. Este é feito no Estádio de flexão III, que ocorre em situações extremas, na eminência da ruptura.

O diagrama de tensões e deformações do concreto nesse estágio comportam-se como mostra a Figura 18, o de tensão tem a forma parabólica-retangular mas a ABNT NBR 6118:2014 permite o uso de um diagrama retangular equivalente.

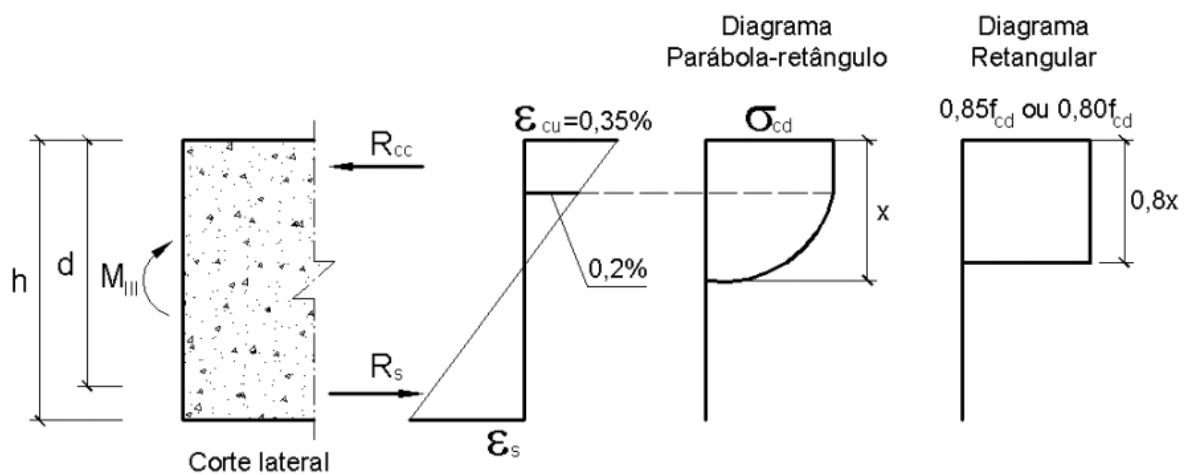


Figura 18. Comportamento do concreto na flexão pura, estágio III. (PINHEIRO *et.al*, 2003)

De acordo com Pinheiro (2003) no domínio 3 o concreto encontra-se na ruptura e o aço tracionado em escoamento, dessa forma tanto o concreto quanto o aço trabalham suas resistências, havendo um aproveitamento máximo dos dois materiais. Além disso, é uma ruína considerada “adequada” pois ocorre a fissuração devido a ruptura do concreto e deslocamentos visíveis devido ao escoamento do aço, o que é considerado um aviso prévio da estrutura. O comportamento da seção nesse domínio está mostrado na Figura 19.

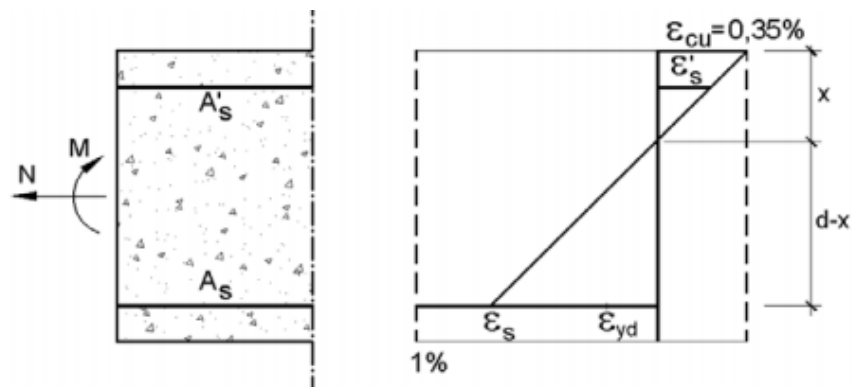


Figura 19. Representação do domínio 3. (PINHEIRO, *et.al*, 2003)

Através do equilíbrio de forças atuantes na seção transversal é possível calcular a quantidade de armadura longitudinal para seções retangulares. A ABNT NBR 6118:2014 permite o uso de apenas parte do domínio III para esse dimensionamento pois segundo esta, a capacidade de rotação dos elementos estruturais é função da linha neutra. De acordo com a norma, de modo a manter o comportamento dúctil adequado dos elementos estruturais em estudo a posição da linha neutra no ELU deve ser $x/d \leq 0,45$ para concretos com f_{ck} até 50 Mpa e serem dimensionados no domínio 3. De acordo com ARAÚJO,2014 essa área de aço pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$A_s = \frac{M_d}{z * f_{yd}}$$

Onde,

A_s = Área de aço.

M_d = Momento de cálculo.

z = Braço de alavanca.

f_{yd} = Tensão de escoamento do aço.

2.8.2 Resistência ao Cisalhamento em lajes lisas de concreto armado

É necessário ainda verificar a resistência das lajes aos esforços cortantes sob os quais estas estão submetidas. Segundo a ABNT NBR 6118:2014, as lajes maciças ou nervuradas podem prescindir de armadura transversal quando o esforço cortante solicitante for menor que a força cortante resistente, para isso faz-se a seguinte verificação:

$$V_{sd} \leq V_{Rd1}$$

Em que,

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd1} K (1,2 + 40\rho_1) + 0,15\sigma_{cp}] b_w d$$

Sendo,

$$\tau_{Rd1} = 0,25f_{ctd}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d} < |0,02|$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c}$$

Onde,

V_{Rd1} = Força resistente de cálculo

V_{sd} = Força cortante de solicitação

A_{s1} = Área da armadura de tração

b_w = Largura mínima da seção ao longo da altura útil

N_{sd} = Força longitudinal devido a protensão

τ_{Rd} = Tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento

K = Um coeficiente que tem os seguintes valores:

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

$k = |1,6 - d|$, para os demais casos. não menor que $|1|$.

A partir dessa verificação, adota-se ou não o uso de armadura para força cortante na laje. Caso seja necessário a utilização dessa armadura, a norma faz as seguintes limitações:

- A resistência dos estribos deve ser no máximo: 250 Mpa, para lajes com espessura até 15 centímetros.
- 435 Mpa para lajes com espessura maior que 35 centímetros sendo permitindo a interpolação linear.

Portanto, têm-se que:

$$f_{ywd} \leq 250 + \left(\frac{435 - 250}{20} \right) (h - 15) \leq 435 \text{ Mpa}$$

Além disso, nesse caso, é necessário fazer as seguintes verificações:

$$V_{sd} \leq V_{Rd2}$$
$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_C + V_{sw}$$

Onde,

V_{sd} = Força cortante solicitante de cálculo

V_{Rd2} = Força cortante resistente de cálculo

V_{Rd3} = É a força cortante resistente de cálculo relativa a ruína por tração diagonal

V_C = Parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça

V_{sw} = Parcela resistida pela armadura transversal

Além disso, é necessário ainda a verificação à punção na laje, como é apresentado no item 2.8.4 mais adiante.

2.8.3 Verificação de cisalhamento em lajes nervuradas de concreto armado

Segundo Carvalho *et al.* (2009), a verificação do estado limite último de cisalhamento é feita considerando o elemento como laje e verificando se a espessura da nervura e a distância entre elas é suficiente para evitar o uso de armadura transversal, como os estribos, por exemplo.

De acordo com o item 19.4.1 da ABNT NBR 6118:2014, as lajes maciças ou nervuradas podem prescindir de armadura transversal para resistir as forças de tração oriundas da força cortante, desde que a força cortante de cálculo que atua na nervura (V_{sd}) seja menor ou igual à resistência de projeto ao esforço cortante resistido pelo concreto (V_{Rd1}).

Caso a laje necessite de armadura transversal, segundo o item 19.4.2 da NBR 6118:2014, deve-se aplicar os critérios estabelecidos pela Verificação do estado limite último, assunto apresentado no item 2.8.2 do presente trabalho.

2.8.4 Punção em lajes de concreto armado

O Ibracon (2015) denomina como “Punção” o estado limite último determinado por cisalhamento no entorno de forças concentradas. No entanto, ressalta que punção é diferente do

estado limite último determinado por cisalhamento em seções planas solicitadas à força cortante.

Segundo Carvalho *et al.* (2009) o fenômeno da punção ocorre quando uma força agindo sobre uma pequena área de uma placa provoca a sua perfuração. No sistema estrutural de lajes sem vigas, há grande chance desse fenômeno ocorrer devido à força cisalhante concentrada que surge decorrente da reação de apoio junto ao pilar.

De acordo com o CEB MC90, a superfície de ruptura de uma laje cogumelo sem armadura de cisalhamento ocorre como está mostrado na Figura 20. A superfície de ruptura forma um ângulo de 25° a 30° em relação ao plano da laje.

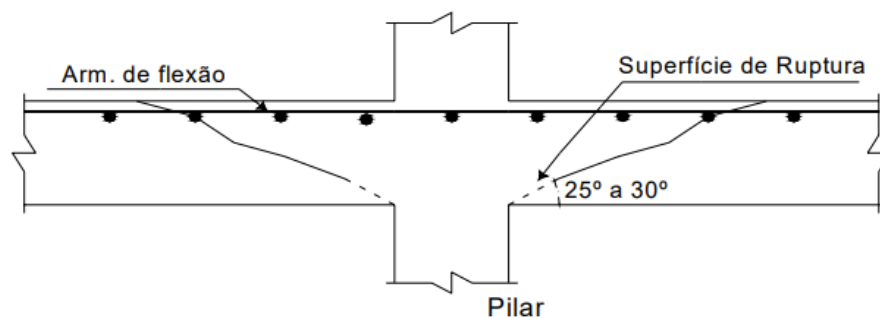


Figura 20. Representação da ruptura de uma laje sem armadura de cisalhamento (CEB/MC90).

De acordo com estudos do Ibracon (2015), para dimensionar uma laje à punção, deve-se verificar o cisalhamento em duas ou mais superfícies críticas definidas em torno de forças concentradas.

Inicialmente, deve-se verificar a primeira superfície crítica, (contorno C), do pilar ou da carga concentrada, em que indiretamente verifica-se a tensão de compressão diagonal do concreto, através da tensão de cisalhamento. Nessa etapa, adota-se o mesmo limite de vigas, fazendo com que fique a favor da segurança pois despreza o estado múltiplo de compressão no local.

Logo após, é possível fazer a verificação da segunda superfície crítica (contorno C'). Esse contorno encontra-se afastado $2d$ do pilar ou da carga concentrada, em que d é a altura útil da laje, isso se deve ao fato da fissura que determina o Estado Limite Último ser inclinada, como mostra a Figura 20. Nessa etapa verifica-se a capacidade da ligação à punção, associada à

resistência a tração diagonal, também através da tensão de cisalhamento. Para isso, adota-se um modelo empírico em que limita-se a tensão convencional de cisalhamento nesse perímetro C' . Por fim, caso seja necessário colocar armadura transversal, verifica-se a terceira superfície (contorno C'').

O item 19.5 da ABNT NBR 6118:2014 recomenda como deve ser feito o dimensionamento de lajes à punção. Seguindo suas prescrições, inicialmente deve-se definir a tensão solicitante nas superfícies críticas C e C' , isso é feito de diferentes maneiras caso o pilar seja interno com carregamento simétrico, interno com carregamento assimétrico ou de canto.

A Figura 21 mostra como devem ser identificadas as superfícies críticas C e C' em pilares internos. Logo em seguida, mostra-se como deve ser feito o cálculo da tensão solicitante para cada caso em específico.

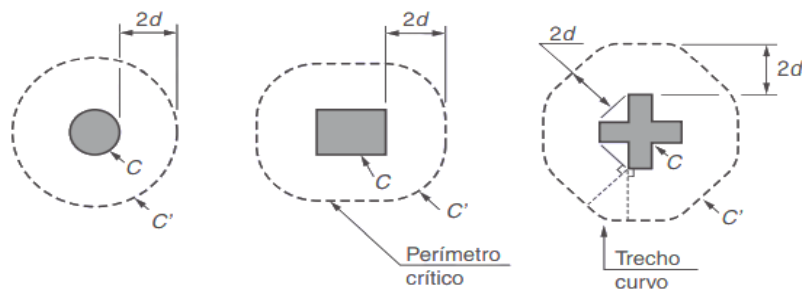


Figura 21. Perímetro crítico em pilares internos. (NBR 6118:2014).

Uma observação importante que a norma faz é que caso exista na laje uma abertura/furo situado a menor de $8d$ do contorno C , o trecho do contorno crítico C' entre duas retas que passam pelo centro de aplicação da força e que tangenciam o contorno da abertura não pode ser considerados. A Figura 22 mostra como isso deve ser considerado.

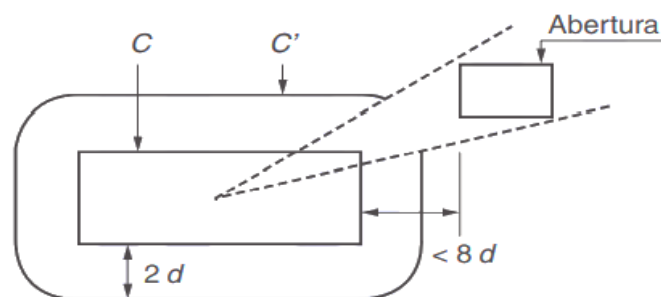


Figura 22. Perímetro crítico de laje com abertura. (NBR 6118:2014).

2.8.4.1 Determinação da tensão solicitante

a) Interno com carregamento simétrico

Cálculo da tensão solicitante:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u*d}$$

Em que $d = \frac{(d_x + d_y)}{2}$

Onde,

d = Altura útil da laje ao longo do perímetro crítico C’;

dx e dy = Alturas úteis nas duas direções ortogonais;

u = Perímetro do contorno C’;

u*d = Área da superfície crítica;

F_{Sd} = Força ou reação concentrada de cálculo.

b) Interno com carregamento assimétrico

Nesse caso, além da força vertical, existe transferência de momento da laje para o pilar, o que deve ser considerado. Sendo assim o cálculo da tensão solicitante:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u*d} + \frac{KM_{Sd}}{W_p * d}$$

Onde,

K = Coeficiente que fornece a parcela da M_{Sd} transmitida ao pilar por cisalhamento.

M_{Sd} = Momento solicitante.

τ_{Sd} = Tensão solicitante de projeto.

O coeficiente K depende da relação C1/C2, em que C1 é a dimensão do pilar paralela a excentricidade da força e C2 é a dimensão perpendicular à excentricidade da força. Isso é

mostrado no exemplo da Figura 23, em que e_x é a excentricidade do carregamento gerado pela assimetria.

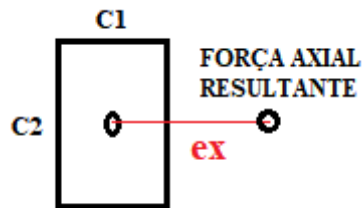


Figura 23. Exemplo de pilar interno com carregamento excêntrico. (Autora, 2021).

Os valores do coeficiente K são os que estão mostrados na Tabela 12. Para pilares circulares, adota-se $K=0,6$.

Tabela 12. Valores do coeficiente K. (NBR 6118:2014).

C_1/C_2	0,5	1,0	2,0	3,0
K	0,45	0,60	0,70	0,80

Já os valores de W_p devem se calculados de acordo com as expressões que seguem:

Pilar retangular (único caso existente no estudo em questão).

$$w_p = \frac{C_1^2}{2} + C_1 C_2 + 4C_2 d + 16d^2 + 2\pi d C_1$$

Onde,

C_1 = Direção do pilar paralela a excentricidade da força.

C_2 = Direção do pilar perpendicular a excentricidade da força.

c) Pilares de borda

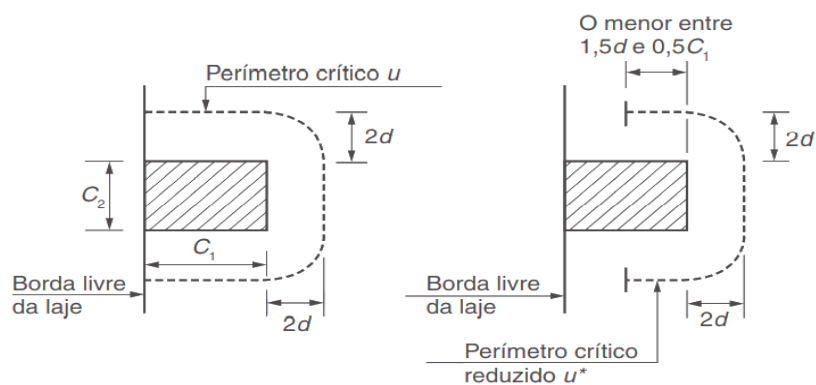


Figura 24. Perímetro crítico em pilares de borda. (NBR 6118:2014)

- Quando não agir momento no plano paralelo a borda livre:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u*d} + \frac{K_1 * M_{Sd1}}{W_{p1}*d}$$

Em que $M_{Sd1} = (M_{Sd} - M_{Sd} *) \geq 0$

Onde,

F_{Sd} = Reação de apoio;

u^* = Perímetro crítico reduzido;

M_{Sd} = Momento de cálculo do plano perpendicular a borda livre;

$M_{Sd} *$ = Momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico reduzido u^* em relação ao centro do pilar;

w_{p1} = Módulo de resistência plástica perpendicular à borda livre, calculado para o perímetro u .

- Quando agir momento no plano paralelo a borda livre:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u*d} + \frac{K_1 * M_{Sd1}}{W_{p1}*d} + \frac{K_2 * M_{Sd2}}{W_{p2}*d}$$

Onde,

M_{Sd2} = Momento de cálculo no plano paralelo à borda livre;

w_{p2} = Módulo de resistência plástica paralela à borda livre, calculado para o perímetro u .

Observação: Nesse caso, para o cálculo do coeficiente K_2 utiliza-se a Tabela 12, colocando no lugar de $\frac{c_1}{c_2}$ a equação $\frac{c_2}{(2*c_1)}$.

d) Pilares de canto

Para calcular a tensão solicitante em pilares de canto, segundo o Item 19.5.2.4 da ABNT NBR 6118:2014, deve-se aplicar o mesmo conceito do pilar de borda quando não age momento na direção paralela a borda livre.

Deve-se ainda, verificar separadamente cada uma das bordas livres desses pilares, considerando sempre o momento fletor que atua no plano perpendicular à borda livre que está sendo verificada.

Para o cálculo do coeficiente K nesse caso utiliza-se a Tabela 12, em que C_1 é o lado do pilar perpendicular à borda livre adotada e C_2 é o lado do pilar paralelo à borda livre adotada, como mostra a Figura 25.

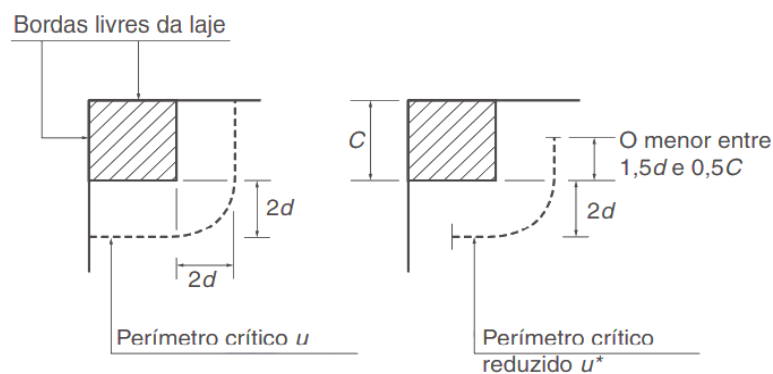


Figura 25. Perímetro crítico em pilares de canto. (NBR 6118:2014).

2.8.4.2 Capitel

De acordo com o Ibracon (2015) o critério estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014 à respeito desse assunto serve para definir o capitel mínimo para não ser preciso usar armadura. Afirma que quando o capitel for maior que o mínimo, esse critério pode ser exagerado, sugerindo então determinar sempre o mínimo, pois faz com que os casos maiores que o mínimo atendam a esse critério.

A Figura 26 mostra as definições usadas para explicação de como devem ser feitas as duas verificações nos contornos C'_1 e C'_2 , de acordo com o item 19.5.2.5 da ABNT NBR 6118:2014.

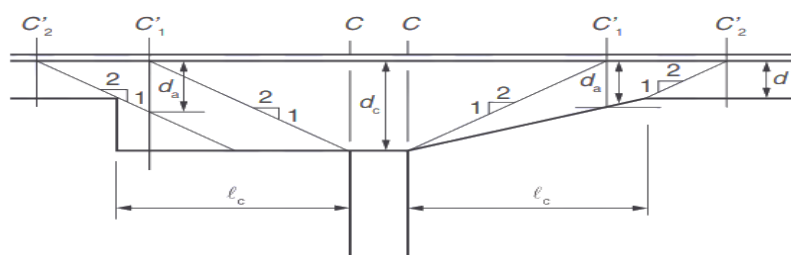


Figura 26. Definição da altura útil para lajes com capitel. (NBR 6118:2014).

Observações:

- Quando $l_c \leq 2 * (d_c - d)$ é preciso verificar apenas o contorno C_2 ';
- Quando $2 * (d_c - d) < l_c \leq 2 * d_c$ é preciso verificar apenas o contorno C_1 ';
- Quando $l_c > 2 * d_c$ é preciso verificar os dois contornos.

Onde,

d = Altura útil da laje no contorno C_2 ';

d_c = Altura útil da laje na face do pilar;

l_c = Distância entre a borda do capitel e a face do pilar;

d_a = Altura útil da laje no contorno C_1 '.

2.8.4.3 Determinação da tensão resistente

Inicialmente verifica-se a tensão resistente de compressão diagonal do concreto na superfície crítica C, com o intuito de quantificar a máxima resistência que uma ligação pode atingir, através da equação:

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd2} = 0,27 * \alpha_v * F_{cd}$$

Onde,

$$\alpha_v = (1 - f_{ck}/250);$$

τ_{Sd} = Tensão solicitante de cálculo;

F_{cd} = Resistência de cálculo do concreto à compressão.

Após realizada essa verificação, realiza-se a segunda verificação, que é a tensão resistente na superfície crítica C', com o intuito de verificar se será necessário o uso de armadura à punção. Caso $\tau_{Sd} < \tau_{Rd1}$ não será necessário o uso dessa armação. Para isso, faz-se a seguinte comparação:

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) (100 * \rho * f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,1\sigma_{cp}$$

$$\text{Em que } \sigma_{cp} = \frac{\sigma_{cx} + \sigma_{cpy}}{2}$$

Onde,

τ_{sd} = Tensão solicitante de cálculo;

f_{ck} = Resistência característica do concreto à compressão;

d = Altura útil da laje, no contorno crítico C’;

ρ = Taxa geométrica de armadura de flexão aderente;

ρ_x e ρ_y = Taxas nas duas direções ortogonais da laje;

σ_{cp} = Tensão normal no concreto na seção crítica.

Observações:

- Para o cálculo de ρ_x e ρ_y deverá ser considerada uma faixa de largura igual a dimensão do pilar quando não tiver armadura de punção e igual a dimensão da região armada quando tiver armadura de punção + 3d para cada lado ou até a borda, quando essa distância for menor.
- Caso exista capitel essa verificação deve ser feita no contorno crítico C1’ e C2’, mostrados na Figura 26.

Caso nessa última verificação, concluiu-se que será necessário o uso de armadura à punção, será necessário fazer uma última verificação no contorno crítico C’, já considerando essa armadura. Isso será feito através da comparação abaixo:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd3} = 0,1 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}}\right) (100 * \rho * f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,1\sigma_{cp} + 1,5 \frac{d}{S_r} \frac{A_{sw} f_{ywd} \text{sen}\alpha}{u*d}$$

Onde,

f_{ywd} = Resistência de cálculo da armadura de punção;

S_r = Espaçamento radial entre as linhas da armadura de punção;

A_{sw} = Área de armadura de punção em um contorno completo e paralelo à C’;

α = Ângulo de inclinação entre o eixo da armadura de punção e o plano da laje.

Por fim, quando necessário a utilização dessa armadura transversal, a norma diz que ela deve ser estendida em contornos paralelos a C’, ficando distante no máximo 2d do último contorno de armadura, como mostra a Figura 27, garantindo que a partir daí não é mais necessária a armadura, ou seja $\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1}$.

Onde,

f_{yd} = Tensão de escoamento de cálculo do aço;

$A_{s,ccp}$ = Somatório de todas as áreas das barras inferiores que cruzam cada uma das faces do pilar;

F_{sd} = Força solicitante de cálculo, podendo ser calculado com $\gamma_f = 1,2$.

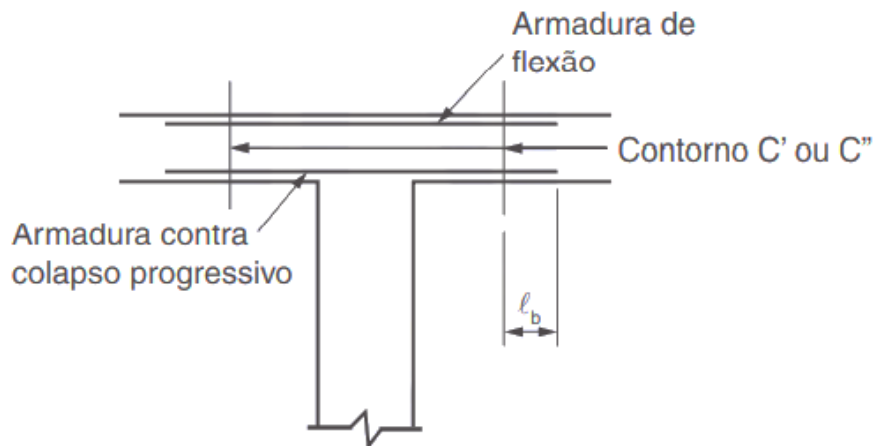


Figura 29. Armadura contra colapso progressivo. (NBR 6118:2014).

2.9 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

Segundo a ABNT NBR6118:2014 os estados-limites de serviço são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e equipamentos suportadas.

2.9.1 Estado limite de deformação

Deve-se garantir a boa funcionalidade da estrutura e a boa aparência desta para que o usuário sinta-se seguro. Limita-se assim as flechas de modo a não permitir que a estrutura atinja estágios que causem desconforto ao usuário. Para esta análise verifica-se os deslocamentos-limites, que segundo a ABNT NBR 6118:2014 são clasificados em quatro grupos básicos. Sendo eles:

- **Aceitabilidade sensorial:** Usualmente utiliza-se a aceitabilidade sensorial para a análise das flechas da estrutura, que é o limite caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável.

- **Efeitos específicos:** Deslocamentos acima dos valores estabelecidos podem impedir a utilização adequada da construção.
- **Efeitos em elementos não estruturais:** Deslocamentos acima dos valores estabelecidos podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que apesar de não fazerem parte da estrutura, estão ligadas a ela.
- **Efeitos em elementos estruturais:** Deslocamentos acima dos valores estabelecidos podem ocasionar problemas no comportamento estrutural.

De modo a prevenir que isso ocorra a limitação das flechas ou deslocamento-limite é dada pela Tabela 13. Limites para deslocamentos. (NBR 6118:2014).

Tabela 13. Limites para deslocamentos. (NBR 6118:2014).

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$\ell/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$\ell/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$\ell/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$\ell/350+$ contraflecha ^b
			Ocorrido após a construção do piso	$\ell/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$\ell/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$\ell/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H_i/850^e$ entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$\ell/400^g$ e 15 mm

2.9.2 Estado limite de fissuração

O controle da fissuração nas estruturas tem como objetivos principais a aceitabilidade sensorial dos usuários e a proteção das armaduras quanto à corrosão.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 devido à baixa resistência do concreto à tração e à grande variabilidade a fissuração em elementos de concreto armado é inevitável. No entanto, para que não ocorram os problemas citados no parágrafo acima, é necessário manter essas fissuras dentro dos limites estabelecidos mostrados na tabela abaixo.

Tabela 14. Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental. (NBR 6118:2014)

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente

2.10 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

A ABNT NBR 6118:2014 foi elaborada no Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB-02) pela comissão de Estudo de Estruturas de Concreto-Projeto e Execução. Cabe a esta definir os critérios gerais que regem o projeto das estruturas de concreto, tanto edifícios, quanto pontes, obras hidráulicas, aeroportos, portos e etc. Deve ser completada por outras normas que estabeleçam critérios para estruturas específicas.

O estudo em questão segue as recomendações da ABNT NBR 6118:2014 associada a NBR 6120:1980.

2.10.1 Armaduras mínimas

Visando controlar a fissuração e melhorar a ductilidade, desempenho das lajes à flexão, a ABNT NBR 6118:2014 estabelece valores mínimos de armadura passiva. Esses valores encontram-se na Tabela 15. Essa armadura deve ser constituída por barras com alta aderência ou telas soldadas.

Tabela 15. Valores mínimos para armaduras passivas aderentes. (NBR 6118:2014).

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$ (ver 19.3.3.2)
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\min}$		-

Além disso, a norma afirma que lajes que não possuam continuidade com outras lajes devem ser constituídas de armadura negativa de borda que deve se estender até pelo menos 0,15 do vão menor da laje a partir da face do apoio.

O item 17.2.5.2.1 da ABNT NBR 6118:2014 estabelece que os elementos estruturais armados ou protendidos devem ser armados com uma área de aço mínima obtida através do cálculo de um momento fletor mínimo calculado pela equação abaixo:

$$Md_{mín} = 0,8 * W_0 * f_{ctk,sup}$$

Onde,

$Md_{mín}$ = Momento fletor mínimo;

W_0 = Módulo de resistencia da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada;

$f_{ctk,sup}$ = Resistência característica superior do concreto à tração.

Além disso, a armadura mínima pode ser calculada através da equação abaixo

$$A_{smín} = \rho_{mín} * A_c$$

Onde,

$A_{smín}$ = Armadura mínima;

$\rho_{mín}$ = Taxa mínima de armadura de flexão;

A_c = Área de concreto do elemento estrutural.

A taxa mínima de armadura de flexão depende do formato da seção e do fck do concreto, podendo ser retirado da tabela abaixo:

Tabela 16. Taxas mínimas de flexão para vigas. (NBR 6118:2014)

Forma da seção	Valores de $\rho_{mín}^a$ ($A_{s,mín}/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

^a Os valores de $\rho_{mín}$ estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$ e $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, $\rho_{mín}$ deve ser recalculado.

2.10.2 Armaduras máximas

O valor da armadura de flexão não deve ultrapassar 4% da área de concreto, calculada na região fora da zona de trespasse. Deve-se garantir ainda as condições de ductilidade da laje, para isso a posição da linha neutra no ELU deve ser limitada a: $x/d \leq 0,45$ para concretos com $f_{ck} \leq 50$ Mpa.

2.10.3 Recomendações para lajes maciças

Os limites mínimos de espessura para lajes maciças, segundo o item 13.2.4.1 da ABNT NBR 6118:2014, são:

- 7 centímetros para cobertura não em balanço;
- 8 centímetros para lajes de piso não em balanço;
- 10 centímetros para lajes em balanço;
- 10 centímetros para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- 12 centímetros para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- 15 centímetros para lajes com protensão apoiadas em vigas, com o mínimo de $\frac{l}{42}$ para lajes de piso biapoiadas e $\frac{l}{50}$ para lajes de piso contínuas;
- 16 centímetros para lajes lisas e 14 centímetros para lajes-cogumelo, fora do capitel.

Além disso, no dimensionamento de lajes em balanço, os esforços solicitantes de cálculo devem ser multiplicados por um coeficiente adicional γ_n . Esse valores estão mostrados na Tabela 17.

Tabela 17. Valores do coeficiente adicional γ_n para lajes em balanço. (NBR 6118:2014).

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.

2.10.4 Recomendações para lajes nervuradas

Os limites mínimos de espessura para lajes nervuradas, segundo o item 13.2.4.2 da ABNT NBR 6118:2014, são:

- A espessura da mesa, quando não existirem tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre as faces das nervuras (o) e não menor que 4 cm.
- O valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser 5 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm. Para tubulações com diâmetro Φ maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de $4\text{ cm} + \Phi$, ou $4\text{ cm} + 2\Phi$ no caso de haver cruzamento destas tubulações.
- A espessura das nervuras não pode ser inferior a 5 cm.
- Nervuras com espessura menor que 8 cm não podem conter armadura de compressão.

Além disso, para o projeto das lajes nervuradas, devem ser obedecidas as seguintes condições:

- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 centímetros, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje;
- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 centímetros e 110 centímetros, exige-se a verificação da flexão da mesa, e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 centímetros e a largura média das nervuras for maior que 12 centímetros;
- Para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 centímetros, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

2.11 FÔRMAS

Para elaboração do projeto com laje nervurada utilizou-se fôrmas bidirecionais da ATEX Brasil. Para os dois casos em que se utilizou esse tipo de laje, a forma adotada foi a ATEX 800 com abas iguais. Esta possui a características exibidas na Figura 30.

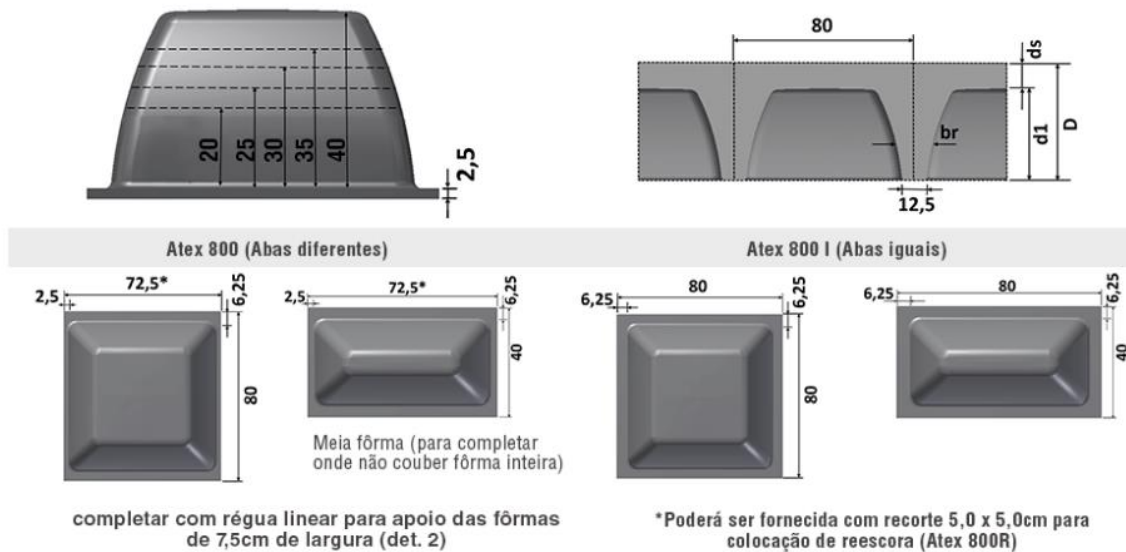


Figura 30. Dimensões das fôrmas ATEX800.

É necessário para montagem desse tipo de laje, além dos moldes, um sistema de aplicação ou execução. O sistema Cabetex para escoramento convencional, que é um sistema horizontal para aplicação de formas Atex, é constituído por dois elementos: Régua Lineares em aço que são utilizadas para apoio de abas estreitas das fôrmas e as Cabetex, também conhecidas como cabeça de escora, que são posicionadas nos locais onde serão instaladas as escora fixas. Esses elementos estão mostrados na Figura 31.



Figura 31. Exemplos de régua Linear e Cabete. (ATEX)

A Figura 32 exibe como usualmente são colocados esses elementos. Sendo uma fileira da régua de 1,5 metros com as Cabetex e uma fileira somente com as régua de 1 metro e de 3 metros, intercalando esses dois tipos de fileiras entre os moldes das fôrmas.

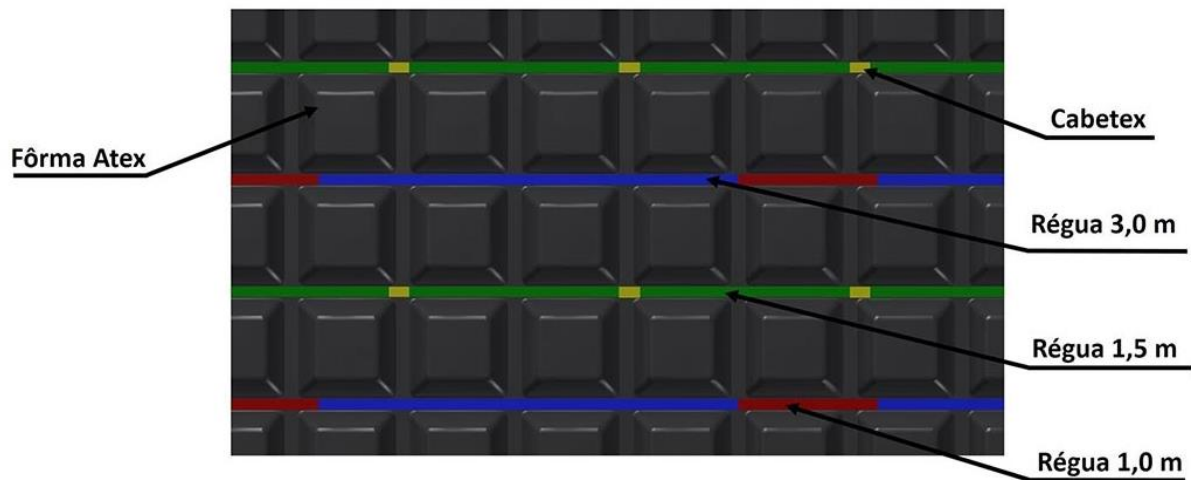


Figura 32. Posicionamento dos elementos de aplicação das Fôrmas Atex. (ATEX)

Esse catálogo possui cinco opções de moldes baseadas na altura da forma que vai de 20 centímetros até 40 centímetros, conseqüentemente quanto maior esse valor, maior é a espessura total da laje e maior o seu peso próprio, isso pode ser observado na Tabela 18. Para esse estudo optou-se por uma fôrma com 35 centímetros de altura e espessura da lâmia de 8 centímetros. Chegando assim a uma altura total da laje de aproximadamente 43 centímetros.

Tabela 18. Tabela de moldes para laje nervurada (ATEX).

ALTURA DA FÔRMA	ESPESSURA DA LÂMIA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.G. ð		INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		FACE SUPERIOR	FACE INFERIOR	INÉRCIA PY NERV.	ALTURA EQUIVALENTE	m ³	m ³ /m ²		
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ⁴	cm	m ³	m ³ /m ²	kN /m ²	m ³ /m ²
20,0	5,0	25,0				681	7,5	17,5	34444	17,3			2,85	0,114
	7,5	27,5	12,5	15,6	14,0	881	8,0	19,5	46395	19,1	0,087	0,136	3,48	0,139
	10,0	30,0				1081	8,8	21,2	60494	20,9			4,10	0,164
25,0	5,0	30,0				770	9,4	20,6	59543	20,7			3,35	0,134
	7,5	32,5	12,5	17,1	14,8	970	9,7	22,8	77643	22,7	0,106	0,166	3,98	0,159
	10,0	35,0				1170	10,3	24,7	97633	24,5			4,60	0,184
30,0	5,0	35,0				888	11,5	23,5	95454	24,3			3,98	0,159
	7,5	37,5	12,5	20,0	16,3	1088	11,6	25,9	122004	26,3	0,122	0,191	4,60	0,184
	10,0	40,0				1288	12,1	27,9	150167	28,2			5,23	0,209
35,0	5,0	40,0				1013	13,6	26,4	142988	27,8			4,65	0,186
	7,5	42,5	12,5	22,5	17,5	1213	13,6	28,9	179875	30,0	0,137	0,214	5,28	0,211
	10,0	45,0				1413	14,0	31,0	218056	32,0			5,90	0,236
40,0	5,0	45,0				1166	15,8	29,2	205963	31,4			5,48	0,219
	7,5	47,5	12,5	25,8	19,2	1366	15,8	31,7	255473	33,7	0,148	0,231	6,10	0,244
	10,0	50,0				1566	16,1	33,9	306124	35,8			6,73	0,269
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V		CONCRETO 25kN/m ³	

2.12 SOFTWARE UTILIZADO

O software utilizado para desenvolvimento desse trabalho foi o TQS, que é um software destinado a elaboração de projetos estruturais de edificações de concreto armado. É composto por um conjunto de sistemas que, de forma totalmente integrada e automatizada, fornecem recursos necessários para concepção estrutural, análise estrutural, dimensionamento e detalhamento de armaduras, geração de desenhos e emissão de plantas. (MANUAL DO TQS, 2021).

A determinação dos esforços nas lajes foi feita através da analogia de grelha, que é um método que transforma a análise de placas das lajes em uma análise de elementos do tipo barra.

Para utilização desse método de análise é necessário definir as características geométricas dos elementos estruturais, seus carregamentos, condições de apoio. A partir disso, o programa transforma os pavimentos analisados em grelhas. Além disso, é possível editar o espaçamento horizontal e vertical entre as barras da grelha, de acordo com cada necessidade, ligação entre os elementos, torção das barras, etc.

Outro ponto relevante é o fato do programa permitir considerar que os apoios da grelha, no caso os pilares, são elásticos, visto que transformar os pilares em apoios perfeitamente rígidos leva a picos de momento negativo que não são reais.

No entanto, considerar um modelo totalmente elástico é também uma consideração não condizente com a realidade. Dessa forma, o programa permite ainda uma plastificação, o que diminui a rigidez dos trechos de laje, fazendo com que os esforços migrem das regiões menos rígidas para as regiões com maior rigidez, como de fato acontece na realidade das estruturas de concreto armado, visto que o concreto fatura e o aço escoar. É possível fazer essa consideração de duas maneiras: Através da redução da rigidez a torção das barras da grelha ou através da redução dos momentos negativos nas regiões dos apoios.

O coeficiente de mola do apoio é definido de acordo com a seção do pilar, já o coeficiente de translação parte do módulo de elasticidade e área da seção, por fim, os coeficientes de rotação tem como base o módulo de elasticidade e o momento de inércia.

A grelha é processada e fornece resultados através de arquivos de texto e visualizadores gráficos. O método utilizado para esse processamento é uma análise matricial baseada no método dos deslocamentos.

3 METODOLOGIA

O estudo será realizado com base na planta de um pavimento de um edifício comercial denominado Bittar V, localizado no SHJB, Avenida das Paineiras, Quadra 7, lote E/F, bloco E. Jardim Botânico. Brasília – DF.

Para análise, dimensionamento e detalhamento da estrutura foi utilizado o software TQS. Além de comparadas entre si, as soluções encontradas foram comparadas também à solução já entregue e executada, em que o projeto estrutural foi realizado pela empresa PROEST (Projetos de Estruturas e Construção Civil), optando adotar pelo sistema de laje lisa nervurada com vigas faixa no eixo dos pilares.

3.1 PROJETO ARQUITETÔNICO PROPOSTO PARA ANÁLISE

O projeto escolhido para o estudo comparativo em questão foi um edifício composto por 2 pavimentos (térreo e pavimento superior), em que o projeto arquitetônico foi feito pelo escritório RR ROBERTO Arquitetos Associados. A edificação tem um total de 10 lojas, 2 elevadores, 12 banheiros, com uma área total construída de 2400 m². O corte esquemático do edifício está mostrado na Figura 33.

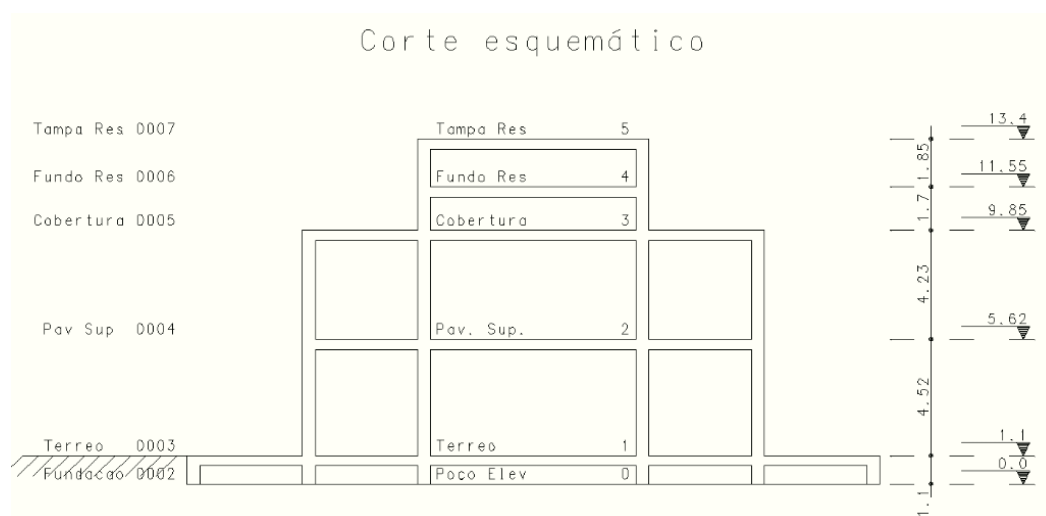


Figura 33. Corte Esquemático do edifício. (TQS, versão 2021).

A edificação em questão foi projetada e executada em concreto armado (lajes, vigas e pilares do pavimento superior) e a cobertura em estrutura metálica. O projeto estrutural completo foi realizado pela empresa PROEST- Projetos de Estrutura e Construção Civil LTDA e a execução da estrutura metálica pela empresa VITÓRIA-Metalúrgica e Construção Civil LTDA.

Atualmente a edificação está ocupada pelo Colégio Objetivo, como mostra a Figura 34.



Figura 34. Edificação em estudo executada e ocupada pelo Colégio Objetivo. (PROEST, 2020).

Para a comparação deste estudo utilizou-se a planta do pavimento superior como base. Esta possui 6 banheiros sendo 2 PNE, dois elevadores e dois espaços destinados à depósito.

A Figura 35 apresenta a planta de arquitetura do pavimento superior desse edifício. As dimensões estão cotadas em centímetros.

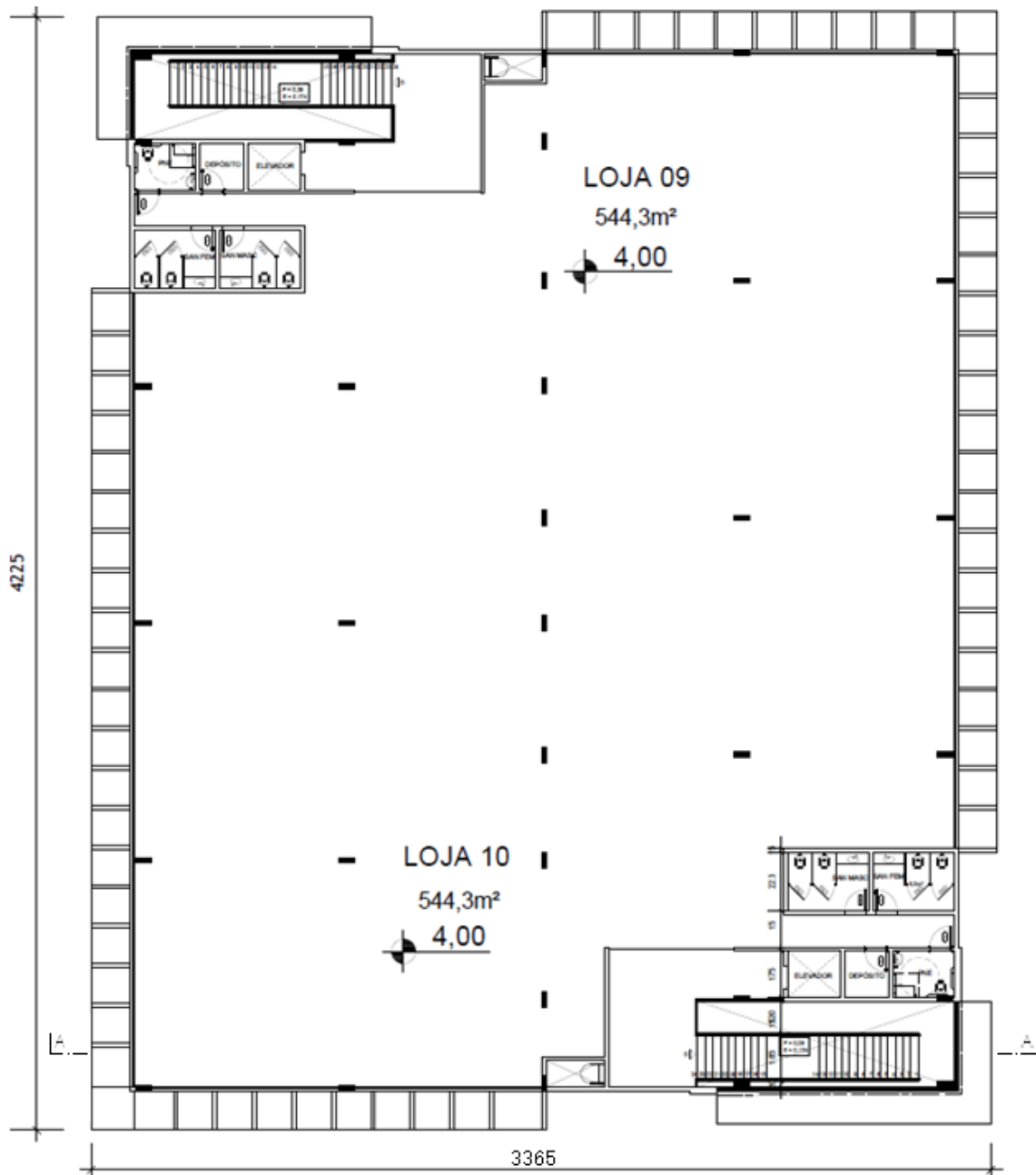


Figura 35. Planta de arquitetura do Pavimento Superior. (RR Roberto Arquitetura, modificada)

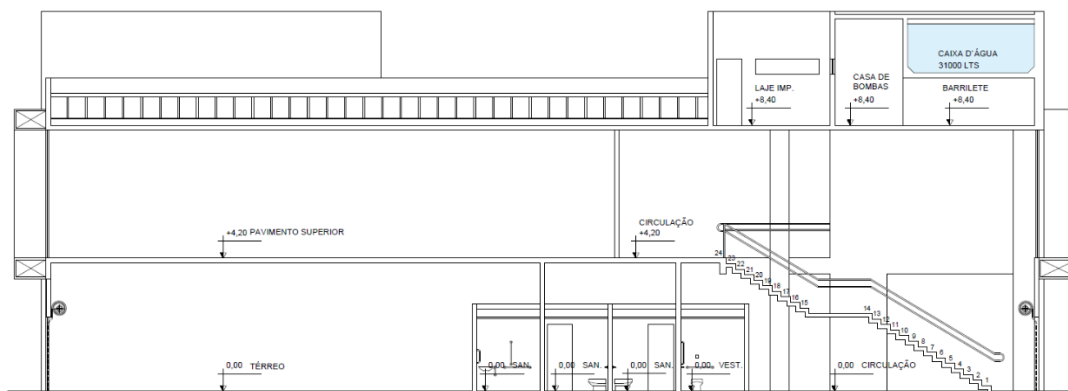


Figura 36. Corte AA da planta de arquitetura. (RR Roberto Arquitetura, modificada)

3.2 SOLUÇÃO PROPOSTA PELA PROEST

Na solução proposta pela PROEST, que é a solução em que foi executado o edifício, optou-se por fazer uma laje nervurada nas duas direções para o pavimento superior em estudo, com vigas faixas nas regiões dos pilares. Além disso, em algumas regiões pequenas utilizou-se lajes maciças apoiadas em vigas, como na região da escada. Devido aos vãos pequenos não foi necessário o uso de laje nervurada nessas regiões. Além disso, nas regiões dos banheiros utilizou-se laje lisa maciça visando facilitar a passagem de instalações. Esse método construtivo está apresentado no ANEXO I desse trabalho.

O concreto utilizado no projeto foi o de 25 MPa e o aço CA-50 e CA-60.

Utilizou-se 38 pilares com dimensões variando entre 20x50, 20x60, 25x35, 40x25, 25x60, 25x50, 25x35, 20x40 centímetros. Todos os pilares nascem na fundação e morrem na cobertura ou na laje da tampa do reservatório superior. Além disso, possui 6 montantes nascendo no pavimento superior.

A laje nervurada principal central adotada possui 43 centímetros de altura, as lajes maciças convencionais são de 15 cm nas partes internas e 20 centímetros nas marquizes. Já as vigas faixa possuem dimensão de 120x43 centímetros.

A Figura 37 abaixo mostra a solução adotada pela PROEST já executada, laje nervurada nas duas direções com vigas faixa. Como é possível observar, as nervuras não foram preenchidas com outro material, estas se encontram vazias, o que possibilita um peso próprio reduzido quando comparado à outros métodos, além disso optou-se por esse estilo visando fazer uma composição arquitetônica utilizando as nervuras aparentes.

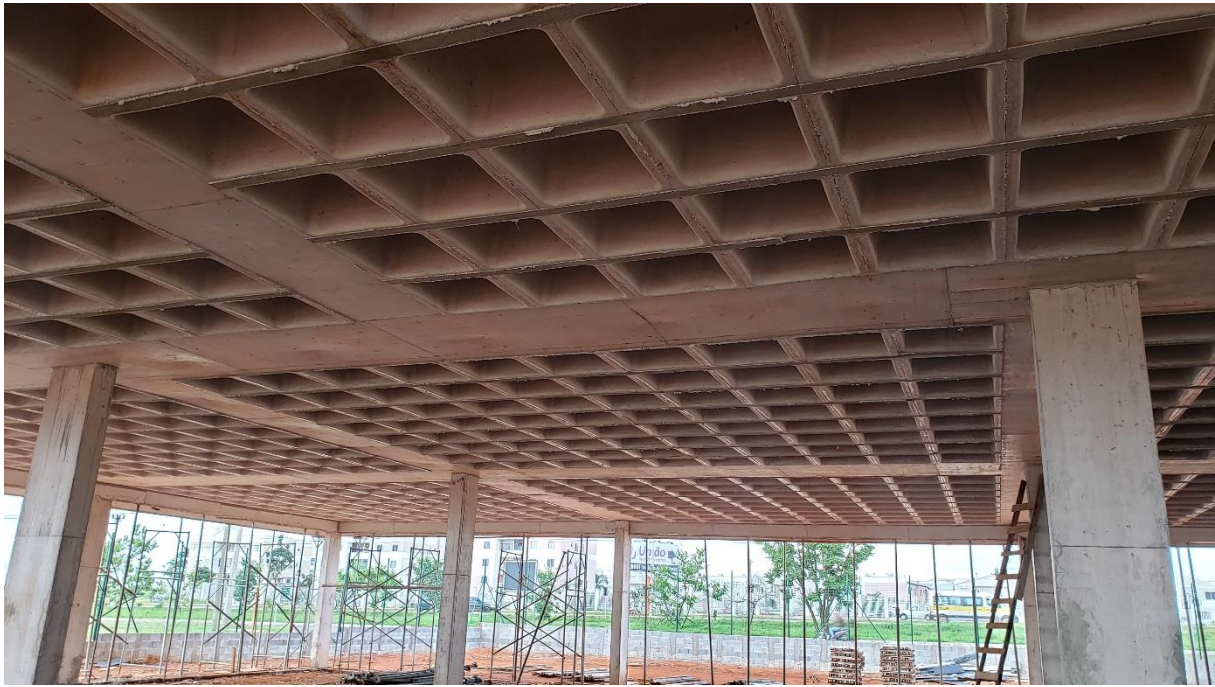


Figura 37. Solução com laje nervurada e vigas faixa executada. (PROEST, 2020).

A forma utilizada para construção da laje em questão foi ATEX 800 com abas iguais do catálogo ATEX mostrado anteriormente, de 80x80x35. Essa forma possui um volume por molde de 0,128 m³, espessura da capa de 8 cm e altura total da laje de 43 cm. Além disso, o peso próprio dessa laje é em torno de 563 kg/m³ e o volume de concreto utilizado é 0,225 m³/m². Esses dados estão mostrados com os valores arredondados na Figura 38 e Figura 39.

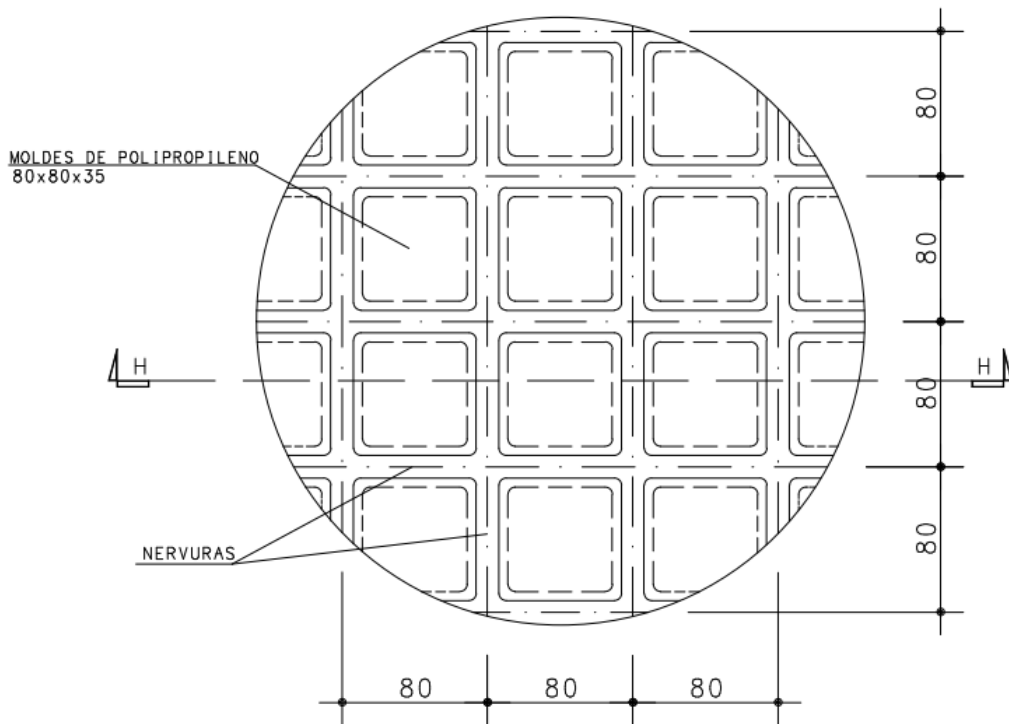


Figura 38. Laje nervurada em planta – Detalhe Genérico. (TQS, versão 2021).

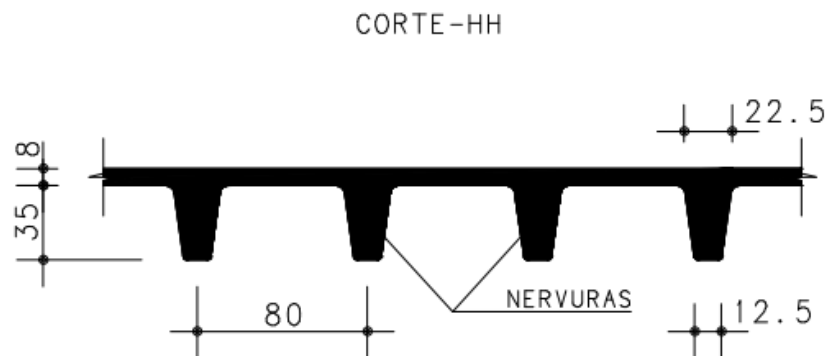


Figura 39. Corte HH – Vista em corte das nervuras da laje. (TQS, versão 2021).

3.3 SISTEMA ESTRUTURAL DA LAJE PROPOSTO PARA O ESTUDO

Com o objetivo de comparar à solução estrutural utilizada pela PROEST, foi proposto outras duas soluções estruturais para o pavimento superior do edifício. Uma em que se utiliza laje lisa maciça e outra com laje lisa nervurada sem vigas-faixa.

3.3.1 PROPOSTA COM LAJE LISA MACIÇA

Sendo a primeira solução estrutural a proposta pela PROEST (laje nervurada com vigas-faixa), a segunda proposta escolhida para realização da laje do pavimento superior foi com o uso de laje lisa maciça.

O pré-dimensionamento da laje maciça foi feito baseado no critério estabelecido pela ACI 318 (1983), em que utilizando aço CA-50, têm-se que:

$$h = \frac{l}{31}$$

Onde,

l = dimensão do maior vão (cm);

h = altura da laje (cm);

Na planta do pavimento analisado o maior vão possui aproximadamente 883,5 centímetros de comprimento. Sendo assim:

$$h = \frac{884}{31} = 28,5 \text{ cm}$$

Adotou-se então para essa laje um valor inicial de 29 centímetros de altura.

Uma pré-forma visando apresentar esse método construtivo está apresentado como ANEXO II no presente trabalho.

O concreto utilizado no projeto foi o de 25 MPa e o aço CA-50 e CA-60.

3.3.2 PROPOSTA COM LAJE LISA NERVURADA

A terceira proposta escolhida para realização da laje do pavimento superior foi com o uso de laje lisa nervurada, o que diferencia da primeira proposta é o fato da não utilização de vigas faixa nesse caso, apenas engrossamento na região dos pilares. É possível observar bem essa diferença na Figura 17.

O pré-dimensionamento da laje foi feito considerando a utilização do aço CA-50. Têm-se que:

$$h = \frac{l}{30}$$

Onde,

l = dimensão do maior vão (cm);

h = altura da laje (cm);

Na planta do pavimento analisado o maior vão possui aproximadamente 883,5 centímetros de comprimento. Sendo assim:

$$h = \frac{884}{30} = 29,5 \text{ cm}$$

Adotou-se então para essa laje um valor inicial de 30 centímetros de altura.

Para melhor visualização foi realizada uma pré-forma dessa proposta que está apresentada como ANEXO III.

O concreto utilizado no projeto foi o de 25 MPa e o aço CA-50 e CA-60.

3.4 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

Adotou-se como critério de comparação entre os 3 sistemas estruturais para a laje do pavimento superior manter o mesmo deslocamento para os vãos das lajes. Como os 3 modelos se comportam de maneira diferente e portanto seria inviável encontrar os mesmos deslocamentos em todos os vãos, optou-se por tomar alguns em específico como base e compará-los.

As alturas iniciais adotadas para os dois tipos de laje foram insuficientes para obter um deslocamento dentro do limite estabelecido pela NBR 6118:2014 e em um intervalo próximo ao da laje utilizada na edificação já construída. Dessa forma, foi necessário aumentar as alturas dessas lajes até atingir os valores de deslocamentos esperados, visto que não é possível alterar

outros parâmetros da estrutura pois a análise comparativa foi feita com um sistema estrutural já detalhado.

Segundo a NBR 6118, essa análise deve ser feita considerando a rigidez efetiva da seção, ou seja, considerando a presença de armadura, a existência de fissuras no concreto e as deformações diferidas no tempo. Além disso, a deformação real da estrutura depende também do processo construtivo e das propriedades dos materiais exatamente quando estas são solicitadas. Devido à essa grande variabilidade é extremamente difícil mensurar com precisão esses deslocamentos. Dessa forma, a norma sugere avaliações aproximadas a serem feitas.

A flecha imediata foi obtida através da combinação ELS-Quase permanente, combinação que mede o estado limite de deformação excessiva, considerando as cargas que podem atuar durante grande parte da vida útil da estrutura, (peso próprio + carga permanente + 0.6*carga acidental). O caso de combinação no software TQS que aborda esta análise é o Caso 26.

Além disso, é necessário acrescentar a parcela de carga referente a deformações diferidas no tempo e a fluência. Para isso, é possível calcular um coeficiente de ponderação através da fórmula da norma brasileira para flecha diferida no tempo:

$$a_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'} a_i$$

Tabela 19. Valores do coeficiente ξ em função do tempo. (NBR6118:2014).

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

Considerando que o escoramento será retirado 2 semanas após a concretagem e que o tempo final de análise da flecha é superior a 70 meses, temos:

$$\Delta\xi = \xi(70) - \xi(0,5) = 2 - 0,54 \approx 1,5$$

Dessa forma, a flecha final total é:

$$a_t = a_f + a_i = 1,5 \cdot a_i + a_i = 2,5 \cdot a_i$$

As deformações apresentadas foram obtidas com o auxílio do software TQS em que apresenta as flechas elásticas multiplicadas pelo coeficiente de ponderação 2,5 para chegar ao valor aproximado dos deslocamentos finais da estrutura considerando as deformações diferidas no tempo e a fluência.

Para análise comparativa, utilizou-se como parâmetro os deslocamentos na região indicada na Figura 40. Buscou-se manter esses valores em intervalos próximos ao da estrutura detalhada pela PROEST de modo a fazer uma análise com lajes de rigidezes aproximadas.

Os resultados dos deslocamentos do pavimento como um todo encontram-se em anexo para os três tipos de laje em estudo. Vale lembrar que buscou-se mantê-los em um intervalo de dimensões próximo de modo a fazer uma análise igualitária dos quantitativos de materiais desse pavimento.

Além disso, para melhor visualização da comparação dos deslocamentos, os valores referentes à região selecionada, como mostra a Figura 40, encontram-se expostos na Tabela 20. Nessa tabela a linha “deslocamento do modelo inicial” refere-se ao deslocamento da estrutura no modelo inicialmente adotado, enquanto a linha nomeada “deslocamento do modelo final” faz referência ao deslocamento da estrutura após as verificações necessárias para o dimensionamento. Sendo assim, os valores dessas duas linhas são iguais para os casos em que não foi necessário fazer alterações nas dimensões das vigas da estrutura na etapa de dimensionamento.

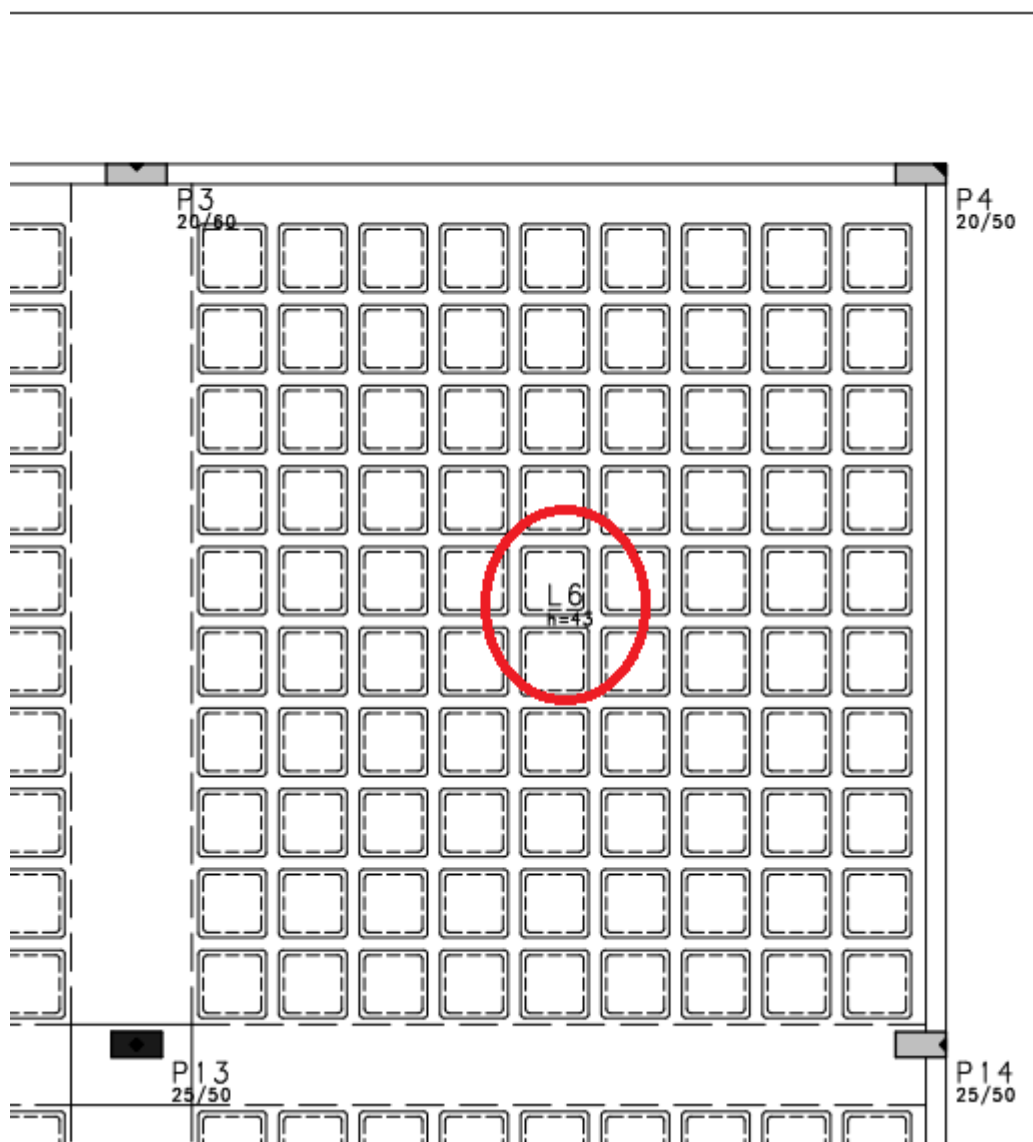


Figura 40. Indicação da região de análise dos deslocamentos em um dos vãos mais solicitados da laje. (TQS, versão 2021)

Tabela 20. Deslocamentos das lajes em estudo na região indicada.

Tipo de laje em estudo	Nervurada com vigas-faixa (PROEST)	Lisa maciça	Nervurada sem vigas-faixa
Altura total da laje (cm)	43,00	40,00	46,00
Deslocamento do modelo Inicial (cm)	1,52	1,47	1,52
Deslocamento do modelo Final (cm)	1,52	1,50	1,52

A Tabela 20 apresenta os valores nos pontos críticos de deslocamento na região da laje L6 indicada na Figura 40 para os 3 sistemas estruturais escolhidos para estudo. Inicialmente, teve-se como base uma flecha de 1,52 cm nessa região, referente ao deslocamento obtido através da análise do projeto detalhado pela PROEST.

Ao se utilizar uma laje maciça para o pavimento superior inteiro como análise, foi necessário uma espessura de 40 cm para obter valores de deslocamentos aproximados aos da estrutura utilizada como base (laje lisa nervurada com vigas-faixa nos eixos dos pilares). Ainda assim houve uma discrepância de aproximadamente 3% no valor de deslocamento obtido inicialmente, como pode ser observado na Tabela 20 e de aproximadamente 1,3% do valor de deslocamento final. Caso fosse utilizada uma laje com espessura menor, a flecha de estrutura seria maior, sendo ainda mais distante. Caso continuasse aumentando essa espessura, a flecha seria menor, ficando distante do valor utilizado como parâmetro. É preciso notar que a laje desse sistema estrutural possui um peso próprio maior que os demais, o que fez com que após o dimensionamento, algumas vigas nessa região precisaram ser aumentadas, o que tornou a estrutura mais rígida e reduziu o deslocamento nessa região, passando de 1,47 cm para 1,50 cm.

Já para a laje lisa nervurada sem vigas-faixa, somente com maciços ao redor dos pilares, foi necessário uma laje com altura total de 46 cm para obter deslocamentos exatamente iguais ao da laje utilizada como parâmetro inicial de comparação. Essa exigência por uma maior espessura para uma mesma flecha deve-se principalmente ao fato desse modelo não ter vigas ligando os pilares, o que torna a estrutura menos rígida. Como não houve alteração nas vigas no dimensionamento dessa estrutura, os deslocamentos analisados inicialmente se mantiveram.

3.5 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO SUPERIOR COM LAJE MACIÇA

Para análise quantitativa do pavimento detalhou-se as lajes e vigas seguindo as prescrições da ABNT NBR 6118:2014. Para isso utilizou-se o software TQS, obtendo os esforços através do modelo VI, em que é considerado o pórtico espacial completo, ou seja, com vigas, lajes e pilares integrados. Este modelo considera o peso próprio da estrutura, cargas permanentes e acidentais e ações provenientes do vento. Optou-se por utilizar o modelo VI principalmente devido ao fato de ter pilares nascendo na laje, o uso de outros modelos impossibilitaria o lançamento desses pilares diretamente sobre a laje e a análise da estrutura como um todo.

3.5.1 Dimensionamento da laje

Através das análises de deslocamentos descritos no item 3.4, a altura da laje maciça adotada foi 40 centímetros. É preciso observar que seguindo as prescrições da NBR 6118:2014, seria possível utilizar uma laje com espessura inferior, atendendo ao deslocamento máximo recomendado por esta. No entanto, como a intenção era manter os deslocamentos em intervalos aproximados ao da estrutura já detalhada, foi necessário aumentar essa dimensão, obtendo um deslocamento mais conservador quando comparado ao recomendado pela norma.

Através do parâmetro “Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas” da NBR 6118:2014, foi possível calcular uma área de aço mínima necessária para uma laje com essa espessura, obtendo como valor mínimo de armadura de flexão uma área de 6 cm²/m, optando por utilizar uma armação de base positiva de $\varnothing 10$ mm a cada 13 cm em toda a sua extensão, complementando com faixas de armação nos lugares críticos que requeriam uma maior área de aço.

A homogeneização das faixas de esforço negativo foi feita como recomenda a NBR 6118:2014 através do modelo de pórtico espacial. Em que as faixas externas ao pilar foram homogeneizadas com valores de aproximadamente $0,25 \cdot L$ e as faixas centrais em aproximadamente $0,5 \cdot L$, em que L é o comprimento total do vão.

Foi necessário também dimensionar a laje ao esforço de punção. Esse dimensionamento também foi feito como recomenda a ABNT NBR 6118:2014, optando por utilizar estribos de dois ramos, de $\varnothing 8$ mm e $\varnothing 10$ mm a depender do pilar. Além disso, posicionou-se armaduras para funcionar como porta estribos e adicionou-se armações contra o colapso progressivo, como preconiza a norma.

3.5.2 Dimensionamento das vigas

Para o dimensionamento das vigas utilizou-se os esforços provenientes do pórtico espacial, em que considera além das cargas permanentes e acidentais, a ação do vento. Para isso analisou-se as vigas a flexão composta normal, ao esforços cisalhantes e torções. Todas as vigas foram dimensionadas considerando os esforços de flexão, de cisalhamento e de torção.

Optou-se por manter a dimensão de quase todas as vigas, retirando as vigas-faixa, do projeto original. No entanto, devido ao elevado valor do peso próprio causar maiores esforços nas vigas, foi necessário aumentar a dimensão das vigas V2 e V21 para resistir principalmente aos esforços de torção, que estavam excessivos com as dimensões originais. Dessa forma, essas vigas passaram a possuir 35 cm de largura e permaneceram com 70 cm de altura.

3.6 DETALHAMENTO DO PAVIMENTO SUPERIOR COM LAJE NERVURADA SEM VIGAS-FAIXA

3.6.1 Dimensionamento da laje

Para o caso com laje nervurada e maciço nas regiões dos pilares, sem vigas-faixa, utilizou-se uma altura total de 46 centímetros, sendo 6 cm de capa e 40 cm de altura da nervura. Com essa espessura foi possível obter os valores de deslocamentos próximos aos estipulados como parâmetro de comparação, atendendo além das dimensões mínimas recomendadas pela ABNT NBR6118:2014, as recomendações da norma de incêndio e a acústica.

Utilizou-se uma armadura negativa distribuída na capa de $\phi 6,3$ mm a cada 12,5 cm, além disso concentrou-se nas nervuras armação negativa complementar e a armação positiva necessária para resistir aos esforços do pórtico espacial. A homogeneização foi realizada para regiões que possuíam esforços aproximados e portanto requeriam quantidades de aço com valores próximos.

Os maciços ao redor dos pilares foram dimensionados com armação de flexão com dobras nas duas direções e as faixas homogenizadas em valores de bitola e espaçamento únicos visando simplificar a execução na obra.

Ao realizar o dimensionamento à punção foi necessário aumentar o tamanho do maciço de quatro pilares para posicionar a armação exigida por norma. No P17 e P22 foi necessário retirar uma cabaça de cada lado e no P16 e P23 foi necessário retirar as meias cabaças posicionadas acima do maciço, alterando um pouco a concepção estrutural inicial, isso pode ser observado na Figura 41 e Figura 42. Para esse caso também utilizou-se estribos de dois ramos, sendo necessário apenas o uso de bitolas de $\phi 8$ mm.

A Figura 41 mostra uma parte da forma de laje lisa nervurada sem vigas-faixa com os tamanhos dos maciços ao redor dos pilares iniciais, ou seja, sem alterações. Já a Figura 42 mostra uma parte da forma da laje lisa nervurada sem vigas-faixa com os tamanhos finais dos maciços, ou seja, com as dimensões necessárias para posicionar a armação de punção como preconiza a norma.

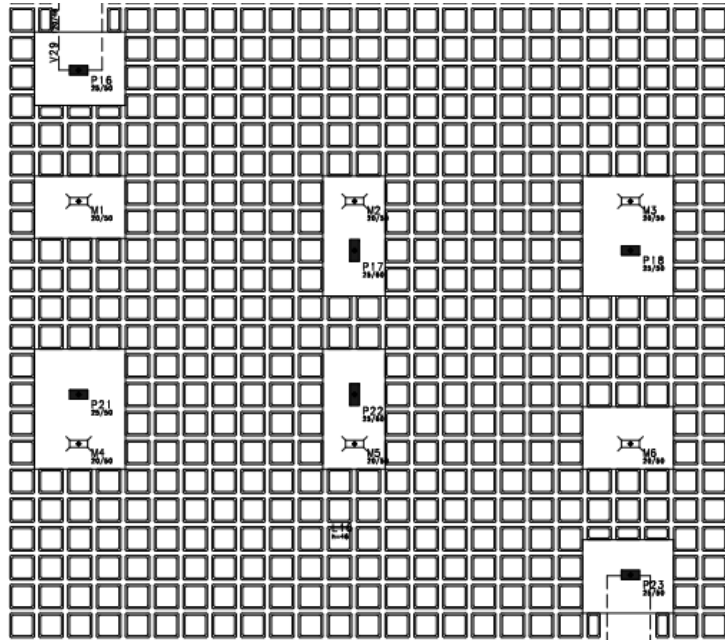


Figura 41. Recorte da forma antes da alteração do tamanho do maciço dos pilares P16, P17, P22, P23. (TQS, versão 2021).

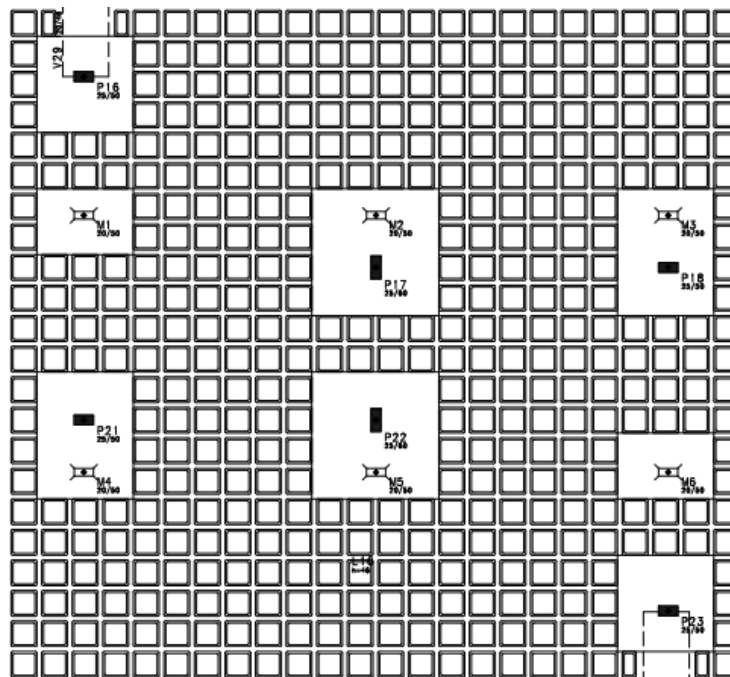


Figura 42. Recorte da forma depois da alteração do tamanho do maciço dos pilares P16, P17, P22, P23. (TQS, versão 2021).

Por fim, para esse tipo de laje foi necessário ainda fazer a verificação ao cisalhamento nas nervuras. Esse dimensionamento foi feito baseado nos esforços cortantes obtidos com o auxílio do software TQS, que encontram-se concentrados principalmente ao redor dos maciços dos pilares. Utilizou-se estribos de dois ramos, com bitolas de $\varnothing 5$, $\varnothing 6.3$, $\varnothing 8$ e $\varnothing 10$ mm à depender do esforço, espaçadas com 12 cm, buscando manter um padrão de distribuição.

3.6.2 Dimensionamento das vigas

Para o dimensionamento das vigas utilizou-se os esforços provenientes do pórtico espacial, em que considera além das cargas permanentes e acidentais, a ação do vento. Para isso analisou-se as vigas a flexão composta normal, aos esforços cisalhantes e torçores. Todas as vigas foram dimensionadas considerando os esforços de flexão, de cisalhamento e de torção.

Para esse caso foi possível manter as mesmas dimensões das vigas utilizadas no projeto inicial, de laje nervurada com vigas-faixa.

4 RESULTADOS

4.1 Quantitativos

Após o dimensionamento e detalhamento das lajes e vigas em estudo, foi possível obter os quantitativos dos materiais necessários para execução desse pavimento.

No item 4.1.1 está descrito detalhadamente as armações utilizadas nas lajes, divididas em: armações positivas horizontais, armações positivas verticais, armações negativas horizontais, armações negativas verticais, além de armações de punção e armações de cisalhamento, quando necessárias. Estão mostradas também, a quantidade total de aço obtida no detalhamento das vigas para os três tipos de análise.

Já no item 4.1.2 apresenta-se além dos quantitativos totais de aço para cada sistema estrutural em estudo, a quantidade de formas em m^3 e de concreto em m^3 .

4.1.1 Aço

Nesse item está detalhado a quantidade final de aço utilizado em cada planta do projeto, sendo exposto na coluna 2 a soma do aço CA 50 e CA 60, obtido após a análise dos esforços e o detalhamento de armadura do pavimento em estudo.

Tabela 21. Descrição da utilização do aço na laje nervurada com vigas-faixa.

Planta	Peso Aço (kg)	Consumo de Aço/m ³
Armação Positiva Horizontal	3648	16,61
Armação Positiva Vertical	3556	16,19
Armação Negativa Horizontal	3671	16,71
Armação Negativa Vertical	3209	14,61
Armação de Cisalhamento das nervuras da laje	502	2,29
Armação das Vigas	12399	104,61
Armação total do pavimento	26985	79,78

* O consumo de aço/m³ refere-se ao peso do aço dividido pelo total de m³ de concreto da laje, exceto no item “Armação das Vigas” em que esse volume refere-se ao volume total de concreto das vigas.

Tabela 22. Descrição da utilização do aço na laje lisa maciça.

Planta	Peso Aço (kg)	Consumo de Aço/m ³
Armação Positiva Horizontal	6548	14,02
Armação Positiva Vertical	6826	14,62
Armação Negativa Horizontal	8666	18,56
Armação Negativa Vertical	8517	18,24
Armação de Punção	2293	4,91
Armação das Vigas	13955	408,28
Armação total do pavimento	46805	93,41

* O consumo de aço/m³ refere-se ao peso do aço dividido pelo total de m³ de concreto da laje, exceto no item “Armação das Vigas” em que esse volume refere-se ao volume total de concreto das vigas.

Tabela 23. Descrição da utilização do aço na laje nervurada sem vigas-faixa.

Planta	Peso Aço (kg)	Consumo de Aço/m ³
Armação Positiva Horizontal	5302	18,70
Armação Positiva Vertical	5972	21,06
Armação Negativa Horizontal	4548	16,04
Armação Negativa Vertical	5867	20,69
Armação de Cisalhamento	1437	5,07
Armação de Punção	861	3,04
Armação das Vigas	10947	255,17
Armação total do pavimento	34934	107,00

* O consumo de aço/m³ refere-se ao peso do aço dividido pelo total de m³ de concreto da laje, exceto no item “Armação das Vigas” em que esse volume refere-se ao volume total de concreto das vigas.

Como mostra as Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23 a maior quantidade total (lajes+vigas) de armação ao se comparar os 3 casos foi com o uso de laje lisa maciça, isso deve-se principalmente ao fato da maior parte da laje ser preenchida por uma armação mínima que devido a espessura elevada da laje, 40 cm, resultou em uma alta área de aço, exigindo um uso de $\varnothing 10$ mm a cada 13 cm por toda a extensão da laje. Essa espessura também fez com que o consumo de aço/m³ não fosse o mais elevado dos 3 casos.

Apesar da laje nervurada sem vigas-faixa apresentar uma menor quantidade de armação de vigas como era esperado, esse sistema estrutural apresentou uma maior quantidade de armação total quando comparada a laje nervurada com vigas-faixa. Isso pode ser justificado considerando que para o caso da laje nervurada com vigas-faixa parte dos esforços foram combatidos pela armação dessas vigas enquanto para o caso de laje nervurada sem vigas-faixa esses esforços foram completamente combatidos pela armação da laje, o que resultou em altas taxa de armação principalmente no maciço ao redor dos pilares, região crítica de momento negativo. Além disso, a primeira situação proposta apresentou uma menor quantidade de armação de cisalhamento e não necessita de armação de punção. Por fim, a primeira situação apresentada foi detalhada por um projetista com maior experiência, o que levou a um menor consumo de aço/m³.

4.1.2 Quantitativos totais

Através de uma ferramenta do TQS denominada “Resumo de Plantas e Materiais” foi possível obter a quantidade final de materiais por pavimento. Dessa forma, nas tabelas a seguir estão expostas as quantidades de forma, concreto e aço que serão necessárias para execução do pavimento em estudo. A quantidade de aço foi obtida através da soma das armações descritas no 4.1.1.

É necessário considerar que o quantitativo do TQS para lajes nervuradas, no item formas, considera apenas as formas para vigas e lajes maciças, dessa forma, foi necessário adicionar a área dos maciços dos pilares aos quantitativos obtidos através do software. O quantitativo das formas de nervuras estão apresentados separadamente, com a quantidade de cubetas.

Tabela 23. Quantitativo final dos materiais da laje nervurada com vigas-faixa.

	Vigas	Laje	Total
Peso do Aço (kg)	12399,00	14586,00	26985,00
Volume de concreto (m³)	118,53	219,69	338,22
Área de formas (m²)	458,16	192,95	651,11
Quantidade de cubetas	-	1286	1286

*O item “ Total de Área de formas” engloba as formas utilizadas nas lajes maciças, vigas e vigas-faixa.

Tabela 24. Quantitativo final dos materiais da laje lisa maciça.

	Vigas	Laje	Total
Peso do Aço (kg)	13955,00	32850,00	46805,00
Volume de concreto (m³)	34,18	466,90	501,08
Área de formas (m²)	242,03	1237,24	1479,27

Tabela 25. Quantitativo final dos materiais da laje nervurada sem vigas-faixa.

	Vigas	Lajes	Total
Peso do Aço (kg)	10947,00	23987,00	34934,00
Volume de concreto (m³)	42,90	283,58	326,48
Área de formas (m²)	274,72	297,76	572,48
Quantidade de cubetas	-	1414	1414

*O item “Área de formas de Lajes” engloba as formas utilizadas nas lajes maciças e nos maciços ao redor dos pilares.

De posse desses quantitativos, de forma a facilitar a análise dos dados, foram construídos os gráficos da Figura 43, Figura 44 e Figura 45, em que apresentam o consumo dos materiais dos três sistemas estruturais em estudo.

4.1.2.1 Análise do Consumo de Aço

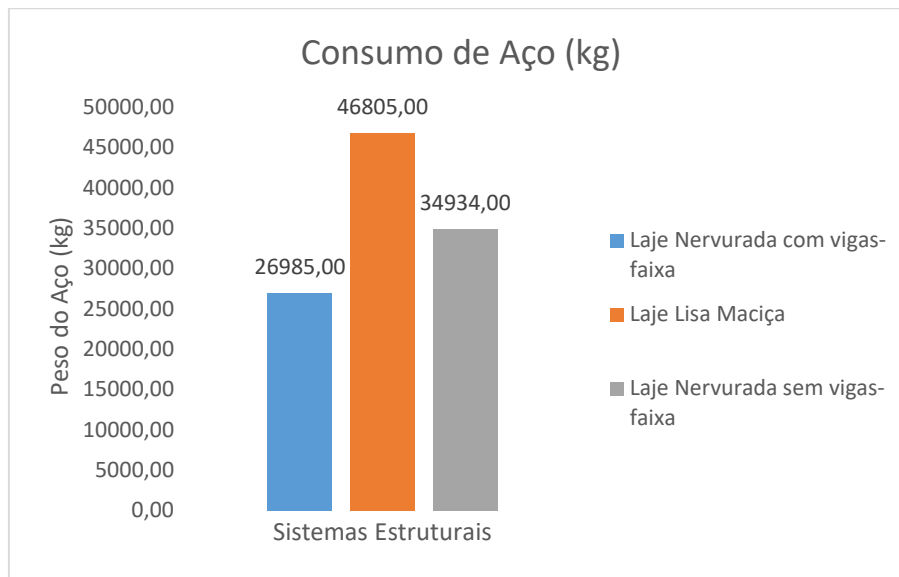


Figura 43. Consumo de Aço dos sistemas estruturais em estudo. (Autora, 2021)

Ao analisar o gráfico da Figura 43 é notório que o sistema estrutural com maior gasto de armação é o com laje lisa maciça, isso deve-se principalmente ao fato do peso próprio dessa laje ser alto, o que gera um aumento nos esforços da estrutura, como por exemplo flexão, torção, punção, tendo como consequência a exigência de uma maior taxa de armação para combater esses esforços. Além do fato da elevada espessura da laje exigir uma quantidade de armação mínima alta, distribuída por toda a laje, o que também leva à esse resultado.

Em segundo lugar encontra-se a laje nervurada sem vigas-faixa. Apesar do sistema estrutural com vigas-faixa apresentar uma maior quantidade de armação de vigas, o sistema estrutural com laje nervurada com maciço ao redor dos pilares apresentou um maior consumo de aço na laje, o que levou a essa maior quantidade total de armadura.

Por fim, o sistema estrutural com menor consumo de aço foi o sistema escolhido pela PROEST para construção desse pavimento, laje nervurada com vigas-faixa.

4.1.2.2 Análise do Consumo de concreto

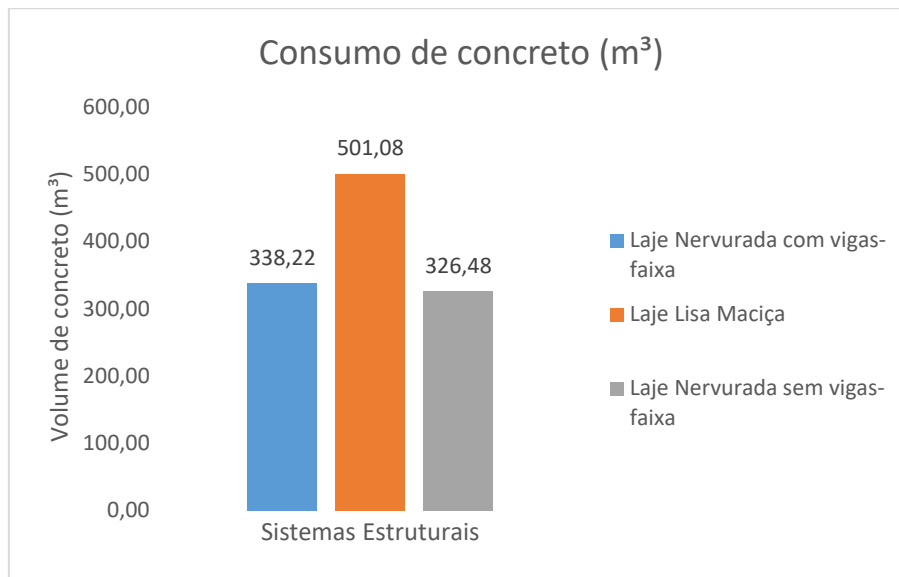


Figura 44. Consumo de concreto dos sistemas estruturais em estudo. (Autora, 2021)

Com relação ao consumo de concreto, como o esperado, o sistema estrutural com maior volume foi o de laje lisa maciça, isso deve-se ao fato de que essa laje possui 40 centímetros de espessura totalmente preenchida por concreto. É válido ressaltar que este sistema estrutural poderia ter sido escolhido utilizando uma laje com espessura menor e atendendo ao ELS de deformação excessiva, no entanto, visando manter os mesmos deslocamentos para os três sistemas estruturais em estudo, foi necessário utilizá-la com 40 centímetros de espessura.

Apesar do volume de concreto da laje nervurada com vigas-faixa ter sido menor quando comparado ao da laje nervurada sem vigas-faixa, o valor total de consumo desse material, somando laje e vigas foi maior do que para o segundo caso. Portanto, o consumo de concreto foi menor com o uso de laje nervurada com maciço ao redor dos pilares.

4.1.2.3 Análise do consumo de formas de lajes e vigas

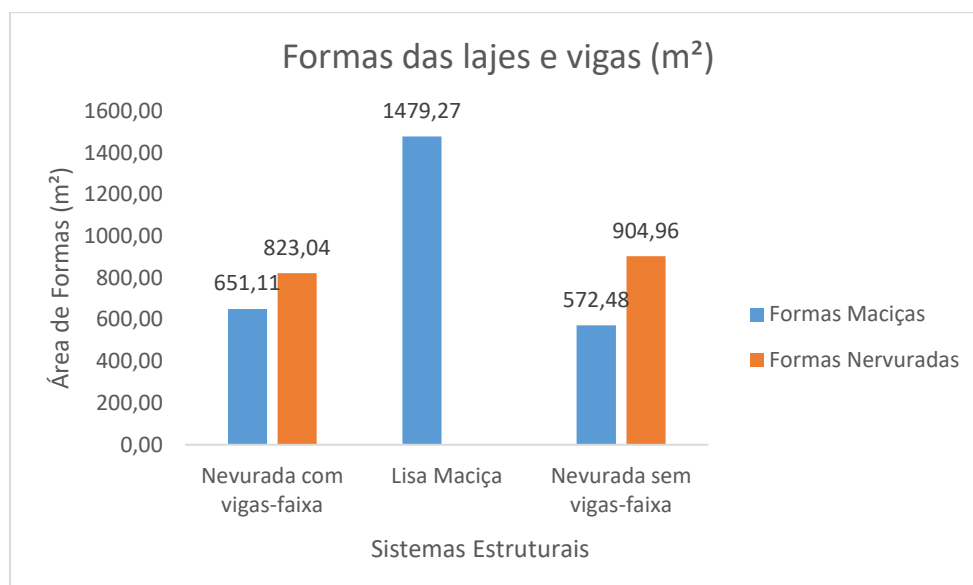


Figura 45. Quantitativo de formas dos sistemas estruturais em estudo. (Autora, 2021)

No gráfico da Figura 45 o tópico “Formas Nervuradas” é mensurado através dos valores da área ocupada pelas cubetas, de modo a comparar de maneira igualitária com as formas maciças.

Como é possível observar na Figura 45 a área de formas maciças, ou seja, englobando lajes maciças, vigas, vigas-faixa e maciço dos pilares, foi mais que o dobro para o caso do sistema estrutural em que se utilizou laje lisa maciça no pavimento inteiro. Entretanto, para esse sistema estrutural o consumo com cubetas, ou seja, formas nervuradas, foi nulo. Ao se comparar os dois sistemas estruturais em que se utilizou laje lisa nervurada, o consumo de formas maciças foi maior para o caso com vigas-faixa, visto que a área dessas vigas é maior quando comparadas a área dos maciço s dos pilares. A área de formas nervuradas foi maior para o sistema estrutural em que se utilizou laje nervurada sem vigas-faixa.

4.2 CUSTOS FINAIS

Os valores unitários utilizados foram cedidos pela construtora Tecna, considerando a construção em 2021. A composição desses preços unitários englobam material e mão de obra, incluindo o cimbramento. Sendo cotados em m³ para o concreto, m² para as formas e kg para o aço.

Para essa cotação considerou-se o uso de aço CA-50 e aço CA-60, concreto com $f_{ck}=25$ Mpa, formas em madeirite de 14 milímetros e cubetas ATEX 800. Para a estimativa do preço unitário do aluguel das cubetas considerou-se 30 dias, sendo 60 centavos o valor de cada uma por dia.

O preço da etapa referente à concretagem não varia de um sistema estrutural para outro, nem o do aço. No entanto, o preço das execução da formas varia de um tipo de laje para outro, além do fato da laje nervurada exigir o aluguel de cubetas, enquanto a laje lisa maciça não necessita dessa etapa.

Tabela 26. Custo do sistema estrutural constituído por laje nervurada com vigas-faixa.

Laje Nervurada com vigas-faixa				
Descrição do material	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total	% Custo
Aço (kg)	26985,00	R\$ 10,45	R\$ 281.993,25	56%
Concreto (m ³)	338,22	R\$ 382,83	R\$ 129.481,78	26%
Formas (m ²)	651,11	R\$ 106,55	R\$ 69.375,39	14%
Formas ATEX	1286	R\$ 18,00	R\$ 23.148,00	5%
TOTAL (R\$)			R\$ 503.998,42	100%

*O item formas engloba as formas das lajes maciças, das vigas e vigas-faixa.

Tabela 27. Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça.

Laje lisa maciça				
Descrição do material	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total	% Custo
Aço (kg)	46805,00	R\$ 10,45	R\$ 489.112,25	58%
Concreto (m ³)	501,08	R\$ 382,83	R\$ 181.807,82	23%
Formas (m ²)	1479,27	R\$ 106,55	R\$ 157.615,84	19%
TOTAL (R\$)			R\$ 828.535,91	100%

Tabela 28. Custo do sistema estrutural com laje nervurada sem vigas-faixa.

Laje Nervurada sem vigas-faixa				
Descrição do material	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total	% Custo
Aço (kg)	34934,00	R\$ 10,45	R\$ 365.060,30	63%
Concreto (m ³)	326,48	R\$ 382,83	R\$ 124.987,35	22%
Formas (m ²)	572,48	R\$ 106,55	R\$ 60.998,02	11%
Formas Atex	1414	R\$ 18,00	R\$ 25.452,00	4%
TOTAL (R\$)			R\$ 576.497,67	100%

*O item formas engloba as formas das lajes maciças, dos maciços ao redor dos pilares e das vigas.

Para uma visualização rápida dessa divisão de custos elaborou-se os gráficos da Figura 46, Figura 47 e Figura 48, em que se apresenta a porcentagem do custo total de cada componente para os 3 sistemas estruturais em estudo.

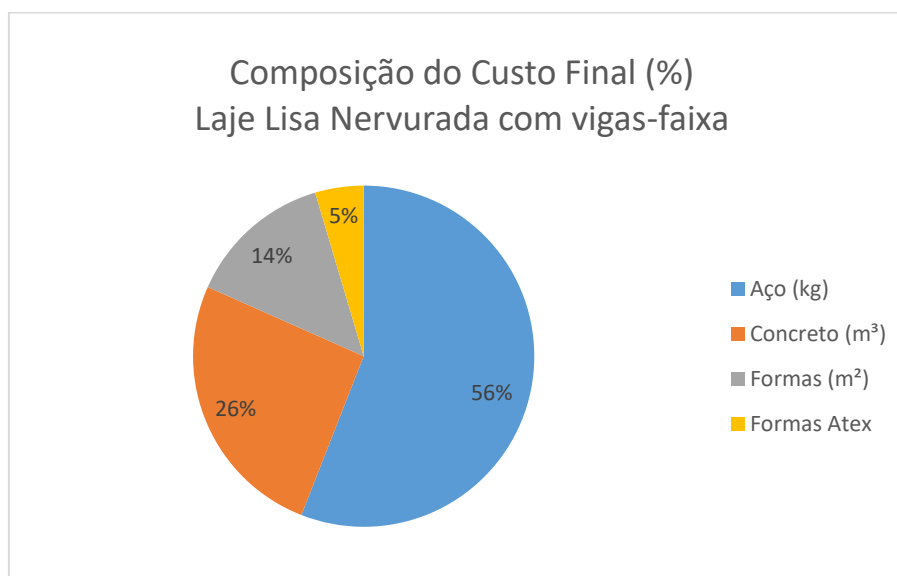


Figura 46. Composição dos custo final do sistema estrutural com laje lisa nervurada com vigas-faixa. (Autora, 2021)

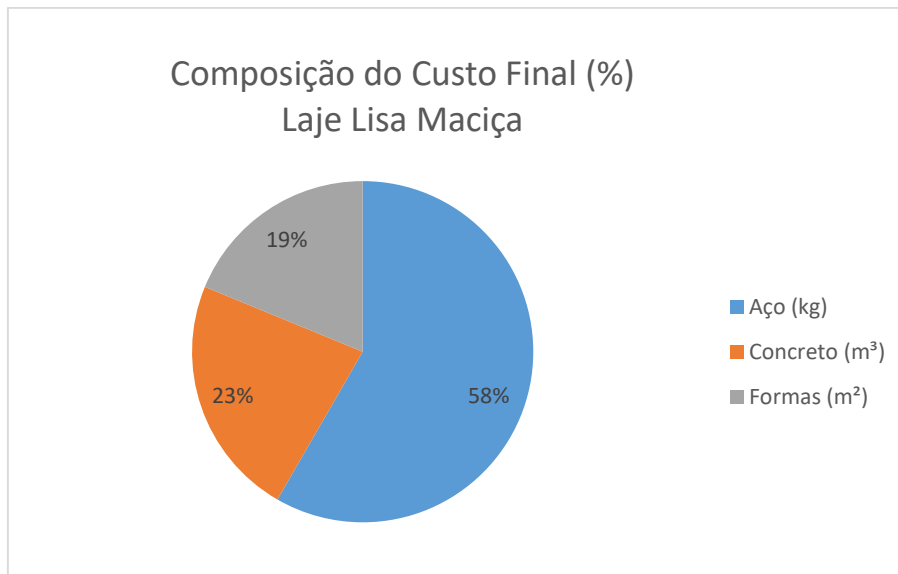


Figura 47. Composição dos custo final do sistema estrutural com laje lisa maciça. (Autora, 2021)

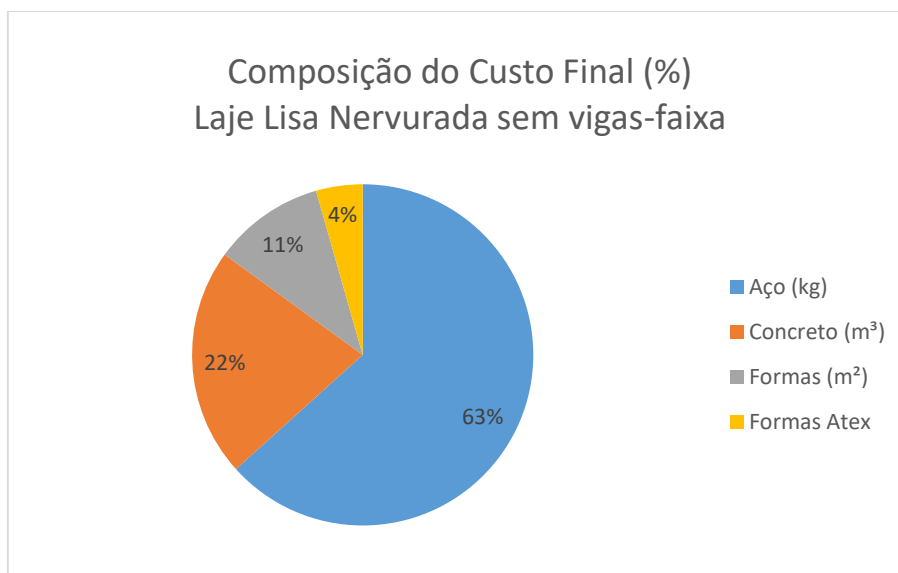


Figura 48. Composição dos custo final do sistema estrutural com laje lisa nervurada sem vigas-faixa. (Autora, 2021)

Ao analisar as figuras acima nota-se que nos custos totais a porcentagem maior do valor final é referente ao aço nos três casos, ou seja, um detalhamento minucioso buscando usar uma quantidade baixa de armação, desde que atenda aos requisitos exigidos, é de extrema importância, gerando uma economia considerável no valor final da construção. Em seguida têm-se o custo referente ao concreto e logo após as formas. O aluguel das cubetas corresponde a um valor pequeno quando comparado aos outros.

Para melhor visualização e comparação dos valores finais criou-se o gráfico da Figura 49 em que apresenta uma comparação do custo final dos 3 sistemas estruturais.

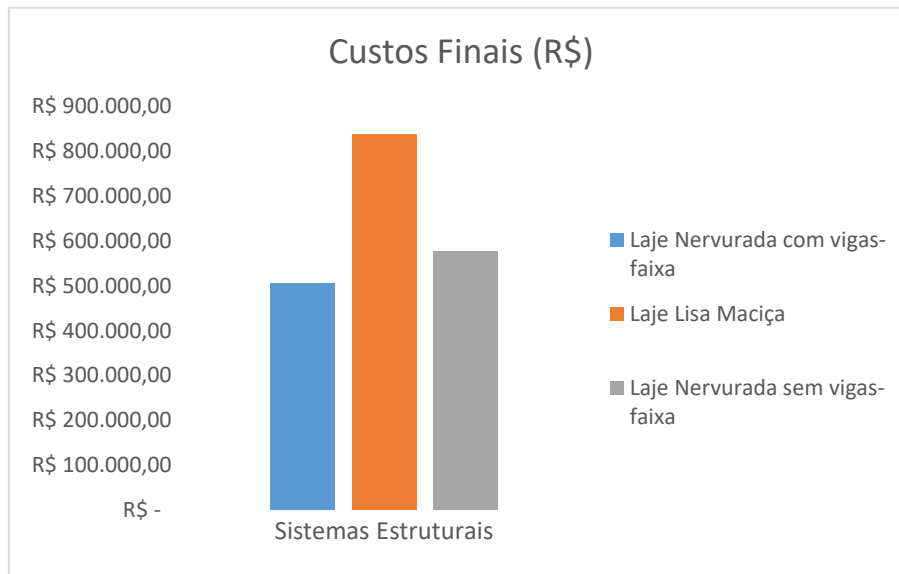


Figura 49. Custos finais dos três sistemas estruturais. (Autora,2021)

Com relação ao custo final, considerando que a maior parte do preço final é composta pelo valor da armação utilizada, o sistema estrutural mais caro para o pavimento em questão foi o em que se utilizou laje lisa maciça em toda a extensão do pavimento. Em seguida tem-se o sistema estrutural com laje lisa nervurada sem vigas-faixa e por último o sistema estrutural com laje lisa nervurada com vigas-faixa, sendo esse o sistema com menor custo final.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Ao se fazer um projeto estrutural é de extrema importância o conhecimento sobre a obra e o que está sendo solicitado. Além disso, conhecer o software utilizado e as diversas possibilidades de sistemas estruturais possíveis de serem usadas são outros fatores importantes.

O material e mão de obra das formas representa entre 10% e 20% do custo total da estrutura, representando um valor muito pequeno quando comparado ao valor do concreto e do aço. O custo do aço é o mais representativo na composição final do custo da estrutura, por isso é tão importante um bom detalhamento de armação, podendo reduzir significativamente os custos da obra.

Para a edificação em questão, a escolha do uso de uma laje maciça por exemplo, não seria a melhor opção economicamente pois gerou além de uma maior quantidade de concreto, uma maior quantidade de aço e de formas, o que leva a custo final extremamente alto quando comparado aos demais.

Os sistemas estruturais com laje lisa nervurada, mais utilizados atualmente, quando comparados entre si, não tiveram grandes diferenças no valor final. Sendo que o valor final do sistema estrutural com laje lisa nervurada sem vigas-faixa foi maior principalmente pela maior quantidade de armação utilizada nesse projeto. Isso pode ser justificado considerando a maior experiência dos projetistas que realizaram o detalhamento da laje nervurada com vigas-faixa.

O menor custo final foi o do sistema estrutural com vigas-faixa, sistema utilizado no projeto proposto pela PROEST. Apesar dessa opção exigir uma maior quantidade de concreto e formas, a quantidade de aço e cubetas são consideravelmente menores quando comparadas as demais, resultando em um preço final abaixo dos outros sistemas estruturais. Além disso, no quesito obra, considera-se esse sistema mais produtivo em alguns casos.

Sendo assim, concluiu-se que a solução estrutural mais econômica para o pavimento em questão foi de fato a escolhida pela empresa PROEST, laje nervurada com vigas-faixa.

5.2 Limitações

Utilizou-se nesse trabalho um projeto inicial já executado como parâmetro de comparação, o fato deste ter sido realizado por um escritório de cálculo com engenheiros com mais experiência pode ter gerado resultados diferentes devido as peculiaridades de cada engenheiro.

A busca por manter a rigidez dos três sistemas estruturais próximas, através da avaliação dos deslocamentos, tendo como base a flecha da estrutura já executada, fez com que a espessura das lajes dos outros dois sistemas estruturais ficassem acima do valor necessário caso considerasse apenas as prescrições normativas.

5.3 Sugestões

Como é um assunto muito amplo, sugere-se itens que podem ser estudados seguindo esse tema:

- Comparação com outros sistemas estruturais como bubbledeck e lajes protendidas.
- Comparação dos custos dos sistemas estruturais antes e depois da pandemia.
- Análise global da estrutura incluindo pilares e outros pavimentos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

CARVALHO, Roberto Chust., PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. V.2. São Paulo. PINI, 2009. 589p.

LEONHARDT, Fritz., MÖNNIG, Eduard. **Construções de concreto- Princípios Básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado**. V.3. Rio de Janeiro, INTERCIÊNCIA Ltda, 2007. 288p.

CARVALHO, Roberto Chust., FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado – Segundo a NBR 6118:2014**. 4.ed. São Carlos. EdUFSCar, 2014. 415p.

TRAUTWEIN, Leandro Mouta. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: Análise Experimental e Numérica**. São Paulo, 2016. 350p.

MONTEIRO, Victor., COELHO, A. Teixeira., LIMA, J. D'Arga e. **Manual de betão armado**. 5.ed. Lisboa, 1980. 460p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2012. 48p.

IBRACON. **ABNT NBR6118:2014 – Comentários e Exemplos de Aplicação**. São Paulo, 2015. 480p.

SILVA, Andréia Rodrigues da. **Análise comparativa de custos de Sistemas Estruturais para pavimentos de concreto armado**. Belho Horizonte, 2002. 211p.

CUNHA, Albino Joaquim Pimenta da., SOUZA, Vicente Custódio Moreira de. **Lajes em concreto armado e protendido**. Universidade Federal Fluminense, 1994. 584p.

SMIRIGLIO, Giovanni da Silva. **Análise comparativa de projeto de um pavimento, feito em lajes maciças convencionais e em lajes lisas**. Rio de Janeiro, 2015. 75p.

MÜLLER, André Buchmann., PORTO, Pedro Rezennde. **Análise Estrutural de um edifício de concreto armado, localizado no núcleo habitacional do Cafundá em Jacarepágua-RJ**. Brasília, 2019. 115p.

NEVES, Luís Filipe Costa dos Santos. **Comparação de modelos de grelha e de elementos finitos de laje na modelação de estruturas de edifícios de betão armado**. Lisboa, 2010. 86p.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. São Carlos, 2005. 239p.

GREGORIO, Graciele R. S. **Análise Comparativa entre Lajes Lisas Maciças e Nervuradas**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2017. 77p.

AGNOLETTO, Rodrigo Moacir. **Lajes Lisas: Comparativo de consumo de aço utilizando os métodos dos pórticos equivalentes e dos elementos finitos**. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

PAIVA, Luana Kívia Lima de. **Estudo comparativo entre sistemas estruturais com laje lisa maciça e lisa nervurada em um edifício comercial**. Universidade Federal de Alagoas, 2021. 149p.

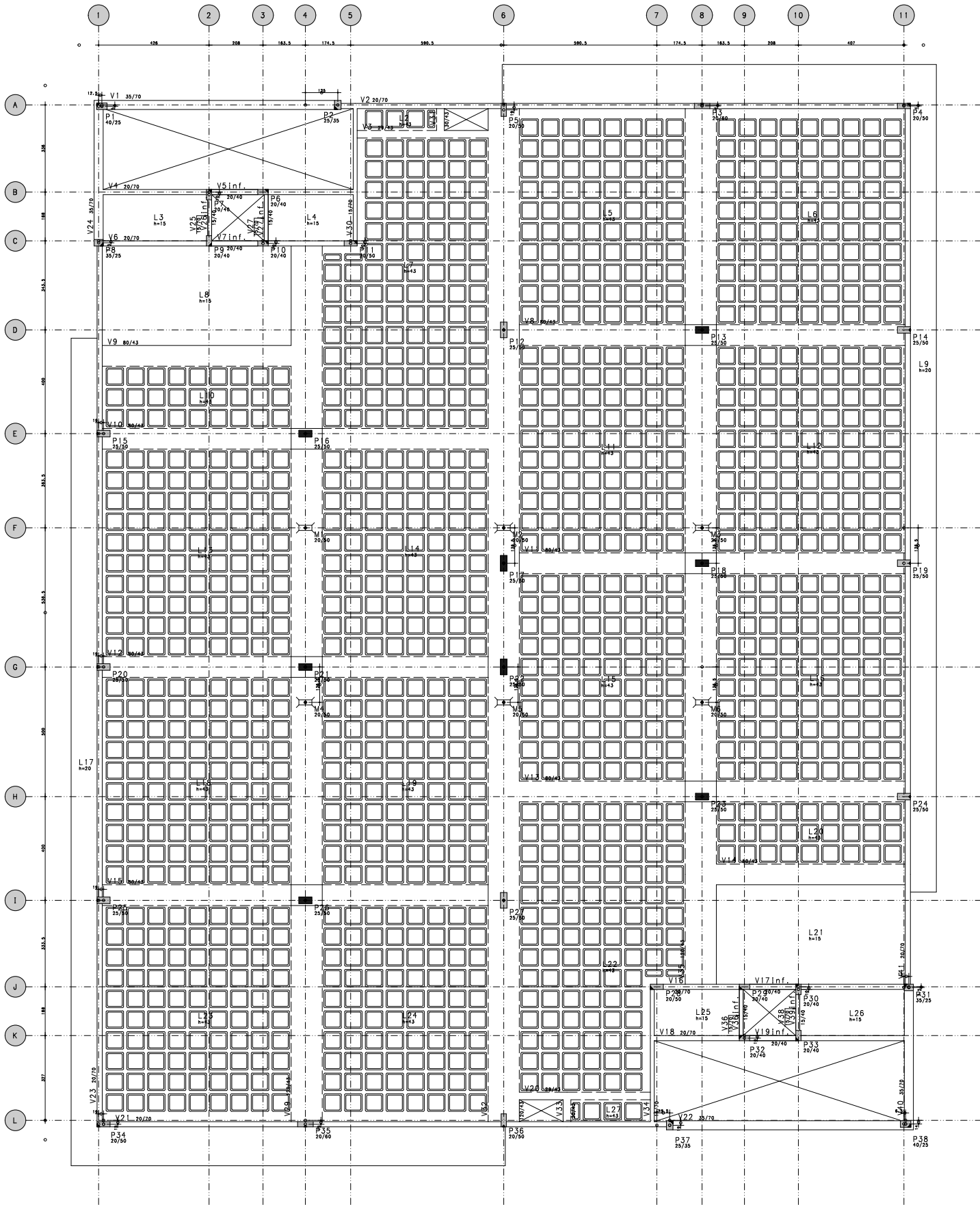
MARQUES, Eduardo Dias. **Análise Comparativa de um edifício de múltiplos pavimentos, com adoção de três diferentes tipos de lajes em concreto armado (Maciça, nervurada e treliçada)**. Palmas-TO, 2017. 56p.

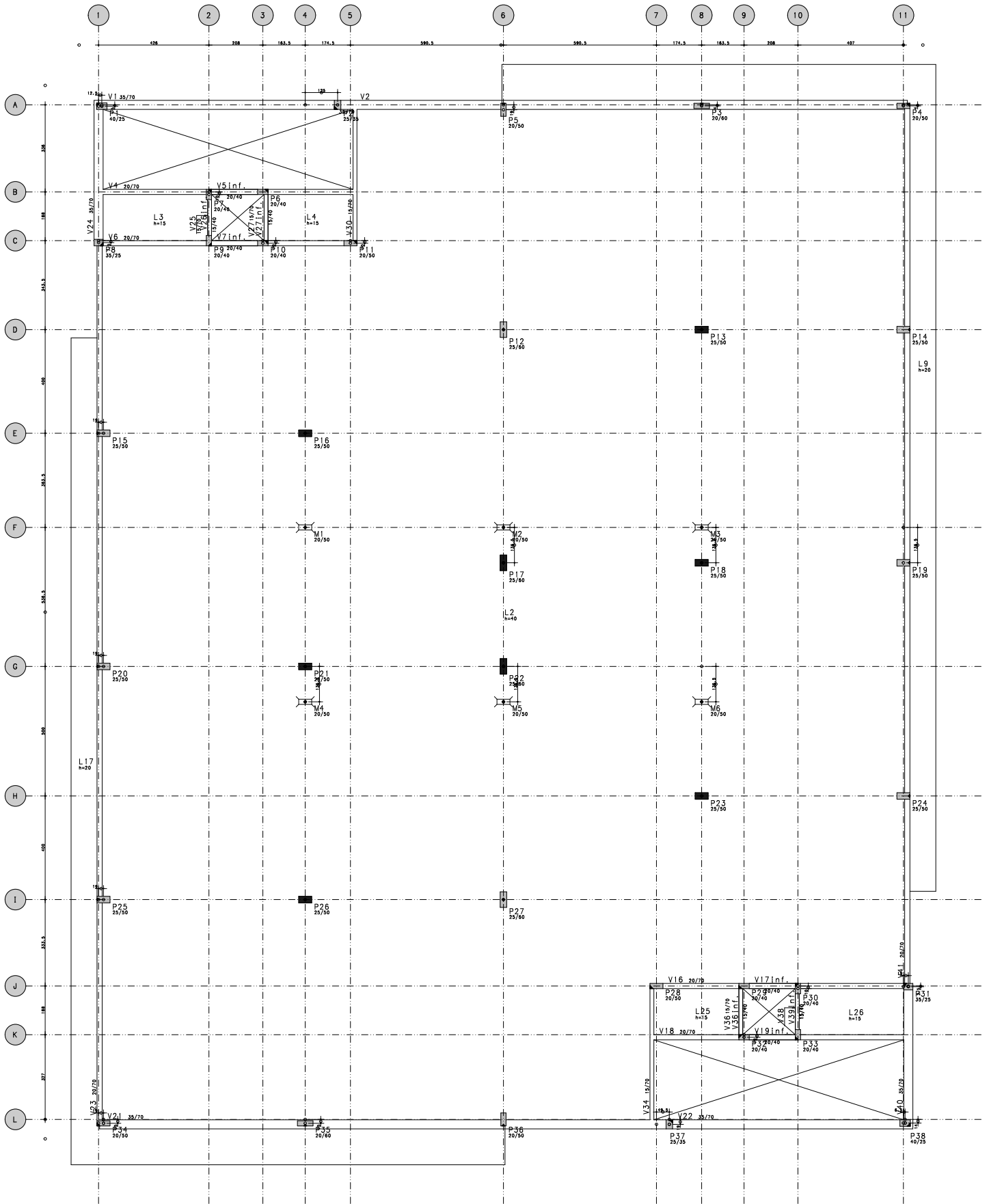
PEREYRON, Daniel., SANTOS, Jorge Luiz Pizzutti. **Laje nervurada: Análise da performance acústica para ruído de impacto**. Santa Maria-RS, 2007. 5p.

PINHEIRO, Libânio M., MUZARDO, Cassiane D., SANTOS, Sandro P. **Fundamentos do concreto e Projetos de Edifícios**. USP – EESC – Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos, 2007. 380p.

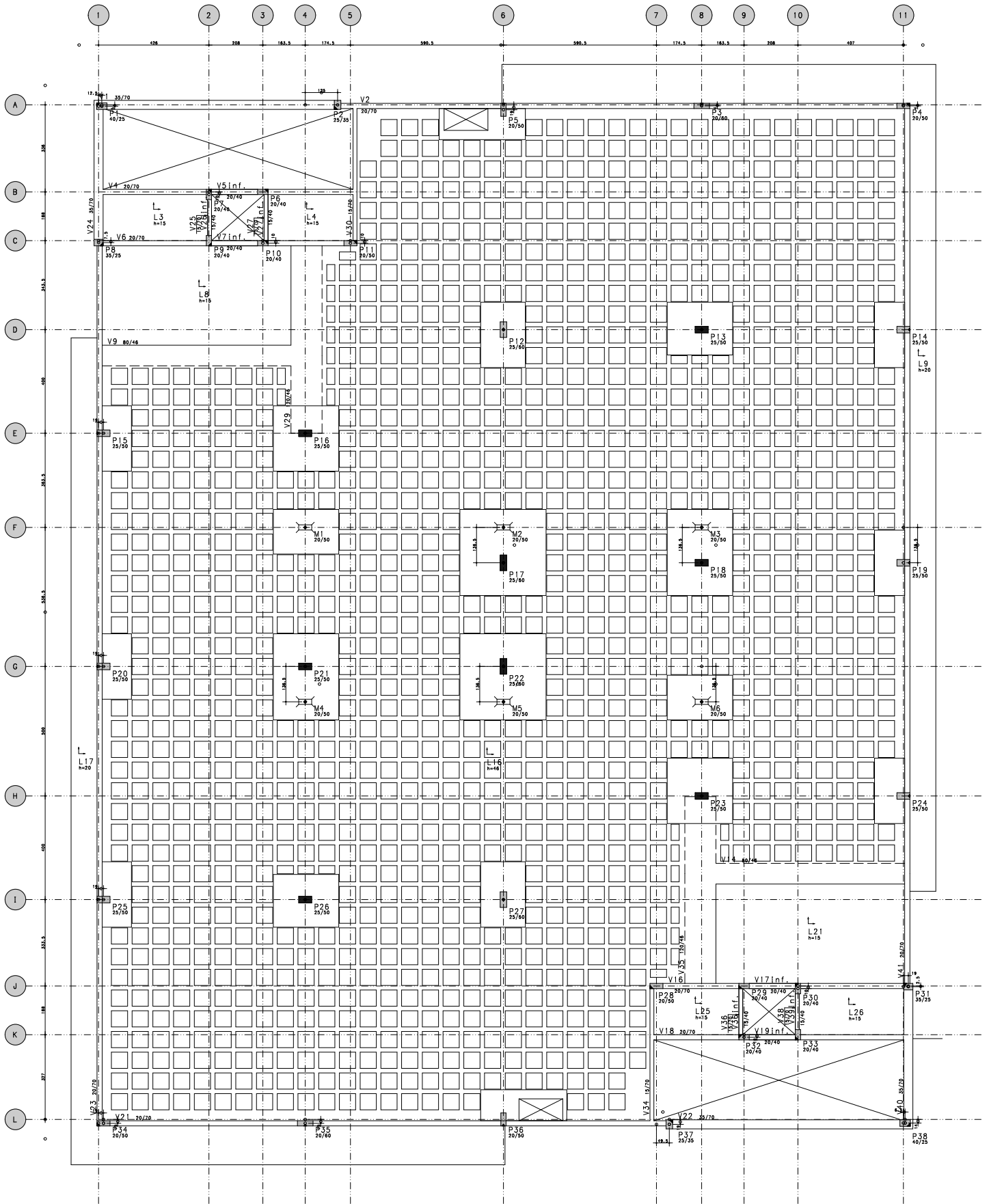
BASTOS, Paulo Sérgio. **Lajes de concreto Armado**. UNESP – Departamento de Engenharia Civil. Bauru - SP, 2021. 113p.

TQS INFORMÁTICA. **Manual de Análise Estrutural**. São Paulo, Versão 15.X.

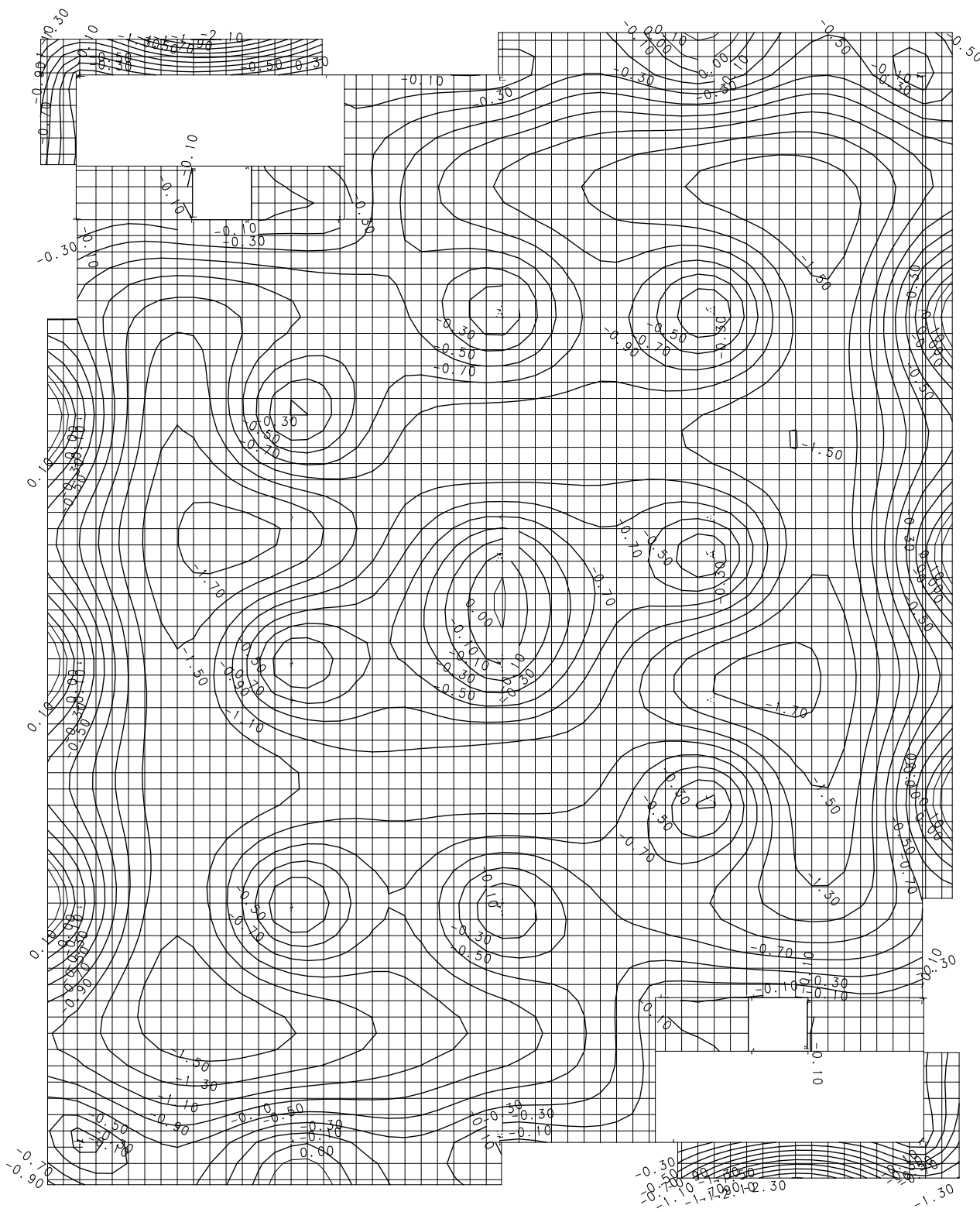




ANEXO II - FORMA DO PAVIMENTO SUPERIOR COM LAJE LISA MACIÇA



ANEXO III - FORMA DO PAVIMENTO SUPERIOR COM LAJE NERVURADA SEM VIGAS-FAIXA



ANEXO V - DESLOCAMENTO FINAL DA LAJE LISA MACIÇA

