



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS
ESTRUTURAIS – ESTUDO DE CASO**

LEANDRO GUEDES DE SOUZA

JOÃO PESSOA - PB

2018

LEANDRO GUEDES DE SOUZA

**ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS
ESTRUTURAIS – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba como requisito
parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira

JOÃO PESSOA - PB

2018

S729e Souza, Leandro Guedes de

Estudo comparativo de sistemas estruturais – Estudo de caso. / Leandro Guedes de Souza. – João Pessoa, 2018.

69f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Estruturas 2. Concreto Armado 3. Lajes Maciças 4. Lajes Lisas

FOLHA DE APROVAÇÃO

LEANDRO GUEDES DE SOUZA

ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS – ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso em 14/06/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Professor Dr. Enildo Tales Ferreira - Orientador
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Professor Dr. Carlos Antonio Taurino de Lucena
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Professor Dr. Primo Fernandes Filho
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof.^a Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Matrícula Siape: 1668619
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Dedico este trabalho aos meus sobrinhos (as):
Stephanie, Leonardo, Giovanni, Gabriela,
Letícia e Lívia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser a melhor fundação possível para que possamos erguer a estrutura das nossas vidas;

Agradeço aos familiares, em especial meus pais, Antonio e Josefa, irmãos Lúcia, Luiz e Luciano, pelo incentivo, educação e, sobretudo pelo amor transmitido em todos os momentos da minha caminhada;

Agradeço a Sabrina, minha companhia de todas as horas por caminhar comigo, sobretudo nos muitos momentos difíceis que enfrentei pra chegar até este momento;

Agradeço ao Professor Dr. Enildo Tales Ferreira pela dedicação e empenho, por ter sido além de meu orientador, um amigo que partilhou comigo as angustias e alegrias que este trabalho proporcionou;

Agradeço aos meus colegas de curso pelos muitos momentos partilhados, que fizeram com que a concretização deste sonho fosse mais fácil;

Agradeço a equipe de obra por me proporcionar aprendizados diários que complementam minha formação profissional e pessoal.

RESUMO

A busca por estruturas cada vez mais econômicas, com sistemas construtivos mais eficientes é uma tendência do setor da construção civil. Neste trabalho foi desenvolvida uma comparação entre quantitativo de materiais e custos de aço, concreto e forma entre 9 estruturas em concreto armado, variando o tipo de laje (maciça, nervurada e lisa) e a altura da edificação em 10, 20 e 30 pavimentos, mantendo-se a mesma distância entre eixos dos pilares para todos os casos – 7,5 m. Para o cálculo e dimensionamento das estruturas, foram observadas as recomendações normativas previstas na NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto e as normas de incêndio NBR 15.200/2012 – Projeto de estruturas de concreto em situações de incêndio e NBR 14.432/2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Após uma breve revisão bibliográfica sobre os sistemas estruturais abordados as estruturas foram modeladas em uma ferramenta computacional, obtendo-se desse software os resumos de quantitativos e custos de materiais. A partir dos resultados verificou-se que sistema constituído por lajes nervuradas apoiadas sobre vigas foi o mais econômico para as condições adotadas neste estudo, em todos os casos verificados.

Palavras chaves: estruturas; concreto armado; lajes maciças; lajes lisas; lajes nervuradas.

ABSTRACT

The search for more economic structures, with more effective constructions systems is a trend of the construction industry. In this work a comparison was made between quantity of materials and costs of steel, concrete and shape among 9 structures in reinforced concrete, varying the type of slab (massive, ribbed and smooth) and the height of the building in 10, 20 e 30 floors, maintaining the same distance between the axes of the pillars for all cases – 7,5m. For the calculations and dimensioning of structures, were observed the normative recommendation contained into NBR 6118:2014 – Design of concrete structures – Procedure, NBR 15.200/2012 – Fire design of concrete structures e NBR 14.432/2001 – Fire resistance requirements for building construction – Procedure. After a brief bibliographic review on the structural systems addressed, the structures were modeled in a computational tool, obtaining from this software the summaries of quantitative and material costs. From the results it was verified that the system constituted by ribbed slabs supported on beams was the most economical for the conditions adopted in this study, in all verified cases.

Keywords: structures; reinforced concrete; solid slabs; smooth slabs; ribbed slabs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema típico de laje maciça convencional.....	17
Figura 2 – Laje nervurada apoiadas em vigas	18
Figura 3 – Cimbramento típico de laje nervurada com cubetas	19
Figura 4 – Laje cogumelo.....	21
Figura 5 – Laje maciça lisa.....	21
Figura 6 – Armadura de punção	24
Figura 7 – Bitolas das armaduras dos pilares	34
Figura 8 – Bitolas das armaduras das vigas.....	34
Figura 9 – Bitolas das armaduras positivas e negativas das lajes.....	35
Figura 10 – Planta baixa adotada.....	37
Figura 11 – Isopletas de velocidade básica	40
Figura 12- Gráfico para cargas nos pilares – Modelos com 10 pavimentos.....	42
Figura 13 – Gráfico para cargas nos pilares - Modelos com 20 pavimentos.....	43
Figura 14 – Gráfico para cargas nos pilares - Modelos com 30 pavimentos.....	43
Figura 15 –Gráfico para flambagem.....	44
Figura 16 – Seções adotadas para lajes nervuradas	47
Figura 17 – Gráfico para pré-dimensionamento de lajes lisas.....	47
Figura 18– Plana baixa do pavimento tipo desenvolvida no Autocad	48
Figura 19 – Modelo 10.1.....	49
Figura 20 – Deslocamentos verificados no modelo 10.1.....	49
Figura 21 – Modelo 10.2.....	50
Figura 22 – Deslocamentos verificados no modelo 10.2.....	50
Figura 23 – Forma do pavimento tipo modelo 10.3	51
Figura 24 – Modelo 10.3	51
Figura 25 – Deslocamentos verificados no modelo 10.3.....	52
Figura 26 – Modelo 20.1.....	55
Figura 27 – Deslocamentos verificados no modelo 20.1.....	55
Figura 28 – Modelo 20.2.....	55
Figura 29 – Deslocamentos verificados no modelo 20.2.....	55
Figura 30 – Modelo 20.3	56
Figura 31 – Deslocamentos verificados no modelo 20.3.....	57

Figura 32 – Modelo 30.1	60
Figura 33 – Deslocamentos verificados no modelo 30.1.....	60
Figura 34 – Modelo 30.2	61
Figura 35 – Deslocamentos verificados no modelo 30.2.....	61
Figura 36 – Modelo 30.3	63
Figura 37 – Deslocamentos verificados no modelo 30.3.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Classificação das edificações quanto a sua ocupação.....	27
Tabela 2- Tempos requeridos de resistência ao fogo	28
Tabela 3 – Dimensões mínimas para lajes contínuas	29
Tabela 4- Dimensões mínimas para lajes nervuradas contínuas em pelo menos uma das bordas	29
Tabela 5– Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelo.....	30
Tabela 6 – Classe de agressividade ambiental (CAA)	32
Tabela 7 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	32
Tabela 8 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e o cobrimento mínimo.....	33
Tabela 9 – Nomenclatura adotada para as estruturas	38
Tabela 10 – Valores mínimos das cargas verticais.....	39
Tabela 11 - seção adotada para os pilares por número de pavimentos.....	44
Tabela 12 - Seções pré-dimensionadas para as vigas	45
Tabela 13 – Consumo de materiais e custos totais modelo 10.1	53
Tabela 14 - Consumo de materiais e custos totais modelo 10.2.....	53
Tabela 15 - Consumo de materiais e custos totais modelo 10.3.....	54
Tabela 16 - Consumo de materiais e custos totais modelo 20.1.....	58
Tabela 17 - Consumo de materiais e custos totais modelo 20.2.....	58
Tabela 18 - Consumo de materiais e custos totais modelo 20.3.....	59
Tabela 19 - Consumo de materiais e custos totais modelo 30.1.....	64
Tabela 20 - Consumo de materiais e custos totais modelo 30.2.....	65
Tabela 21 - Consumo de materiais e custos totais modelo 30.3.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Consumo de aço – 10 pavimentos.....	54
Gráfico 2: Consumo de concreto – 10 pavimentos.....	54
Gráfico 3: Consumo de forma – 10 pavimentos.....	54
Gráfico 4: Custos totais – 10 pavimentos.....	54
Gráfico 5: Consumo de aço – 20 pavimentos	59
Gráfico 6: Consumo de concreto – 20 pavimentos.....	59
Gráfico 7: Consumo de forma – 20 pavimentos.....	59
Gráfico 8: Custos totais – 20 pavimentos.....	59
Gráfico 9: Consumo de aço – 30 pavimentos.....	66
Gráfico 10: Consumo de concreto – 30 pavimentos.....	66
Gráfico 11: Consumo de forma – 30 pavimentos.....	66
Gráfico 12: Custos totais – 30 pavimentos.....	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo geral	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Lajes maciças convencionais.....	16
2.1.1 Prescrições da NBR 6118:2014 para lajes maciças quanto a espessuras mínimas	17
2.2 Lajes nervuradas com vigas.....	18
2.2.1 Prescrições da NBR 6118:2014 para lajes nervuradas quanto a dimensões mínimas.....	20
2.3 Lajes lisas	20
2.3.1 Prescrições da NBR 6118:2014 para lajes lisas quanto a espessuras mínimas	23
2.3.2 Prescrições da NBR 6118:2014 para lajes lisas quanto a armadura de punção	23
2.4 Pré-dimensionamentos	24
2.5 Algumas considerações sobre a NBR 15.575:2013 – Desempenho de edificações habitacionais	25
2.6 Algumas considerações sobre a NBR 14432:2001 Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento	26
2.7 Algumas considerações da NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.....	28
3 MATERIAIS	31
3.1 Concreto	31
3.1.1 Classe de agressividade	31
3.1.2 Resistência característica à compressão e cobrimentos mínimos.....	32
3.2 Aço	33
3.2.1 Diâmetros adotados para as barras e fios.....	34
3.3 Materiais de enchimento para lajes nervuradas	35
4 MÉTODOS.....	36

4.1 Software de cálculo	36
4.2 Modelos de estruturas adotadas	36
4.3 Cargas adotadas para o cálculo das estruturas	38
4.4 Velocidade do vento	40
4.5 Pré - dimensionamento de pilares	41
4.6 Pré-dimensionamento de vigas	44
4.7 Pré-dimensionamento das lajes maciças tradicionais	45
4.8 Pré-dimensionamento das lajes nervuradas com vigas	46
4.9 Pré-dimensionamento das lajes lisas	47
4.10 Lançamento e processamento das estruturas no software de cálculo	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1 Modelos com 10 pavimentos	49
5.2 Modelos com 20 pavimentos	55
5.3 Modelos com 30 pavimentos	60
6 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência do desenvolvimento de novos materiais em diversas áreas, surgem também novos métodos construtivos e soluções variadas para os desafios propostos em cada projeto. Em geral o avanço tecnológico na construção civil, além atender a eficiência global do segmento, visa também, aumentar a produtividade com diminuição dos custos relacionados ao consumo de materiais e mão de obra.

Embora exista grande pressão do mercado para a elaboração de projetos em tempos extremamente curtos, o projetista deve priorizar uma análise minuciosa e cautelosa das soluções que irá adotar para estrutura. Verificando se estas soluções são economicamente viáveis e se de fato atenderão com o mínimo de interferências possíveis no projeto arquitetônico.

O sistema convencional constituído por lajes maciças apoiadas em vigas tem sido utilizado em larga escala por diversos países o mundo. Trata-se de um sistema já consagrado no mercado por décadas de uso e mão de obra habituada a execução desse sistema. Existe, no entanto, um relativo gasto de tempo e dinheiro com a execução de formas, que apresentam diversos recortes, sobretudo na região de encontro de vias com lajes.

No entanto com o passar do tempo, para atender a demanda de vãos cada vez maiores a laje nervurada tem-se se mostrado como uma alternativa para atender aos ousados projetos arquitetônicos. Este sistema utiliza em geral algum tipo de material de enchimento e um sistema de escoramento que exige, algumas vezes, uma mão de obra especializada, e cuidados maiores com a execução. Destaca-se ainda que com a implementação de novas normas, inclusive as de desempenho de estrutura para atender as exigências de incêndio e ao conforto ambiental do usuário, aumenta-se as exigências de maior espessura para a capa da laje e de maior cobrimento para as nervuras, implicando em maiores consumos de materiais.

As lajes lisas por sua vez, não apresentam vigas, apoiando-se diretamente sobre pilares, diminuem o consumo de formas e agilizam o processo construtivo. Não necessita de mão de obra específica, pois o sistema de escoramento é similar ao tradicional com vigas. Em contrapartida são lajes que exigem em geral maiores espessuras para aumentar a rigidez da estrutura e a necessidade de armaduras de combate a punção.

Diante do que foi apresentado nota-se a relevância de se verificar a solução estrutural mais viável para um projeto arquitetônico sendo pertinente o seguinte questionamento: para

um determinado projeto arquitetônico de uma edificação modulada de vários pavimentos qual a solução estrutural que proporcionará maior economia?

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo de custos entre estruturas com três tipos de lajes (maciças, nervuradas e lisas) para edifícios residenciais com 10, 20 e 30 pavimentos. Objetivando identificar aquele que apresentará menores custos para o projeto arquitetônico proposto.

O estudo é composto por uma breve revisão bibliográfica sobre sistemas estruturais, seguida de algumas especificações de normas. No item seguinte abordou-se de modo sucinto os materiais e especificações normativas destes no decorrer do trabalho. A seguir apresentou-se a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos com os devidos comentários. Tem-se no último item as considerações finais seguidas de sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Objetivo geral

Mostrar a importância da relação entre a arquitetura e as soluções adotadas nas estruturas das edificações para os custos finais dos edifícios em concreto armado, por meio da utilização do software de cálculo estrutural, Eberick versão 2018.

1.2 Objetivos específicos

Comparar os quantitativos dos materiais e os custos finais de cada modelo adotado nas estruturas das edificações em concreto armado com a mesma distribuição interna de pilares em edifícios com 10, 20 e 30 pavimentos utilizando três soluções diferentes de lajes (maciça, lisas e nervuradas).

Apresentar as soluções mais econômicas para os modelos adotados das edificações com 10, 20 e 30 pavimentos considerando os custos de materiais e suas respectivas execuções.

Apresentar comentários sobre a viabilidade econômica das estruturas adotadas neste trabalho, considerando as exigências da NBR 15.575/2013 – Desempenho de edificações habitacionais e as normas de incêndio NBR 15.200/2012 – Projeto de estruturas de concreto em situações de incêndio e NBR 14.432/2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Após a elaboração de um projeto arquitetônico, inicia-se uma fase tão importante quanto à definição da arquitetura da edificação, a escolha da solução estrutural a ser adotada.

A concepção estrutural não é realizada de modo arbitrário, sem critérios, pois depende de materiais disponíveis, estética da edificação e do seu entorno, recursos disponíveis, dentre outros. Encontrar um equilíbrio entre todas essas variáveis é o que implicará em alternativas bem fundamentadas e inovadoras, REBELLO (2000).

O conhecimento teórico sobre estruturas, seus elementos estruturais básicos e o modo como esses são combinados para formar sistemas estruturais são de suma importância para o desenvolvimento de um projeto. Neste trabalho foram avaliados três modelos de sistemas estruturais, diferenciados apenas pelo tipo de laje empregado, sendo eles:

- a) Estruturas com lajes maciças apoiadas diretamente sobre pilares sem o uso de capiteis e vigas – Lajes lisas;
- b) Estruturas com lajes maciças apoiadas sobre vigas e essas apoiadas sobre pilares – Laje maciça tradicional;
- c) Estruturas com lajes nervuradas apoiadas sobre vigas e essas apoiadas sobre pilares – Laje nervurada com vigas.

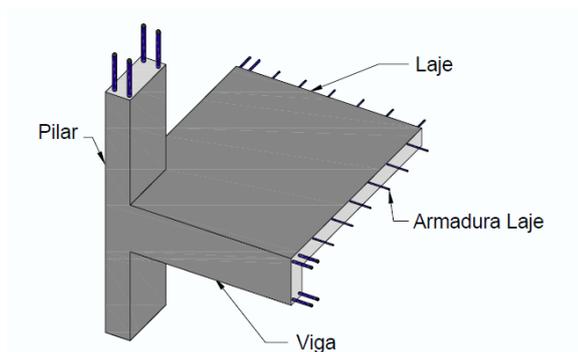
A seguir serão abordados em mais detalhes os tipos de lajes citadas acima, bem como algumas de suas vantagens e desvantagens.

2.1 Lajes maciças convencionais

ARAÚJO (2010a, p. 2) define laje maciça como sendo “... placas de espessura uniforme, apoiadas ao longo do seu contorno. Os apoios podem ser constituídos por vigas ou por alvenaria...”. Segundo o mesmo autor este sistema é usual dentre as edificações residenciais, sobretudo para pequenos vãos.

O sistema é constituído basicamente por lajes, vigas e pilares. Os carregamentos atuantes acrescidos do peso próprio dessas lajes são transferidos para as vigas que por sua vez descarregam os esforços nos pilares, Figura 1.

Figura 1- Esquema típico de laje maciça convencional



Fonte: Spohr (2003, p. 25).

A seguir listaram-se algumas vantagens e desvantagens desse sistema, segundo ALBUQUERQUE (1999, p. 21-23):

As principais vantagens:

- a) as vigas formam pórticos que contribuem para o contraventamento da estrutura;
- b) foi durante anos o sistema estrutural em concreto armado mais utilizado, fato que contribui para que a mão de obra esteja habituada com esse tipo de estrutura;

Principais desvantagens

- a) devido a quantidade de vigas há um considerável número de recortes nas formas, fato que aumenta o consumo de formas;
- b) os mesmos recortes citados no item anterior causam ainda uma redução na produtividade;
- c) elevado consumo de concreto, aço e formas;

2.1.1 Prescrições da NBR 6118:2014 para lajes maciças quanto a espessuras mínimas

Em seu item 13.2.4 a NBR 6118/2014 recomenda que devem ser respeitados os seguintes limites mínimos para a espessura:

- a) 7 cm para cobertura não em balanço;
- b) 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- c) 10 cm para lajes em balanço;
- d) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;

e) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN.

2.2 Lajes nervuradas com vigas

Nas estruturas onde são necessários grandes vãos a solução com laje maciça, seja com vigas ou sem, pode não ser a mais econômica. Para vencer grandes distâncias entre apoios utilizando lajes maciças em geral as espessuras necessárias para atender ao dimensionamento, inviabilizam a escolha desse tipo de sistema. Uma das alternativas é o uso de lajes nervuradas. Nesse sistema a zona de tração não se encontra na mesa da laje e sim nas nervuras.. Entre essas nervuras podem-se utilizar diversos materiais, entre os quais: blocos cerâmicos, EPS (poliestireno expandido) ou cubetas para servir de forma para o concreto da mesa da laje, tornando a estrutura mais leve, ARAÚJO (2010b, p. 177).

A retirada do concreto que se encontra entre nervuras, abaixo da linha neutra, conforme se percebe na Figura 2, proporciona uma diminuição no peso próprio, além de um melhor aproveitamento do aço e do concreto. As nervuras são responsáveis pela resistência à tração, desse modo os materiais inertes como os blocos cerâmicos ou de outro material qualquer não contribuem para a resistência, constituindo-se apenas como materiais de enchimento, PINHEIRO et al (2007).

Figura 2 - Laje nervurada apoiadas em vigas



Fonte: O autor

Observa-se além da redução do peso próprio da estrutura, uma economia de materiais e mão de obra. O sistema de escoramento torna-se, em geral, mais simples e conseqüentemente de execução mais rápida, proporcionando uma racionalização da execução conforme se mostra na Figura 3, PINHEIRO et al (2007).

Figura 3 - Cimbramento típico de laje nervurada com cubetas



Fonte: <https://www.ufrgs.br/eso/content/?tag=laje-nervurada>

Pode-se destacar dentre as vantagens das lajes nervuradas:

a) apresenta maior inércia se comparada às lajes convencionais, viabilizando vãos maiores e conseqüentemente menos interferências na arquitetura da edificação SPOHR (2008, p. 37);

b) maior facilidade na execução quando associado a um sistema de cimbramento industrializado, SPOHR (2008, p. 37);

c) economia de materiais e mão de obra, visto que não é necessário o assoalho da laje, construído em geral com maderites, conforme Figura 3, PINHEIRO et al (2007);

d) diminuição do peso próprio da estrutura, PINHEIRO et al (2007);

e) diminuição do tempo de execução da obra, em comparação ao sistema convencional, DORNELES (2014);

Embora seja um sistema com vários pontos positivos, pode-se destacar como aspectos negativos:

a) necessidade de mão de obra que conheça os sistemas de montagem do escoramento, bem como de armação das estruturas, DORNELES (2014);

b) necessidade de maiores cuidados durante a execução, devido a colocação dos blocos de enchimento e fixação de materiais, DORNELES (2014);

c) atenção especial durante a concretagem, sobretudo na região das nervuras, a fim de evitar a formação de vazios, DORNELES (2014);

2.2.1 Prescrições da NBR 6118:2014 para lajes nervuradas quanto a dimensões mínimas

A NBR 6118/2014 em seu item 13.2.4.2 faz as seguintes prescrições:

- 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 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 \varnothing maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de $4\text{ cm} + \varnothing$, ou $4\text{ cm} + 2\varnothing$ 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;

Segundo a mesma norma ainda no item citado acima se deve obedecer as seguintes condições:

a) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, 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;

b) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, 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 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;

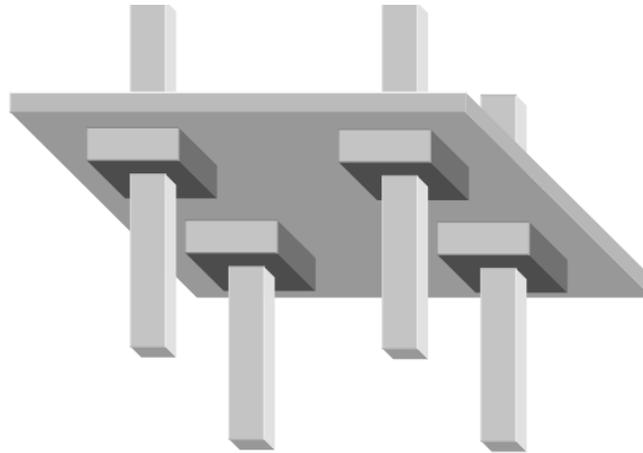
c) para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

2.3 Lajes lisas

De acordo com a NBR 6118/2014 “lajes lisas são apoiadas nos pilares sem capitéis.” O fato de não apresentar capitéis é que as diferencia das lajes cogumelo. De acordo com FUSCO (1995, p. 265), essas lajes à princípio apresentavam capitéis sobre os pilares, fato que originou o termo lajes-cogumelo. Com intuito, segundo ARAÚJO (2010b, p. 199) de se reduzir as tensões de cisalhamento, podem-se alargar e aumentar a espessura da laje no

entorno do topo dos pilares dando origem assim, ao surgimento dos capitéis, conforme a Figura 4 mostra a estrutura da laje lisa com cogumelo ou simplesmente, laje cogumelo.

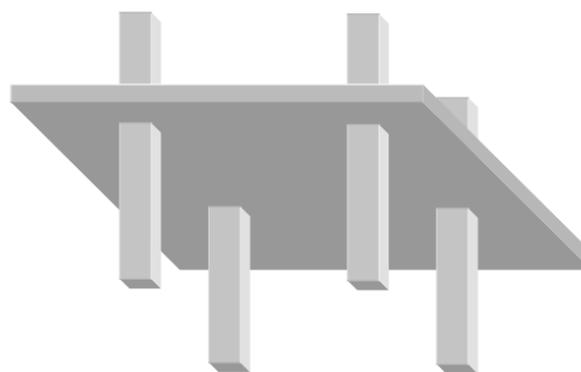
Figura 4 - Laje cogumelo



Fonte: Henrichs (2003, p. 25).

Devido a dificuldades de execução segundo ARAÚJO (2010b, p. 200) tem-se optado por não utilizar capitéis. Fato este, que se justifica devido à busca crescente de estruturas que apresentem execuções rápidas e com custos reduzidos. Com o uso de capitéis as estruturas além terem um tempo de execução de formas mais elevado consomem mais materiais e consequentemente acarretam maiores custos, Figura 4.

Figura 5- Laje maciça lisa



Fonte: Henrichs (2003, p. 25).

Quando se adotam lajes apoiadas diretamente sobre os pilares, as espessuras delas devem assegurar a resistência à punção e a flexão.

As bordas das lajes podem ser livres, ou estarem apoiadas sobre pilares ou ainda sobre apoios contínuos como as vigas situadas nas bordas ou em paredes, ARAÚJO (2010b, p. 200). Por simplificação, as lajes maciças lisas sem capiteis serão chamadas apenas de lajes lisas (Figura 5). Neste trabalho optou-se pela utilização de lajes maciças lisas sem capitéis com vigas de borda sem rigidez.

ARAÚJO (2010b) e FIGUEIREDO (1989) destacam algumas das vantagens do sistema estrutural com lajes lisas:

a) Simplificação das formas

- menor consumo de formas, pois não apresentam vigas;
- menos recortes nas formas do assoalho da laje e conseqüentemente menos desperdícios;

- maior índice de reaproveitamento das formas das lajes, pois são montadas e desmontadas com mais facilidade;

- menor incidência de mão de obra da carpintaria na execução;

- racionalização e padronização dos cimbramentos, pois apresentam tetos lisos com altura constante;

b) simplificação das armaduras

- redução das atividades de corte, dobra e montagem das armaduras, que acontecerão apenas nas armaduras de lajes e pilares; pois as vigas deixam de existir nesse tipo de modelo estrutural;

- redução de mão de obra dos armadores;

c) simplificação da concretagem

- diminuição dos locais onde poderiam apresentar falhas durante a concretagem, pois apresentam poucos recortes que dificultam o acesso de vibradores;

d) redução do pé-direito

- a ausência das vigas no interior da edificação permite uma redução do pé-direito da edificação que poderá inclusive apresentar maior número de pavimentos a depender da altura total da estrutura;

e) melhora na compatibilização dos projetos e simplificação das instalações

- por apresentar tetos livres, facilita a passagem de tubulações hidráulicas e sanitárias, conseqüentemente reduz o número de curvas, fios, tubos, conexões e furos na estrutura, acarretando redução de custos e promovendo maior rapidez na execução;

f) redução do tempo de execução

- devido às simplificações citadas acima nas etapas de carpintaria, armação e instalações.

As lajes lisas não devem ser empregadas em todas as situações. ARAÚJO (2010b, p. 200) destaca que quando não há regularidade na disposição de pilares a solução pode não ser econômica. Ressalta ainda que por não apresentar vigas a estrutura torna-se muito deformável frente às ações horizontais, fato que se agrava nos edifícios altos.

Para FIGUEIREDO (1989) há ainda as seguintes desvantagens:

a) punção das lajes

- um dos principais problemas das lajes lisas, dentre as soluções estão no uso de armadura específica e/ou o aumento das seções das lajes no entorno do pilar, o que acarretaria a formação dos capiteis;

b) deslocamentos transversais das lajes

- considerando uma mesma rigidez e mesmo vão, o deslocamento central das lajes sem vigas torna-se maior do que aquelas que as possuem;

c) instabilidade global da edificação

- principalmente nos edifícios esbeltos a ausência das vigas implica em maiores deslocamentos horizontais e conseqüentemente contribui para o aumento da instabilidade da estrutura. Dentre as alternativas para minimizar esses efeitos está à criação de núcleos rígidos através de paredes de concreto no foço do elevador ou nos vãos das escadas.

2.3.1 Prescrições da NBR 6118:2014 para lajes lisas quanto a espessuras mínimas

No item 13.2.4 a NBR 6118:2014 recomenda que devem ser respeitados os seguintes limites mínimos para a espessura das lajes lisas:

g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes – cogumelo, fora do capitel.

2.3.2 Prescrições da NBR 6118:2014 para lajes lisas quanto a armadura de punção

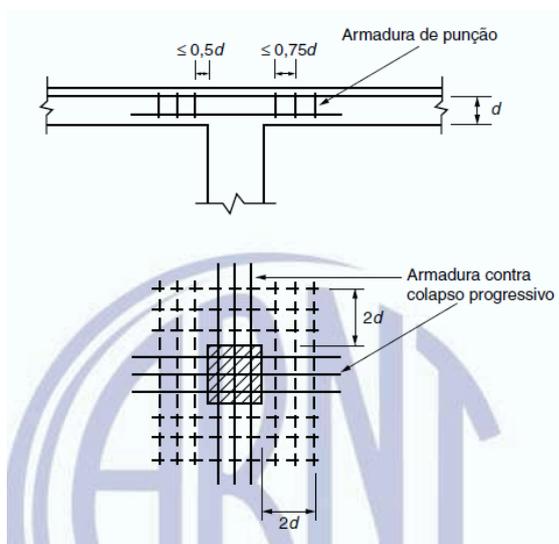
O item 20.4 da referida norma estabelece os critérios que devem ser observados no dimensionamento das armaduras de combate a punção, são eles:

a) Quando forem necessárias as armaduras para resistir a punção devem ser constituídas por estribos verticais ou conectores;

b) O diâmetro da armadura de estribos não pode ser maior que $h/20$ da laje, devendo haver contato mecânico das barras longitudinais com os cantos dos estribos;

A figura 20. 3 da norma mostra as regiões mínimas nas quais devem ser dispostas as armaduras de punção e as distâncias que devem ser obedecidas, aqui apresentada na figura 6.

Figura 6 – Armadura de punção



Fonte: NBR 6118:2014 – Figura 20.3

2.4 Pré-dimensionamentos

Uma das etapas do processo de dimensionamento das estruturas, independentemente do uso de software de cálculo ou não, é a etapa de pré-dimensionamento dos elementos estruturais.

Esta fase pode ter influência direta na concepção do projeto arquitetônico, pode-se citar como exemplo a influência da estrutura na criação das vagas de garagem onde o posicionamento dos pilares e suas dimensões devem ser compatibilizados com as vagas de estacionamento, MELO (2013).

O pré-dimensionamento pode ser realizado por fórmulas empíricas ou por métodos que utilizam gráficos com certa variação das dimensões levando em consideração parâmetros relacionados às condições de apoio, carregamento, número de pavimentos, dentre outros.

Dentre os autores que propõem métodos de pré-dimensionamento, REBELLO (2007) aborda uma série elementos estruturais, propondo métodos para lajes maciças, nervuradas, lisas (com e sem capitel), vigas contínuas, vigas bi apoiadas, vigas com balanço e pilares. Devido a variedade de elementos que os métodos do referido autor abordam, optou-se por segui-los como base para estimar as dimensões dos pilares, lajes e vigas deste estudo. Estes métodos serão abordados no item referente à metodologia, item 4.

2.5 Algumas considerações sobre a NBR 15.575:2013 – Desempenho de edificações habitacionais

Desde sua criação em julho de 2013 a Norma de desempenho das edificações habitacionais, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), trouxe novos parâmetros e ratificou normas anteriores, trazendo uma mudança conceitual sobre as exigências mínimas relacionadas à segurança e qualidade da construção civil.

As regras separam as responsabilidades segundo os envolvidos, desde os fabricantes dos materiais até os usuários do produto final, a edificação. A NBR 15.575:2013 é formada por seis partes:

Parte 1 – Requisitos gerais – define requisitos gerais da edificação quanto à habitabilidade, segurança estrutural, funcionalidade, acessibilidade, desempenho térmico, acústico e lumínico, bem como os métodos de avaliação desses e de outros parâmetros. Define ainda exigências do usuário e dos intervenientes (projetistas, construtores, incorporadores, e fornecedores de insumos e materiais). O item 4 merece destaque para o presente trabalho, em seu subitem:

4.2 Segurança

- segurança estrutural;
- segurança contra o fogo;

O destaque se justifica pelo fato de que todas as estruturas foram dimensionadas respeitando as exigências das normas:

- NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
- NBR 14432:2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento;
- NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.

As cinco partes restantes abordam os demais sistemas que compõem as edificações:

Parte 2 – Requisitos para os sistemas estruturais – enfoque nos requisitos relacionados a estabilidade e resistência estrutural, deformações, dentre outros;

Parte 3 – Requisitos para os sistemas de pisos;

Parte 4 – Sistemas vedações verticais internas e externas – SVVIE;

Parte 5 – Requisitos para os sistemas de cobertura;

Parte 6 – Sistemas hidrossanitários.

2.6 Algumas considerações sobre a NBR 14432:2001 Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento

Esta norma define as condições em que os elementos estruturais das edificações devem atender em situações de incêndio, de modo que seja evitado o colapso da estrutura. A observação desta norma é de suma importância, pois embora não sejam recorrentes os acidentes envolvendo colapso em estruturas de concreto armado devido a incêndios, quando esses ocorrem causam desastres de proporções irreparáveis.

A norma estabelece que as estruturas sejam dimensionadas de modo a atender ao tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). Esse tempo, segundo a NBR 14432:2001 é o “Tempo mínimo de resistência ao fogo, preconizado por esta Norma, de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão”.

As edificações residenciais multifamiliares se enquadram no grupo A, divisão A-2 conforme a Tabela B.1 da NBR 14432:2001 apresentada na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1– Classificação das edificações quanto a sua ocupação

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Descrição	Exemplos
A	Residencial	A-1	Habitações unifamiliares	Casas térreas ou assobradadas, isoladas ou não
		A-2	Habitações multifamiliares	Edifícios de apartamento em geral
		A-3	Habitações coletivas	Pensionatos, internatos, mosteiros, conventos, residenciais geriátricos
B	Serviços de hospedagem	B-1	Hotéis e assemelhados	Hotéis, motéis, pensões, hospedarias, albergues, casas de cômodos
		B-2	Hotéis residenciais	Hotéis e assemelhados com cozinha própria nos apartamentos (incluem-se apart-hotéis, hotéis residenciais)
C	Comercial varejista	C-1	Comércio em geral, de pequeno porte	Amarinhos, tabacarias, mercearias, fruteiras, butikues e outros
		C-2	Comércio de grande e médio portes	Edifícios de lojas, lojas de departamentos, magazines, galerias comerciais, supermercados em geral, mercado e outros
		C-3	Centros comerciais	Centro de compras em geral (shopping centers)
D	Serviços profissionais pessoais e técnicos	D-1	Locais para prestação de serviços profissionais ou condução de negócios	Escritórios administrativos ou técnicos, consultórios, instituições financeiras (que não estejam incluídas em D-2), repartições públicas, cabeleiros laboratórios de análises clínicas sem internação, centro profissionais e outros
		D-2	Agências bancárias	Agencias bancárias e assemelhados
		D-3	Serviços de reparação (exceto os classificados em G e I)	Lavanderias, assistência técnica, reparação e manutenção de aparelhos eletrodomésticos, chaveiros, pintura de letreiros e outros
E	Educativa e cultura física	E-1	Escolas em geral	Escolas de primeiro, segundo e terceiro graus, cursos supletivos e pré-universitário e outros
		E-2	Escolas especiais	Escolas de artes e artesanato, de línguas, de cultura geral, de cultura estrangeira e outras
		E-3	Espaço para cultura física	Locais de ensino e/ou práticas de artes marciais ginástica (artística, dança musculação e outros) esportes coletivos (tênis, futebol e outros que não estejam incluídos em F-3); sauna, casas de fisioterapia e outros
		E-4	Centros de treinamento profissional	Escolas profissionais em geral
		E-5	Pré-escolas	Creches, escolas maternas, jardins-de-infância
		E-6	Escolas para portadores de deficiências	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e outros
F	Locais de reunião pública	F-1	Locais onde há objetos de valor inestimável	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e outros
		F-2	Templos e auditórios	Igrejas, sinagogas, templos e auditórios em geral
		F-3	Centros esportivos	Estádios, ginásios e piscinas cobertas com arquibancadas, arenas em geral
		F-4	Estações e terminais de passageiros	Estações rodoviárias, aeroportos, estações de transbordo e outros
		F-5	Locais de produção e apresentação de artes cênicas	Teatros em geral cinemas, óperas, auditórios de estúdios de rádio e televisão e outros

Fonte: NBR 14432:2001- Tabela B.1

Para determinação do TRRF, a norma apresenta a Tabela A.1, mostrada aqui na (Tabela 2), onde se observa esses tempos em função da profundidade do subsolo (se houver) e da altura da edificação.

Tabela 2- Tempos requeridos de resistência ao fogo

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S ₂ h _s > 10 m	Classe S ₁ h _s ≤ 10 m	Classe P ₁ h ≤ 6 m	Classe P ₂ 6 m < h ≤ 12 m	Classe P ₃ 12 m < h ≤ 23 m	Classe P ₄ 23 m < h ≤ 30 m	Classe P ₅ h > 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Fonte: NBR 14432:2001- Tabela A.1

Para o caso das edificações residências multifamiliares na Tabela A.1 da norma, o TRRF assume valores entre 30 a 120 min, dependendo da altura do subsolo e/ou da edificação.

2.7 Algumas considerações da NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio

Esta norma faz um paralelo com a norma citada no item anterior, pois ela determina os critérios de projeto de estruturas de concreto armado a partir da classificação da edificação, bem como do TRRF prescrito na NBR 14432:2001.

A NBR 15200:2012 estabelece que os objetivos gerais para a verificação de estruturas em situação de incêndio são:

- a) limitar o risco a vida humana;
- b) limitar o risco da vizinhança e da própria sociedade;
- c) limitar o risco da propriedade corta fogo.

Para dimensionar as estruturas de modo que atendam aos requisitos estabelecidos na NBR 14432:2001, a NBR 15200:2012 estabelece alguns critérios de verificação da estrutura em situação de incêndio. Um dos métodos mais práticos é o método tabular, pois nesse

método basta atender às dimensões mínimas para a laje, recomendadas em tabelas, em função do tipo de elemento estrutural e do TRRF.

A seguir, observam-se nas tabelas de 7 a 10 da norma citada as dimensões mínimas para lajes maciças contínuas (Tabela 3), lajes nervuradas contínuas em pelo menos um vão (Tabela 4) e lajes lisas (Tabela 5):

Tabela 3 – Dimensões mínimas para lajes contínuas

TRRF min	h^a mm	c_1^b mm
30	60	10
60	80	10
90	100	15
120	120	20
180	150	30

^a Dimensões mínimas para garantir a função corta-fogo.
^b Válido para lajes armadas em uma ou duas direções.
^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: NBR 15200:2001- Tabela 7

Tabela 4- Dimensões mínimas para lajes nervuradas contínuas em pelo menos uma das bordas

TRRF min	Nervuras Combinações de b_{min}/c_1^a mm/mm			Capa ^b h/c_1 mm/mm
	1	2	3	
30	80/10			60/10
60	100/25	120/15	190/10	80/10
90	120/35	160/25	250/15	100/15
120	160/45	190/40	300/30	120/20
180	310/60	600/50		150/30

^a b_{min} corresponde à largura mínima da nervura ao nível do centro geométrico das armaduras.
^b h é a altura mínima da laje para garantir a função corta-fogo.
^c Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: NBR 15200:2001 – Tabela 10

Tabela 5– Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelo

TRRF min	h mm	c_1 mm
30	150	10
60	180	15
90	200	25
120	200	35
180	200	45

^a Os valores de c_1 indicados nesta tabela são válidos para armadura passiva. No caso de elementos protendidos, os valores de c_1 para as armaduras ativas são determinados acrescentando-se 10 mm para barras e 15 mm para fios e cordoalhas.

Fonte: NBR 15200:2001 – Tabela 8

3 MATERIAIS

Dentre os materiais mais utilizados na construção civil, estão o concreto e o aço, que quando associados formam o concreto armado. Os sistemas estruturais adotados neste estudo são formados por estes dois materiais, e as estruturas por eles construídas devem atender recomendações normativas, sobretudo a NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

3.1 Concreto

Mesmo não sendo tão resistente quanto o aço, esse material é amplamente utilizado na engenharia. MEHTA e MONTEIRO (2008, p.3) destacam três das principais razões para o uso desse material na construção civil:

- a) Excelente resistência à água, proporcionando sua utilização em estruturas para controle, armazenamento e transporte da água;
- b) Facilidade para executar estruturas de diferentes formas e tamanhos, devido a consistência plástica do concreto fresco, que possibilita o fluxo do mesmo no interior de formas;
- c) Baixo custo, normalmente, e rápida disponibilidade do material para a obra, visto que os principais componentes para produzir o concreto – água, agregado e cimento Portland – são encontrados em praticamente todos os países e de custo relativamente barato.

3.1.1 Classe de agressividade

Segundo a NBR 6118:2014, a agressividade do ambiente está associada às ações físicas e químicas que agem sobre as estruturas de concreto. Para classificar a agressividade ambiental adotaram-se os valores da Tabela 6, pois neste trabalho, foi utilizada a classe de agressividade ambiental II – Moderada, em razão da edificação ser considerada em zona urbana.

Tabela 6 – Classe de agressividade ambiental (CAA)

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

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

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

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

Fonte: NBR 6118:2014 – Tabela 6.1

3.1.2 Resistência característica à compressão e cobrimentos mínimos

Para garantir a durabilidade da estrutura na sua vida útil de projeto é necessário o atendimento a classe de resistência do concreto e a espessura do cobrimento das armaduras, conforme a Tabela 7 mostra essa correlação entre classe de agressividade e a qualidade mínima que o concreto deve apresentar:

Tabela 7 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118:2014 – Tabela 7.1

A resistência característica à compressão (F_{ck}) para a classe de agressividade ambiental II de acordo com a tabela 7.1 da norma NBR 6118:2014 é de no mínimo 25 MPa para elementos estruturais de concreto armado. Entretanto, considerando estruturas para

edificações entre 10 a 30 pavimentos adotou-se para todos os casos a resistência característica à compressão de 35 MPa para o lançamento das estruturas no software de cálculo estrutural. Para os cobrimentos observaram-se as recomendações indicadas na Tabela 7.2 da citada norma, mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e o cobrimento mínimo

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

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.
^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.
^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.
^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Para concretos de classe de resistência superior ao mínimo exigido, os cobrimentos definidos na Tabela 7.2 podem ser reduzidos em até 5 mm.

Fonte: NBR 6118:2014 – Tabela 7.2

Pelo fato de se ter adotado a resistência característica à compressão de 35 MPa, valor superior ao mínimo exigido, optou-se por seguir a sugestão proposta no item da parte inferior da Tabela 7.2 da norma, reduzindo assim os cobrimentos em 5 mm.

3.2 Aço

O concreto simples tem ruptura frágil e apresenta pequena resistência à tração, sendo adequada sua associação com o aço, que supre a ineficiência do concreto quanto à resistência a tração. Quando dimensionado e detalhado corretamente, o aço resiste à maioria das solicitações fornece ductilidade e aumenta à resistência a compressão do concreto armado, PINHEIRO et al (2007).

3.2.1 Diâmetros adotados para as barras e fios

Adotou-se neste trabalho o aço CA -60 para os fios de \varnothing 5mm e aço CA - 50, para as barras utilizadas nas armaduras longitudinais dos pilares (Figura 7) , das vigas (Figura 8) e das armaduras positivas e negativas das lajes (Figura 9).

Figura 7 – Bitolas das armaduras dos pilares

Longitudinais		Transversais	
<input type="checkbox"/>	8.0	<input type="checkbox"/>	3.2
<input checked="" type="checkbox"/>	10.0	<input checked="" type="checkbox"/>	8.0
<input checked="" type="checkbox"/>	12.5	<input checked="" type="checkbox"/>	10.0
<input checked="" type="checkbox"/>	16.0	<input type="checkbox"/>	12.5
<input checked="" type="checkbox"/>	20.0	<input type="checkbox"/>	16.0
<input type="checkbox"/>	22.2	<input type="checkbox"/>	4.2
<input type="checkbox"/>	25.0	<input checked="" type="checkbox"/>	4.6
<input type="checkbox"/>	32.0	<input checked="" type="checkbox"/>	5.0
<input type="checkbox"/>	40.0	<input type="checkbox"/>	6.0
		<input checked="" type="checkbox"/>	6.3
		<input type="checkbox"/>	7.0

Fonte: O autor

Figura 8 – Bitolas das armaduras das vigas

Longitudinais		Transversais	
<input type="checkbox"/>	6.3	<input type="checkbox"/>	3.2
<input checked="" type="checkbox"/>	8.0	<input checked="" type="checkbox"/>	8.0
<input checked="" type="checkbox"/>	10.0	<input checked="" type="checkbox"/>	10.0
<input checked="" type="checkbox"/>	12.5	<input type="checkbox"/>	12.5
<input checked="" type="checkbox"/>	16.0	<input type="checkbox"/>	16.0
<input checked="" type="checkbox"/>	20.0	<input type="checkbox"/>	4.2
<input type="checkbox"/>	22.2	<input checked="" type="checkbox"/>	4.6
<input type="checkbox"/>	25.0	<input checked="" type="checkbox"/>	5.0
<input type="checkbox"/>	32.0	<input checked="" type="checkbox"/>	6.0
<input type="checkbox"/>	40.0	<input checked="" type="checkbox"/>	6.3
		<input type="checkbox"/>	7.0

Fonte: O autor

Figura 9 – Bitolas das armaduras positivas e negativas das lajes

Longitudinais			Transversais		
<input type="checkbox"/>	3.2	<input checked="" type="checkbox"/>	8.0	<input type="checkbox"/>	3.2
<input type="checkbox"/>	3.4	<input checked="" type="checkbox"/>	10.0	<input type="checkbox"/>	3.4
<input type="checkbox"/>	4.0	<input checked="" type="checkbox"/>	12.5	<input type="checkbox"/>	4.0
<input type="checkbox"/>	4.2	<input checked="" type="checkbox"/>	16.0	<input type="checkbox"/>	4.2
<input type="checkbox"/>	4.6	<input type="checkbox"/>	20.0	<input type="checkbox"/>	4.6
<input checked="" type="checkbox"/>	5.0	<input type="checkbox"/>	22.2	<input checked="" type="checkbox"/>	5.0
<input type="checkbox"/>	6.0	<input type="checkbox"/>	25.0	<input type="checkbox"/>	6.0
<input checked="" type="checkbox"/>	6.3	<input type="checkbox"/>	32.0	<input checked="" type="checkbox"/>	6.3
<input type="checkbox"/>	7.0	<input type="checkbox"/>	40.0	<input type="checkbox"/>	7.0

Fonte: O autor

3.3 Materiais de enchimento para lajes nervuradas

O software utilizado fornece a opção de 3 tipos de material de enchimento para as lajes nervuradas: EPS (poliestireno expandido), bloco cerâmico e cubetas plásticas. Os blocos cerâmicos apresentam massas específicas da ordem de 750 kg/m^3 enquanto os blocos de EPS em torno de 13 kg/m^3 . Embora apresentem massa específica muito menor os blocos de EPS ainda significam uma sobrecarga na estrutura, pois estes blocos permaneceram agregados a laje do edifício após sua conclusão.

Por esse motivo foi adotado como material de enchimento as cubetas plásticas, que além de apresentarem uma variedade de tamanhos, existem diversas empresas que fornecem a locação desse material. Existe ainda a vantagem de não apresentarem sobrecarga na estrutura após sua conclusão, visto que as cubetas são retiradas após o período de cura do concreto das lajes.

O programa utilizado para o cálculo da estrutura ainda não considera o reuso nos quantitativos desse material utilizado para forma da laje. Esta limitação implica em um valor relacionado ao custo com a aquisição desse material para todas as lajes. Optou-se neste trabalho por considerar este item, visto que de fato existe um custo mensal com a manutenção das cubetas nas obras, principalmente quando as empresas optam pela locação.

4 MÉTODOS

Neste trabalho compararam-se os custos de três tipos de modelos estruturais, buscando mostrar a importante relação entre a arquitetura e as soluções estruturais. Foram lançadas nove estruturas no programa de cálculo estrutural. O trabalho ficou limitado à verificação quantitativa de custos dos três tipos de sistemas estruturais, para edifícios com 10, 20 e 30 pavimentos.

4.1 Software de cálculo

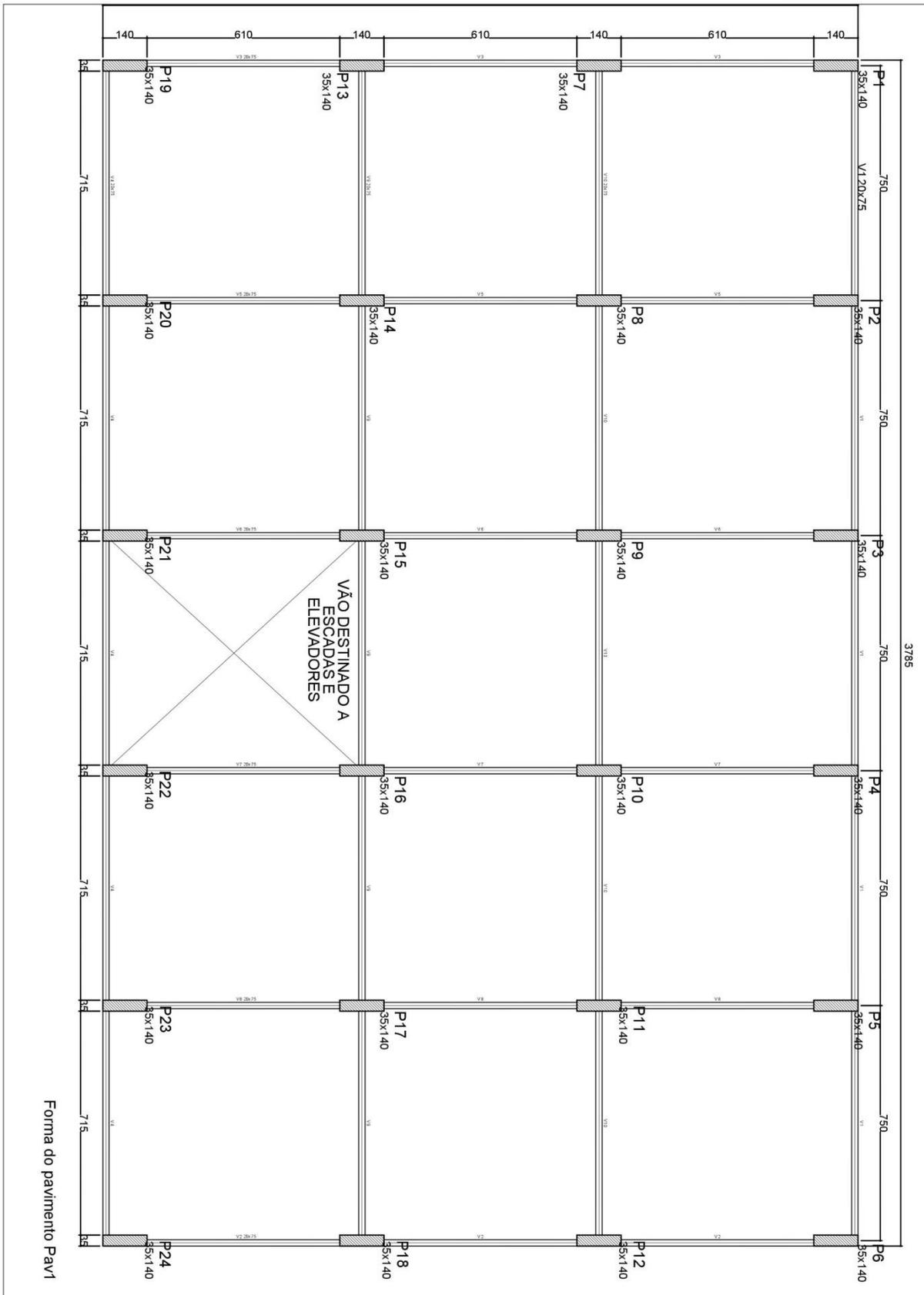
Neste trabalho verificaram-se principalmente os recursos de cálculo dos esforços na estrutura, dimensionamento dos elementos e geração dos custos de material e execução do Eberick. Verificaram-se ainda os relatórios de diagnóstico da estrutura onde o software exibe quantitativos relacionados à execução da obra e informa se houve elementos processados com erro.

Preservaram-se as configurações do software, uma vez que estas estão de acordo com a NBR 6118:2014. A seguir serão apresentados algumas propriedades e parâmetros adotados para o lançamento da estrutura, no software relacionados ao concreto, aço e materiais de enchimento para lajes nervuradas.

4.2 Modelos de estruturas adotadas

O projeto arquitetônico adotado apresenta uma modulação para distâncias de 7,5 m entre eixos de pilares. Não se considerou a subdivisão de ambientes da planta baixa neste trabalho, pois o objetivo era verificar uma situação genérica para uma modulação pré-definida. Adotou-se um módulo central para considerar como sendo o que possivelmente seria utilizado para inserção de escadas e elevadores. A figura 10 apresenta a planta baixa do projeto arquitetônico proposto para todas as edificações dos modelos estudados.

Figura 10 – Planta baixa adotada



Fonte: O autor

As estruturas foram subdivididas de acordo com o número de pavimentos do prédio e o tipo de laje adotada, sendo três modelos estruturais para cada altura (10 pavimentos, 20 e 30) da edificação. Dessa forma, a tabela 9 apresenta a nomenclatura adotada neste estudo, para cada tipo de modelo da estrutura.

Tabela 9 – Nomenclatura adotada para as estruturas

10 Pavimentos	MODELO 10.1 - LAJE MACIÇA CONVENCIONAL
	MODELO 10.3 - LAJE NERVURADA COM VIGAS
	MODELO 10.3 - LAJE LISA

20 Pavimentos	MODELO 20.1 - LAJE MACIÇA CONVENCIONAL
	MODELO 20.2 - LAJE NERVURADA COM VIGAS
	MODELO 20.2 - LAJE LISA

30 Pavimentos	MODELO 30.1 - LAJE MACIÇA CONVENCIONAL
	MODELO 30.3 - LAJE NERVURADA COM VIGAS
	MODELO 30.3 - LAJE LISA

Fonte: O autor

4.3 Cargas adotadas para o cálculo das estruturas

As cargas que devem ser adotadas para o dimensionamento das estruturas obedecem às recomendações estabelecidas na NBR 6120: 1980 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (com errata incorporada no ano 2000 e confirmada em 2014).

As cargas acidentais para edifícios residenciais variam de 1,5 á 2 kN/m² ou 150 a 200 kgf/m² e para as escadas 2,5 a 3 kN/m², conforme a Tabela 2 da norma, citada aqui na (Tabela 10). Optou-se por adotar o valor de 2 kN/m² para cargas acidentais em toda a estrutura, pois não há definição dos cômodos.

Tabela 10 – Valores mínimos das cargas verticais

		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
		2 1,5
4	Bibliotecas	Sala de leitura Sala para depósito de livros 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
		2,5 4 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 Estúdio e platéia com assentos móveis Banheiro
		3 4 2
7	Clubes	Sala de refeições e de assembleia com assentos fixos Sala de assembleia com assentos móveis Salão de danças e salão de esportes Sala de bilhar e banheiro
		3 4 5 2
8	Corredores	Com acesso ao público Sem acesso ao público
		3 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 Despensa, área de serviço e lavanderia
		1,5 2
12	Escadas	Com acesso ao público (ver 2.2.1.7) Sem acesso ao público
		3 2,5

Fonte: NBR 6120:1980 – Tabela 2

Simularam-se ainda cargas permanentes devido à existência de possíveis paredes dividindo os ambientes. Considerou-se a existência de 15 m de alvenaria sobre o módulo de 7,5 x 7,5 m. Obtendo-se uma carga por m² que foi aplicada sobre a estrutura. A carga inserida foi obtida através do processo descrito a seguir, equação 1:

Peso específico para alvenaria = 1300 kgf/m³

Espessura média das paredes = 0,15 m

Comprimento total adotado = 15 m

Altura da alvenaria adotada = 3 m

$$Carga = \frac{1300 \cdot 0,15 \cdot 15 \cdot 3}{7,5 \cdot 7,5} = 156 \frac{kgf}{m^2} \quad \text{Equação 1}$$

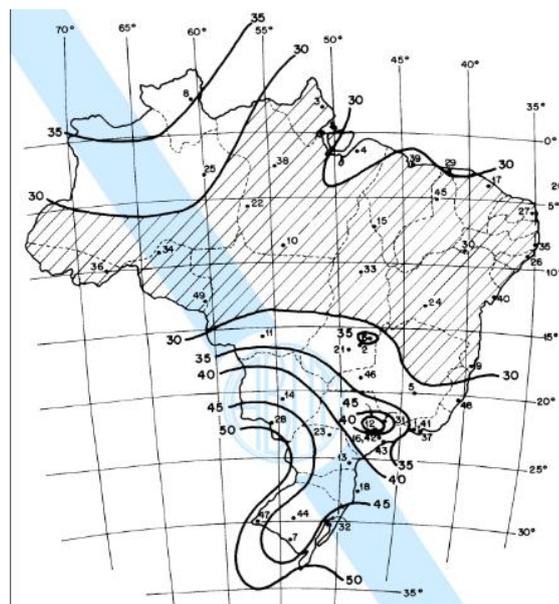
Majorou-se a altura das alvenarias, pois embora no caso das lajes com vigas a altura das paredes seja menor, para as lajes lisas esse fato não ocorre. Nas lajes lisas a altura seria o

pé direito (3 m) menos a espessura das lajes (22,5 cm). Para simular possíveis cargas de alvenaria sobre as lajes, adotou-se a partir do valor obtido na equação 1, a carga de 150 kgf/m²

4.4 Velocidade do vento

A NBR 6123:1988 Versão corrigida 2013 – (Forças devidas ao vento), estabelece às condições exigíveis na consideração das forças devidas a ação do vento, para efeito de cálculo nas edificações. Simulou-se que as edificações adotadas neste estudo, estriam localizadas no estado da Paraíba, nessa região a velocidade básica do vento é 30 m/s. Este valor é definido em um mapa da referida norma (Figura 11) que define valores de velocidade para todo país.

Figura 11 – Isopletas de velocidade básica



Fonte: Fonte: NBR 6123 – Figura 1

4.5 Pré - dimensionamento de pilares

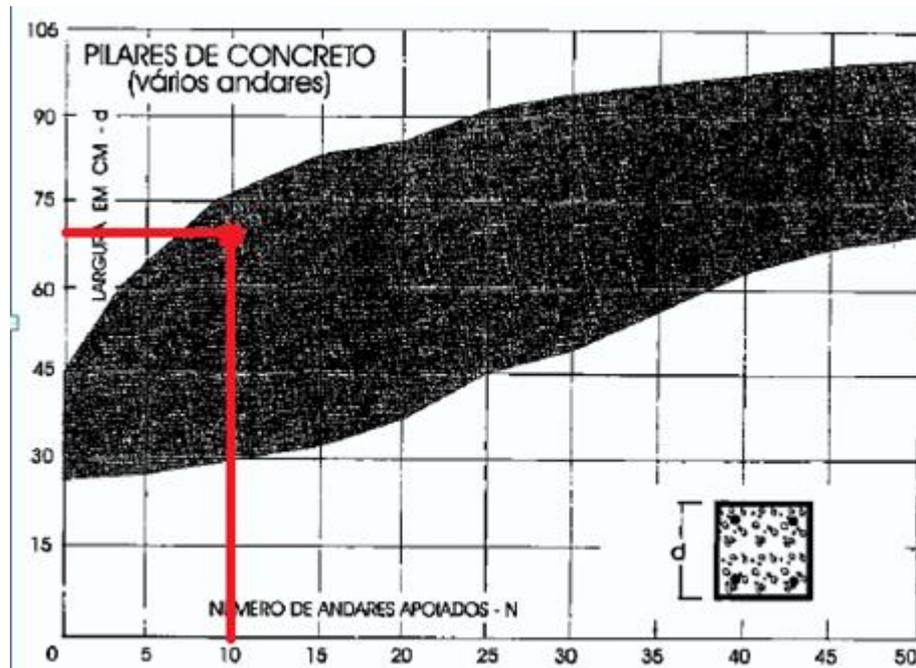
O pré-dimensionamento dos pilares segundo o método proposto por REBELLO (2007), depende das áreas de influência sobre cada pilar, da carga adotada para lajes de piso e do número de vezes que essa se repete, depende ainda da carga adotada para lajes de cobertura.

Além de observar os valores obtidos no pré-dimensionamento, verificou-se se as dimensões obtidas atendiam as especificações da NBR 6118:2014 e NBR 15200:2012.

Para o pré - dimensionamento dos elementos estruturais neste trabalho foi adotado o método gráfico proposto por REBELLO (2007). Devido ao fato das distâncias entre eixos de pilares das estruturas serem de 7,5 m ocasionando áreas de influência elevadas, adotou-se valores relativamente elevados para as cargas sobre os pilares, ocasionando seções quadradas de lado “d” relativamente grandes.

Para os edifícios com 10 pavimentos considerou-se uma seção “d” que fosse adequado as exigências do gráfico mostrado na figura 12 e as de projeto, obtendo-se assim, as seções de $(70 \times 70) \text{ cm}^2$ que equivale a uma área total de concreto para as seções dos pilares de 4900 cm^2 . Em seguida, fixou-se o valor de 35 cm para o menor lado da seção, mas que atendesse também ao segundo gráfico (Figura 15) que verifica das exigências para flambagem. Desta forma a seção retangular equivalente a 4900 cm^2 considerada para o projeto foi a de $(35 \times 140) \text{ cm}^2$ levando em consideração as cargas acima dos valores médios conforme visto no primeiro gráfico.

Figura 12- Gráfico para cargas nos pilares – Modelos com 10 pavimentos

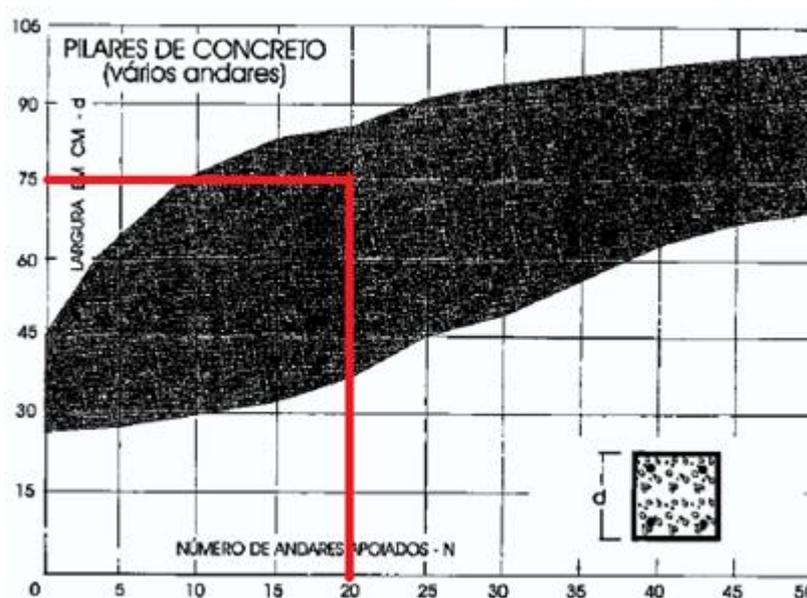


Fonte: Rebello, 2007, p.199.

Visto que para o pré-dimensionamento dos pilares, pelo método adotado, consideram-se apenas as áreas de influência, número de pavimentos e valores fixos de carga, o valor obtido será adotado para os três sistemas estruturais com 10 pavimentos, independentemente do tipo de laje. Procedeu-se de modo análogo para as estruturas de 20 e 30 pavimentos.

Nos modelos estruturais de 20 pavimentos considerou-se uma seção quadrada com lados "d" do gráfico correspondente de (75 x 75) cm² que implica em uma área de concreto de 5625 cm². Adotou-se o valor de 35 cm para o lado menor da seção dos pilares e obteve-se 160 cm para a outra dimensão da seção retangular dos pilares (Figura 13).

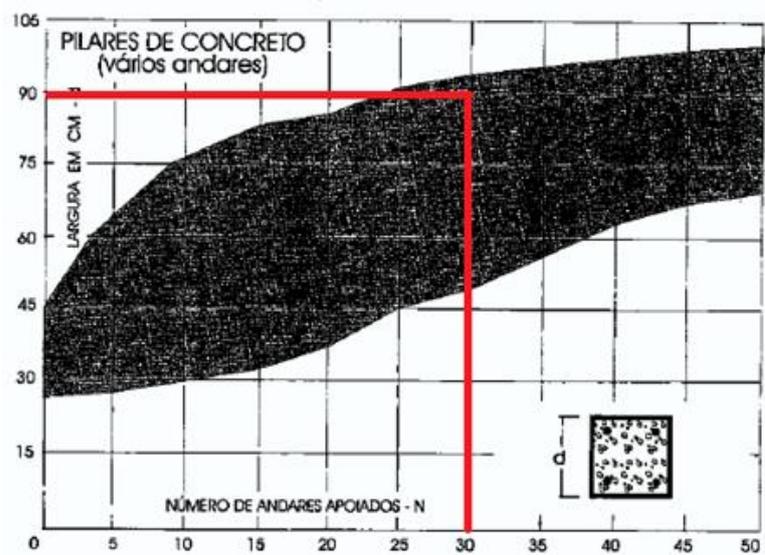
Figura 13 – Gráfico para cargas nos pilares - Modelos com 20 pavimentos



Fonte: Rebello, 2007, p.199

Por fim, para as estruturas de 30 pavimentos, considerou-se uma seção “d” de (90 x 90) cm no gráfico da figura 14, fixando do mesmo modo das anteriores uma das dimensões em 35 cm, obteve-se para outra dimensão o valor de 230 cm.

Figura 14- Gráfico para cargas nos pilares - Modelos com 30 pavimentos

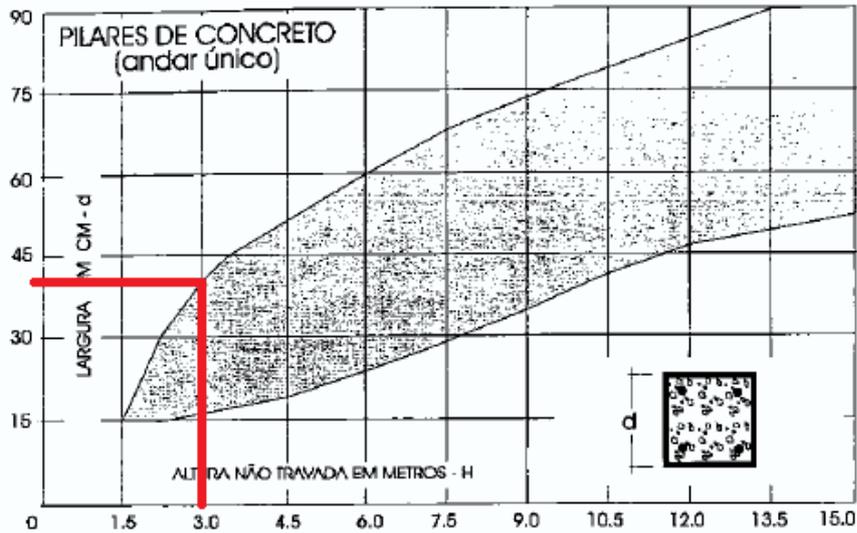


Fonte: Rebello, 2007, p.199

De acordo com REBELLO (2007) devem-se verificar as seções pré-dimensionadas quanto à flambagem, para tanto se utilizou o gráfico para a flambagem, proposto pelo mesmo autor (Figura 15). Como a distância não travada é de 3m, mesmo adotado a maior seção proposta no gráfico (em torno de 40 x 40 cm), não seria maior que nenhuma das seções

adotadas neste estudo. De acordo com REBELLO (2007) deve-se adotar a maior seção obtida entre os gráficos, o anterior e o gráfico para flambagem.

Figura 15 – Gráfico para flambagem



Fonte: Rebello, 2007, p.200

Assim, de forma resumida a tabela 11, mostra as dimensões das seções pré-dimensionadas dos pilares para os três casos estudados.

Tabela 11 - seção adotada para os pilares por número de pavimentos

Número de pavimentos	Seção adotada (cm)
10	35 x 140
20	35 x 160
30	35 x 230

Fonte: O autor

4.6 Pré-dimensionamento de vigas

O procedimento de REBELLO (2007) para o pré-dimensionamento das vigas possibilita a escolha de cargas pequenas, médias ou grandes. No caso desse trabalho foi adotada a opção de cargas grandes, por isso, a altura das vigas deve ser 10% do maior vão. Assim, como as distâncias entre os eixos dos pilares são todas de 7,5m, conseqüentemente as

alturas estimadas finais para as vigas resultaram no valor de 75 cm, conforme mostra os cálculos seguintes:

$$h = 10 \% \cdot v\tilde{a}o = 0,1 \cdot 7,5 = 0,75 \text{ m} = 75 \text{ cm}$$

Segundo o mesmo autor, a largura da viga deve variar entre 1/4 e 1/3 da altura. Por isso, adotou-se o valor aproximado de 1/4 da altura para a largura da base das vigas.

$$b = \frac{1}{4} \cdot altura = \frac{1}{4} \cdot 75 = 18,75 \text{ cm}$$

Para facilitar os trabalhos de carpintaria na montagem das formas das vigas durante execução, procurou-se trabalhar com valores inteiros, sempre que possível, para todos os elementos estruturais. Dessa forma, adotou-se, portanto, 20 cm para a largura das vigas, conforme mostra a tabela 12, o resumo de todas as seções de vigas utilizadas nos modelos estruturais.

Tabela 12 - Seções pré-dimensionadas para as vigas

Dimensões das Vigas			
	ALTURA (m)	BASE (m)	SEÇÃO (cm)
MODELOS COM 10 PAV	0,75	0,1875	20 x 75
MODELOS COM 20 PAV	0,75	0,1875	20 x 75
MODELOS COM 30 PAV	0,75	0,1875	20 x 75

Fonte: O autor

4.7 Pré-dimensionamento das lajes maciças tradicionais

A espessura da laje maciça tradicional foi pré-dimensionada de acordo com REBELLO (2007), considerando 2% da média dos vãos. Portanto, como todos os vãos das estruturas apresentam as mesmas dimensões, logo, conforme os cálculos abaixo, a espessura adotada para posterior lançamento no software foi de 15 cm.

$$h = 2\% \cdot \frac{L + l}{2} = \frac{2}{100} \cdot \frac{7,5 + 7,5}{2} = 0,15\text{m} = 15 \text{ cm}$$

4.8 Pré-dimensionamento das lajes nervuradas com vigas

O método proposto por REBELLO (2007, p.181) propõe um pré-dimensionamento para altura da mesa da laje, largura das nervuras e para o espaçamento delas. Portanto, a altura da laje resultou em:

$$h = 4\% \cdot \frac{L + l}{2} = \frac{4}{100} \cdot \frac{7,5 + 7,5}{2} = 0,30m = 30 \text{ cm}$$

A largura das nervuras deve ficar entre 1/4 e 1/3 da altura da laje, adotou-se 1/4 da altura obtendo-se:

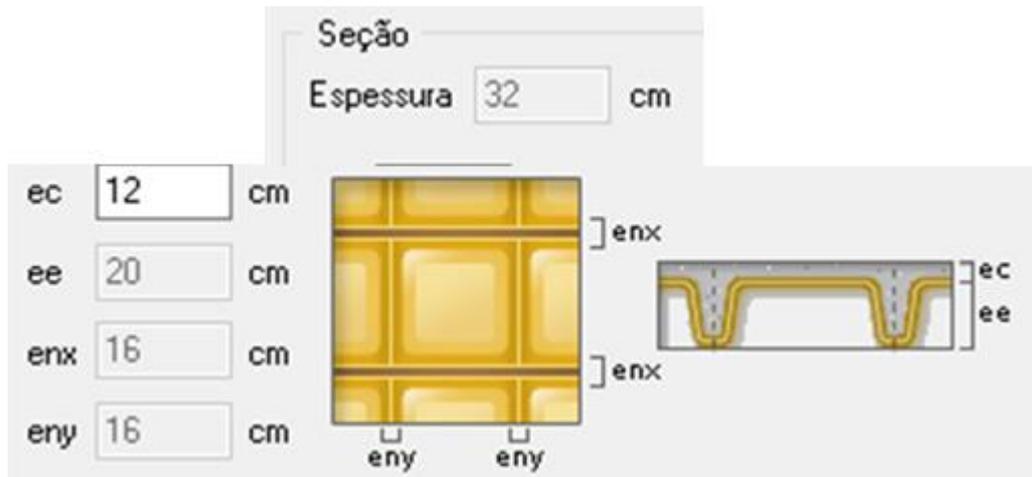
$$\text{largura das nervuras} = \frac{1}{4} \cdot 30 = 7,5 \text{ cm}$$

O espaçamento entre as nervuras deve ser um valor entre 1,5h e 2h. Adotou-se 2h, obtendo desse modo:

$$2h = 2 \cdot 30 = 60 \text{ cm}$$

As dimensões obtidas no pré-dimensionamento das lajes nervuradas não foram adotadas, pois não satisfazem a NBR 15200:2012. O valor mínimo absoluto previsto na NBR 6118:2014 para a capa dessas lajes é de 5 cm, no entanto esse valor também não atende a norma de incêndio. Diante disto, adotaram-se as dimensões mínimas propostas na Tabela 4 (item 2.7 deste trabalho) para o lançamento das lajes nervuradas. A figura 16 apresenta as dimensões adotadas no pré-dimensionamento.

Figura 16 – Seções adotadas para lajes nervuradas

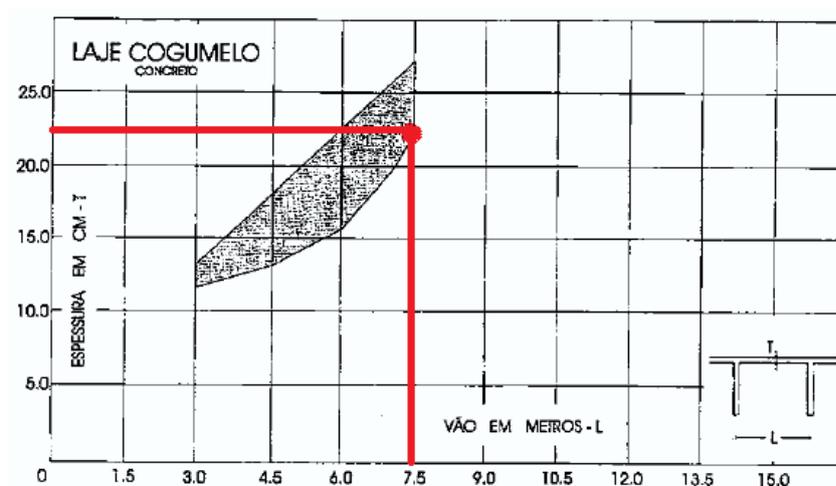


Fonte: O autor

4.9 Pré-dimensionamento das lajes lisas

Utilizou-se o método gráfico proposto por REBELLO (2007) para pré-dimensionar a espessura das lajes lisas. Nota-se no gráfico apresentado na figura 17 que o valor de 7,5 m é o limite máximo para o pré-dimensionamento das lajes lisas sem capitel. Adotou-se o valor de 22,5 cm para o lançamento das lajes lisas.

Figura 17 – Gráfico para pré-dimensionamento de lajes lisas

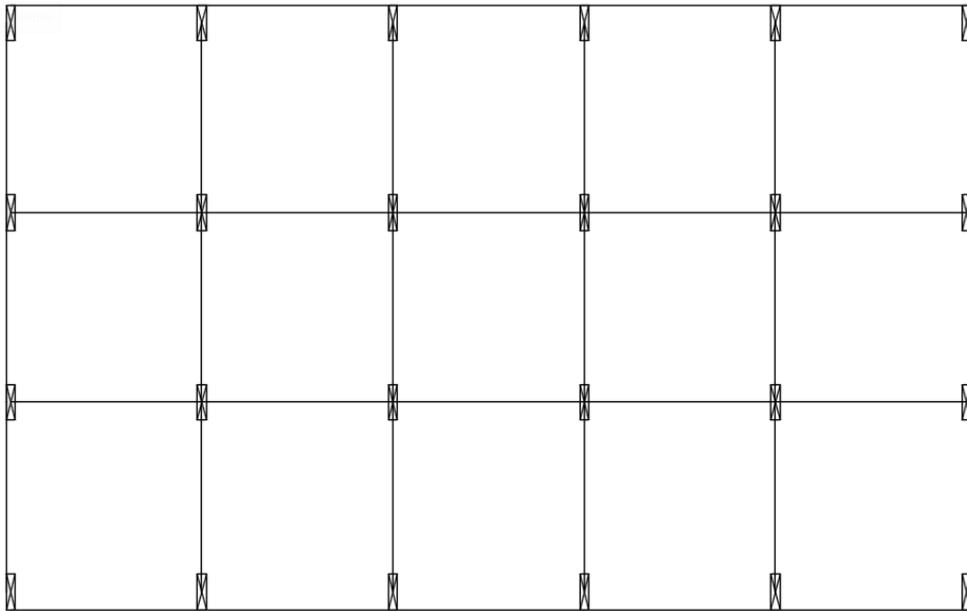


Fonte: Rebello, 2007, p.186

4.10 Lançamento e processamento das estruturas no software de cálculo

Após o devido pré-dimensionamento dos elementos estruturais, procedeu-se com o lançamento das estruturas. Para tanto, importou-se a planta baixa do pavimento tipo da estrutura desenvolvido no AutoCad. Nessa planta foram inseridos os desenhos dos pilares com as dimensões obtidas no pré-dimensionamento (Figura 18).

Figura 18– Plana baixa do pavimento tipo desenvolvida no Autocad



Fonte: O autor

As etapas seguintes são as de lançamento dos elementos estruturais no software. Após converter em escala adequada e inserir a quantidade de pavimentos e o valor do pé direito, lançaram-se os pilares, vigas e lajes da estrutura.

Com o lançamento das estruturas finalizado, utilizou-se a ferramenta de cálculo da estrutura para que o software de cálculo iniciasse o processo de cálculos e verificações da estabilidade global da estrutura, bem como do dimensionamento e detalhamentos dos elementos estruturais. No próximo item deste trabalho serão apresentadas as estruturas de modo detalhado, com seus respectivos resultados.

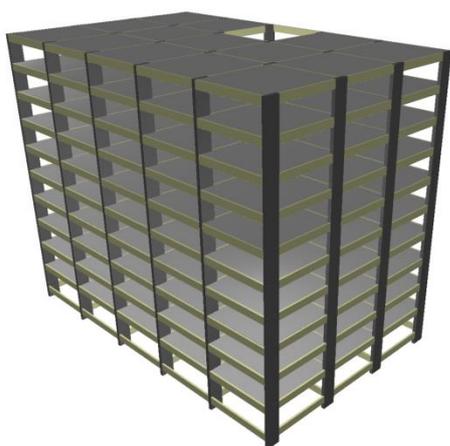
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos próximos itens serão apresentados além dos resultados obtidos nos cálculos os modelos estruturais em 3D e os seus respectivos modelos deformados, para todas as estruturas.

5.1 Modelos com 10 pavimentos

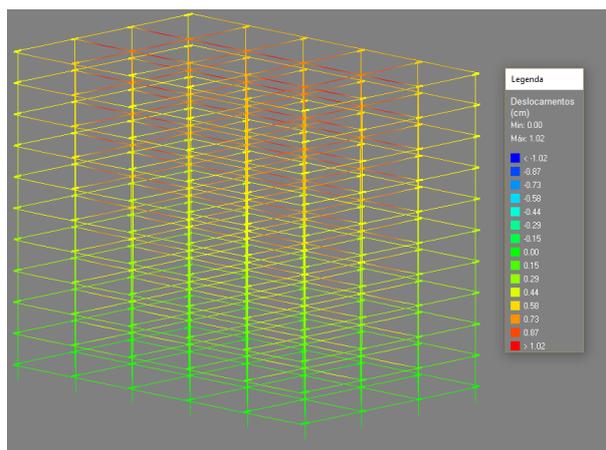
Após o processamento da estrutura, geraram-se os relatórios de quantitativos e custos de materiais das estruturas a fim de compará-los. O modelo com laje maciça tradicional foi processado sem necessidade de alterações na estrutura (Figura 19), apresentado deslocamentos máximos da ordem de 1 cm (Figura 20).

Figura 19 – Modelo 10.1



Fonte: O autor

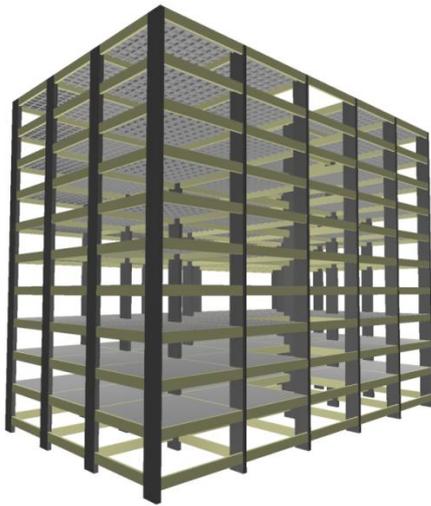
Figura 20 – Deslocamentos verificados no modelo 10.1



Fonte: O autor

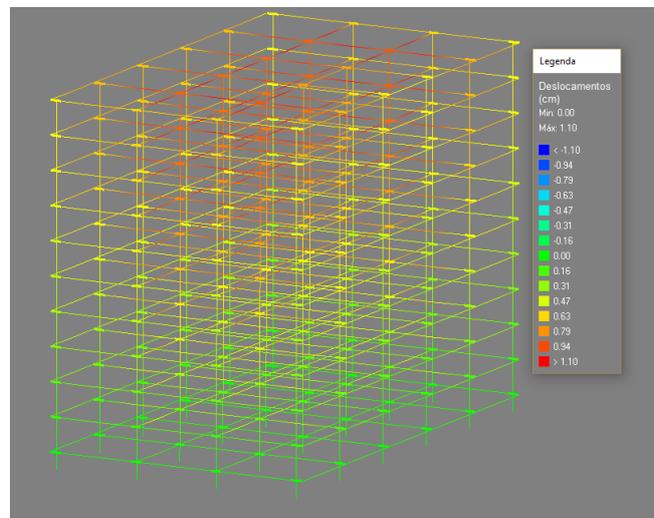
A estrutura com o sistema formado por lajes nervuradas apoiadas sobre vigas (Figura 21), apresentou deslocamentos da mesma ordem de grandeza do modelo anterior, em torno de 1 cm (Figura 22). Também não houve necessidade de redimensionar elementos estruturais.

Figura 21 – Modelo 10.2



Fonte: O autor

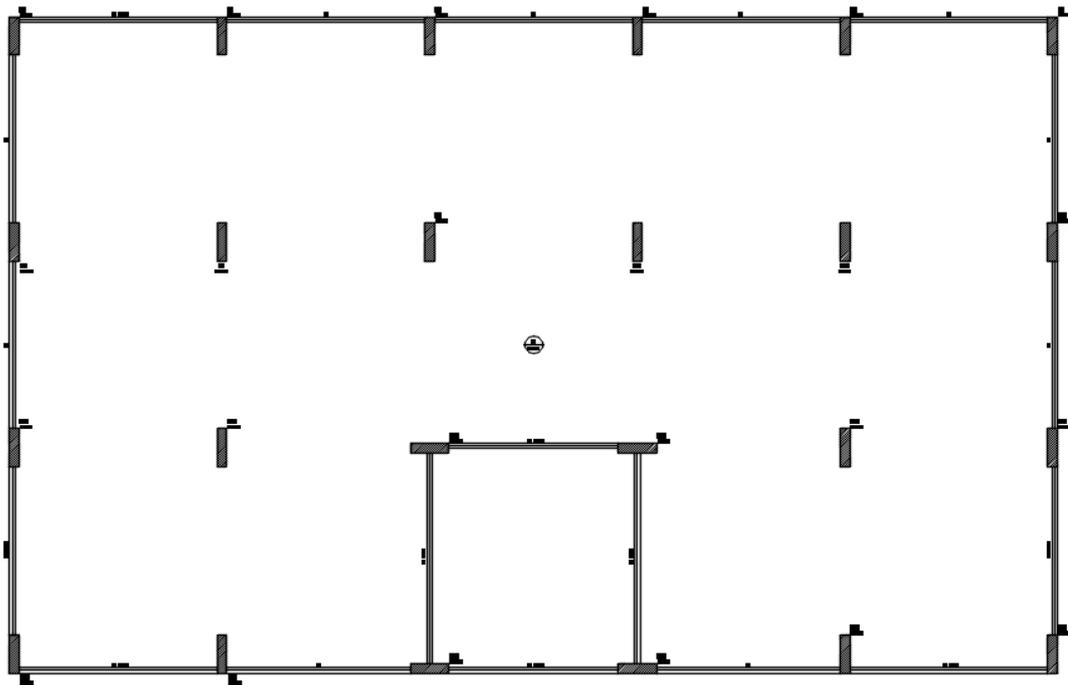
Figura 22 – Deslocamentos verificados no modelo 10.2



Fonte: O autor

Para o caso da laje lisa, o software verificou que a estrutura apresentava deslocamentos horizontais excessivos. Nesse caso não houve, a princípio, o processamento da estrutura. A fim de minimizar os deslocamentos horizontais buscou-se como solução criar um núcleo rígido na estrutura. No vão onde se simulou a presença de elevadores e escadas, lançaram-se vigas no seu perímetro, com o intuito de tornar a estrutura mais rígida (Figura 23).

Figura 23 – Forma do pavimento tipo modelo 10.3

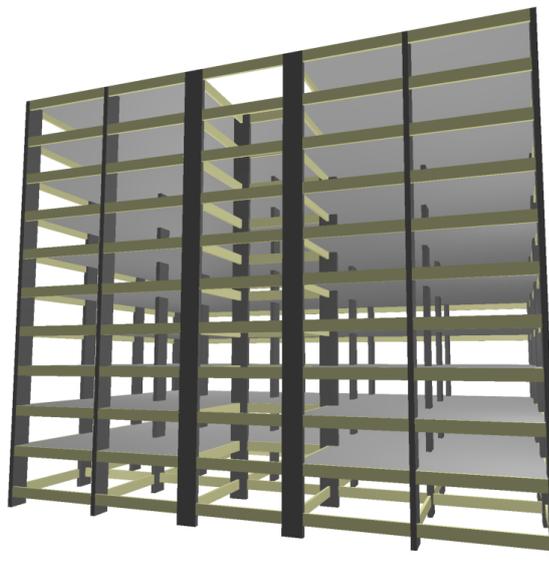


Forma do pavimento Tipo

Fonte: O autor

Apenas a inserção de vigas no interior de um dos módulos, não foi suficiente para solucionar o problema da instabilidade da estrutura. Para evitar a descaracterização do sistema de lajes lisas, onde a laje é apoiada diretamente sobre os pilares, evitou-se a inserção de novas vigas na estrutura. Buscou-se como alternativa a rotação em 90° dos pilares que fazem parte do vão aberto (Figura 24).

Figura 24 – Modelo 10.3



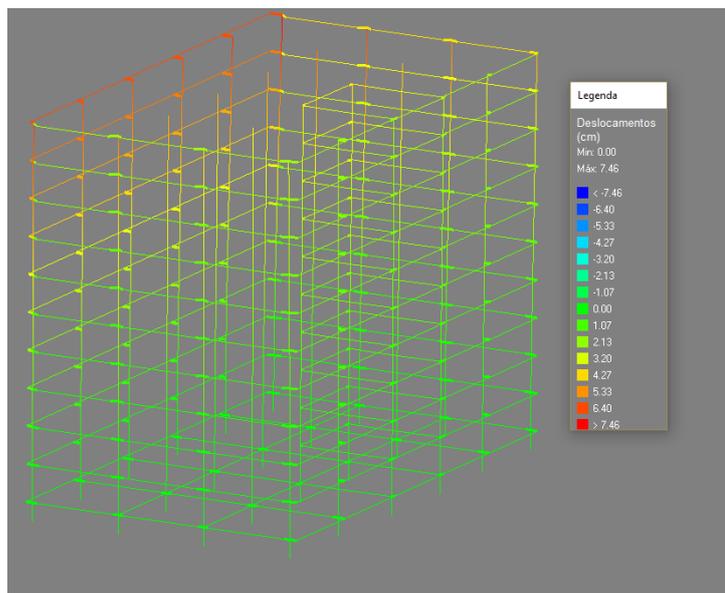
Fonte: O autor

A estrutura com os quatro pilares rotacionados e as vigas no perímetro do vão aberto foi processada com sucesso. Para as demais estruturas com lajes lisas, partiu-se do lançamento inicial com esse mesmo sistema, com o intuito de minimizar os deslocamentos horizontais e evitar a descaracterização da laje lisa.

Após o processamento, verificou-se novo erro, pois o software não identificou a ligação da laje com os pilares de extremidade como sendo um travamento para os pilares. Desse modo o software considerou que os mesmos estão engastados apenas na fundação. Solucionou-se esse problema lançando-se vigas sem rigidez no perímetro da estrutura. Desse modo o software identificou a ligação entre a laje e os pilares, fazendo com que a distância entre os travamentos dos pilares, fosse à mesma do pé direito da estrutura (3m).

A estrutura com laje lisa apresentou os maiores deslocamentos 7,46 cm. Observou-se que os deslocamentos eram maiores na extremidade oposta ao núcleo rígido criado com as vigas (Figura 25).

Figura 25 – Deslocamentos verificados no modelo 10.3



Observa-se nas tabelas 13, 14 e 15 o resumo do consumo de concreto, aço, forma e cubetas (quando aplicável) para os modelos 10.1, 10.2 e 10.3 respectivamente.

Tabela 13 – Consumo de materiais e custos totais modelo 10.1

MODELO 10.1 - LAJE MACIÇA CONVENCIONAL					
CONSUMO DE MATERIAIS					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	32.336,80	14.674,60	87.807,20	134.818,60
	CA60	5.741,40	6.054,10	7.983,20	19.778,70
	Total	38.078,20	20.728,70	95.790,40	154.597,30
Concreto (m ³)		474,50	364,60	1.189,20	2.028,30
Área de forma (m ²)		5.378,10	2.604,00	7.927,80	15.909,90
Consumo de aço (kg/m ³)		80,20	56,90	80,60	76,20
Consumo de forma (m ² /m ³)		11,33	7,14	6,67	7,84

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	R\$ 737.144,27	R\$ 452.530,90	R\$ 1.189.675,17
Concreto	R\$ 552.255,31	R\$ 266.716,52	R\$ 818.971,83
Formas	R\$ 736.616,30	R\$ 1.088.582,39	R\$ 1.825.198,69
TOTAL	R\$ 2.026.015,88	R\$ 1.807.829,81	R\$ 3.833.845,69
Custo total por metro cúbico de concreto			R\$ 1.890,18

Fonte: O autor

Tabela 14 - Consumo de materiais e custos totais modelo 10.2

MODELO 10.2 - LAJE NERVURADA COM VIGAS					
CONSUMO DE MATERIAIS					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	31.112,90	14.911,60	56.201,00	102.225,50
	CA60	6.023,40	6.047,70	6.956,80	19.027,90
	Total	37.136,30	20.959,30	63.157,90	121.253,50
Concreto (m ³)		C-35 474,50	364,60	1.570,50	2.409,60
Área de forma (m ²)		5.378,10	2.604,00		7.982,10
Consumo de aço (kg/m ³)		78,30	57,50	40,20	50,30
Consumo de forma (m ² /m ³)		11,33	7,14	0,00	3,31

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	R\$ 562.240,26	R\$ 315.236,69	R\$ 877.476,95
Concreto	R\$ 656.077,61	R\$ 316.858,40	R\$ 972.936,01
Formas	R\$ 385.654,80	R\$ 505.654,93	R\$ 891.309,74
Blocos de enchimento	R\$ 124.249,60	R\$ -	R\$ 124.249,60
TOTAL	R\$ 1.936.188,17	R\$ 1.499.954,68	R\$ 2.865.972,30
Custo total por metro cúbico de concreto			R\$ 1.189,40

Fonte: O autor

Tabela 15 - Consumo de materiais e custos totais modelo 10.3

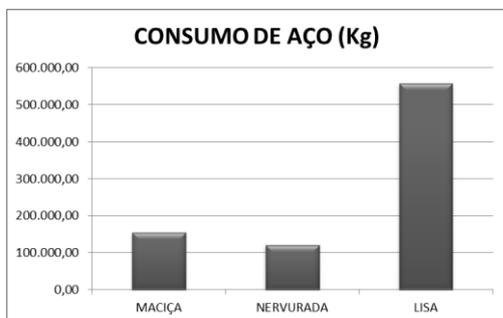
MODELO 10.3 - LAJE LISA					
CONSUMO DE MATERIAIS					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total+ 10% (kg)	CA50	13.794,00	15.172,40	470.160,50	499.126,90
	CA60	3.386,20	7.724,80	46.693,40	57.804,50
	Total	17.180,20	22.897,20	516.854,00	556.931,40
Concreto (m³)	C-35	262,70	365,50	1.842,10	2.470,30
Área de forma (m²)		2.977,70	2.611,00	8.187,00	13.775,70
Consumo de aço (kg/m³)		65,40	62,60	280,60	225,40
Consumo de forma (m²/m³)		11,33	7,14	4,44	5,58

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	R\$ 2.457.815,40	R\$ 563.715,89	R\$ 3.021.531,29
Concreto	R\$ 641.641,26	R\$ 309.886,24	R\$ 951.527,51
Formas	R\$ 583.210,46	R\$ 910.291,18	R\$ 1.493.501,64
TOTAL	R\$ 3.682.667,12	R\$ 1.783.893,31	R\$ 5.466.560,44
Custo total por metro cúbico de concreto			R\$ 2.212,91

Fonte: O autor

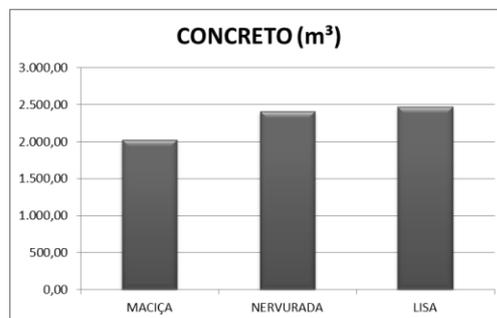
A seguir será apresentado de forma gráfica os resultados obtidos, gráficos de 1 á 4.

Gráfico 1: Consumo de aço – 10 pavimentos



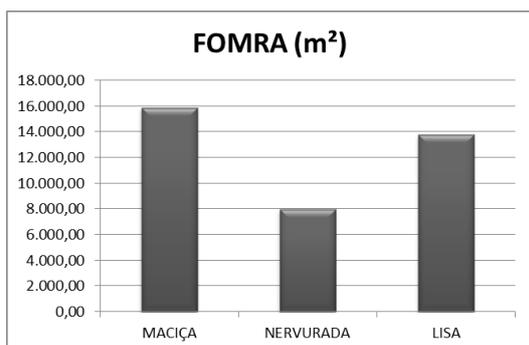
Fonte: O autor

Gráfico 2: Consumo de concreto – 10 pavimentos



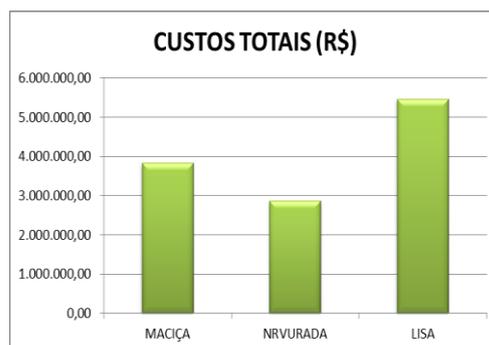
Fonte: O autor

Gráfico 3: Consumo de forma – 10 pavimentos



Fonte: O autor

Gráfico 4: Custos totais – 10 pavimentos



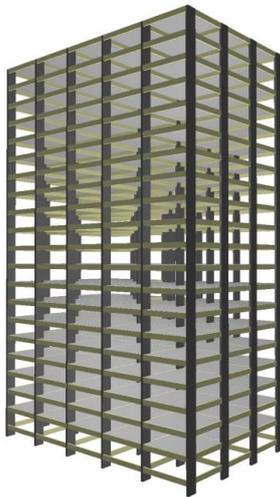
Fonte: O autor

5.2 Modelos com 20 pavimentos

De modo semelhante ao item anterior as estruturas com lajes maciças tradicionais (Figura 26) e nervuradas com vigas (Figura 28), foram dimensionadas com êxito pelo software a partir do lançamento inicial. Não houve necessidade de redimensionar nenhum elemento estrutural.

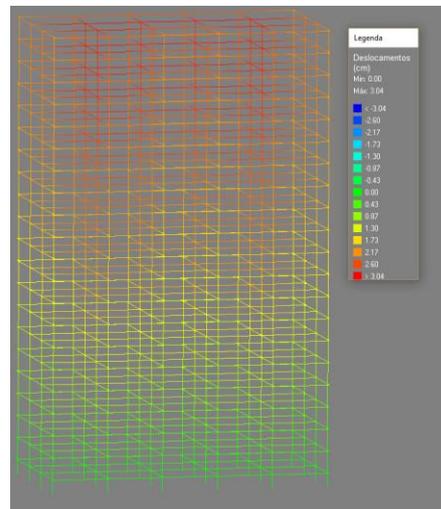
O pórtico deformado da estrutura com laje maciça (Figura 27) e o modelo utilizando laje nervurada (Figura 29) apresentaram deslocamentos da mesma ordem de grandeza como no item anterior, valores em torno de 3 cm.

Figura 26 – Modelo 20.1



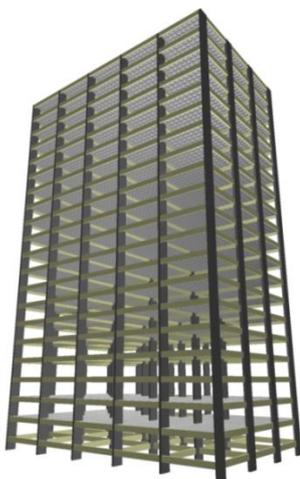
Fonte: O autor

Figura 27 – Deslocamentos verificados no modelo 20.1



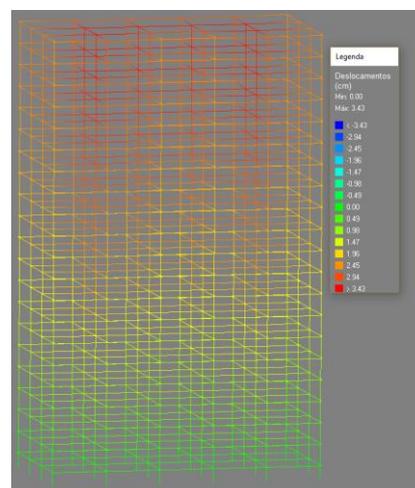
Fonte: O autor

Figura 28 – Modelo 20.2



Fonte: O autor

Figura 29 – Deslocamentos verificados no modelo 20.2

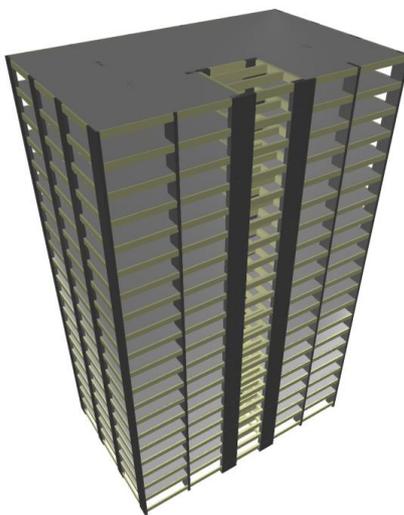


Fonte: O autor

Novamente para o caso do edifício com lajes lisas, houve problemas quanto aos deslocamentos horizontais excessivos. Aplicou-se o mesmo sistema de contraventamento utilizado na estrutura com 10 pavimento a fim de minimizar os deslocamentos.

Como não houve êxito optou-se por adicionar mais duas vigas no módulo onde possivelmente seriam inseridos os elevadores e escadas (Figura 30). Diante das alterações propostas ainda não foi possível realizar o dimensionamento da estrutura devido aos deslocamentos horizontais excessivos.

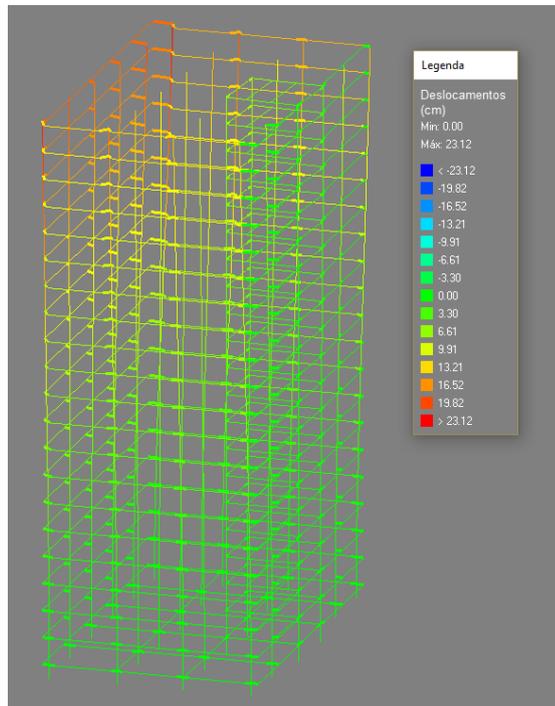
Figura 30 – Modelo 20.3



Fonte: O autor

Com o intuito de não descaracterizar o sistema constituído por lajes lisas apoiadas diretamente sobre pilares, inserindo mais vigas na estrutura, preferiu-se iniciar um processo de redimensionamento dos elementos estruturais. A estrutura tornou-se mais rígida e desse modo concluiu-se o processo de cálculo, gerando o dimensionamento da estrutura e o modelo do pórtico deformado (Figura 31).

Figura 31 – Deslocamentos verificados no modelo 20.3



Fonte: O autor

Este procedimento implicou em um prédio com elementos estruturais que apresentavam dimensões maiores que aquelas obtidas no pré – dimensionamento. Fato que repercutiu de modo negativo no custo total da edificação.

As tabelas 16,17 e 18 apresentam os resumos de custos de materiais somados as execuções bem como dos seus quantitativos. Verifica-se como no item anterior uma discrepância nos valores relacionados à estrutura com lajes lisas, fato que se deve, provavelmente devido ao aumento das seções e acréscimo de vigas realizado.

Tabela 16 - Consumo de materiais e custos totais modelo 20.1

MODELO 20.1 - LAJE MACIÇA CONVENCIONAL					
CONSUMO DE MATERIAIS					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	76.224,20	43.921,70	177.189,80	297.335,70
	CA60	11.012,30	22.342,10	16.372,30	49.726,60
	Total	87.236,40	66.263,70	193.562,10	347.062,30
Concreto (m³)	C-35	902,20	819,80	2.395,00	4.117,00
Área de forma (m²)		10.224,50	5.709,60	15.966,50	31.900,50
Consumo de aço (kg/m³)		96,70	80,80	80,80	84,30
Consumo de forma (m²/m³)		11,33	6,96	6,67	7,75

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	R\$ 1.843.702,61	R\$ 999.945,15	R\$ 2.843.647,76
Concreto	R\$ 1.120.967,91	R\$ 541.381,23	R\$ 1.662.349,14
Formas	R\$ 1.479.218,80	R\$ 2.195.042,47	R\$ 3.674.261,26
TOTAL	R\$ 4.443.889,32	R\$ 3.736.368,84	R\$ 8.180.258,16
Custo total por metro cúbico de concreto			R\$ 1.986,95

Fonte: O autor

Tabela 17 - Consumo de materiais e custos totais modelo 20.2

MODELO 20.2 - LAJE NERVURADA COM VIGAS					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	80.306,10	47.133,60	115.900,80	243.340,60
	CA60	10.504,80	21.692,60	154,70	32.352,10
	Total	90.810,90	68.826,30	116.055,50	275.692,70
Concreto (m³)	C-35	902,20	819,80	3.162,90	4.884,90
Área de forma (m²)		10.224,50	5.709,60	-	15.934,10
Consumo de aço (kg/m³)		100,70	84,00	36,70	56,40
Consumo de forma (m²/m³)		11,33	6,96	-	3,26

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	R\$ 1.308.489,56	R\$ 729.779,66	R\$ 2.038.269,22
Concreto	R\$ 1.330.065,51	R\$ 642.366,73	R\$ 1.972.432,24
Formas	R\$ 772.384,06	R\$ 1.021.029,40	R\$ 1.793.413,45
Blocos de enchimento	R\$ 248.934,40	R\$ -	R\$ 248.934,40
TOTAL	R\$ 4.078.363,57	R\$ 3.122.040,65	R\$ 6.053.049,31
Custo total por metro cúbico de concreto			R\$ 1.239,13

Fonte: O autor

Tabela 18 - Consumo de materiais e custos totais modelo 20.3

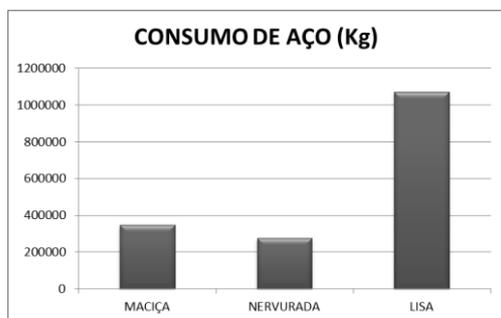
MODELO 20.3 - LAJE LISA					
CONSUMO DE MATERIAIS					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	55.009,20	187.407,10	714.981,80	957.398,10
	CA60	8.098,10	7.228,50	100.683,00	116.009,60
	Total	63.107,40	194.635,50	815.664,80	1.073.407,70
Concreto (m³)	C-35	702,70	1.337,70	3.708,00	5.748,30
Área de forma (m²)		6.269,80	7.127,60	16.480,00	29.877,40
Consumo de aço (kg/m³)		89,80	145,50	220,00	186,70
Consumo de forma (m²/m³)		8,92	5,33	4,44	5,20

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	R\$ 5.019.654,87	R\$ 2.017.509,12	R\$ 7.037.163,99
Concreto	R\$ 1.565.158,83	R\$ 755.907,10	R\$ 2.321.065,94
Formas	R\$ 1.390.511,02	R\$ 2.123.173,65	R\$ 3.513.684,67
TOTAL	R\$ 7.975.324,71	R\$ 4.896.589,88	R\$ 12.871.914,59
Custo total por metro cúbico de concreto			R\$ 2.239,26

Fonte: O autor

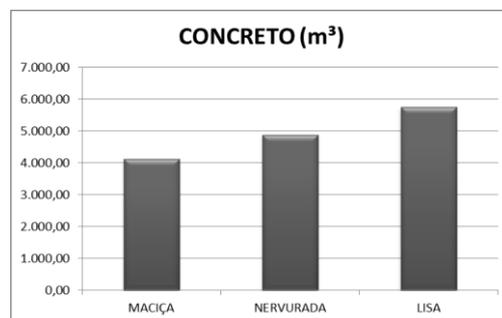
Os gráficos de 5 à 8 apresentaram os resultados obtidos para os modelos com 20 pavimentos.

Gráfico 5: Consumo de aço – 20 pavimentos



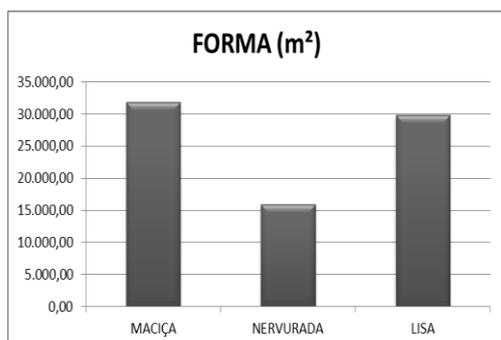
Fonte: O autor

Gráfico 6: Consumo de concreto – 20 pavimentos



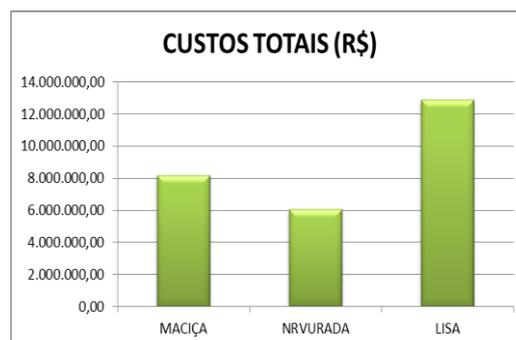
Fonte: O autor

Gráfico 7: Consumo de forma – 20 pavimentos



Fonte: O autor

Gráfico 8: Custos totais – 20 pavimentos



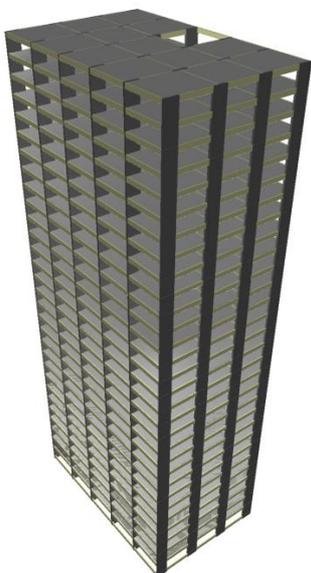
Fonte: O autor

5.3 Modelos com 30 pavimentos

Em todos os modelos com 30 pavimentos houve necessidade de redimensionamento de elementos estruturais. A estrutura com menor modificação foi à com laje maciça tradicional. Ao processar a estrutura o programa de cálculo apresentou o Erro D09, que segundo o software, significa que nenhuma bitola configurada para a armadura longitudinal pode ser usada. Esse erro pode ser provocado por diversos fatores, dentre eles: espaçamento entre as barras menor que o permitido, taxa de armadura maior que a configurada, diâmetro das barras maior que o configurado, dentre outros.

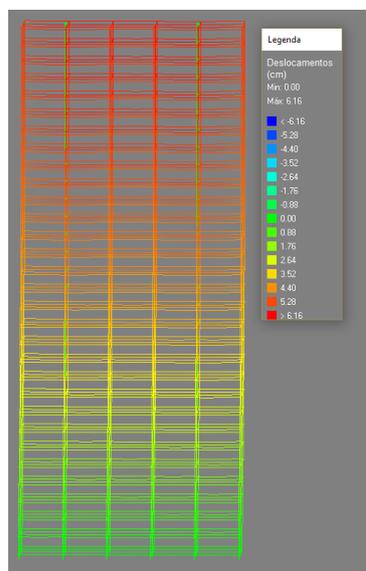
Para evitar soluções que alterassem as configurações pré-definidas inicialmente e padronizadas do software, de acordo com a NBR 6118:2014, optou-se por aumentar a seção dos pilares que apresentaram o erro. A seção obtida no pré-dimensionamento foi 35 x 230 cm, alterou-se a mesma para 35 x 240 cm, e em seguida, processou-se novamente a estrutura obtendo-se êxito, pois o erro foi solucionado e os detalhamentos tanto da estrutura em três D, quanto às dos pórticos espaciais deformados, estão mostrados nas figuras 32 e 33 respectivamente.

Figura 32 – Modelo 30.1



Fonte: O autor

Figura 33 – Deslocamentos verificados no modelo 30.1

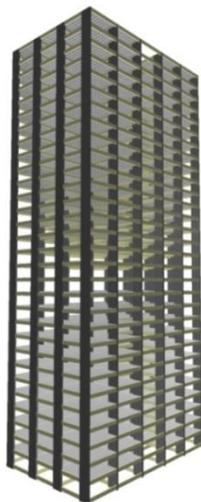


Fonte: O autor

Ao processar o modelo com lajes nervuradas (Figura34) o mesmo erro D09 foi observado. Dos 8 pilares internos da estrutura, 6 apresentavam esse erro. Procedeu-se de modo análogo ao descrito para a estrutura com laje maciça. Aumentou-se a maior dimensão

dos pilares em 25 cm e processou-se a estrutura, outra vez. Este processo se repetiu até que a estrutura fosse dimensionada, com sucesso. Os 6 pilares tiveram as suas seções alteradas de 35 x 230 para 35 x 255.

Figura 34 – Modelo 30.2

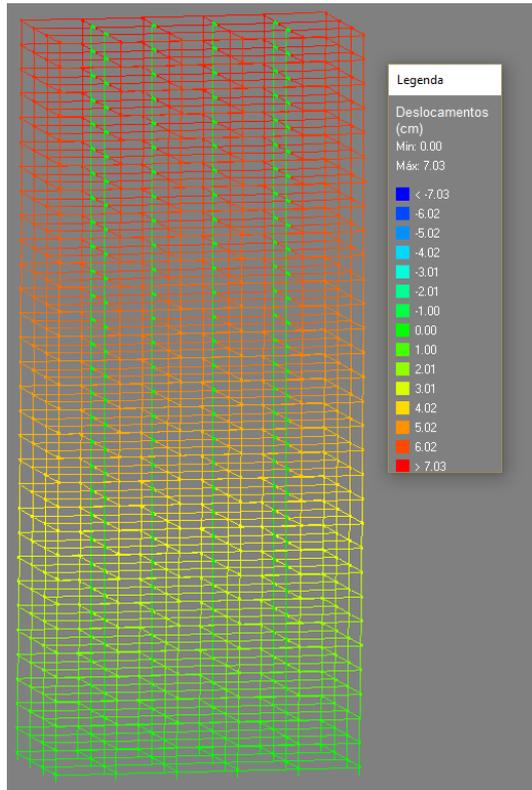


Fonte: O autor

A escolha de alterar apenas a maior dimensão dos pilares se justifica no fato de que os pilares com seções acima de 35 cm poderiam interferir de modo negativo no layout dos apartamentos. Em geral tem-se as paredes divisória dos edifícios residenciais construídos em tijolos cerâmicos de 9 cm de largura, e com os rebocos e acabamentos finais, podem no máximo chegar a 15 cm de espessura. Caso os pilares tenham mais de 35 cm na sua menor dimensão, haverá um saque na parede de mais de 20 cm. Portanto, buscou-se evitar essa situação visando minimizar as incompatibilidades com a arquitetura.

Após o processamento da estrutura verificou-se que os pilares que tiveram suas seções aumentadas sofreram menores deslocamentos, como se observa na figura 35. Enquanto os deslocamentos críticos da estrutura de modo geral foram da ordem de 7 cm, os deslocamentos sofridos pelos 6 pilares de 35 x 255 cm foram da ordem de 2 cm.

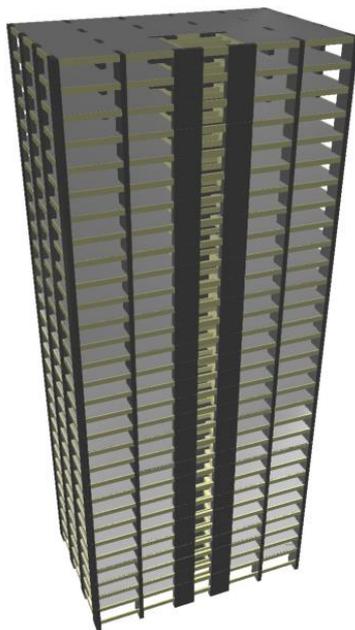
Figura 35 – Deslocamentos verificados no modelo 30.2



Fonte: O autor

Como já havia sido mencionado no item 2.3 deste estudo uma das desvantagens das lajes lisas está no fato de não apresentarem vigas, e isto, implica em maiores deslocamentos horizontais e menor estabilidade global da estrutura. Pois ficou evidenciado em todas as estruturas adotadas, sobretudo no modelo com 30 pavimentos (Figura 36).

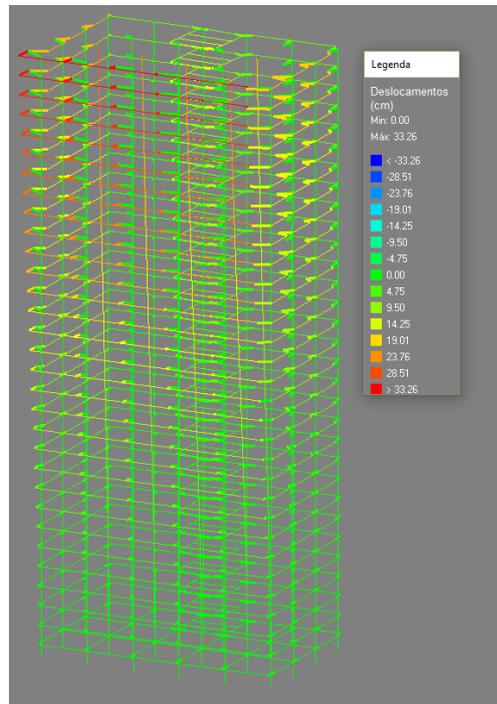
Figura 36 – Modelo 30.3



Fonte: O autor

Portanto para resolver essa deficiência de rigidez da estrutura foi necessário redimensionar as vigas do núcleo rígido por diversas vezes, até encontrar a seção adequada, o mesmo acontecendo com as seções dos pilares da estrutura a fim de minimizar os deslocamentos horizontais. Quando a estrutura foi processada, este redimensionamento implicou em uma estrutura com um peso próprio mais elevado. Em consequência disso os pilares tiveram que continuar sendo redimensionados para corrigir o Erro D09, já mencionado neste item. Embora a estrutura final apresente elementos estruturais com dimensões muito maiores que aquelas obtidas no pré-dimensionamento (35 x 230 cm) e muito além das obtidas nos modelos com lajes maciças e nervudas, verificou-se, ainda assim, elevados deslocamentos horizontais. Esses deslocamentos foram cerca de 5 vezes os deslocamentos obtidos para as estruturas anteriores (Figura 37).

Figura 37 – Deslocamentos verificados no modelo 30.3



Fonte: O autor

Nestes últimos modelos estudados observou-se mais uma vez uma relativa proximidade entre os custos relacionados das estruturas com lajes maciças (Tabela 19) e nervuradas (Tabela 20), se comparados aos custos com lajes lisas (Tabela 21).

Tabela 19 - Consumo de materiais e custos totais modelo 30.1

MODELO 30.1 - LAJE MACIÇA CONVENCIONAL					
CONSUMO DE MATERIAIS					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total+ 10% (kg)	CA50	145.252,30	130.184,30	282.961,60	558.398,20
	CA60	14.310,30	46.807,20	27.370,40	88.487,90
	Total	159.562,60	176.991,40	310.332,00	646.886,00
Concreto (m³)	C-35	1.304,80	1.759,80	3.676,90	6.741,50
Área de forma (m²)		14.787,60	11.583,20	24.512,70	50.883,50
Consumo de aço (kg/m³)		122,30	100,60	84,40	96,00
Consumo de forma (m²/m³)		11,33	6,58	6,67	7,55

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	R\$ 3.088.292,54	R\$ 1.771.846,62	R\$ 4.860.139,17
Concreto	R\$ 1.834.640,34	R\$ 886.055,55	R\$ 2.720.695,89
Formas	R\$ 2.372.884,73	R\$ 3.538.994,29	R\$ 5.911.879,02
TOTAL	R\$ 7.295.817,62	R\$ 6.196.896,46	R\$ 13.492.714,08
Custo total por metro cúbico de concreto			R\$ 2.001,44

Fonte: O autor

Tabela 20 - Consumo de materiais e custos totais modelo 30.2

MODELO 30.2 - LAJE NERVURADA COM VIGAS					
CONSUMO DE MATERIAIS					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total+ 10% (kg)	CA50	146.556,70	144.269,80	179.384,10	470.210,50
	CA60	13.586,70	48.576,20	22.531,90	84.694,90
	Total	160.143,40	192.846,00	201.916,00	554.905,40
Concreto (m ³)	C-35	1.304,80	1.820,40	4.858,90	7.984,20
Área de forma (m ²)		14.787,60	11.915,20	-	26.702,80
Consumo de aço		122,70	105,90	41,60	69,50
Consumo de forma (m ² /m ³)		11,33	6,55	-	3,34

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	R\$ 2.592.457,06	R\$ 1.287.792,22	R\$ 3.880.249,28
Concreto	R\$ 2.169.060,00	R\$ 1.047.566,44	R\$ 3.216.626,44
Formas	R\$ 1.302.541,77	R\$ 1.759.169,94	R\$ 3.061.711,72
Blocos de enchimento	R\$ 390.048,00	R\$ -	R\$ 390.048,00
TOTAL	R\$ 6.454.106,83	R\$ 4.094.528,60	R\$ 10.548.635,44
Custo total por metro cúbico de concreto			R\$ 1.321,19

Fonte: O autor

Tabela 21 - Consumo de materiais e custos totais modelo 30.3

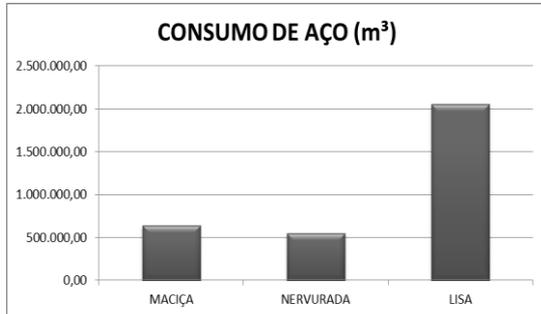
MODELO 30.3 - LAJE LISA					
CONSUMO DE MATERIAIS					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total+ 10% (kg)	CA50	122.338,40	901.160,10	904.969,80	1.928.468,30
	CA60	9.679,60		121.344,60	131.024,20
	Total	132.017,90	901.160,10	1.026.314,40	2.059.492,40
Concreto (m ³)	C-35	1.080,90	4.436,30	5.732,70	11.249,90
Área de forma (m ²)		8.967,00	15.170,00	25.478,60	49.615,60
Consumo de aço (kg/m ³)		122,10	203,10	179,00	183,10
Consumo de forma (m ² /m ³)		8,30	3,42	-	4,41

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	R\$ 9.631.602,57	R\$ 4.257.632,90	R\$ 13.889.235,47
Concreto	R\$ 3.063.116,69	R\$ 1.479.358,91	R\$ 4.542.475,60
Formas	R\$ 2.330.227,26	R\$ 3.568.390,03	R\$ 5.898.617,29
TOTAL	R\$ 15.024.946,52	R\$ 9.305.381,84	R\$ 24.330.328,36
Custo total por metro cúbico de concreto			R\$ 2.162,72

Fonte: O autor

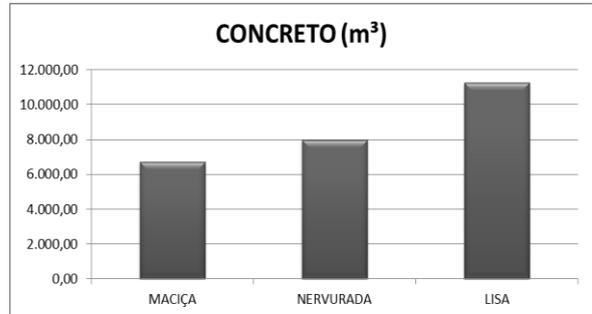
Os mesmos valores verificados com relação aos custos de materiais e execução e custos totais foram apresentados nos gráficos de 9 à 12.

Gráfico 9: Consumo de aço – 30 pavimentos



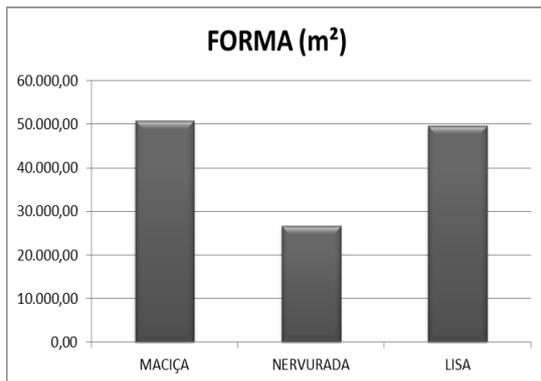
Fonte: O autor

Gráfico 10: Consumo de concreto – 30 pavimentos



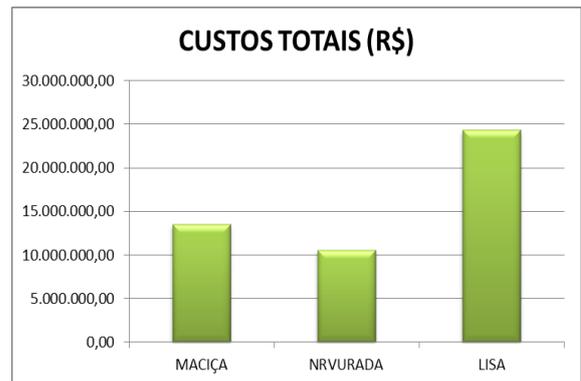
Fonte: O autor

Gráfico 11: Consumo de forma – 30 pavimentos



Fonte: O autor

Gráfico 12: Custos totais – 30 pavimentos



Fonte: O autor

6 CONCLUSÃO

Os modelos 10.2, 20.2 e 30.2 (lajes nervuradas) embora não tenham sido aqueles que apresentaram os menores consumos dentre todos os materiais, esses modelos tiveram o menor consumo de aço e formas para todas as estruturas proporcionando um custo final da estrutura com melhores resultados quando comparados aos demais. Provavelmente, porque segundo REBELLO (2007), na prática a laje nervurada é mais econômica para vãos maiores que 7,0 m.

O consumo e conseqüentemente o custo com concreto foi menor nas estruturas com lajes maciças, para todas as alturas estudadas. Já para o item formas, as lajes maciças apresentaram o maior consumo e conseqüente maior custo entre os modelos estudados fato já esperado, pois embora apresentasse praticamente mesma área de forma para as lajes, os modelos 10.1, 20.1 e 30.1 possuíam vigas, fato que as distinguia do sistema com lajes lisas. No que diz respeito as formas, as lajes nervuradas apresentam a vantagem de utiliza-las apenas para vigas e pilares.

O fato das estruturas com lajes lisas terem apresentado dificuldades quanto ao processamento e dimensionamento, no que diz respeito à estabilidade global, era esperado, pois segundo FIGUEIREDO (1989), em edifícios esbeltos com lajes lisas, o fato de não apresentarem vigas implica em maiores deslocamentos horizontais e aumento da instabilidade global da estrutura. Não se pode, no entanto, concluir que o uso destas lajes não é viável em todos os casos, pois cada projeto arquitetônico apresenta novos desafios e diversas possibilidades de soluções, portanto, deve-se verificar qual a mais adequada.

Durante o processo de desenvolvimento de um projeto estrutural deve-se levar em consideração fatores que vão além do sistema estrutural que será utilizado, tais como: a disponibilidade dos materiais a serem aplicados, a mão de obra específica para a execução da estrutura e seus custos, além dos cuidados para evitar qualquer tipo de incompatibilidade com o projeto arquitetônico, entre outras.

Sugerisse para pesquisas futuras:

- A consideração de variações nas distâncias entre pilares;
- Levar em consideração o custo com fundações;
- Verificar a viabilidade da utilização de lajes protendidas para vãos acima de 7,5 m;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14432:2001**. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014;
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15200:2012**. Projeto de estruturas de concreto em situações de incêndio. Rio de Janeiro, 2014;
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575:2013**. Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118:2014**. Projeto e Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014;
- ALBUQUERQUE, A.T. **Análise de alternativas para edifícios em concreto armado**. 1998.100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.
- ARAÚJO, J.M. **Curso de concreto armado**. 3 ed. Rio Grande: Dunas, 2010a. v.2.
- ARAÚJO, J.M. **Curso de concreto armado**. 3 ed. Rio Grande: Dunas, 2010b. v.4.
- DORNELES, D. M. **Lajes na construção civil brasileira: estudo de caso em edifício residencial em Santa Maria – RS**. 2014. 77f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- FIGUEIREDO, J.R.F. **Sistemas estruturas de lajes sem vigas: subsídios para o projeto e execução**. 1989, 262f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.
- FUSCO, P.B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 1 ed, 5. tiragem. São Paulo: Pini, 1995.
- MEHTA,P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: Ibracon, 2008.
- MELO, P.R. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira, de aço e de concreto para auxílio à concepção de projetos arquitetônicos**. 2013. 113f. Qualificação de mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- PINHEIRO,L.M.; MUZARDO,C.D.;SANTOS,S.P. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos, 2007. (Apostila).
- PRETTO, S. **Formas plásticas para laje nervurada**. 2013. Disponível em < <https://www.ufrgs.br/eso/content/?tag=laje-nervurada>>. Acesso em: 04 maio 2018.

REBELO, Y. C. P. **A concepção estrutural e a arquitetura.** 1 ed. São Paulo : Ziguarte, 2000.

REBELO, Y.C.P. **Bases para projeto estrutural na arquitetura.** 1 ed. São Paulo : Ziguarte, 2007.

SPOHR, V.H. **Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas.** 2008. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.