



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

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS

GRACIELLY KARINE DOS SANTOS FERREIRA

JOÃO PESSOA

2018

GRACIELLY KARINE DOS SANTOS FERREIRA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS

Trabalho de conclusão de curso (TCC)
apresentado como requisito necessário para a
conclusão do curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal da Paraíba.

Orientador: Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira

JOÃO PESSOA

2018

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F383e Ferreira, Gracielly Karine Dos Santos.
Estudo Comparativo entre sistemas estruturais /
Gracielly Karine Dos Santos Ferreira. - João Pessoa,
2018.
103 f. : il.

Orientação: Prof° Enildo Tales Ferreira.
Monografia (Graduação) - UFPB/Tecnologia.

1. arquitetura, estrutura, concreto armado, custo. I.
Ferreira, Prof° Enildo Tales. II. Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

GRACIELLY KARINE DOS SANTOS FERREIRA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS

Trabalho de Conclusão de Curso em 30/10/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:

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

APROVADO

Carlos A. Taurino de Lucena
Professor Dr. Carlos Antônio Taurino de Lucena - Membro 1
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

APROVADO

Primo Fernandes Filho
Professor Dr. Primo Fernandes Filho - Membro 2
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

APROVADO

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

Dedico a minha avó Maria da Penha
(in memorian), exemplo de força e sabedoria.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus, o autor da minha história, aquele que permitiu a concretização desse sonho e que está presente em todos os momentos da minha vida.

A todos os meus familiares, que contribuíram de alguma forma nessa minha caminhada e que se orgulham dos meus esforços, em especial a minha mãe que esteve ao meu lado diariamente, vivendo todas as dificuldades e conquistas ao meu lado, sempre acreditando em mim, essa vitória sem dúvidas também é dela.

Ao Richard, que esteve sempre comigo na reta final de formação, me dando todo carinho e amor com palavras de ânimo e admiração.

A meu professor orientador, Enildo Tales Ferreira, por aceitar esse convite, por toda paciência, dedicação e atenção durante a preparação desse trabalho. E pelo exemplo de profissional, ao dispor-se a compartilhar os conhecimentos e experiências adquiridas durante sua vida.

A todos os professores, que durante o percorrer do curso contribuíram diretamente para a minha formação. Particularmente aos professores Primo e Taurino, que gentilmente se dispuseram a participar da banca examinadora.

Aos colegas de curso, com quem convivi e compartilhei muitos dos momentos dessa trajetória, em especial as amigas, Gracielle e Mariana com quem tive a oportunidade de compartilhar mais uma etapa da minha vida.

A toda equipe da Delfos Engenharia, por me doar uma infinidade de conhecimento, experiências profissionais e pessoais.

RESUMO

No presente trabalho foi desenvolvida uma análise comparativa entre diferentes modelos estruturais em concreto armado, em busca de mostrar a importância das soluções adotadas em relação aos custos das estruturas em função da arquitetura. A análise comparativa foi feita entre diferentes modelos estruturais compatíveis com uma edificação de 10 pavimentos para uso residencial/comercial, considerando-se vãos entre pilares de 5,00 e 7,5 m, evidenciando o aspecto da funcionalidade da edificação prevendo uma melhor otimização dos espaços para as vagas dos veículos no pavimento de garagem, para esses tipos de edificações. Foi adotado para estudo três modelos estruturais distintos, variando cada um deles três tipos de lajes, maciça, pré-moldadas treliçadas e nervuradas. Foi analisada a influência das exigências da NBR 15.755/2013 - Desempenho de edificações habitacionais, 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, nos dimensionamentos das estruturas fundamentadas na NBR 6118/2014 e nos custos dos modelos estruturais adotados. Após uma revisão bibliográfica abordando os sistemas estruturais estudados, os materiais utilizados na sua concepção e o método de dimensionamento, as estruturas foram lançadas no programa Eberick 2018, onde foi realizado o dimensionamento e análise, assim como foram obtido os resultados e custos das estruturas. A partir da análise dos resultados, foi possível concluir que para os modelos estruturais adotados, as estruturas com lajes pré-moldadas treliçadas apresentaram-se como soluções mais econômicas.

Palavras chaves: arquitetura, estrutura, concreto armado, custo, funcionalidade, concepção estrutural.

ABSTRACT

In the present work a comparative analysis was developed between different structural models in reinforced concrete, in order to show the importance of the adopted solutions in relation to the costs of the structures in function of the architecture. The comparative analysis was made between different structural models compatible with a 10-storey building for residential / commercial use, considering spans between 5,00 and 7,5 m pillars, showing the aspect of the functionality of the building foreseeing a better optimization of spaces for the spaces of the vehicles in the pavement of garage, for these types of buildings. Three distinct structural models were adopted for study, each of which varied three types of slabs, massive, precast and trussed. It was analyzed the influence of the requirements of NBR 15.755/2013 - Performance of housing constructions, NBR 15.200/2012 - Design of concrete structures in fire situations and NBR 14.432/2001- Requirements of fire resistance of constructive elements of buildings - in the dimensioning of the structures based on NBR 6118/2014 and in the costs of the structural models adopted. After a literature review addressing the structural systems studied, the materials used in their design and the sizing method, the structures were launched in the Eberick 2018 program, where sizing and analysis were carried out, as well as the results and costs of the structures were obtained. From the analysis of the results, it was possible to conclude that for the structural models adopted, the structures with lattice precast slabs presented as more economical solutions.

Keywords: architecture, structure, reinforced concrete, cost, functionality, structural design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Laje nervurada treliçada e vigota treliçada	22
Figura 2 - Seção transversal da laje nervurada com cubetas	24
Figura 4- Áreas de influência: Modelo 1 (5,0x5,0)m	40
Figura 5- Áreas de influência: Modelo 2 (7,5x7,5)m	42
Figura 6- Áreas de influência: Modelo 3 (7,5x5,0)m	43
Figura 7 - Esquema laje nervurada	46
Figura 8 - Isopletas da velocidade básica V_0	49
Figura 9 - Planta de Fôrma: Modelo 1	53
Figura 10 - Forma Modelo 1: Maciça	55
Figura 11 - 3D: Modelo 1- Maciça	56
Figura 12 - Deslocamentos: Modelo 1- Maciça	56
Figura 13 - Forma Modelo 1: Treliçada	59
Figura 14 - 3D: Modelo 1 - Treliçada	60
Figura 15 - Deslocamentos: Modelo 1 - Treliçada	60
Figura 16 - Forma Modelo 1: Nervurada	63
Figura 17 - 3D: Modelo 1 - Nervurada	64
Figura 18 - Deslocamentos: Modelo 1 - Nervurada	64
Figura 19 - Planta de Fôrma: Modelo 2	69
Figura 20 - Forma Modelo 2: Maciça	70
Figura 21 - 3D: Modelo 2 - Maciça	71
Figura 22 - Deslocamentos: Modelo 2 - Maciça	71
Figura 23 - Forma Modelo 2: Treliçada	74
Figura 24 - 3D: Modelo 2 - Treliçada	75
Figura 25 - Deslocamentos: Modelo 2 - Treliçada	75
Figura 26 - Forma Modelo 2: Nervurada	78
Figura 27 - 3D: Modelo 2 - Nervurada	79
Figura 28 - Deslocamentos: Modelo 2 - Nervurada	79
Figura 29 - Planta de Fôrma: Modelo 3	84
Figura 30 - Forma Modelo 3: Maciça	85
Figura 31 - 3D: Modelo 3 - Maciça	86
Figura 32 - Deslocamentos: Modelo 3 - Maciça	86
Figura 33 - Forma Modelo 3: Treliçada	89

Figura 34 - 3D: Modelo 3 – Treliçada.....	90
Figura 35 - Deslocamentos: Modelo 3 - Treliçada.....	90
Figura 36 - Forma Modelo 3: Nervurada.....	93
Figura 37 - 3D: Modelo 3 – Nervurada.....	94
Figura 38 - Deslocamentos: Modelo 3 – Nervurada.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de majoração do carregamento para pilares.....	18
Tabela 2 - Classes de agressividade ambiental.....	28
Tabela 3 - Correspondência entre as classes de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.....	29
Tabela 4 - Classificação das edificações quanto a sua ocupação	33
Tabela 5 - Tempos requeridos de resistência ao fogo	34
Tabela 6 - Dimensões mínimas para vigas contínuas.....	35
Tabela 7 - Dimensões mínimas para lajes contínuas.....	35
Tabela 8 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em duas direções.....	36
Tabela 9 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma só direção	36
Tabela 10 - Modelos estruturais	37
Tabela 11 - Pré-dimensionamento pilares – Modelo 1	39
Tabela 12 - Pré-dimensionamento pilares – Modelo 2	41
Tabela 13 - Pré-dimensionamento pilares – Modelo 3	42
Tabela 14 - Pré-dimensionamento vigas	44
Tabela 15 - Pré-dimensionamento laje maciça.....	44
Tabela 16 - Pré-dimensionamento laje treliçada	45
Tabela 17 - Pré-dimensionamento laje nervura com cubetas.....	46
Tabela 18 - Resumo dos pré-dimensionamentos das seções dos elementos adotados.....	46
Tabela 19 - Valores mínimos das cargas verticais	48
Tabela 20 - Custo do concreto	50
Tabela 21 - Custo do aço	50
Tabela 22 - Custo de fôrma	51
Tabela 23 - Custo da laje treliçadas com enchimento de EPS.....	52
Tabela 24 - Custo lajes nervuradas com cubetas.....	52
Tabela 25 - Consumo de materiais: Modelo 1 - Maciça.....	57
Tabela 26 - Relação custo por elemento: Modelo 1 – Maciça	57
Tabela 27 - Consumo de materiais: Modelo 1 - Treliçada	61
Tabela 28 - Blocos de enchimento: Modelo 1 - Treliçada	61
Tabela 29 - Relação custo por elemento: Material 1 – Treliçada.....	61
Tabela 30 - Consumo de materiais: Modelo 1 - Nervurada	65
Tabela 31 - Blocos de enchimento: Modelo 1 - Nervurada.....	65
Tabela 32 - Relação custo por elemento: Modelo 1 – Nervurada	65

Tabela 33 - Comparativo de materiais e custo: Modelo 1	66
Tabela 34 - Consumo de materiais: Modelo 2 - Maciça.....	72
Tabela 35 - Relação custo por elemento: Modelo 2 – Maciça	72
Tabela 36 - Consumo de materiais: Modelo 2 - Treliçada	76
Tabela 37 - Blocos de enchimento: Modelo 2 - Treliçada	76
Tabela 38 - Relação custo por elemento: Modelo 2 – Treliçada	76
Tabela 39 - Consumo de materiais: Modelo 2 - Nervurada	80
Tabela 40 - Bloco de enchimento: Modelo 2 – Nervurada.....	80
Tabela 41 - Relação custo por elemento: Modelo 2 – Nervurada	80
Tabela 42 - Comparativo de materiais e custo: Modelo 2.....	81
Tabela 43 - Consumo de materiais: Modelo 3 - Maciça.....	87
Tabela 44 - Relação custo por elemento: Modelo 3 - Maciça	87
Tabela 45 - Consumo de materiais: Modelo 3 - Treliçada	91
Tabela 46 - Blocos de enchimento: Modelo 3 - Treliçada	91
Tabela 47 - Relação custo por elemento: Modelo 3 - Treliçada.....	91
Tabela 48 - Consumo de materiais: Modelo 3 - Nervurada	95
Tabela 49- Blocos de enchimento: Modelo 3 - Nervurada.....	95
Tabela 50 - Relação custo por elemento: Modelo 3 - Nervurada.....	95
Tabela 51 - Comparativo de materiais e custo: Modelo 3.....	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição do custo por elemento: Modelo 1 - Maciça.....	57
Gráfico 2– Distribuição do custo por elemento: Modelo 1 - Treliçada.....	62
Gráfico 3 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 1 - Nervurada.....	66
Gráfico 4 – Comparativo do consumo de concreto: Modelo 1.....	67
Gráfico 5 – Comparativo do consumo de fôrma: Modelo 1.....	67
Gráfico 6 – Comparativo do consumo de aço: Modelo 1.....	67
Gráfico 7 – Comparativo dos custos totais: Modelo 1.....	68
Gráfico 8 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 2 - Maciça.....	72
Gráfico 9 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 2 - Treliçada.....	77
Gráfico 10 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 2 – Nervurada.....	81
Gráfico 11 – Comparativo do consumo de concreto: Modelo 2.....	82
Gráfico 12 – Comparativo do consumo de forma: Modelo 2.....	82
Gráfico 13 – Comparativo do consumo de aço: Modelo 2.....	82
Gráfico 14 – Comparativo dos custos totais: Modelo 2.....	83
Gráfico 15 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 3 – Maciça.....	87
Gráfico 16 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 3 – Treliçada.....	92
Gráfico 17 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 3 – Nervurada.....	96
Gráfico 18 – Comparativo do consumo de concreto: Modelo 3.....	97
Gráfico 19 – Comparativo do consumo de forma: Modelo 3.....	97
Gráfico 20 – Comparativo do consumo de aço: Modelo 3.....	97
Gráfico 21 – Comparativo dos custos totais: Modelo 3.....	98
Gráfico 22 – Comparativo do custo total dos modelos propostos.....	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	Sistemas estruturais	17
	Pilares	17
	Vigas.....	18
	Lajes	19
2.2	Materiais.....	24
	Concreto	25
	Aço	25
	Materiais de enchimento das lajes nervuradas	26
2.3	Estrutura de concreto armado.....	26
	Vantagens e desvantagens do concreto armado	27
	Qualidade das estruturas de concreto armado	27
2.4	Pré-dimensionamento dos elementos estruturais de concreto armado.....	29
2.5	Comentários NBR 15575/2013 – Norma de desempenho	31
	A NBR 14432:2001 Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações–Procedimento.....	32
	A NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.....	34
3	METODOLOGIA	37
3.1	Ferramenta computacional para dimensionamento das estruturas.....	38
3.2	Pré-dimensionamento dos elementos estruturais	38
3.3	Parâmetros de projeto.....	46
	Cargas verticais	47
	Cargas horizontais – vento	48
4	PROCESSAMENTO DA ESTRUTURA	49
4.1	Custos dos materiais adotados no software.....	50
5	RESULTADOS E DISCURSÕES.....	53
5.1	Modelo 1	53
	Maciça	54
	Treliçada.....	58
	Nervurada	62
	Comparativo entre soluções estruturais.....	66

5.2	Modelo 2	68
	Maciça	69
	Treliçada.....	73
	Nervurada	77
	Comparativo entre soluções estruturais.....	81
5.3	Modelo 3	83
	Maciça	84
	Treliçada.....	88
	Nervurada	92
	Comparativo entre soluções estruturais.....	96
	Comparativo total de custos	98
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	99
7	REFERÊNCIAS	102

1 INTRODUÇÃO

Uma boa estrutura, a princípio é aquela que atende aos critérios de segurança, economia e compatibilidade com a arquitetura. Para que estes critérios sejam satisfatórios é essencial a elaboração de um projeto estrutural desenvolvido por um engenheiro civil, especialista da área. Ao desenvolver o projeto o engenheiro civil torna-se responsável pela estrutura que desenvolveu ao registrar por meio de uma Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA) o projeto concluído, em observância as normas vigentes de boas práticas da engenharia. Nesse instante, muitos aspectos devem ser levados em conta, como o processo construtivo, a mão de obra especializada os equipamentos e o custo da estrutura. Portanto, a melhor solução é aquela que procura resolver da melhor maneira os requisitos impostos inerentes aos aspectos citados e a hierarquia que é dada a cada um deles.

Considerar a interação entre o projeto estrutural e o arquitetônico é imprescindível para qualquer estrutura. O dimensionamento e a racionalidade de uma estrutura de concreto dependem diretamente da colaboração do projeto arquitetônico para alcançar esse resultado. No entanto, muitas vezes ao elaborar o projeto, o arquiteto considera superficial tal interação, sendo clara a separação de ambas. Assim, é importante que existam meios e ferramentas que correlacionem tais concepções. A ideia de levar ao arquiteto uma estrutura pré-definida através da colaboração do calculista torna-se uma opção para elaboração de projetos arquitetônicos, visando à compatibilização da arquitetura com a estrutura para obter uma maior racionalidade do projeto. Outra forma é através do ensino aos alunos de arquitetura sobre os procedimentos que facilitam no momento da elaboração do projeto arquitetônico a convivência dos espaços arquitetônicos com os elementos estruturais, ou seja, a compatibilização entre estrutura e arquitetura. Em casos de edificações de multiusos, onde se tenham vários pavimentos com várias plantas baixas diferentes é mais prático e racional se definir primeiro a estrutura (o modelo estrutural em 3D com a modulação mais apropriada entre os pilares e com suas respectivas seções, pré-dimensionadas) para só, em seguida, se montar os espaços internos inerentes a planta baixa dos pavimentos. Assim, nesses casos em vez de se trabalhar primeiro a arquitetura (plantas baixas) e depois a estrutura se aplica o procedimento inverso, ou seja, primeiro a estrutura e depois a arquitetura, desta forma, o arquiteto aprende de forma eficiente e racional, a se relacionar com a estrutura, dispensando a princípio a ajuda do engenheiro calculista para a elaboração do projeto arquitetônico.

Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo comparar diferentes modelos estruturais em concreto armado para uma determinada edificação, mostrar a importância das soluções adotadas em relação aos custos das estruturas e a arquitetura, por meio dos resultados obtidos através do uso de software de cálculo estrutural, Eberick 2018.

Objetivos específicos

- Adotar modelos estruturais em concreto armado compatíveis com a tipologia da edificação em 10 pavimentos para uso residencial/comercial;
- Comparar quantitativamente o consumo dos materiais empregados em cada modelo adotado, verificando-se área de formas, volume de concreto e peso do aço para cada um deles;
- Verificar o grau de influência das exigências relativas as normas de desempenho das edificações (NBR 15.755/2013 - 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), nos dimensionamentos das estruturas e nos custos dos modelos estruturais adotados;
- Apresentar resultados que possibilite definir qual seria a solução mais econômica a ser adotada, dentre os modelos estudados, para o edifício em questão, levando em consideração a relação com os espaços arquitetônicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conceber uma estrutura, não significa necessariamente materializá-la. A concepção da estrutura é anterior ao seu dimensionamento, ou seja, a sua quantificação. (RABELLO, 2000).

Dar forma a uma estrutura está ao mesmo tempo concebendo e para isso são levados em considerações fatores essenciais como os espaços gerados para atender a arquitetura e os materiais utilizados para atender ao dimensionamento da estrutura.

O estudo dos modelos estruturais adotados nesse trabalho foi realizado com base em estruturas de modulações variadas entre vãos de pilares associado ao uso de três tipos de lajes:

maciça, treliçada e nervurada. A seguir, serão apresentados os elementos estruturais que formam cada modelo, seus materiais constituintes e os requisitos adotados para o pré-dimensionamento das peças.

2.1 Sistemas estruturais

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2015), “sistema estrutural é o modo como são arranjados os elementos estruturais, que são as peças (vigas, lajes, pilares) que compõem uma estrutura”.

Em edificações os elementos estruturais se interligam formando as relações entre laje apoiando em viga, viga apoiando em pilar, para juntos formarem a estrutura e desempenharem a função de criar um espaço em que pessoas exercerão diversas atividades.

O caminho pelo qual as forças circulam e atuam sobre os elementos que compõe uma estrutura, leva essas cargas até o solo, seu destino final. O sentido natural das forças gravitacionais atuando é o da vertical, mas se for oferecido a estas forças um caminho diferente, mais longo, elas serão obrigadas a tomá-lo, desviando-se, e provocando esforços que solicitarão os elementos presentes nesse caminho. Uma estrutura com muitos caminhos, ou seja, muitos elementos tende a ter mais elementos com menores dimensões em suas seções transversais, já as com poucos caminhos sofrem um maior acúmulo de forças em cada elemento estrutural, obrigando-os a serem de tamanhos maiores.

Pilares

Pilares são “elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes” (NBR 6118/2014, item 14.4.1.2). São designados a transmitir as ações às fundações, embora possam também transmitir para outros elementos de apoio. As ações são provenientes geralmente das lajes e das vigas que caminham para os pilares.

Esses elementos estruturais são considerados como de maior importância nas estruturas, tanto do ponto de vista da capacidade resistente das cargas quanto no aspecto da estabilidade e da segurança dos edifícios.

Além da transmissão das cargas verticais para os elementos de fundação, os pilares são solicitados por esforços de flexão, com isso, esses elementos podem fazer parte do sistema de

contraventamento, que são responsáveis por garantir a estabilidade global dos edifícios, às ações verticais e horizontais.

Segundo a ABNT NBR 6118/2014 a seção transversal de pilares, qualquer que seja a sua forma, não pode apresentar dimensão menor que 19 cm. Em casos especiais, permite-se a consideração de dimensões entre 19 cm e 14 cm, desde que se multipliquem os esforços solicitantes de cálculo a serem considerados no dimensionamento por um coeficiente adicional γ_n , de acordo com o indicado na Tabela 1. Em todos os casos, determina que a área da seção transversal desses elementos não seja inferior a 360 cm².

Tabela 1 - Coeficiente de majoração do carregamento para pilares

b cm	≥ 19	18	17	16	15	14
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25
onde $\gamma_n = 1,95 - 0,05 b$; b é a menor dimensão da seção transversal, expressa em centímetros (cm). NOTA O coeficiente γ_n deve majorar os esforços solicitantes finais de cálculo quando de seu dimensionamento.						

Fonte: ABNT NBR 6118/2014, Tabela 13.1.

Para dimensionamento dos pilares consideram-se os esforços solicitantes de cálculo, que incluem os momentos fletores, esforços cortantes e axiais, originados das ações verticais e horizontais sofridas.

Vigas

Pela definição da NBR 6118/14 (item 14.4.1.1), vigas “são elementos lineares em que a flexão é preponderante”. As vigas são classificadas como barras e são normalmente retas e horizontais, destinadas a receber as ações das lajes, de outras vigas, de paredes de alvenaria, e eventualmente de pilares. A função das vigas é basicamente vencer vãos e transmitir as ações nelas atuantes para os apoios, geralmente os pilares.

As ações são geralmente perpendicularmente ao seu eixo longitudinal, podendo ser concentradas ou distribuídas. Podem ainda receber forças normais de compressão ou de tração, na direção do eixo longitudinal. As vigas também fazem parte da estrutura de contraventamento

responsável por proporcionar a estabilidade global dos edifícios juntamente com a colaboração das lajes.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 a seção transversal das vigas não pode apresentar largura menor que 12 cm e a das vigas-parede, menor que 15 cm. Estes limites podem ser reduzidos, respeitando-se um mínimo absoluto de 10 cm em casos excepcionais, sendo obrigatoriamente respeitadas as seguintes condições:

- a) Alojamento das armaduras e suas interferências com as armaduras de outros elementos estruturais, respeitando os espaçamentos e cobrimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 6118/2014;
- b) Lançamento e vibração do concreto de acordo com a ABNT NBR 14931/2004.

Lajes

As lajes estão entre os elementos estruturais mais comuns e mais utilizados em projetos estruturais de edificações, tendo função arquitetônica de piso ou cobertura de ambientes. A norma NBR 6118:2014 esclarece que laje é uma maneira usual de se chamar as placas de concreto armado. Segundo ela, placas são “Elementos de superfície plana, sujeitos principalmente a ações normais ao seu plano. As placas de concreto são usualmente denominadas lajes.”.

As ações solicitadas nesses elementos são comumente perpendiculares ao seu plano e consideradas distribuídas por metro quadrado na área ou por forças concentradas. Normalmente o sentido de transmissão dessas cargas é na direção das vigas de apoio nas bordas da laje, que conseqüentemente direciona aos apoios, mas eventualmente também podem ser transmitidas diretamente aos pilares.

Laje maciça

Segundo Rebello (2007), “laje maciça é uma placa de concreto armado cujo plano geralmente é horizontal, podendo algumas vezes apresentar pequenas inclinações, quando utilizadas em coberturas”.

Nesse tipo de laje toda a espessura é composta por concreto, contendo armaduras para atender os esforços de flexão, apoiada em vigas ou paredes ao longo das bordas.

Dentre as vantagens encontradas ao escolher sistemas estruturais formados por esse tipo de laje, Carvalho e Figueiredo Filho (2015) destaca:

- Distribuição das reações em todas as vigas de contorno, causando um melhor

aproveitamento das vigas no pavimento, pois podem ter cargas da mesma ordem de grandeza, dependendo apenas das condições de contorno e da dimensão dos vãos;

- Facilidade em colocar antes da concretagem as passagens de tubulações das instalações em geral;
- Quando utilizada em edificações altas e que repetem o pavimento, os custos com formas e escoramentos são reduzidos, pois podem ser reaproveitados várias vezes.

A norma da ABNT NBR 6118/2014 (item 13.2.4.1) estabelece para lajes maciças os limites de espessura a serem respeitados, são eles:

- 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.

Laje nervurada

Lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte. (NBR 6118/2014 – item 14.7.7).

A resistência do material de enchimento (materiais inertes) não é considerada, ou seja, não contribui para aumentar a resistência da laje nervurada. São as nervuras, unidas e solidarizadas pela mesa (ou capa), que proporcionam a necessária resistência e rigidez.

As lajes nervuradas podem ser armadas em uma direção (unidirecional) ou em duas direções (em cruz ou bidirecional), em função da existência de nervuras em apenas uma ou nas duas direções.

Os materiais de enchimento têm finalidade de tornar a superfície inferior plana ou servir de molde para a capa da laje e as nervuras. Os materiais mais utilizados são blocos cerâmicos, de poliestireno expandido (EPS) e de concreto ultraleve. As nervuras podem também ficar expostas ou aparentes quando não são colocados materiais inertes entre elas.

As lajes nervuradas apresentam as seguintes vantagens em relação às lajes maciças de concreto (Bastos, 2015):

- menor peso próprio;
- menor consumo de concreto;

- redução de fôrmas;
- maior capacidade de vencer grandes vãos;
- Maiores planos lisos (sem vigas).

As lajes nervuradas classificam-se em pré-moldadas ou moldadas no local. Neste estudo será abordado um tipo específico de laje nervurada com vigotas pré-moldadas: as do tipo treliçada. Às lajes nervuradas moldadas no local, podem utilizar moldes de plástico reforçado (chamados de cubetas), que podem ser reaproveitados, para a confecção das nervuras. Esta opção minimiza o uso de fôrmas e também corresponde a um dos nossos objetos de estudo.

A NBR 6118/2014 faz algumas exigências quanto à dimensão dos elementos que formam essas lajes, as principais são que:

- 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 (l_0) 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 F maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de $4\text{ cm} + F$, ou $4\text{ cm} + 2F$ 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.

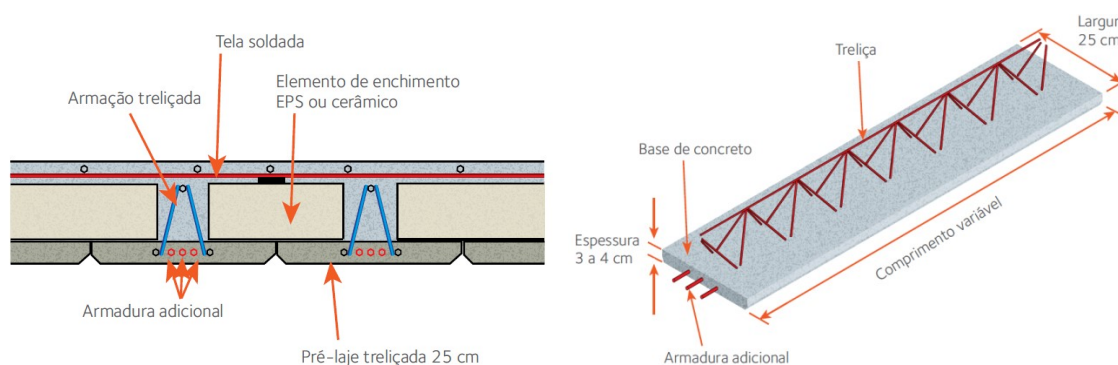
Para o processo de dimensionamento das lajes nervuradas, a NBR 6118/2014 determina as seguintes condições:

- 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.

Laje nervurada com vigota treliçada

Refere-se a um tipo de laje nervurada unidirecional composta por vigotas pré-fabricadas com armaduras treliçadas, esquema apresentado na Figura 1. A utilização deste sistema na construção brasileira tem sido crescente. As vigotas com armadura treliçada correspondem às nervuras da laje, que permitem uma boa aderência das peças pré-moldadas com o capeamento de concreto moldado in loco, e também algumas facilidades e vantagens construtivas na utilização deste sistema estrutural.

Figura 1 - Laje nervurada treliçada e vigota treliçada



Fonte: Manual técnico de lajes treliçadas Arcelor Mittal (2010)

A armação da treliça segundo o Catálogo Técnico da Arcelormittal é constituída por um fio superior (banzo superior) que colabora na resistência ao momento fletor negativo e que funciona como armadura de compressão durante a etapa de montagem e concretagem da laje. Juntamente com os banzos ou fios inferiores, dois no total, que resistem a ação do momento fletor positivo. Os banzos inferior e superior são unidos por barras diagonais inclinadas (em sinusóide), que proporcionam rigidez ao conjunto, melhoram o transporte e manuseio das vigotas já prontas e aumentam a resistência aos esforços cortantes.

Os blocos de enchimento exercem a função de aumentar a altura da laje, aumentar o braço de alavanca formado pela capa de concreto comprimido e a armadura tracionada. Como o concreto abaixo da linha neutra não tem função estrutural, ele é substituído por materiais leves e vazios, que dar forma ao concreto, dando fôrma às nervuras e à capa, além de alguns, como o EPS, proporcionam superfícies inferiores lisas das lajes. Os materiais de enchimento devem ser preferencialmente leves e de custo baixo, sendo mais comuns os de material cerâmico e o EPS (isopor), em construções de pequeno porte. A NBR 14859-1/2016 estabelece parâmetros, como dimensões, tolerâncias e cargas de ruptura desses elementos, que são considerados pré-fabricados não estruturais.

As principais vantagens de utilização de sistemas estruturais com lajes treliçadas em relação a lajes maciças são (Muniz, 1991 apud Spohr, 2008):

- Diminuição do peso da laje;
- Redução da quantidade de estoque e movimentação de materiais no canteiro de obras;
- Diminuição do custo de mão de obra de ferreiros e carpinteiros;
- Uso dos blocos de EPS têm como vantagem o fato de deixarem o tetopronto para receber o acabamento;
- As lajes pré-fabricadas apresentam como vantagens a rapidez de execução e a economia de formas e de escoramento.

Como principais desvantagens na escolha da laje treliçada temos:

- Dificuldade na execução das instalações prediais (Carvalho e Figueiredo Filho, 2015);
- Os valores dos deslocamentos transversais são em uma mesma situação, bem maiores do que os apresentados em lajes maciças (Carvalho e Figueiredo Filho, 2015);
- Exige maiores cuidados durante a concretagem (Faria, 2010 apud Caio, 2014);

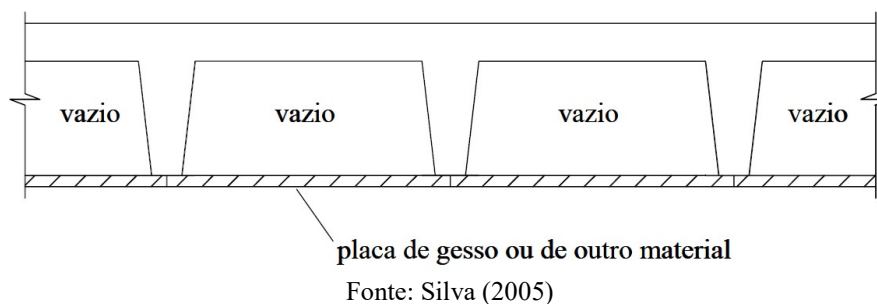
Rebello (2007) afirma que “para garantir um bom comportamento da laje é necessário uma boa aderência entre o concreto novo da capa e o concreto já curado da vigota. Também comenta que esse tipo de laje é uma solução econômica para vãos pequenos, por minimizar o uso de fôrmas, porém vence vãos de até 15 m ou mais, e seu uso em edifícios altos não ocorre com tanta frequência, por conta da dificuldade de transporte vertical e risco de acidentes”.

Laje nervurada com cubetas

Ao optar por permanecerem vazios os espaços entre as nervuras, há a necessidade de se utilizar fôrma em toda a laje. Para isso tem-se adotado a utilização de fôrmas de cubetas de polipropileno, reaproveitáveis encontradas em variadas modulações, proporcionam, sobretudo, uma ótima precisão nas dimensões e acabamento.

O ideal é que as nervuras após a retirada dos moldes fiquem aparentes, que não exista restrição para isso. Em edifícios residenciais / comerciais é comum que se esconda essas nervuras e os espaços vazios entre elas, colocando fôrro, em placas de gesso ou outro material, fixado na própria laje, em sua face inferior, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Seção transversal da laje nervurada com cubetas



As principais vantagens desse sistema citadas por Silva (2005) são:

- não aumentam o peso próprio da estrutura;
- possibilita o uso de forro falso, que permite a colocação de dutos de instalação não embutidos na estrutura;
- o reaproveitamento das cubetas;
- não incorpora peso à laje e por serem leves, facilitam o manuseio na obra;
- atendem a diversos tipos de projetos, pois são encontradas com diversas dimensões e alturas.

As lajes nervuradas com cubetas exigem uma altura h cerca de 50% superior à que seria necessária para as lajes maciças. Entretanto, o peso próprio da laje nervurada (e o consumo de concreto) é inferior ao da laje maciça, resultando em uma solução mais econômica para vãos acima de aproximadamente 8 m. (ARAÚJO, 2003).

Os pontos negativos da opção de utilização desse sistema estrutural são eles:

- necessidade de mão de obra que conheça os sistemas de montagem do escoramento, bem como de armação das estruturas, (DORNELES, 2014);
- atenção especial durante a concretagem, sobretudo na região das nervuras, a fim de evitar a formação de vazios, (DORNELES, 2014).

2.2 Materiais

Atualmente os materiais estruturais mais utilizados são o concreto e o aço. Por vezes, eles se completam, e em outras, competem entre si, de modo que muitas estruturas de mesmo tipo e função podem ser construídas com qualquer um desses materiais. Nesse estudo são abordados sistemas estruturais de concreto armado, resultado da associação desses dois

materiais.

Concreto

O concreto consiste no material resultante da mistura de água, cimento e agregados. Em algumas situações são realizadas adições de produtos químicos ou outros componentes com a finalidade de melhorar algumas características, como aumentar a trabalhabilidade e a resistência e retardar a velocidade das reações químicas que ocorrem no material. Caracteriza-se como um material que apresenta grande resistência a compressão e baixa resistência a tração, na ordem de 1/10 da resistência a compressão.

As diversas características que o concreto endurecido deve apresentar para que possa ser utilizado dependem fundamentalmente do planejamento e dos cuidados tomados na sua execução. O planejamento consiste em definir as propriedades necessárias do concreto, analisar e escolher os materiais existentes ou disponíveis, estabelecer uma metodologia para estabelecer o traço (proporção entre os componentes), os equipamentos para a mistura, o transporte, o adensamento e a cura. (CARVALHO e FIGUEIREDO, 2015).

Aço

Aço é o material composto por um teor de carbono inferior a 2,04%. As barras e fios desse material destinados a armaduras para concreto armado possuem, normalmente, teor de carbono entre 0,08% e 0,5%. Esse material tem como principais características a deformabilidade e resistência a tração.

As características mecânicas mais significantes para a definição de um aço, obtidas em ensaios de tração, são: resistência característica de escoamento, limite de resistência e alongamento na ruptura. (CARVALHO e FIGUEIREDO, 2015).

A norma NBR 7480:2007 define os tipos, as características e outros itens sobre as barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. As barras utilizadas no concreto armado são identificadas com a sigla CA (concreto armado), em forma cilíndrica com diâmetros variados.

Para esse estudo foram utilizados o aço CA -60 para os fios de \varnothing 5mm, utilizada nas armaduras transversais e aço CA - 50, para as demais barras utilizadas, nas armaduras longitudinais dos pilares, das vigas e das armaduras positivas e negativas das lajes.

Materiais de enchimento das lajes nervuradas

Nesse estudo fará o uso de dois tipos de lajes que utilizam material de enchimento na sua composição, as nervuradas e as pré-moldadas treliçadas.

Na opção da utilização de laje nervurada no programa Eberick, disponibiliza três tipos de materiais de enchimento, EPS (poliestireno expandido), bloco cerâmico e cubetas plásticas, com um banco de dados diversificado de dimensões das peças, permitindo a escolha de acordo com a necessidade.

Foi escolhida as cubetas plásticas como material de enchimento das lajes nervuradas, por apresentarem uma variedade de tamanhos, serem usualmente utilizadas em edifícios, além de ter um bom desempenho no que diz respeito a vencer grandes vãos, como apresenta a literatura. E tem a grande vantagem de ser removida após o período de cura do concreto das lajes, não acarretando sobrecarga de materiais e beneficiando o reaproveitamento. Apesar do programa não levar em consideração esse fato optou-se por utilizá-la, pois esses custos podem ser amenizados ao levar em conta que muitas são objetos locativos e que exigem manutenção ou substituição durante o uso.

O software utilizado para dimensionamento das estruturas apresenta duas opções de lajes treliçada, 1D e 2D, unidirecional e bidirecional, respectivamente. Para esse trabalho foi escolhida a opção treliçada 1D para aplicação nos modelos, que corresponde as treliças dispostas em uma só direção. Os materiais de enchimento disponíveis para esse tipo de laje são EPS (poliestireno expandido) e bloco cerâmico, sendo o primeiro escolhido para aplicação.

2.3 Estrutura de concreto armado

O concreto armado não é concreto e aço, mas um terceiro material resultante da forte ligação desenvolvida entre o concreto e o aço. Essa forte ligação recebe o nome de aderência, que se dá por meios mecânicos (atrito) e pelo efeito colante propiciado pelo cimento. (REBELLO, 2007).

O que assegura a existência do material “concreto armado” é não existir o deslizamento ou escorregamento relativo entre ambos quando a peça é solicitada. O conjunto formado por elementos estruturais de concreto armado deve comportar-se como uma peça monolítica, ou seja, é indispensável a aderência eficiente entre os materiais.

A associação aço-concreto visa, na sua concepção primeira, superar a deficiência das

estruturas nas regiões de tração, ao mesmo tempo em que o concreto de boa qualidade e com espessura adequada trabalha para garantir o cobrimento, fornecendo um meio alcalino que protege o aço da corrosão, garantindo a durabilidade da estrutura.

Vantagens e desvantagens do concreto armado

Quanto ao seu uso estrutural, o concreto armado apresenta algumas vantagens, segundo Carvalho e Figueiredo (2015).

- Apresenta boa resistência a maioria das solicitações;
- Tem boa trabalhabilidade, e por isso se adapta a várias formas, dando maior liberdade ao projetista;
- Permite obter estruturas monolíticas. Existe aderência entre o concreto endurecido e o que é lançado posteriormente, facilitando a transmissão de esforços;
- As técnicas de execução são razoavelmente dominadas em todo o país;
- É um material durável, desde que seja bem executado, conforme as normas;
- Apresenta durabilidade e resistência ao fogo superiores em relação a outros materiais, desde que os cobrimentos e a qualidade do concreto estão de acordo com as condições do ambiente que está inserida a estrutura.

As desvantagens mais marcantes do concreto armado como material estrutural, segundo Carvalho e Figueiredo (2015), são:

- Acarreta em estruturas com peso próprio muito grande, limitando seu uso em determinadas situações ou elevando bastante seu custo;
- As reformas e adaptações são, muitas vezes, de difícil execução;
- São necessários um sistema de fôrmas e escoramentos que geralmente precisam permanecer no local até que o concreto alcance resistência adequada.

Qualidade das estruturas de concreto armado

Segundo Araújo (2010), “além dos aspectos econômicos e estéticos, uma estrutura de concreto armado deve ser projetada para atender aos seguintes requisitos de qualidade: segurança, bom desempenho em serviço e durabilidade”.

No que diz respeito à segurança, a estrutura deve ser projetada para suportar as ações que lhe são impostas durante sua vida útil, sem a ocorrência de ruptura ou perda de equilíbrio. Estes critérios são atendidos pela utilização dos métodos de cálculo na ruptura, ou dos **estados-limites últimos**. A ideia é que sempre as solicitações de cálculo, com cargas majoradas, sejam menores que as solicitações últimas, consideradas com os materiais tendo sua resistência minorada.

Para que se atinja um bom desempenho em serviço, nas condições normais de utilização as deformações da estrutura devem ser suficientemente pequenas para não provocar danos inaceitáveis em elementos não estruturais, não afetar o seu uso ou a sua aparência, nem causar desconforto aos usuários. O nível de fissuração também não deve comprometer o uso e aparência da estrutura, nem prejudicar a proteção da armadura das peças. Esses parâmetros são atingidos a partir do cumprimento dos critérios adotados pelos **estados limites de serviço**.

A durabilidade é tratada como o fator de conservação sob as influências ambientais, sem a necessidade de reparos de alto custo ao longo da vida útil dessas estruturas.

Durabilidade e a NBR 6118:2014

A NBR 6118:2014 (Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento) apresenta os requisitos gerais para um projeto de estruturas de concreto armado.

No item 6 da presente norma, apresenta as diretrizes para a durabilidade das estruturas, os mecanismos de deterioração que devem ser considerados, assim como retrata a agressividade do ambiente, que está relacionado as ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas. Essa agressividade deve ser considerada nos projetos, segundo a classificação apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes de agressividade ambiental

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

Essa durabilidade é inteiramente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto do cobrimento, essas exigências são especificados no item 7 da NBR 6118:2014. Além dessas considerações do concreto, deve-se especificar um cobrimento mínimo para as armaduras, a norma trás no subitem 7.4 a correspondência dos elementos estruturais, as classes de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para proteção das armaduras em cada caso, na Tabela 3 apresentada.

Tabela 3 - Correspondência entre as classes de agressividade ambiental e o cobrimento nominal

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

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

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

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

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

Fonte: NBR 6118:2014 - Tabela 7.2

2.4 Pré-dimensionamento dos elementos estruturais de concreto armado

Estimar as dimensões dos elementos estruturais baseado em critérios ou pré-dimensionar as seções desses elementos, é um procedimento usado pelos arquitetos, para verificar a compatibilidade dos espaços e dos volumes inerentes ao projeto arquitetônico com as prováveis dimensões que venham a ter os elementos estruturais necessários para a execução da edificação. Na engenharia se usa pelo mesmo motivo, mas também, para determinar inicialmente o peso próprio dos elementos estruturais, tão necessário para o dimensionamento deles. Na literatura específica, encontra-se registrada alguns critérios e recomendações de alguns autores, para o uso de fórmulas e/ou ábacos simplificados que auxiliam nesse procedimento de estimar as dimensões dos elementos estruturais.

O presente trabalho baseou-se nos procedimentos indicados por Pinheiro (2007) e Rebello (2007) para o pré-dimensionamento dos elementos estruturais, pilares, vigas e lajes de cada modelo e avaliado.

O método descrito por Pinheiro (2007) tem o princípio de realizar o pré-dimensionamento dos pilares, a partir da estimativa da carga transferida para o pilar, através do processo das áreas de influência. Esse processo consiste em dividir a área total do pavimento em áreas de influencia, relativas a cada pilar e, a partir daí, estimar a carga que eles irão absorver (PINHEIRO, 2007).

O critério utilizado para a divisão das áreas consiste em variar a distâncias de seus eixos entre $0,45l$ e $0,55l$, onde l corresponde ao comprimento do vão entre eixos. A área da seção da peça é estimada utilizando a Equação 1.

$$A_c = \frac{30 \cdot \alpha \cdot A \cdot (n+0,7)}{F_{ck} + 0,01 \cdot (69,2 - F_{ck})} \quad \text{Equação (1)}$$

$A_c = b \times h$ (área da seção transversal do pilar – cm^2);

α = coeficiente que leva em conta a excentricidade da carga;

A = área de influência do pilar (m^2) n = número de pavimentos-tipo;

$(n+0,7)$ = número que considera a cobertura, com carga estimada em 70% da relativa ao pavimento-tipo;

f_{ck} = resistência característica do concreto (kN/cm^2).

O coeficiente de majoração da força normal, que leva em consideração a excentricidade da carga, são os seguintes valores:

$\alpha = 1,3$ - pilares internos ou de extremidade, na direção da maior dimensão;

$\alpha = 1,5$ - pilares de extremidade, na direção da menor dimensão;

$\alpha = 1,8$ - pilares de canto.

Rebello (2007) apresenta fórmulas mais simplificadas do que Pinheiro (2007) para pré-dimensionar as seções dos pilares de concreto, entretanto, com menor precisão, pois não leva em consideração distâncias entre os eixos dos pilares.

Dentre os métodos para pré-dimensionamento das vigas, as fórmulas empíricas apresentadas em Rebello (2007), permitem que se obtenham os valores com base nas informações dos dados do autor que classifica as cargas pequenas como sendo equivalentes a cargas provocadas por uma laje apoiada em um lado da viga e ausência de alvenaria sobre ela,

justificando assim, que a altura (h) da seção da viga seja determinada como sendo 8% do vão da viga, para esse tipo de carga. Para as cargas médias, relativo à existência de cargas provenientes de duas lajes, situadas nos dois lados da viga, e existência alvenaria, deve-se considerar para a altura (h) da viga o valor percentual de 10% do vão dela e finalmente para as cargas grandes, quando existem além de carregamentos oriundos de lajes e alvenaria, existem outras vigas apoiadas sobre ela, deve-se adotar para altura (h) da viga, o valor correspondente a 12% do vão. Os valores percentuais para se determinar a altura (h), sofrem pequenas alterações em função dos vínculos e do tipo de viga, ou seja, se a viga é biapoiada ou se tem balanço ou se ela é uma viga contínua.

As lajes são elementos que variam o seu comportamento estrutural em função das proporções entre os seus lados, dos seus vínculos, das suas cargas atuantes e dos materiais constituintes, fatores que são considerados por Rebello (2007) na apresentação das fórmulas empíricas ou gráficas, para se determinar as espessuras pré-dimensionadas dos diferentes tipos de lajes estudados.

As normas vigentes apresentadas a seguir da NBR 6118/2014 e NBR 15575/2013, apresentam os requisitos para serem considerados na escolha das dimensões mínimas dos elementos estruturais.

2.5 Comentários NBR 15575/2013 – Norma de desempenho

Em 2013 entrou em vigor a Nova Norma de Desempenho de Edificações - NBR 15575/2013, que veio com atualizações importantes para garantir a qualidade e a segurança das obras e edificações. A norma estabelece algumas exigências no quesito do conforto e da qualidade ambiental, em cada um dos sistemas que compõem uma edificação: estrutura, vedações, pisos, instalações e coberturas. A partir dela é possível identificar com mais clareza as responsabilidades de cada participante, ou seja, entre projetistas, construtores, usuários e até mesmo os fabricantes.

A NBR 15575 é dividida em cinco partes. Na parte 1 - Requisitos Gerais define as condições quanto à habitabilidade, segurança estrutural, funcionalidade, acessibilidade, desempenho térmico, acústico e lumínico, bem como os métodos de avaliação desses e de outros parâmetros. Estabelece ainda exigências do usuário e dos intervenientes (projetistas, construtores, incorporadores, e fornecedores de insumos e materiais). No item 8 – Segurança contra incêndio, subitem 8.6 apresenta os requisitos para minimizar o risco de colapso estrutural da edificação em situação de incêndio. No caso de estrutura de concreto deve-se atender à:

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

A NBR 14432:2001 Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações–Procedimento

Em suma 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.

Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), 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 estruturas devem ser dimensionadas de modo a atender esse valor mínimo.

As edificações residenciais multifamiliares se enquadram no grupo A, divisão A-2 conforme a Tabela B.1 da NBR 14432/2001 apresentada na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - 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 apartamentos em geral
		A-3	Habitações coletivas	Pensionatos, internatos, mosteiros, conventos, residências geriátricas
B	Serviços de hospedagem	B-1	Hotéis e semelhantes	Hotéis, motéis, pensões, hospedarias, albergues, casas de cômodos
		B-2	Hotéis residenciais	Hotéis e semelhantes com cozinha própria nos apartamentos (incluem-se apart-hotéis, hotéis residenciais)
C	Comercial varejista	C-1	Comércio em geral, de pequeno porte	Armazéns, fabricanas, mercearias, fruteiras, butiques 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, cabineiros laboratórios de análises clínicas sem internação, centros profissionais e outros
		D-2	Agências bancárias	Agências bancárias e semelhantes
		D-3	Serviços de reparação (exceto os classificados em G e I)	Lavanderias, assistência técnica, reparação e manutenção de aparelhos eletrodomésticos, chuveiros, pintura de tetos e outros
E	Educação 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 (judo, jiu-jitsu, dança marcial e outros), esportes coletivos (tênis, futebol e outros que não estejam incluídos em F-3), sessas, casas de fisioterapia e outros
		E-4	Centros de treinamento profissional	Escolas profissionais em geral
		E-5	Pré-escolas	Creches, escolas maternais, 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 ar-condicionado, 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

A partir da Tabela A.1, da presente norma, mostrada aqui na Tabela 5, é possível determinar o TRRF, onde é determinado em função da profundidade do subsolo (quando houver) e da altura da edificação.

Tabela 5 - 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-6, 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 (90)	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

Dependendo da altura do subsolo e/ou da edificação, as edificações residências multifamiliares na Tabela A.1 da norma, assume valores do TRRF entre 30 a 120 min.

A NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio

A NBR 15200/2012 complementa a NBR 14432/2001, ao determinar os critérios de projeto de estruturas de concreto armado a partir da classificação da edificação, bem como do TRRF estabelecido pela NBR 14432/2001.

Essa norma 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 do elemento estrutural, recomendadas em tabelas, em função do tipo de elemento estrutural e do TRRF.

As Tabelas 6 e 7, desse trabalho, reproduzem as tabelas da norma que representam as dimensões mínimas para vigas contínuas (Tabela 5) e para lajes maciças contínuas (Tabela 6).

Tabela 6 - Dimensões mínimas para vigas contínuas

TRRF min	Combinações de b_{\min}/c_1 mm/mm				$b_{w\min}$ mm
	1	2	3	4	
30	80/15	160/12	–	–	80
60	120/25	190/12	–	–	100
90	140/37	250/25	–	–	100
120	190/45	300/35	450/35	500/30	120
180	240/60	400/50	550/50	600/40	140

^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 15200:2012- Tabela 5

Tabela 7 - 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 15200:2012- Tabela 7

A NBR 15200:2012 indica que para lajes nervuradas em duas direções, para esse estudo são as lajes nervuradas com cubetas, que utilize a Tabela 8 para obtenção das dimensões mínimas de altura e capa da peça. No caso de lajes nervuradas em uma só direção, nesse estudo as lajes treliçadas, a norma indica a obtenção das dimensões mínimas a partir da Tabela 9, na coluna laje armada em uma direção.

Tabela 8 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em duas direções

TRRF min	Nervuras Combinações de b_{\min}/c_1 a mm/mm			Capa ^b h/c_1 mm/mm
	1	2	3	
30	80/15			60/10
60	100/35	120/25	190/15	80/10
90	120/45	160/40	250/30	100/15
120	160/60	190/55	300/40	120/20
180	220/75	260/70	410/60	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 15200:2012- Tabela 9

Tabela 9 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma só direção

TRRF min	h^a mm	c_1 mm		
		Laje armada em duas direções ^b		Laje armada em uma direção $\ell_y/\ell_x > 2$
		$\ell_y / \ell_x \leq 1,5$	$1,5 < \ell_y / \ell_x \leq 2$	
30	60	10	10	10
60	80	10	15	20
90	100	15	20	30
120	120	20	25	40
180	150	30	40	55

^a Dimensões mínimas para garantir a função corta-fogo.
^b Lajes apoiadas nas quatro bordas; caso contrário, a laje deve ser considerada armada em uma direção.
^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 15200:2012- Tabela 6

3 METODOLOGIA

A proposta do trabalho consiste em obter a melhor opção de sistema estrutural em concreto armado, tendo em vista a comparação entre os fatores quantitativos e de custo dos materiais utilizados para a execução de nove modelos estruturais distintos para um edifício de 10 pavimentos. Analisando assim, os impactos de diferentes modulações dos pilares e o uso de diferentes tipos de laje, adequadas a um sistema com vigas.

Inicialmente foi adotado um pavimento tipo para todos os andares e para que ficasse evidente o aspecto da funcionalidade da edificação prevendo uma melhor otimização dos espaços para as vagas dos veículos no pavimento de garagem, foi adotado, as seguintes distâncias entre pilares: **5,0 m e 7,5 m**.

Esse método foi adotado com objetivo de apresentar resultados que possibilitem uma estimativa de custos aos profissionais da construção civil, para servir de referência na tomada de decisão por um modelo estrutural a ser adotado.

Foi considerado um mesmo valor carga de parede, por modelo analisado, distribuído em todas as lajes dos módulos estruturais, exceto, no módulo central referente à colocação de escadas e elevadores, visando à obrigatoriedade de tais elementos para uma edificação, pois o intuito da pesquisa é obter uma modulação estrutural na qual possa se adequar a alguns tipos de plantas baixas do projeto arquitetônico.

Quanto as dimensões mínimas dos elementos estruturais, baseou-se nas orientações da norma NBR 6118:2014 e as normas de incêndio NBR 14432:2001 e NBR 15200:2004. O Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) considerado para as edificações desse trabalho foi de 120min, definido para edificações A-2, com altura superior a 30m, conforme a NBR14432:2001 (Tabela 4).

Os modelos estruturais adotados estão representados na Tabela 10.

Tabela 10 - Modelos estruturais

MODELO	MODULAÇÃO ENTRE PILARES	TIPOS DE LAJES		
		Maciça	Treliçada	Nervurada
1	5,00 x 5,00 m	X	X	X
2	7,5 x 7,5 m	X	X	X
3	7,5 x 5,0 m	X	X	X

Fonte: O autor

3.1 Ferramenta computacional para dimensionamento das estruturas

O Eberick 2018 é o software escolhido para elaboração dos projetos estruturais desse trabalho, para obtenção dos relatórios de quantitativos e custos dos materiais referentes a cada modelo analisado.

É um software nacional, produto da AltoQi, destinado a elaboração de projetos estruturais em várias versões, como por exemplo, em concreto armado moldado in-loco, pré-moldado, alvenaria estrutural e estruturas mistas, possuindo recursos para agilizar as etapas de modelagem. Além disso, realiza a análise da estrutura, o dimensionamento das peças estruturais, a compatibilização com projetos complementares e a geração de pranchas finais contendo detalhamentos das armaduras e planta de formas facilitando assim a produtividade na elaboração dos Projetos. Nesta fase apresenta durante a visualização do pórtico 3D da estrutura facilitando o entendimento da geometria proposta.

O dimensionamento ocorre segundo determina as normas brasileiras, sobretudo a NBR 6118 (Projeto de Estrutura de Concreto – Procedimento), verificando os elementos para o Estado Limite Último e de Serviço (ELU e ELS). Os resultados de dimensionamento são apresentados em janelas para cada elemento estrutural, que demonstram os esforços e os resultados de armadura.

A plataforma permite a criação de relatórios com o memorial de cálculo da edificação, com os critérios adotados no projeto e com resumo de materiais da edificação. Sendo possível também, a geração da tabela de quantitativos, que pode incluir o custo dos materiais de cada peça estrutural e o custo total da edificação.

Sabendo que as configurações da plataforma, condizem com as determinações da NBR 6118/2014, procurou-se não alterá-las durante o processo. Em seguida, serão apresentados alguns dados determinados e parâmetros adotados para o lançamento da estrutura no software, relacionado às dimensões pré-determinadas dos elementos, as propriedades do concreto, aço, os materiais de enchimento para cada uma das lajes utilizadas nos modelos e os carregamentos solicitados.

3.2 Pré-dimensionamento dos elementos estruturais

Precedendo o lançamento dos modelos estruturais no software, para dar início ao dimensionamento é preciso que se obtenham as dimensões mínimas dos elementos para que sejam feitos os lançamentos.

Foi escolhida a metodologia adotada por Rebello (2007) e Pinheiro (2007), para pré-dimensionar os elementos desse trabalho, levando em consideração também as recomendações de dimensões mínimas de algumas normas vigentes.

Pilares

O pré-dimensionamento de um pilar consiste em determinar a área da sua seção transversal. Aplicando o método de Pinheiro (2007), que estima a carga do pilar baseado na área de influência de cada elemento, aplicando a Equação 1, demonstrada no item 2.4, obtêm a área da seção transversal necessária.

Com auxílio do programa Autocad obteve-se as áreas de influências dos elementos como mostra as Figuras 3 a 7. Considerando também que os modelos estruturais desse trabalho têm 10 pavimentos tipo e que será utilizado $F_{ck} = 25$ Mpa, obtiveram-se as áreas da seção para cada pilar. Adotou-se, portanto, uma largura na qual fosse mais conveniente para cada caso, resultando na dimensão do outro lado da seção retangular empregada. O valor final adotado condiz com um valor que permitisse ao adotar a largura, não resultasse em pilar-parede (limites prescritos na NBR 6118:2014) e ao mesmo tempo atendesse em área a maioria dos pilares pré-dimensionados. Buscando otimizar as atividades e resultados, utilizada uma única dimensão para todos os pilares, para cada modelo.

Modelo 1:

A área da seção do pilar pré-dimensionada adotada é de $25 \times 80 \text{ cm}^2$. Vãos entre pilares de (5,0 x 5,0) m.

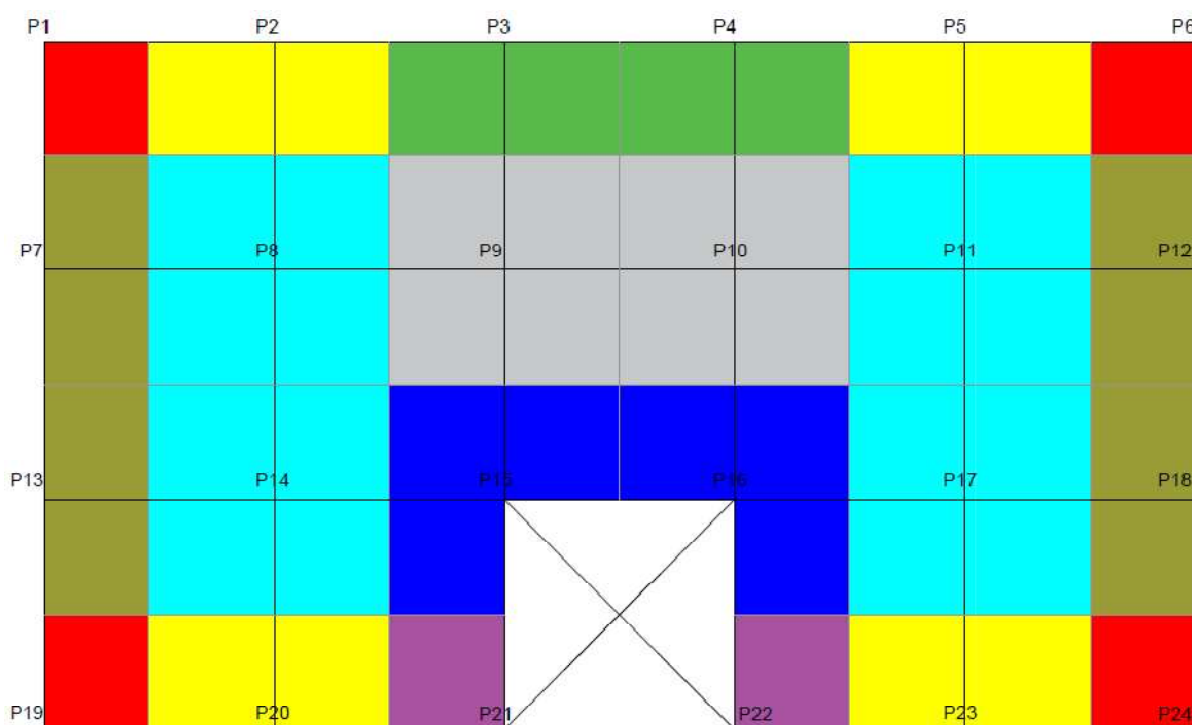
Tabela 11– Pré-dimensionamento pilares – Modelo 1

	Área de influência (m ²)	Ac (cm ²)	B (cm)	H (cm)
P1	5,62	781,15	25	31
P2	13,12	1317,05	25	53
P3	12,5	1254,81	25	50
P4	12,5	1254,81	25	50
P5	13,12	1317,05	25	53
P6	5,62	781,15	25	31
P7	11,25	1129,33	25	45
P8	26,25	2635,10	25	105
P9	25	2509,62	25	100

P10	25	2509,62	25	100
P11	26,25	2635,10	25	105
P12	11,25	1129,33	25	45
P13	11,25	1129,33	25	45
P14	26,25	2635,10	25	105
P15	18,75	1882,22	25	75
P16	18,75	1882,22	25	75
P17	26,25	2635,10	25	105
P18	11,25	1129,33	25	45
P19	5,62	781,15	25	31
P20	13,12	1317,05	25	53
P21	6,25	868,72	25	35
P22	6,25	868,72	25	35
P23	13,12	1317,05	25	53
P24	5,62	781,15	25	31

Fonte: O autor

Figura 3– Áreas de influência: Modelo 1 (5,0x5,0)m



Fonte: O autor

Modelo 2:

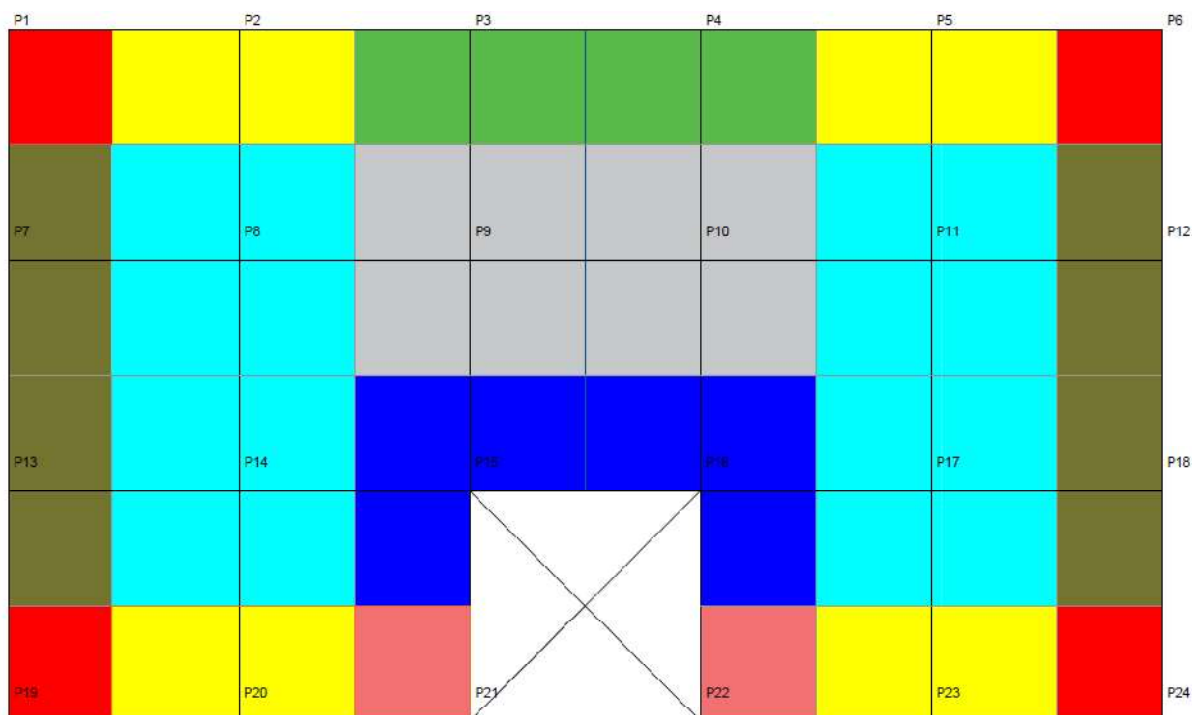
A área da seção do pilar pré-dimensionada adotada é de $35 \times 150 \text{ cm}^2$. Vãos entre pilares de $(7,5 \times 7,5) \text{ m}$.

Tabela 12– Pré-dimensionamento pilares – Modelo 2

	Área de influência (m ²)	Ac (cm ²)	B (cm)	H (cm)
P1	12,66	1759,67	35	50
P2	29,53	2964,37	35	85
P3	28,12	2822,82	35	81
P4	28,12	2822,82	35	81
P5	29,53	2964,37	35	85
P6	12,66	1759,67	35	50
P7	25,31	2540,74	35	73
P8	59,06	5928,73	35	169
P9	56,25	5646,65	35	161
P10	56,25	5646,65	35	161
P11	59,06	5928,73	35	169
P12	25,31	2540,74	35	73
P13	25,31	2540,74	35	73
P14	59,06	5928,73	35	169
P15	42,18	4234,23	35	121
P16	42,18	4234,23	35	121
P17	59,06	5928,73	35	169
P18	25,31	2540,74	35	73
P19	12,66	1759,67	35	50
P20	29,53	2964,37	35	85
P21	14,06	1954,26	35	56
P22	14,06	1954,26	35	56
P23	29,53	2964,37	35	85
P24	12,66	1759,67	35	50

Fonte: O autor

Figura 4– Áreas de influência: Modelo 2 (7,5x7,5)m



Fonte: O autor

Modelo 3:

A área da seção do pilar pré-dimensionada adotada é de $25 \times 110 \text{ cm}^2$. Vãos entre pilares de $(7,5 \times 5,0) \text{ m}$.

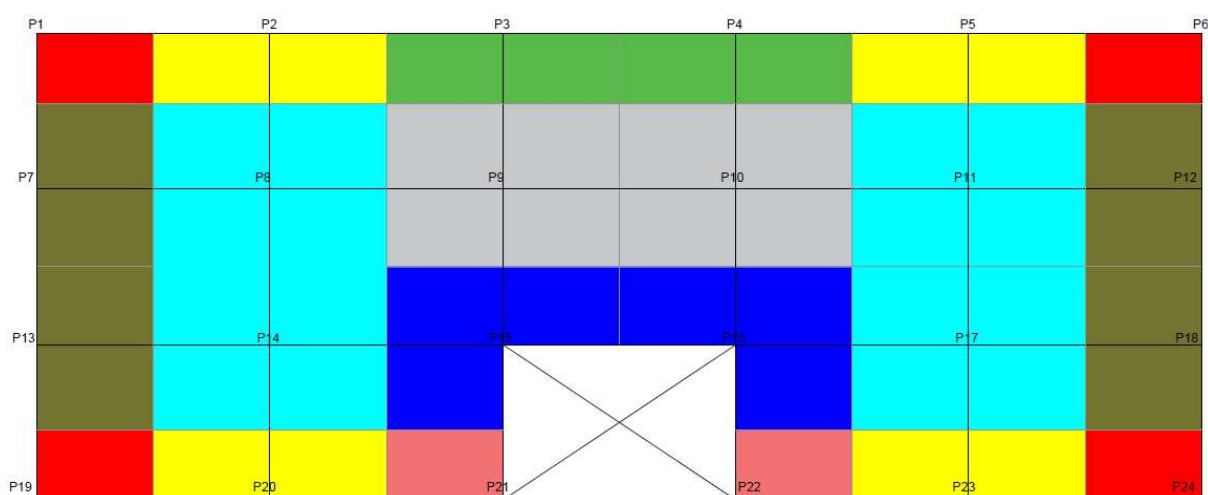
Tabela 13– Pré-dimensionamento pilares – Modelo 3

	Área de influência (m ²)	Ac (cm ²)	B (cm)	H (cm)
P1	8,44	1173,11	25	47
P2	16,87	1693,49	25	68
P3	16,87	1693,49	25	68
P4	16,87	1693,49	25	68
P5	16,87	1693,49	25	68
P6	8,44	1173,11	25	47
P7	19,69	1976,58	25	79
P8	39,37	3952,15	25	158
P9	39,37	3952,15	25	158
P10	39,37	3952,15	25	158
P11	39,37	3952,15	25	158
P12	19,69	1976,58	25	79
P13	19,69	1976,58	25	79
P14	39,37	3952,15	25	158

P15	29,06	2917,18	25	117
P16	29,06	2917,18	25	117
P17	39,37	3952,15	25	158
P18	19,69	1976,58	25	79
P19	8,44	1173,11	25	47
P20	16,87	1693,49	25	68
P21	8,44	1173,11	25	47
P22	8,44	1173,11	25	47
P23	16,87	1693,49	25	68
P24	8,44	1173,11	25	47

Fonte: O autor

Figura 5– Áreas de influência: Modelo 3 (7,5x5,0)m



Fonte: O autor

Os pilares pré-dimensionados corresponderam aos requisitos da norma NBR 6118/2014 com a menor dimensão superior a 19 cm e área de seção transversal superior a 360 cm².

Vigas

As vigas de concreto armado quando apoiadas em mais de dois pilares são consideradas como contínuas, os modelos adotados se encaixam perfeitamente nessa classificação. Nesse sentido, o pré-dimensionamento das vigas foi realizado considerando um valor correspondente a 8% do maior vão para a altura e a largura entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{3}$ da altura. Esses índices equivalem a peças sujeitas a cargas médias, segundo Rebello (2007), pois, estarão suportando cargas oriundas de lajes nos dois lados e alvenaria. Os resultados encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Pré-dimensionamento vigas

Modelo	Vão maior	Altura	Largura
1	5,00 m	40 cm	12
2	7,5 m	60 cm	15
3	7,5 m	60 cm	15

Fonte: O autor

As vigas pré-dimensionadas atenderam aos requisitos da norma NBR 6118/2014 e NBR 15200/2012, para a situação dos modelos acima citados, considerando que os elementos tenham largura mínima de 12 cm.

Lajes Maciças

De acordo com Rebello (2007), a espessura das lajes maciças armadas nas duas direções, deve ser obtida considerando 2% da média do comprimento dos vãos, como mostra a Equação 2 abaixo. Com isso foram estimadas as alturas referentes a cada modelo estudado (Tabela 15).

$$h = 2\% * \left(\frac{L+l}{2}\right) \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo: L = vão maior e l = vão menor.

Tabela 15 - Pré-dimensionamento laje maciça

Modelo	L (m)	l (m)	h (cm)
1	5,00	5,00	10
2	7,50	7,50	15
3	7,50	5,00	12,5

Fonte: O autor

A norma NBR 15200/2012, Tabela 6 desse trabalho, determina que os elementos tenham altura mínima de 12 cm, para atender ao TRRF - Tempo requerido de resistência ao fogo de 120min. Portanto, as dimensões pré-dimensionadas corresponderam aos requisitos estabelecidos, exceto o Modelo 1, que fica definido como 12 cm.

Lajes Treliçadas

Os modelos de lajes treliçadas unidirecionais são compostos por vigotas treliçadas formando as nervuras e blocos de enchimento. Para pré-dimensionar esse tipo de laje são

utilizadas tabelas dos fabricantes, nas quais em função do vão e da sobrecarga, determina-se a altura da laje, assim como, a espessura da sua capa.

Fazendo o uso das tabelas da Gerdau, fabricantes das treliças, escolhendo os blocos de EPS como elemento de enchimento, adotando o maior dos menores vãos das lajes como base e utilizando 200 kgf/m² como a sobrecarga de todos os pavimentos, obtemos os valores apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Pré- dimensionamento laje treliçada

Modelo	L (m)	h (cm)	Capa (cm)
1	5,00	16	4
2	7,50	20	4
3	5,00	16	4

Fonte: O autor

O valor mínimo absoluto previsto na NBR 6118:2014 para a capa dessas lajes é de 4 cm. A norma de incêndio NBR 15200:2012, não faz recomendações referentes a laje pré-moldadas, assim como, material de enchimento das nervuras, com isso, optou-se por adotar apenas as orientações da NBR 6118/2014, como critérios de dimensionamento dessas peças. Portanto, as dimensões pré-dimensionadas corresponderam aos requisitos estabelecidos.

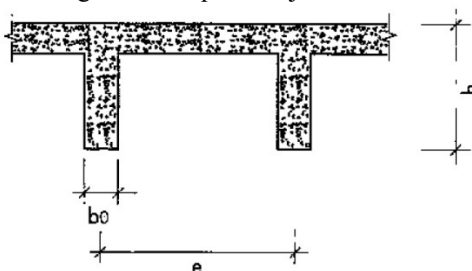
Lajes nervuradas com cubetas

O método proposto por Rebello (2007) propõe um pré-dimensionamento para altura da mesa da laje, largura das nervuras e para o espaçamento delas. A altura da laje (h) é resultado de 4% da média dos vãos (Equação 3), a largura deve ficar entre 1/4 e 1/3 da altura e o espaçamento entre as nervuras devem ser um valor entre 1,5h e 2h. Os valores adotados encontram-se na Tabela 16.

$$h = 4\% * \left(\frac{L+l}{2}\right) \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo: L = vão maior e l = vão menor.

Figura 6 - Esquema laje nervurada



Fonte: Rebello (2007)

Tabela 17 - Pré-dimensionamento laje nervura com cubetas

Modelo	L (m)	l (m)	h (cm)	Largura das nervuras (bo) (1/3h) cm	Espaçamento das nervuras (e) (2h) cm
1	5,00	5,00	20	6,5	40
2	7,50	7,50	30	10	60
3	7,50	5,00	25	8	50

Fonte: O autor

Esse método de pré-dimensionamento não específico a dimensão da capa, porém, em busca de atender os requisitos das normas NBR 6118:2014, que indica 4 cm como valor mínimo e NBR 15200:2012, Tabela 5, para TRRF - Tempo requerido de resistência ao fogo de 120min, define como valor mínimo a altura da capa da laje de 12 cm, serão considerados os valores da Tabela 17.

Tabela 18 - Resumo dos pré-dimensionamentos das seções dos elementos adotados

MODELO	MODULAÇÃO ENTRE PILARES	PILAR (lxh)	VIGAS (lxh)	LAJE MACIÇA (h)	LAJE NERVURADA (h)	LAJE TRELIÇADA (h)
1	5,00 x 5,00 m	25 x 80	12 x 40	12	20	16
2	7,5 x 7,5 m	35 x 150	15 x 60	15	30	20
3	7,5 x 5,0 m	25 x 110	15 x 60	12,5	25	16

Fonte: O autor

3.3 Parâmetros de projeto

Todos os elementos estruturais dimensionados consideraram-se pertencentes a classe C25, resistência a compressão característica $f_{ck} = 25$ Mpa, exceto para as fundações, pois esses elementos não foram considerados nesse estudo. A classe de agressividade ambiental adotada II (moderada) caracteriza o cobrimento de 2,5 cm para lajes e 3,0 cm vigas e pilares.

O peso específico considerado para os elementos de concreto armado foi de 2500 kgf/m³ e para as paredes de alvenaria considerou-se 1300 kgf/m³.

Em relação ao aço, utilizou-se de categorias CA-50 e CA-60, com massa específica de armadura passiva 7850 kgf/m³, módulo de elasticidade de 2100000 kgf/cm² e resistências características ao escoamento (fyk) de 50 Mpa (para o CA-50) e 60 Mpa (para o CA-60).

Na obtenção dos valores de cálculo das ações, utilizou-se os coeficientes de ponderação e fatores de combinação conforme as prescrições normativas e a tipologia da edificação. Assim, obtêm-se as combinações para análise e dimensionamento da estrutura no Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS).

Os carregamentos referentes às ações consideradas no dimensionamento são apresentados a seguir:

Cargas verticais

Conforme os requisitos indicados na norma NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações deve-se adotar para o dimensionamento dos elementos, duas categorias de carga atuantes, cargas permanentes e acidentais.

O Peso próprio é considerado no cálculo de acordo com a geometria e materiais utilizado em cada elemento. Os pesos específicos dos materiais utilizados pelo Eberick correspondem aos recomendados na NBR 6120.

Adotou-se o carregamento de parede sobre todas as vigas de bordo, caracterizando a expectativa da colocação de alvenaria de periferia, contornando toda a edificação. Pelo fato de nesta etapa não dispor ainda de projeto arquitetônico, ou seja, não há definição das paredes de divisão dos ambientes, buscou-se adotar, portanto, cargas permanentes sobre as lajes, devido à possível existência dessas paredes divisórias. A carga de alvenaria distribuída sobre cada laje adotada foi de 200 kgf/m² e as cargas de revestimento de 50 kgf/m². Também foi adotada sobrecargas de 200 kgf/m² para lajes de piso, baseado na tabela 2 da NBR 6120, Tabela 19.

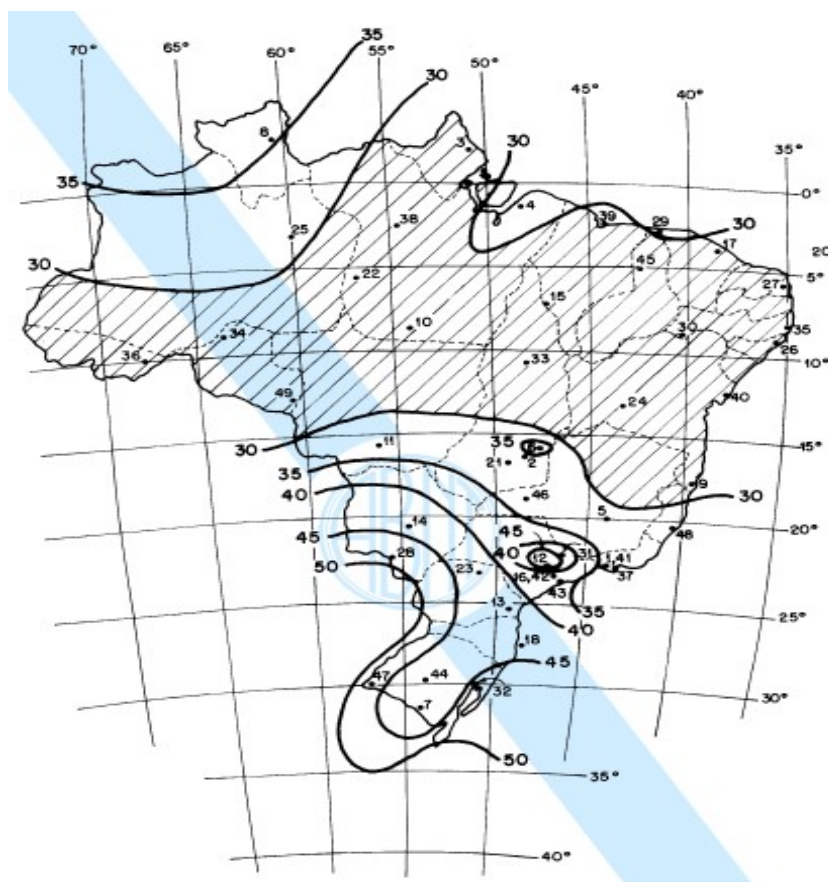
Tabela 19 - Valores mínimos das cargas verticais

		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	Platêia com assentos fixos Estúdio e platêia 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

Cargas horizontais – vento

As ações do vento no edifício foram calculadas de acordo com a ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações, que apresenta as condições requeridas na consideração da ação dos ventos nos cálculos das edificações. Para isso considerando que os modelos de edificações estudados nesse trabalho, poderão ser implantados no estado da Paraíba, de acordo com o mapa Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s), figura 1 da referida norma, temos que a **velocidade dos ventos é de 30 m/s** nessa localidade.

Figura 7 - Isopletas da velocidade básica V_0 

Fonte: NBR 6123:1988 – Figura 1

4 PROCESSAMENTO DA ESTRUTURA

Com o resultado dos elementos pré-dimensionados que compõe os modelos, o passo seguinte correspondeu ao lançamento das estruturas no software. Após inserir a quantidade de pavimentos e o valor do pé direito, lançaram-se os pilares, vigas e lajes da estrutura no programa, com auxílio de uma planta baixa do pavimento tipo, desenvolvida no Autocad, que leva em consideração a dimensão dos vãos de cada modelo.

Todos os modelos propostos foram processados, analisados e dimensionados pelo Eberick versão 2018, algumas vezes até obter uma configuração de elementos sem nenhum erro de dimensionamento e de deslocamentos limites (flechas). A maior parte dos modelos exigiram algum reprocessamento da estrutura necessárias para efetuar correções, como o aumento da espessura de alguma laje ou colocação de vigas apoiadas sobre as existentes, auxiliando na diminuição dos vãos de laje.

O programa permite a exportação de relatórios contendo o diagnóstico geral das estruturas e resumo de materiais da edificação, com base nestes documentos se efetivou os

comparativos em termos de consumo de materiais e de custos. No item 5 deste trabalho serão apresentadas as estruturas de modo detalhado, com seus respectivos resultados.

4.1 Custos dos materiais adotados no software

Em seguida, serão mostrados todos os custos unitários utilizados nesta pesquisa, disponíveis nas configurações padrão do Eberick 2018. Sabe-se que os valores de custo dos insumos variam conforme diversos fatores, entre eles estão a localidade, disponibilidade e as técnicas empregadas, que fogem do escopo deste trabalho. Entretanto, a manutenção dos valores disponibilizados pelo programa para o cálculo dos custos em todos os modelos já atende o objetivo de estabelecer uma análise comparativa.

Os custos referentes ao concreto são expressos em R\$/m³ e variam de acordo com a classe, que é uma característica definida pela resistência característica (fck), como todos elementos analisados nesse trabalho utilizaram único valor de Fck, seu custo pode ser visto na Tabela 20.

Tabela 20 - Custo do concreto

Custo do concreto (R\$/m ³)		
Classe	Material	Execução
C25	244,37	95,11

Fonte: O autor

Os custos do aço são dados em kg/m³ e variam de acordo com a classe do material (CA50 ou CA60) e com o diâmetro das barras. Estes valores estão expressos na Tabela 21.

Tabela 21 - Custo do aço

Custo do aço (R\$/kg)			
Bitola	Aço	Material	Execução
3.2, 3.4, 4.0 e 4;2	CA60	4,96	3,99
4.6 e 5.0	CA60	4,82	3,19
6.0	CA60	4,00	4,88
6.3	CA50	4,82	4,88
7.0	CA60	4,00	4,88
8.0	CA50	5,50	3,92
10.0	CA50	4,69	2,99

12.5	CA50	4,44	1,98
16.0	CA50	4,41	0,70
20.0	CA50	4,22	0,41
22.2	CA50	4,84	0,20
25.0	CA50	4,84	0,20
32.0	CA50	4,84	0,20
40.0	CA50	4,84	0,20

Fonte: O autor

Os custos com forma são dados R\$/m² e variam de acordo com o tipo de elemento estrutural, como podem ser vistos na Tabela 22. O Eberick não possui uma função que permita a compensação da reutilização de formas nos quantitativos, a maneira pela qual é possível levar em consideração este fato é pela alteração dos custos de forma em função do número de reutilizações. Neste trabalho, as formas não serão consideradas reutilizáveis. As fôrmas de laje considerada na Tabela 22, corresponde as lajes maciças.

Tabela 22 - Custo de fôrma

Custo de forma (R\$/m ²)		
Elemento	Material	Execução
Vigas	46,70	55,93
Pilares	51,65	78,67
Lajes	44,27	73,53

Fonte: O autor

Os custos relacionados às lajes nervuradas são contabilizados em separado do restante da estrutura. Os valores unitários são definidos a partir tipo de bloco de enchimento e são compostos pelo custo da laje por área (em R\$/m²) e o custo do bloco de enchimento por unidade (em R\$/unidade). Estes valores podem variar com o material do bloco de enchimento e com suas dimensões.

As Tabelas 23 e 24 mostram estes custos para as lajes treliçadas unidirecional 1D, com enchimento de EPS e lajes nervuradas com cubetas, respectivamente. O programa se refere às lajes com vigotas treliçadas como lajes PM (pré-moldadas).

Tabela 23 - Custo da laje treliçadas com enchimento de EPS

Custo das lajes PM e blocos de enchimento de EPS				
Bloco	Custo da laje PM (R\$/m ²)		Custo do bloco (R\$/unid)	
	Material	Execução	Material	Execução
B10/40/40	3,33	21,64	3,93	0,00
B16/40/40	20,66	21,64	11,05	0,00

Fonte: O autor

Tabela 24 - Custo lajes nervuradas com cubetas

Custo das lajes nervuradas com cubetas				
Cubeta	Custo da laje (R\$/m ²)		Custo da cubeta(R\$/unid)	
	Material	Execução	Material	Execução
B18/66/66	26,36	45,91	10,88	0,00
B20/80/80/8	26,36	45,91	10,88	0,00

Fonte: O autor

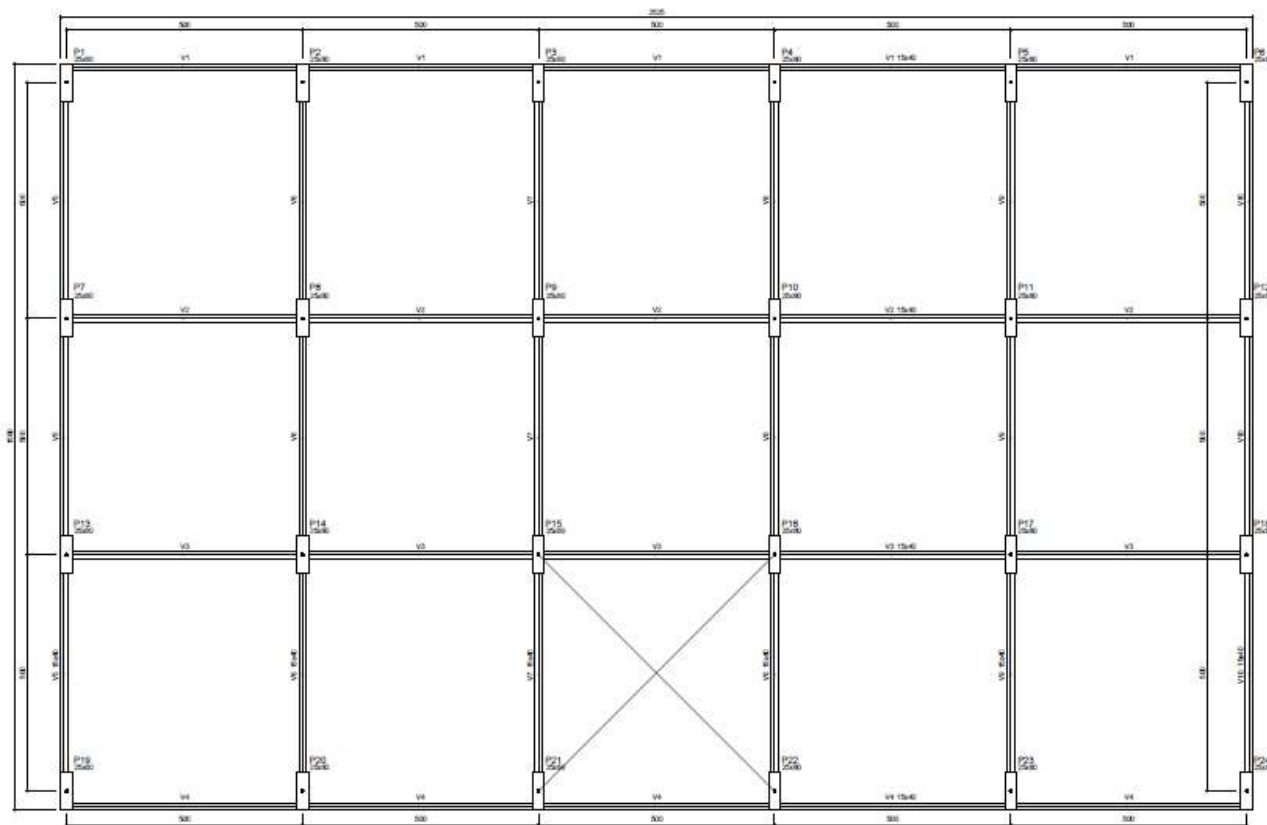
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse item serão apresentados os resultados individuais obtidos no processamento do software, para o dimensionamento dos elementos estruturais dos modelos projetados em 3D e as respectivas estruturas deformadas, assim como, os comparativos entre todos os modelos adotados nos objetivos desse trabalho, que resultaram na discussão final desse estudo.

5.1 Modelo 1

O modelo 1 adotado corresponde a simulação de estruturas com distâncias entre eixos de pilares de 5,0 m, ligados entre si, por vigas formando lajes com vãos de 5,0 x 5,0 m e considerando um total de 10 pavimentos. Após o processamento da estrutura, geraram-se os relatórios de quantitativos e custos de materiais das estruturas para serem comparadas. A planta de fôrma adotada para esse modelo é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Planta de Fôrma: Modelo 1



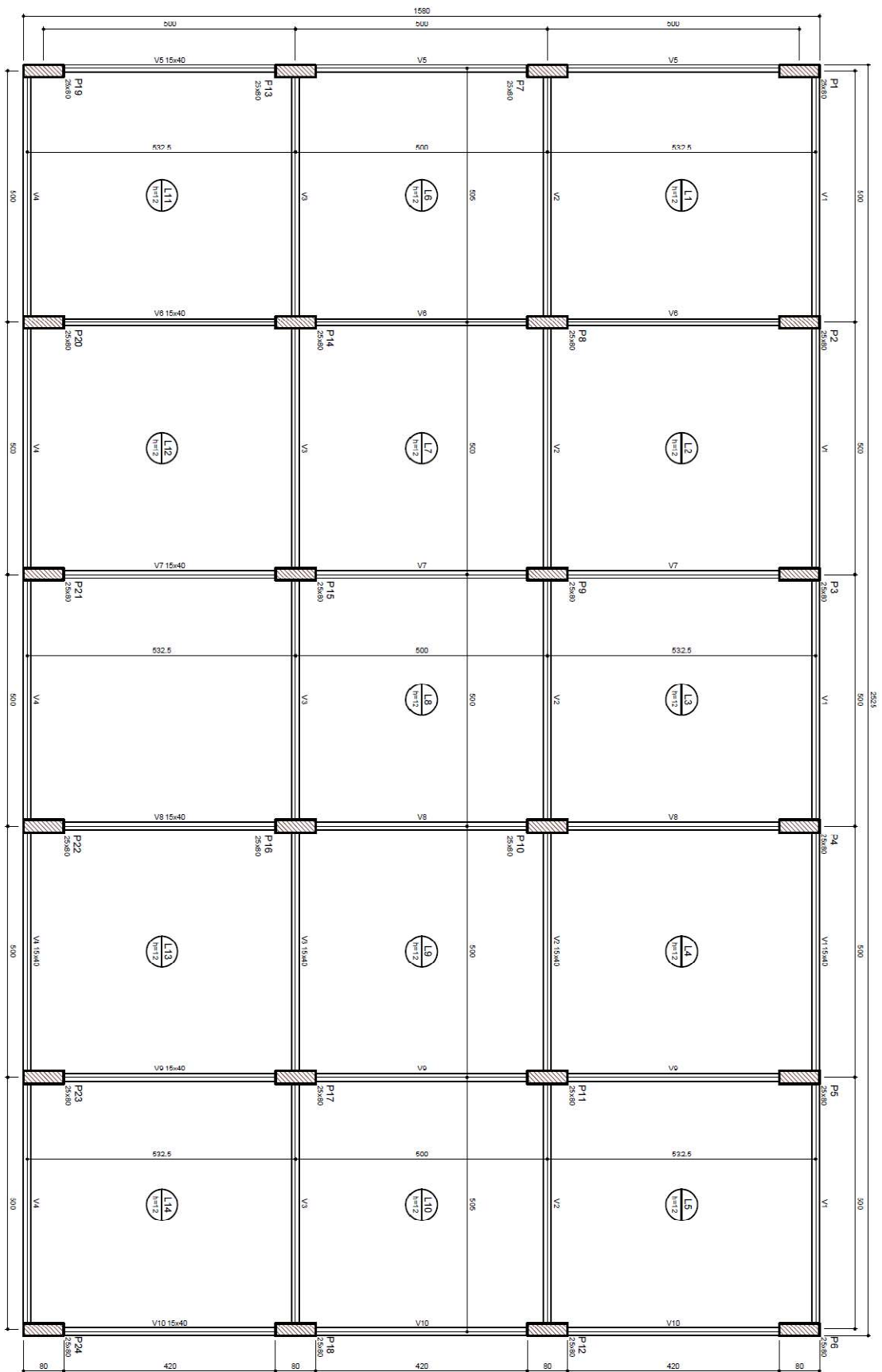
Fonte: O autor

Os resultados das estruturas referentes aos três tipos de lajes adotados foram os seguintes:

Maciça

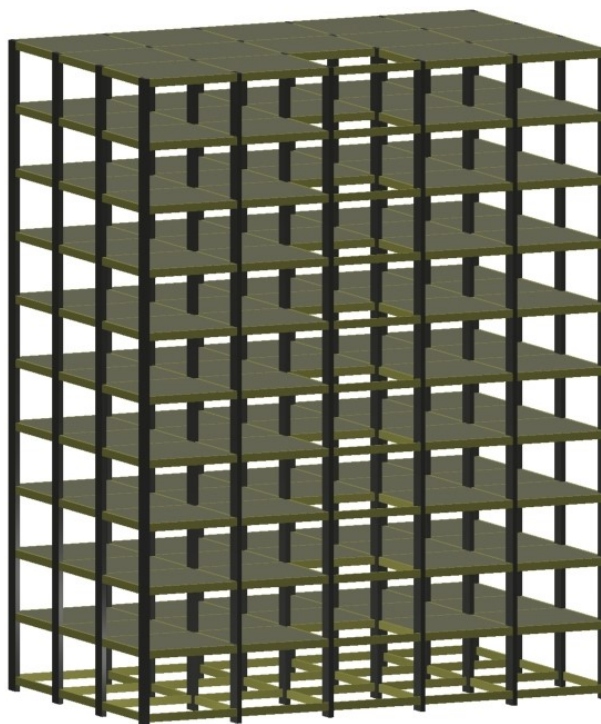
A estrutura com o sistema formado por laje maciça com espessura de $h = 12$ cm, não apresentou a necessidade de redimensionamento, pois, as dimensões pré-dimensionadas e utilizadas no lançamento dos elementos no programa Eberick, como mostra a Figura 9, foram suficientes para obter uma estrutura estável e sem erros, entretanto, os deslocamentos médios foram na ordem de 1,50cm, conforme a apresentação do diagrama unifilar dos pórticos, na figura 11 e a Figura 10 corresponde a estrutura em 3D.

Figura 9 - Forma Modelo 1: Maciça



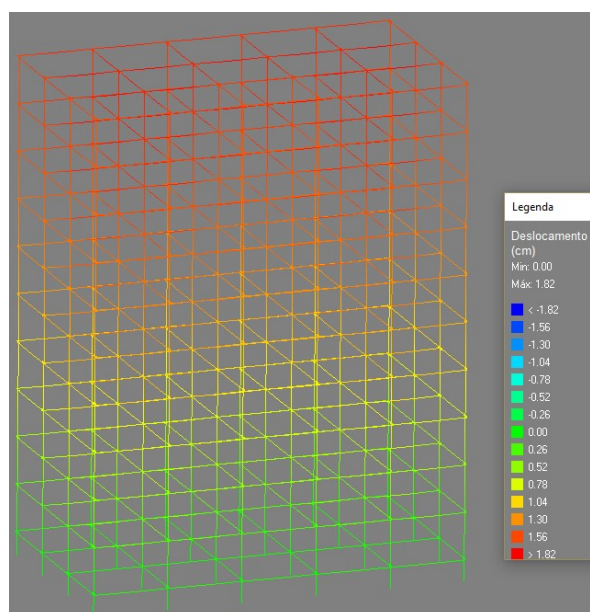
Fonte: O autor

Figura 10 – 3D: Modelo 1- Maciça



Fonte: O autor

Figura 11 – Deslocamentos: Modelo 1- Maciça



Fonte: O autor

O resumo do consumo de aço, concreto e forma, determinado no Eberick para o Modelo 1 – Maciça é apresentado na Tabelas 25.

Tabela 25 - Consumo de materiais: Modelo 1 - Maciça

CONSUMO DE MATERIAIS: MODELO 1 - MACIÇA					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso + 10 % (kg)	CA50	15601,40	8161,60	22142,10	45905,00
	CA60	1818,00	3805,00	3711,80	9334,80
	Total	17419,40	11966,50	25853,90	55239,80
Volume concreto (m ³)	C-25	129,20	156,00	416,00	701,30
Área de forma (m ²)		2046,10	1638,00	3467,00	7151,10
Consumo de aço (kg/m ³)		134,80	76,70	62,10	78,80

Fonte: O autor

Os resultados quanto ao custo da estrutura são apresentados nas Tabelas 26 e Gráfico

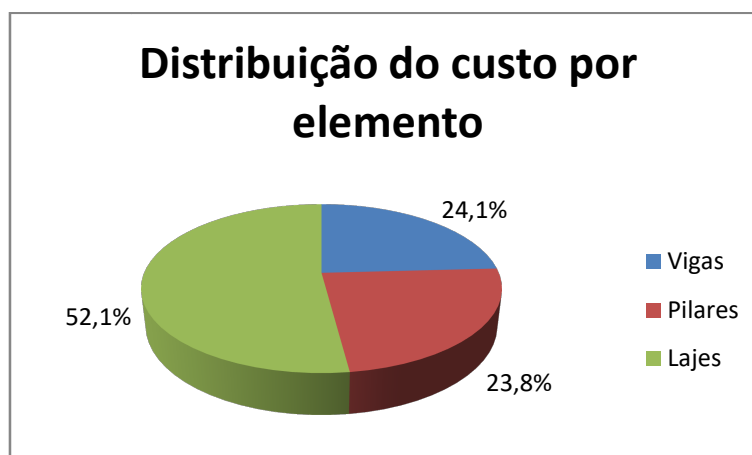
1.

Tabela 26 - Relação custo por elemento: Modelo 1 – Maciça

Relação custo por elemento (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Vigas	206636,15	156257,49	362893,64
Pilares	179009,61	178233,03	357242,64
Lajes	384738,90	397849,36	782588,26
TOTAL	770384,66	732339,88	1502724,54

Fonte: O autor

Gráfico 1 - Distribuição do custo por elemento: Modelo 1 - Maciça

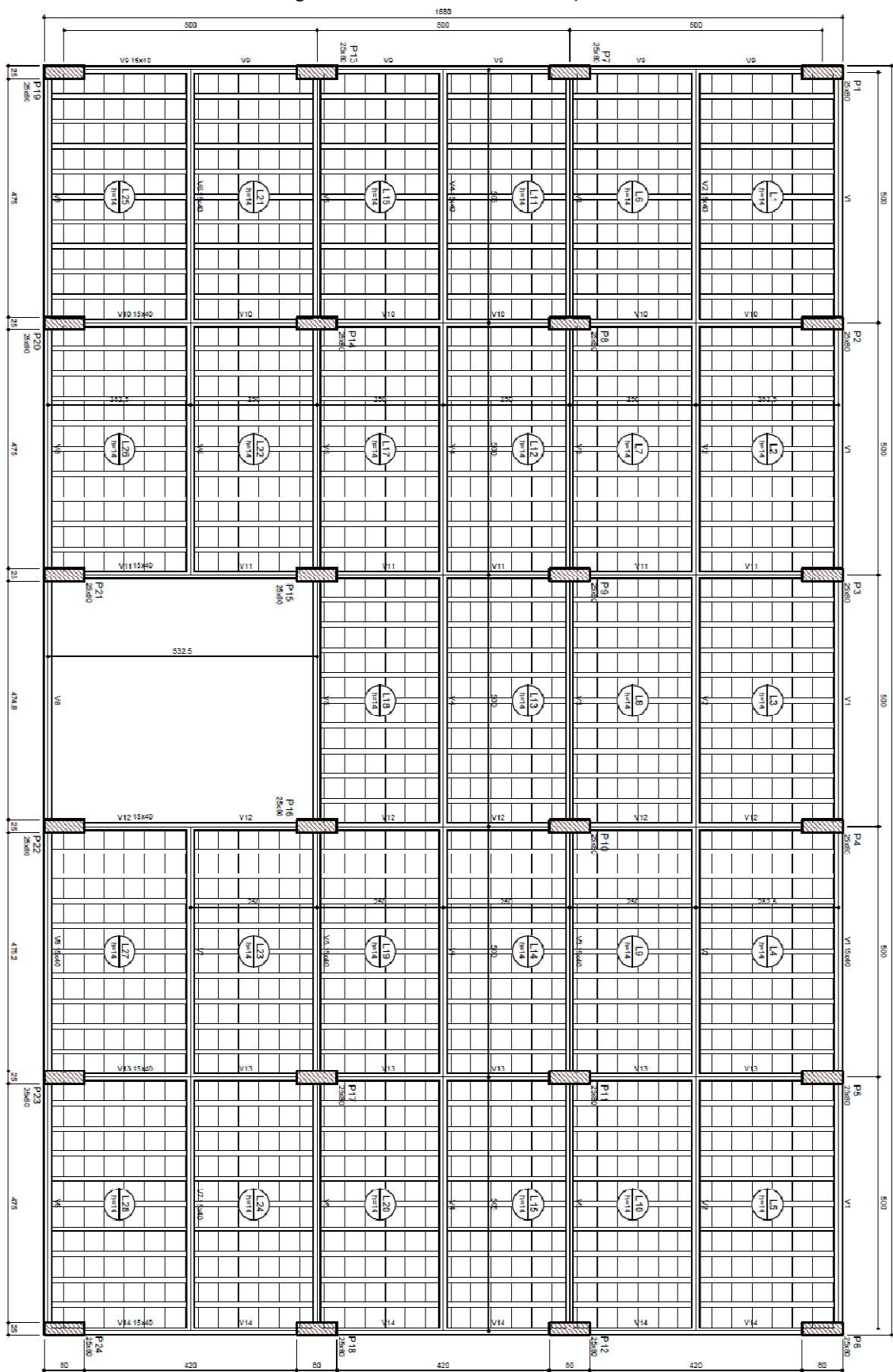


Fonte: O autor

Treliçada

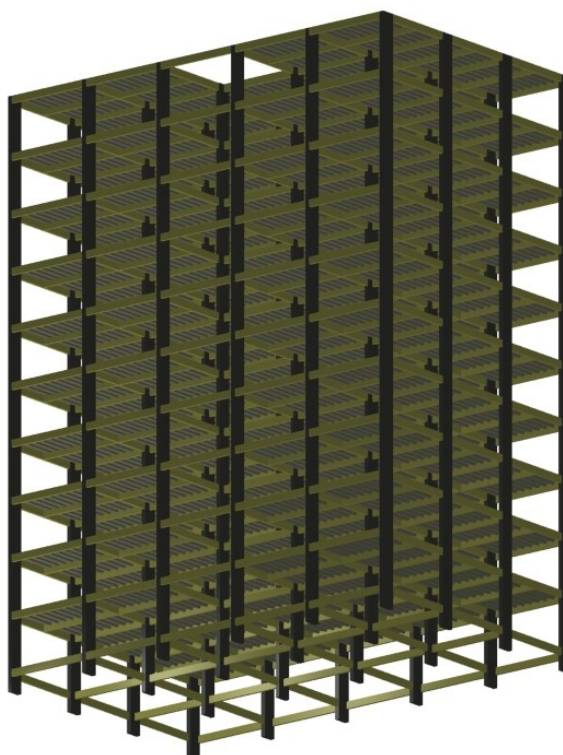
Para o caso da laje treliçada foi necessário o reprocessamento da estrutura para que atendesse as necessidades do dimensionamento dos elementos estruturais, por isso os vãos foram divididos simetricamente no centro, com adição de novas vigas horizontais, obtendo assim, planos de lajes menores com dimensões aproximadas de 2,50 x 5,00 m e espessura de $h = 14$ cm. A planta de forma do pavimento tipo dessa estrutura é apresentada na Figura 12 e na Figura 13 à estrutura em 3D. Os deslocamentos médios dos elementos estruturais foram na ordem de 1,90cm, conforme a apresentação do diagrama unifilar dos pórticos, na Figura 14.

Figura 12 - Forma Modelo 1: Trelçada



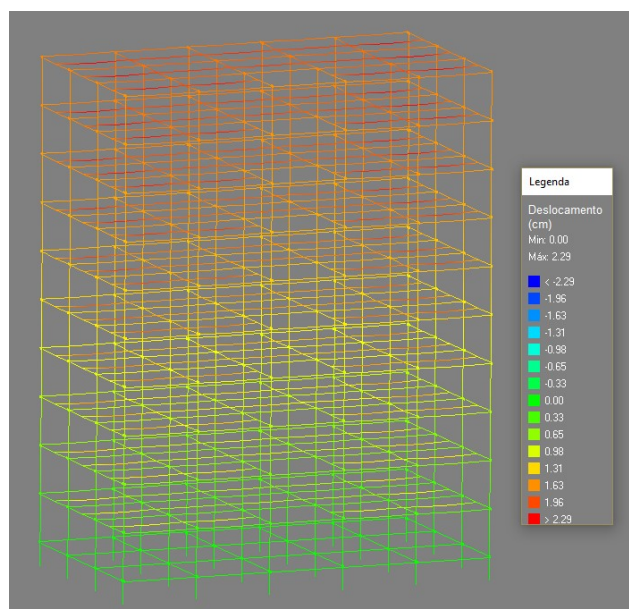
Fonte: O autor

Figura 13 - 3D: Modelo 1 - Treliçada



Fonte: O autor

Figura 14 - Deslocamentos: Modelo 1 - Treliçada



Fonte: O autor

O resumo do consumo de aço, concreto e forma, para o Modelo 1 – Treliçada é apresentado na Tabelas 27. O quantitativo e dimensões do bloco de EPS utilizado nesse modelo é apresentado na Tabela 28.

Tabela 27 - Consumo de materiais: Modelo 1 - Trelaçada

CONSUMO DE MATERIAIS: MODELO 1 - TRELIÇADA					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso + 10 % (kg)	CA50	20300,10	7602,90	1047,70	28950,70
	CA60	2810,30	3881,90	753,80	7446,00
	CA60	Trelaças		5330,00	5330,00
	Total	23110,50	11484,80	7131,50	41726,80
Volume concreto (m ³)	C-25	171,80	159,40	181,70	512,90
Área de forma (m ²)		2719,70	1673,30		4392,90
Consumo de aço (kg/m ³)		134,50	72,10	39,25	81,35

Fonte: O autor

Tabela 28 - Blocos de enchimento: Modelo 1 - Trelaçada

Blocos de enchimento					
Tipo	Nome	Dimensões(cm)			Quantidade
		hb	bx	by	
EPS Unidirecional	B10/40/40	10	40	40	17700

Fonte: O autor

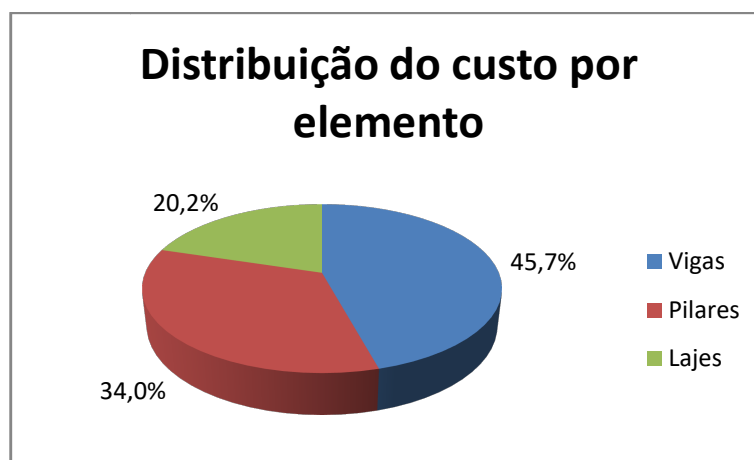
Os resultados quanto ao custo da estrutura são apresentados na Tabela 29 e Gráfico 2.

Tabela 29 - Relação custo por elemento: Material 1 – Trelaçada

Relação custo por elemento (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Vigas	274399.59	211276.16	485675,74
Pilares	179646.68	181491.98	361138,66
Lajes	125108.40	89729.08	214837,48
TOTAL	579154.67	482497.21	1061651,88

Fonte: O autor

Gráfico 2– Distribuição do custo por elemento: Modelo 1 - Trelçada

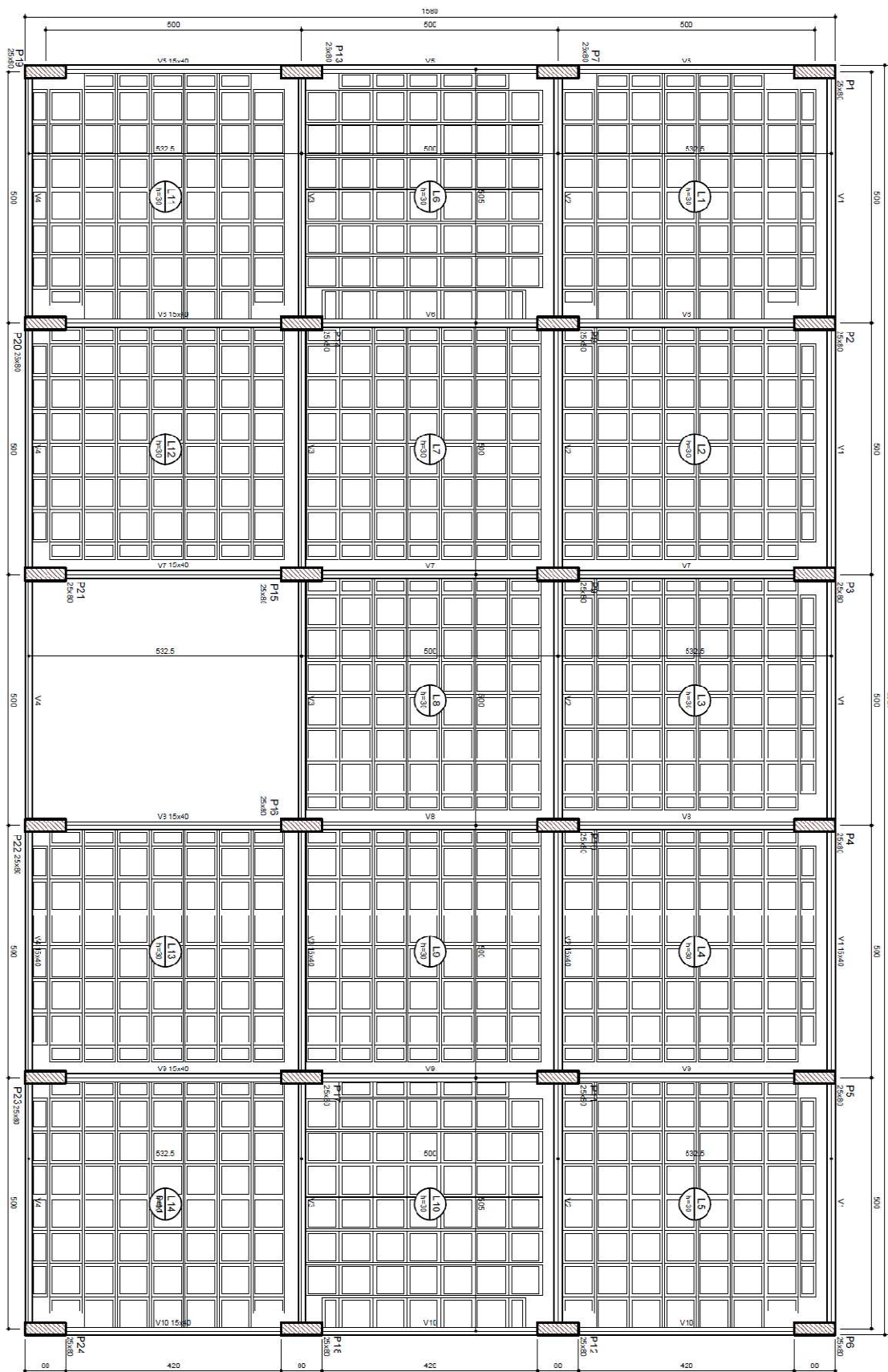


Fonte: O autor

Nervurada

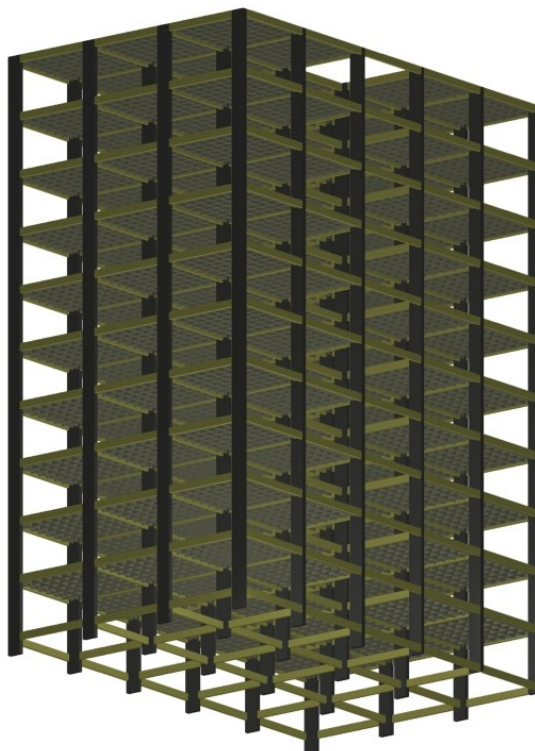
Na estrutura com o sistema formado por laje nervurada com cubetas, as dimensões pré-dimensionadas dos pilares e vigas, utilizadas no lançamento dos elementos no programa foram mantidas, entretanto, reprocessamentos foram necessários com novas alturas de cubetas, obtendo assim, espessura final da laje com ($h = 30$ cm) para obter uma estrutura estável e sem erros nos elementos estruturais. A Figura 15 corresponde à planta de forma resultante do processamento e a Figura 16 a estrutura em 3D. O deslocamento apresentado foi na ordem de 2,40cm, como apresentado no pórtico unifilar, na Figura 17.

Figura 15 - Forma Modelo 1: Nervurada



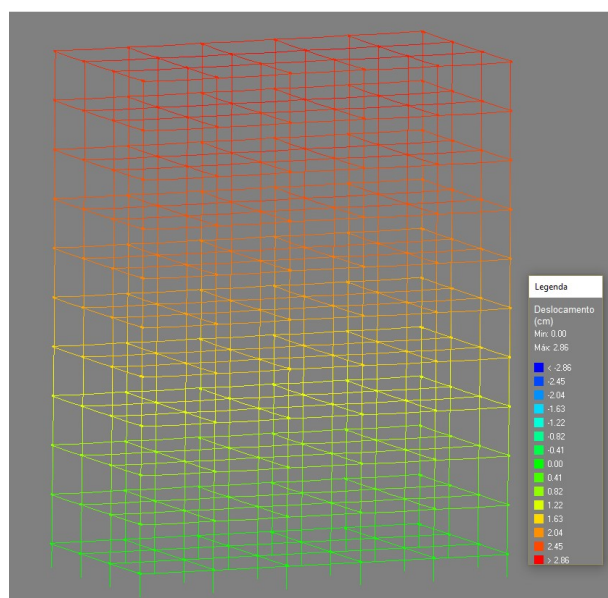
Fonte: O autor

Figura 16 - 3D: Modelo 1 – Nervurada



Fonte: O autor

Figura 17 - Deslocamentos: Modelo 1 - Nervurada



Fonte: O autor

Os resultados de materiais, para o Modelo 1 – Nervurada estão apresentados na Tabela 30. O quantitativo e dimensões das cubetas e meias cubetas utilizadas nesse modelo são apresentados na Tabela 31.

Tabela 30 - Consumo de materiais: Modelo 1 - Nervurada

CONSUMO DE MATERIAIS: MODELO 1 - NERVURADA					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	16869,70	9895,90	13195,90	39961,50
	CA60	2166,30	3832,20	6677,00	12675,50
	Total	19036,00	13728,10	19872,90	52637,00
Volume concreto (m ³)	C-25	129,20	158,90	622,40	910,50
Área de forma (m ²)		2046,10	1668,90		3715,00
Consumo de aço (kg/m ³)		147,30	86,40	31,90	57,80

Fonte: O autor

Tabela 31 - Blocos de enchimento: Modelo 1 - Nervurada

Blocos de enchimento					
Tipo	Nome	Dimensões(cm)			Quantidade
		hb	bx	by	
Cubetas	B18/66/66	18	66	66	6180
	B18/33/66	18	33	66	1480
	B18/66/33	18	66	33	640

Fonte: O autor

Os resultados quanto ao custo da estrutura são apresentados nas Tabelas 32 e Gráfico

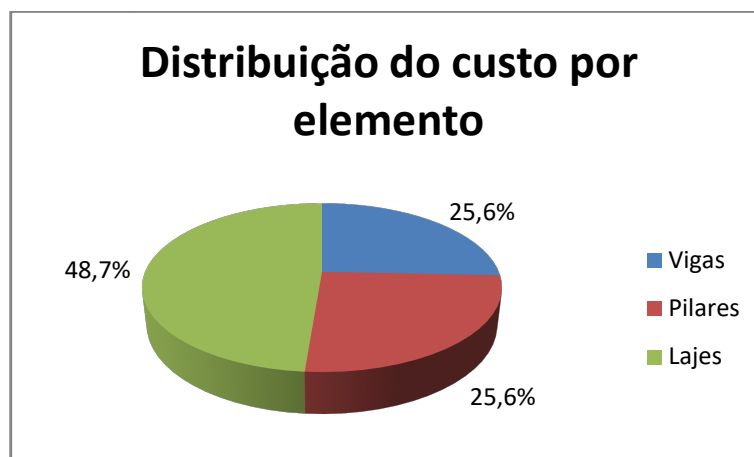
3.

Tabela 32 - Relação custo por elemento: Modelo 1 - Nervurada

Relação custo por elemento (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Vigas	213585,70	157912,45	371498,15
Pilares	188993,43	182256,27	371249,69
Lajes	422433,04	283604,38	706037,42
TOTAL	825012,16	623773,10	1448785,26

Fonte: O autor

Gráfico 3 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 1 - Nervurada



Fonte: O autor

Comparativo entre soluções estruturais

Demonstra-se na Tabela 33 o comparativo de materiais e custos, entre as 3 soluções estruturais adotadas para o Modelo 1 (5,0x5,0m), com uso de laje maciça, pré-moldada treliçada e nervurada com cubetas. Os Gráficos 4 a 7 apresentam os resultados percentuais referentes aos dados da Tabela 33.

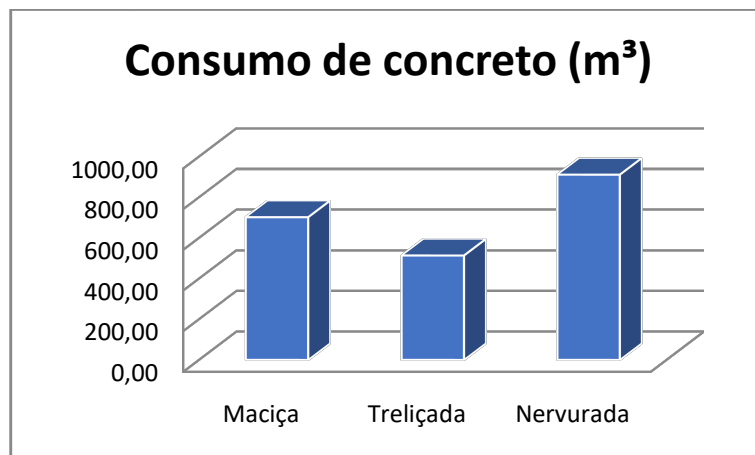
A solução com laje pré-moldada treliçada apresentou menor consumo entre os materiais, assim como, menor custo final da estrutura. A modulação com lajes nervuradas por apresentar menor consumo de fôrma e aço em relação ao modelo 1 com lajes maciças, resultou em um custo menor, porém, bem próximo, justificado pelo consumo elevado de concreto.

Tabela 33 - Comparativo de materiais e custo: Modelo 1

Modelo 1 5.0x5.0	Consumo de material			Custo total
	Concreto (m ³)	Forma (m ²)	Aço (kg)	R\$
Maciça	701,30	7151,10	55239,80	1.502.724,54
Treliçada	512,90	4392,90	41726,80	1.061.651,88
Nervurada	910,50	3715,00	52637,00	1.448.785,26

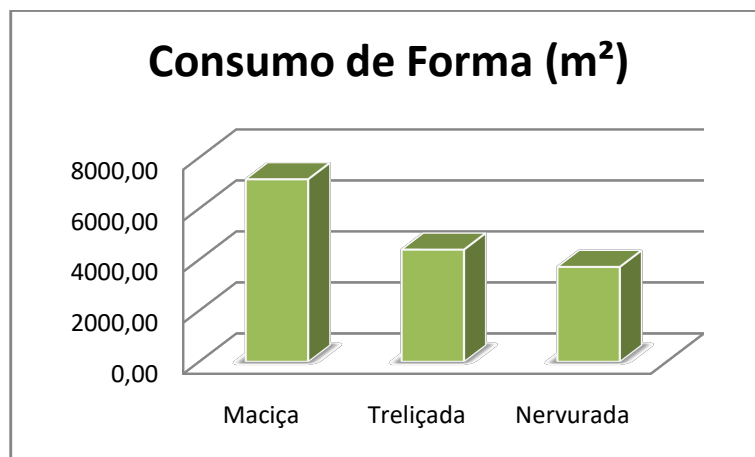
Fonte: O autor

Gráfico 4 – Comparativo do consumo de concreto: Modelo 1



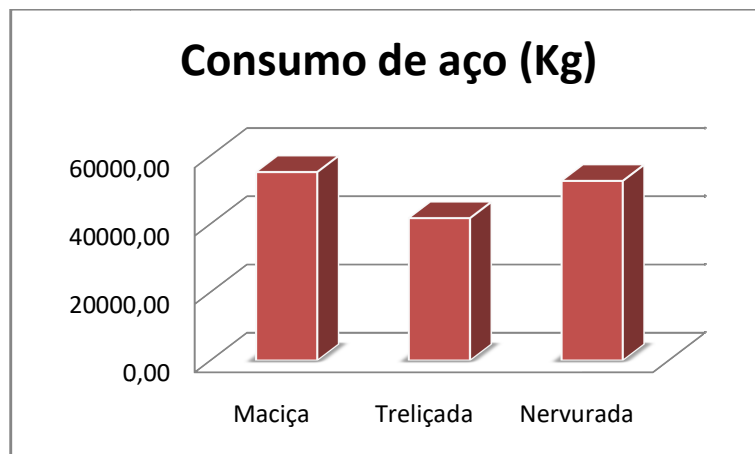
Fonte: O autor

Gráfico 5 – Comparativo do consumo de fôrma: Modelo 1



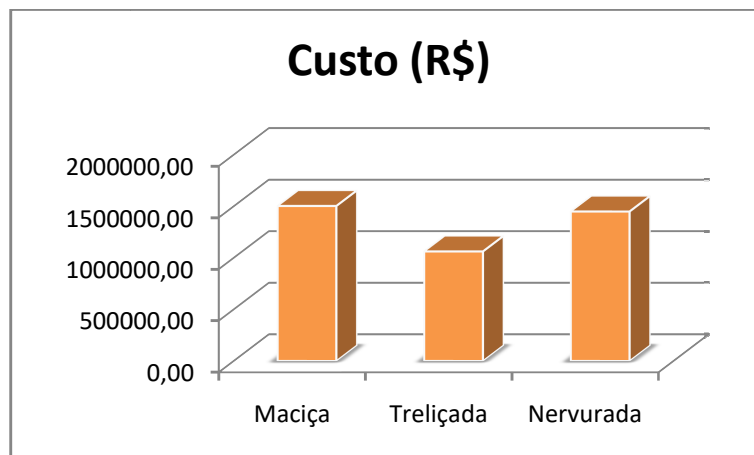
Fonte: O autor

Gráfico 6 – Comparativo do consumo de aço: Modelo 1



Fonte: O autor

Gráfico 7 – Comparativo dos custos totais: Modelo 1

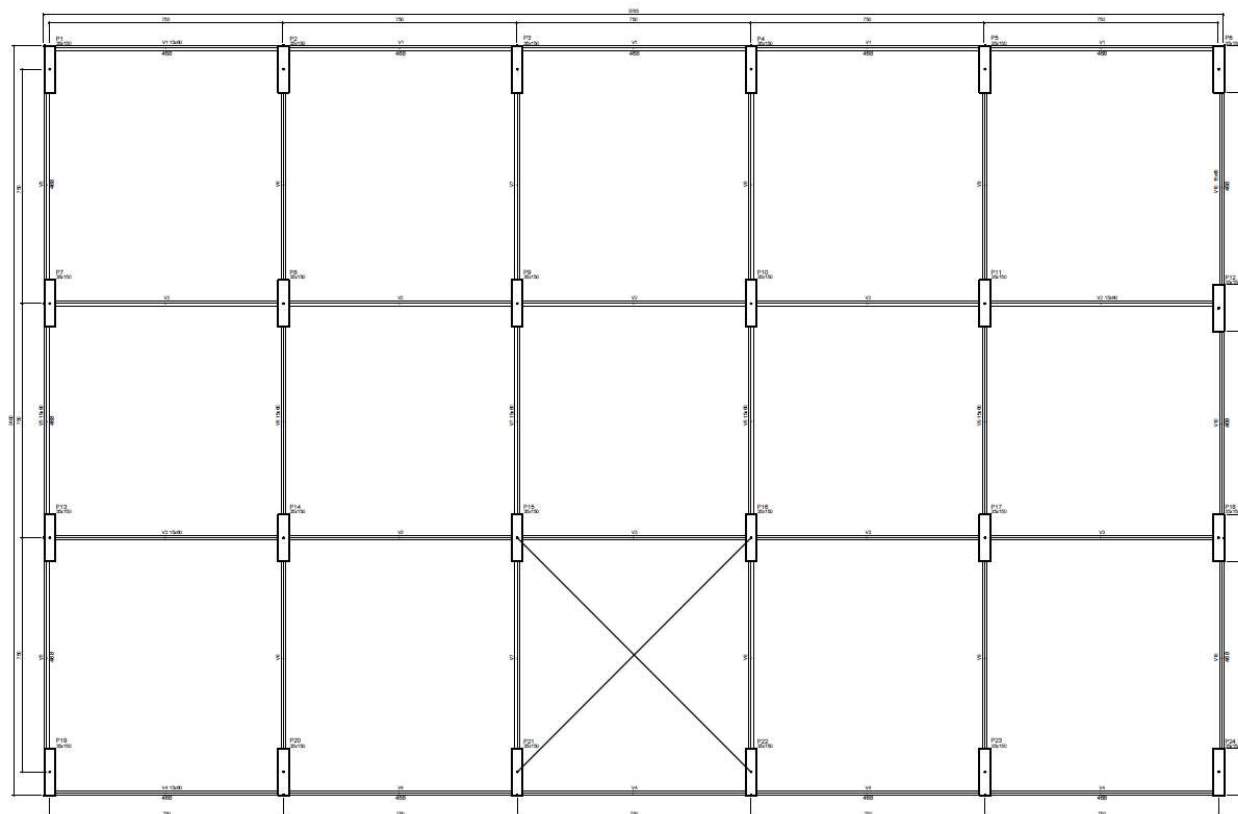


Fonte: O autor

5.2 Modelo 2

O modelo 2 adotado corresponde a simulação de estruturas com distâncias entre eixos de pilares de 7,5 m e de vigas, formando área de lajes de 7,5 x 7,5 m, com 10 pavimentos. Após o processamento da estrutura, geraram-se os relatórios de quantitativos e custos de materiais das estruturas a fim de compará-las. A planta de fôrma adotada para esse modelo é apresentada na Figura 18.

Figura 18 - Planta de Fôrma: Modelo 2



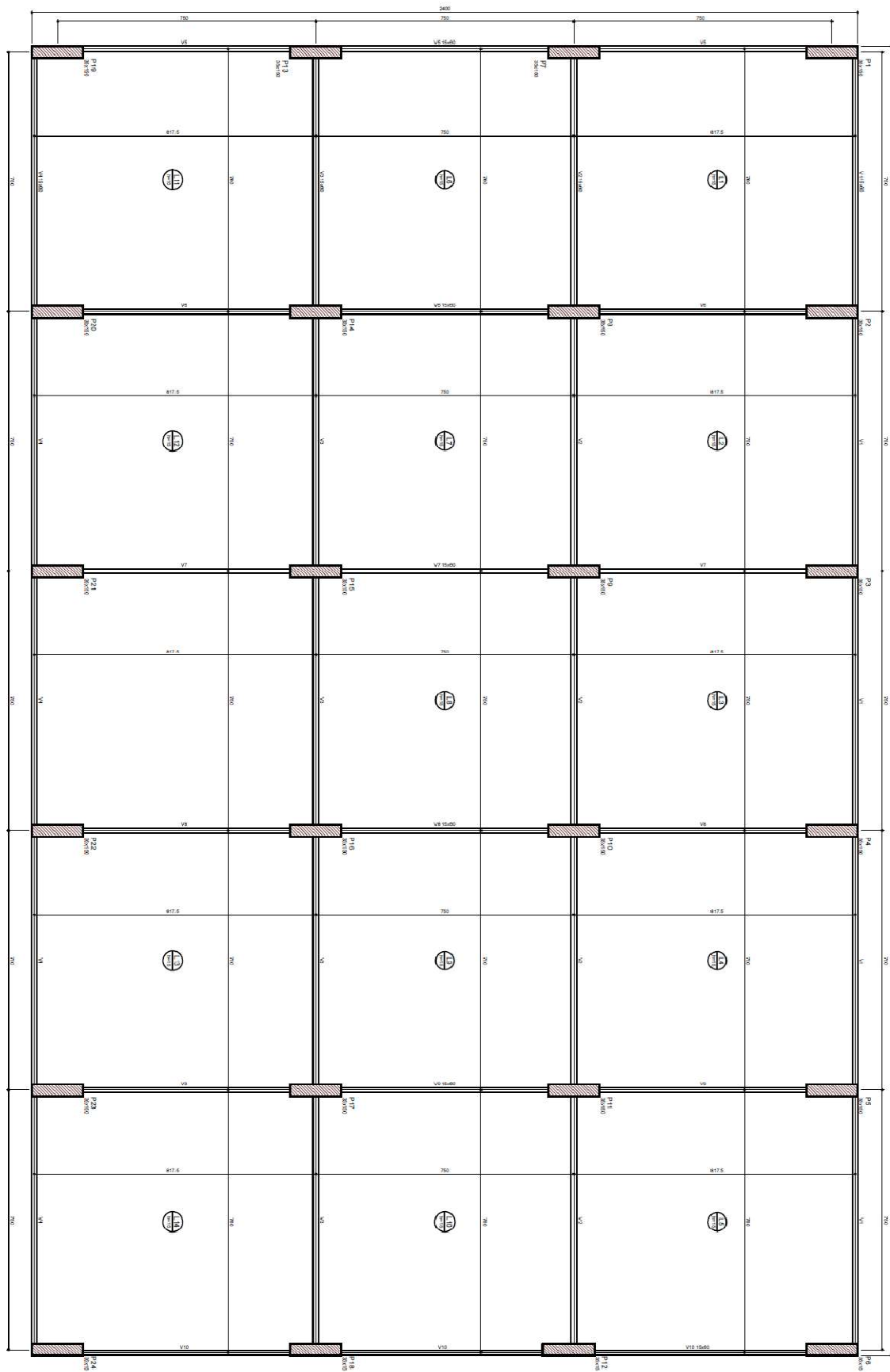
Fonte: O autor

Os resultados das estruturas referentes aos três tipos de lajes adotados foram os seguintes:

Maciça

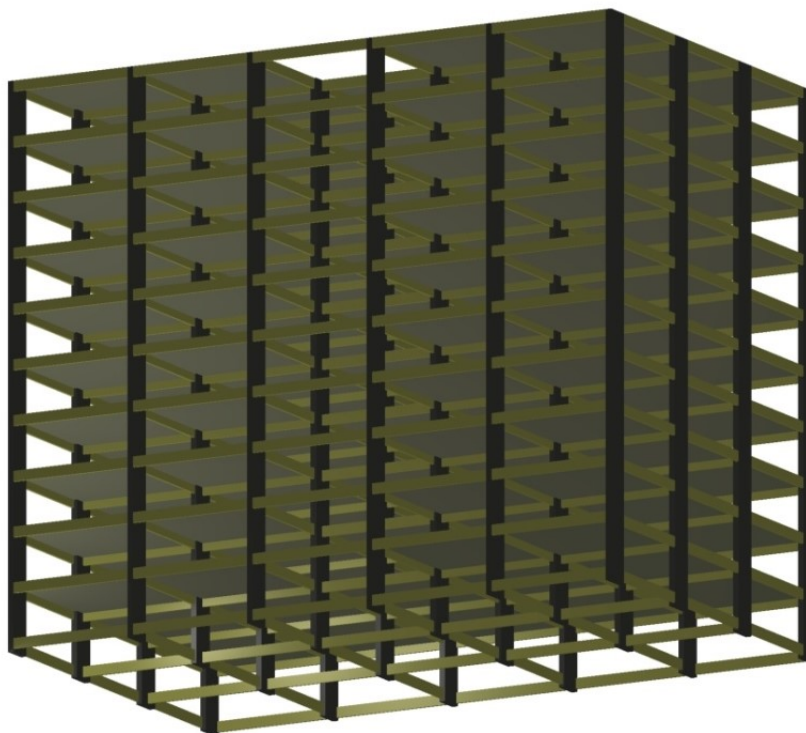
A estrutura com o sistema formado por laje maciça ($h = 15 \text{ cm}$) não apresentou a necessidade de redimensionamento, as dimensões pré-dimensionadas e utilizadas no lançamento dos elementos no programa, foram suficientes para obter uma estrutura estável e sem erros. A Figura 19 corresponde à planta de forma resultante do processamento e a Figura 20 a estrutura em 3D. O deslocamento apresentado foi na ordem de 1,60 cm, como apresentado no pórtico unifilar, na Figura 21.

Figura 19 - Forma Modelo 2: Maciça



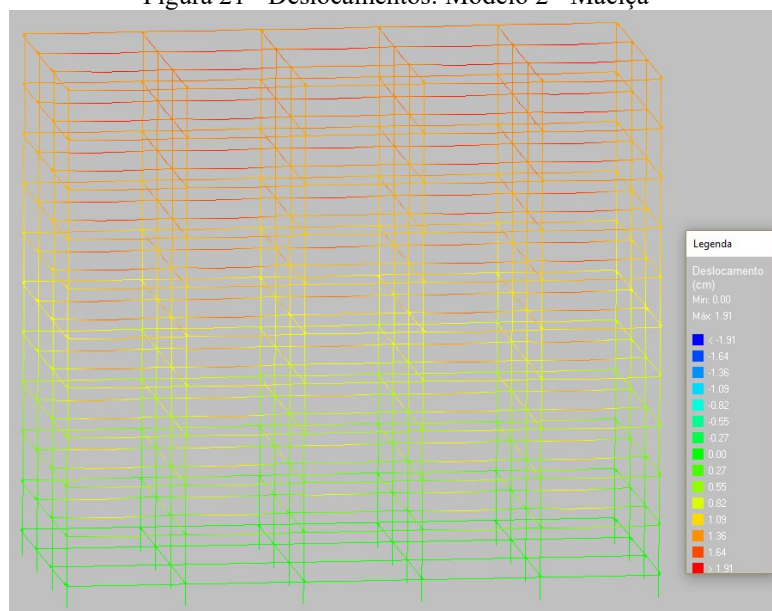
Fonte: O autor

Figura 20 - 3D: Modelo 2 – Maciça



Fonte: O autor

Figura 21 - Deslocamentos: Modelo 2 - Maciça



Fonte: O autor

Os resultados de materiais, para o Modelo 2 – Maciça estão apresentados nas Tabela 34.

Tabela 34 - Consumo de materiais: Modelo 2 - Maciça

CONSUMO DE MATERIAIS: MODELO 2 - MACIÇA					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	34054,80	16709,60	100255,40	151019,80
	CA60	3898,50	11812,30	9001,00	24711,80
	Total	37953,30	28521,80	109256,40	175731,60
Volume concreto (m ³)	C-25	282,30	409,50	1198,60	1890,40
Área de forma (m ²)		4235,20	2886,00	7990,60	15111,80
Consumo de aço (kg/m ³)		134,40	69,70	91,20	93,00

Fonte: O autor

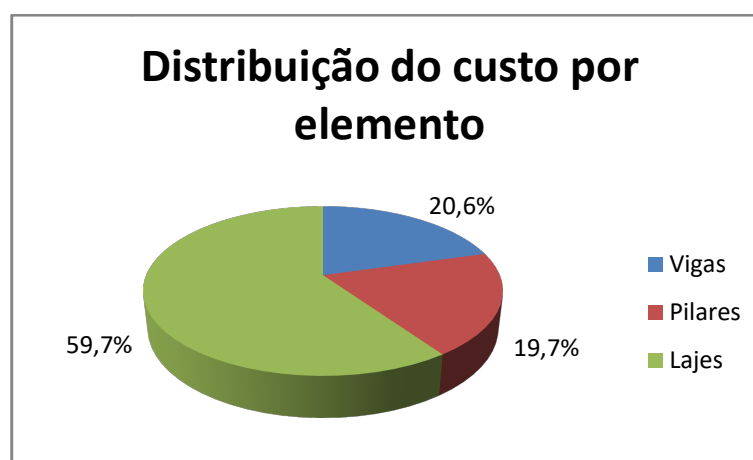
Os resultados quanto ao custo da estrutura são apresentados nas Tabelas 35 e Gráfico e 8.

Tabela 35 - Relação custo por elemento: Modelo 2 – Maciça

Relação custo por elemento (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Vigas	446993,10	351578,28	798571,38
Pilares	395788,69	368116,01	763904,70
Lajes	1215186,60	1099837,63	2315024,23
TOTAL	2057968,39	1819531,92	3877500,31

Fonte: O autor

Gráfico 8 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 2 - Maciça

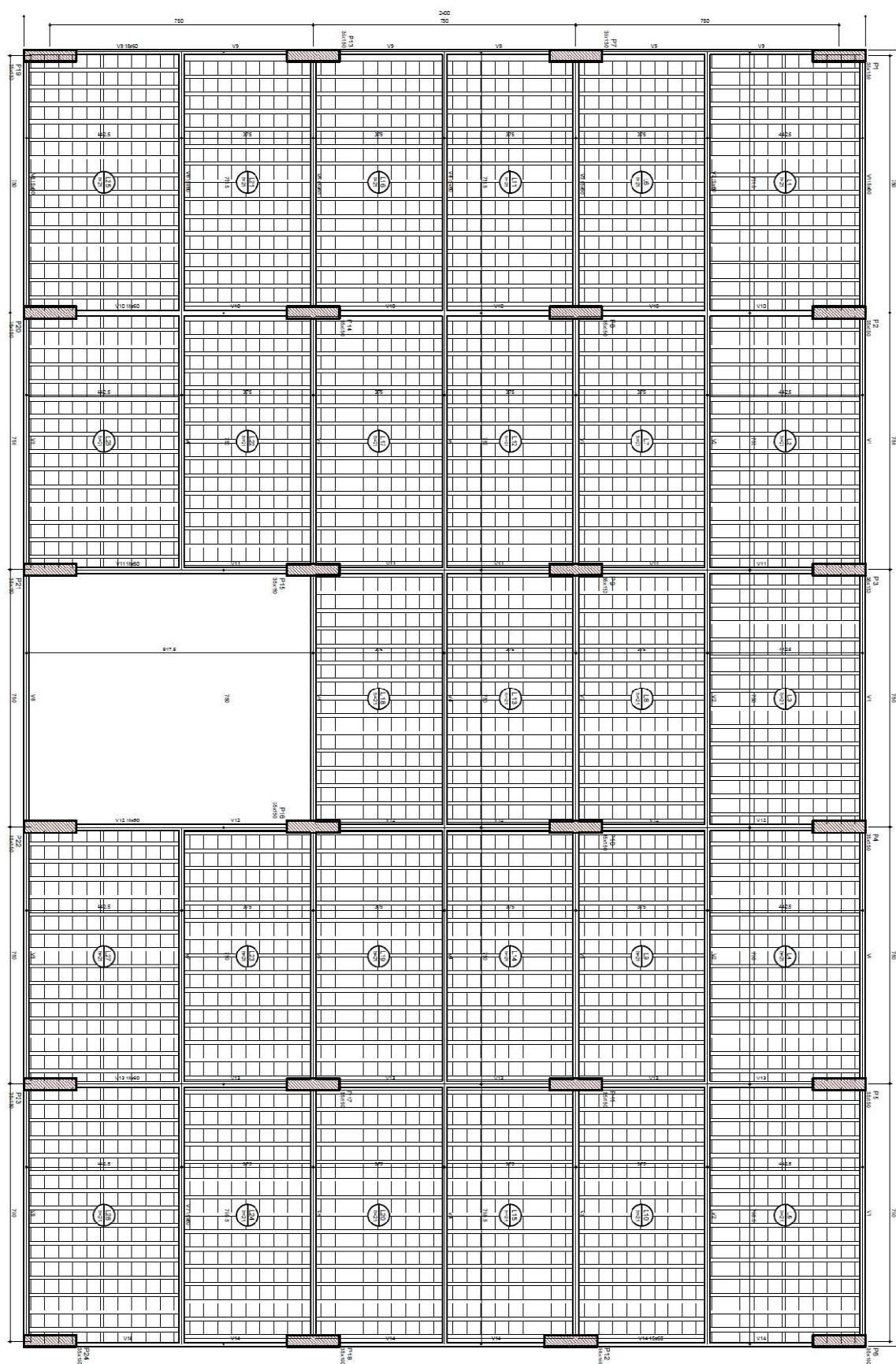


Fonte: O autor

Treliçada

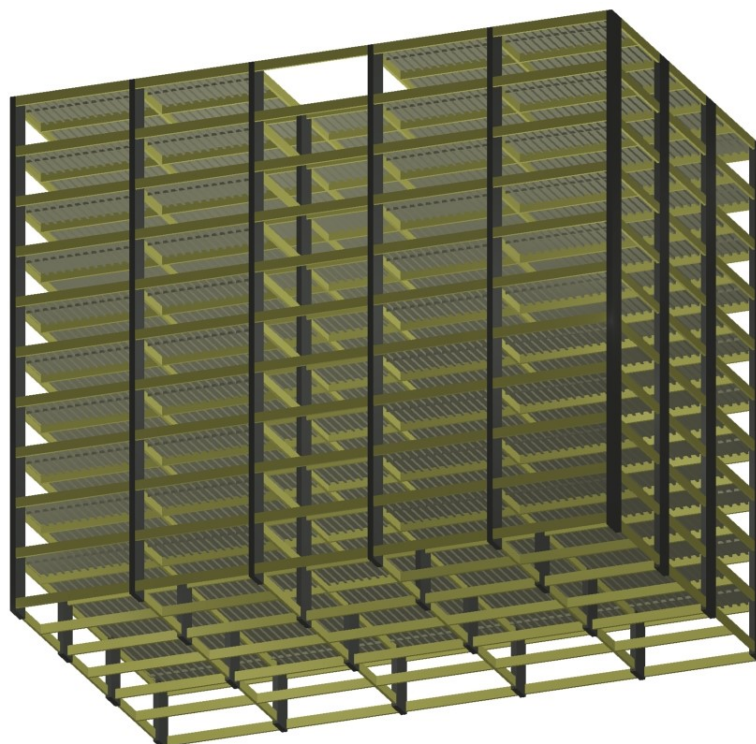
Para o caso da laje treliçada foi necessário o reprocessamento da estrutura para que atendesse as necessidades do dimensionamento dos elementos estruturais, por isso os vãos foram divididos simetricamente no centro, com adição de novas vigas horizontais, obtendo assim, planos de lajes menores com dimensões aproximadas de 3,75 x 7,50 m. As dimensões dos pilares utilizadas no lançamento se mantiveram, assim como as vigas, com exceção das quatro vigas do plano central, que foram alteradas de 15 cm para 18 cm em sua largura, para assim atender as necessidades de apoio das lajes. Após vários reprocessamentos foi obtida uma estrutura dimensionada sem erros, com lajes de espessura de ($h = 21$ cm). A planta de forma do pavimento tipo dessa estrutura é apresentada na Figura 22 e na Figura 23 à estrutura em 3D. O deslocamento da estrutura foi na ordem de 2,40cm, conforme a apresentação do diagrama unifilar dos pórticos, na Figura 24.

Figura 22 - Forma Modelo 2: Treliçada



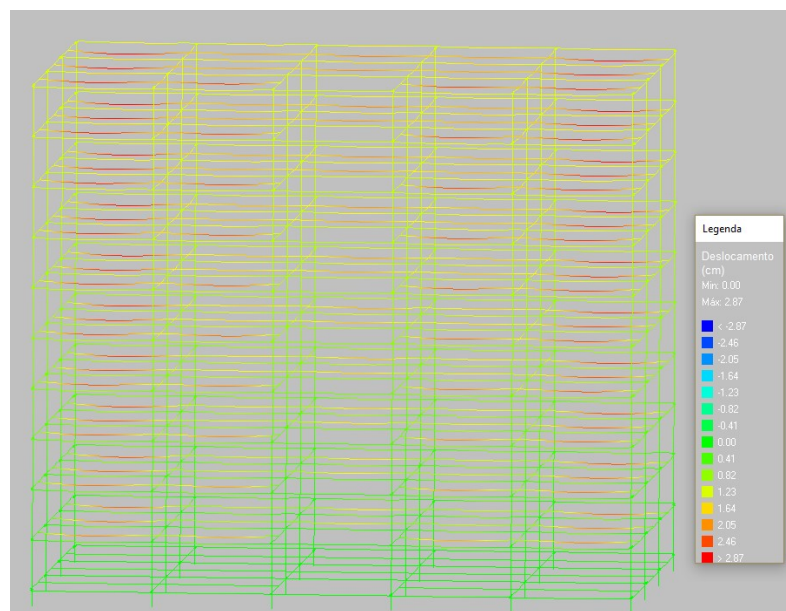
Fonte: O autor

Figura 23 - 3D: Modelo 2 – Treliçada



Fonte: O autor

Figura 24 - Deslocamentos: Modelo 2 - Treliçada



Fonte: O autor

O resumo do consumo de aço, concreto e forma, para o Modelo 1 – Treliçada é apresentado na Tabelas 36, assim como o quantitativo e dimensões do bloco de EPS utilizado nesse modelo é apresentado na Tabela 37.

Tabela 36 - Consumo de materiais: Modelo 2 - Treliçada

CONSUMO DE MATERIAIS: MODELO 2 - TRELIÇADA					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso + 10 % (kg)	CA50	55733,70	16399,10	20470,40	92603,20
	CA60	4572,20	11753,00		16325,20
	CA60	Treliças		38833,10	38833,10
	Total	60305,90	28152,10	59303,50	147761,50
Volume concreto (m ³)	C-25	407,20	409,50	624,90	1441,60
Área de forma (m ²)		5869,30	2886,00		8755,3
Consumo de aço (kg/m ³)		148,10	68,75	94,90	102,50

Fonte: O autor

Tabela 37 - Blocos de enchimento: Modelo 2 - Treliçada

Blocos de enchimento					
Tipo	Nome	Dimensões(cm)			Quantidade
		hb	bx	by	
EPS Unidirecional	B16/40/40	16	40	40	40100

Fonte: O autor

Os resultados quanto ao custo da estrutura são apresentados na Tabela 38 e no Gráfico

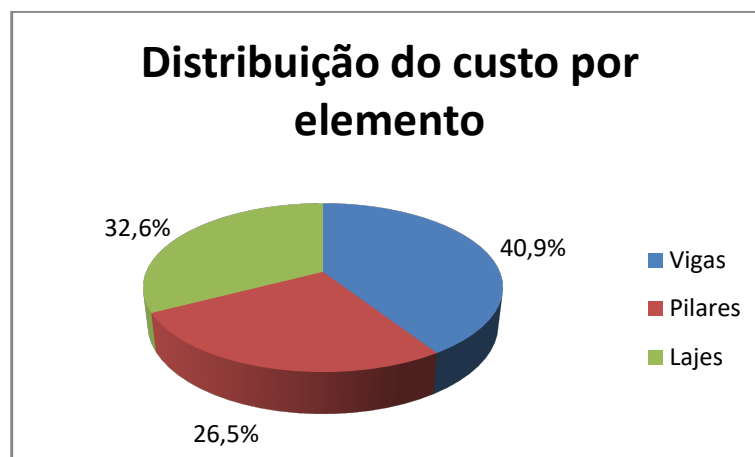
9.

Tabela 38 - Relação custo por elemento: Modelo 2 – Treliçada

Relação custo por elemento (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Vigas	659868.70	514683.74	1174552,44
Pilares	394121.75	367416.22	761537,97
Lajes	596775.85	341546.69	938322,54
TOTAL	1650766.30	1223646.65	2874412,95

Fonte: O autor

Gráfico 9 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 2 - Treliçada

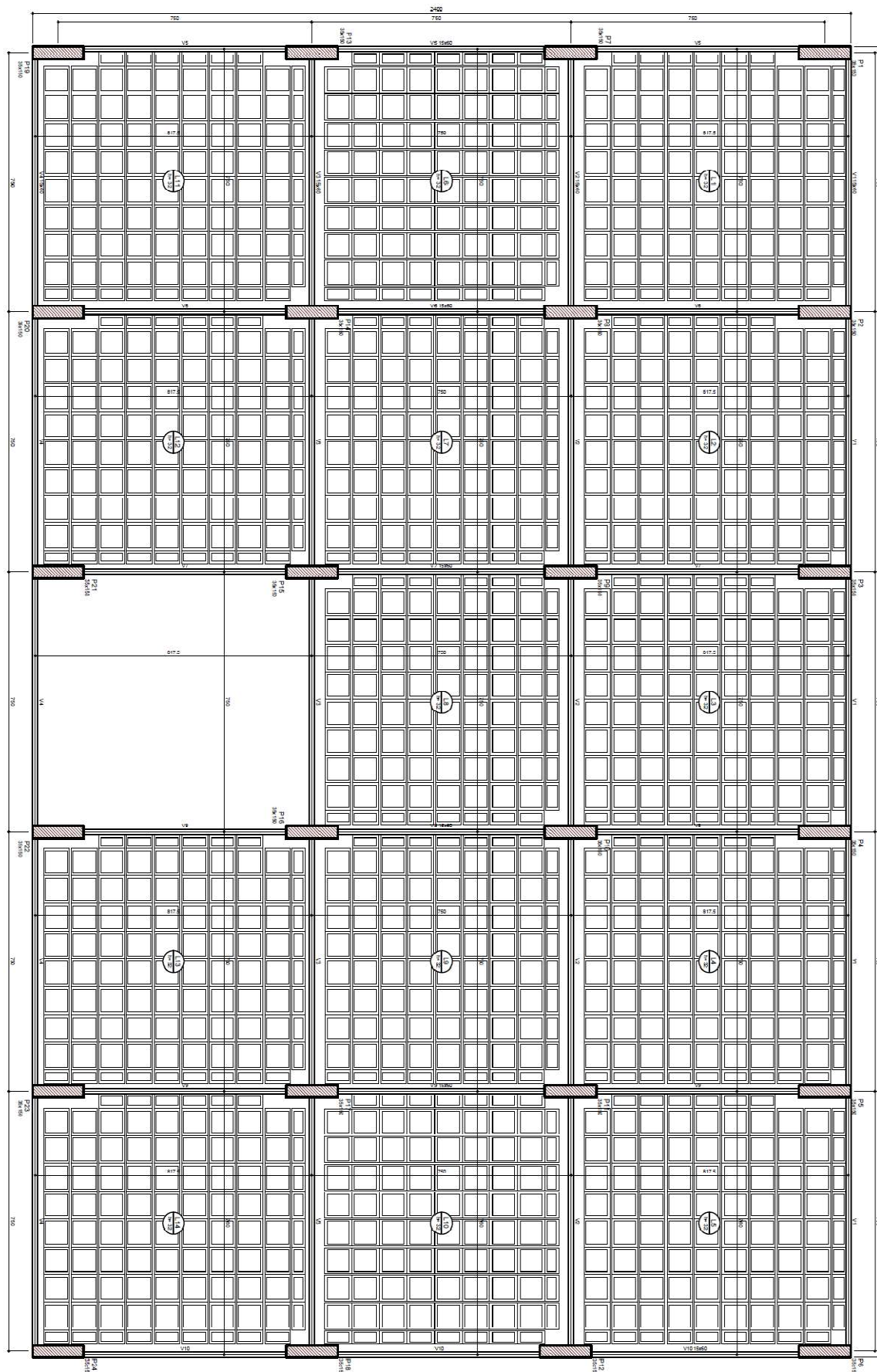


Fonte: O autor

Nervurada

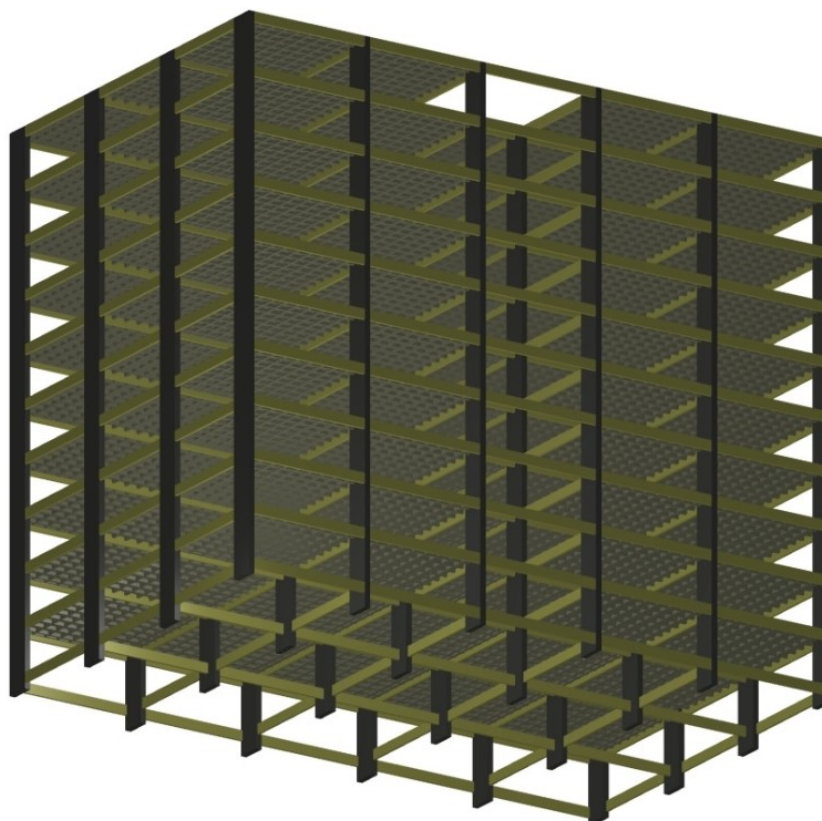
Na estrutura com o sistema formado por laje nervurada com cubetas, as dimensões pré-dimensionadas dos pilares e vigas, utilizadas no lançamento dos elementos no programa foram mantidas, entretanto, reprocessamentos foram necessários com novas alturas de cubetas para obter uma estrutura estável e sem erros nos elementos estruturais, assim, a espessura final das lajes nervuradas ficou com $h = 32$ cm. A Figura 25 corresponde à planta de forma resultante do processamento e a Figura 26 a estrutura em 3D. O deslocamento apresentado foi na ordem de 1,60 cm, como apresentado no pórtico unifilar, na Figura 27.

Figura 25 - Forma Modelo 2: Nervurada



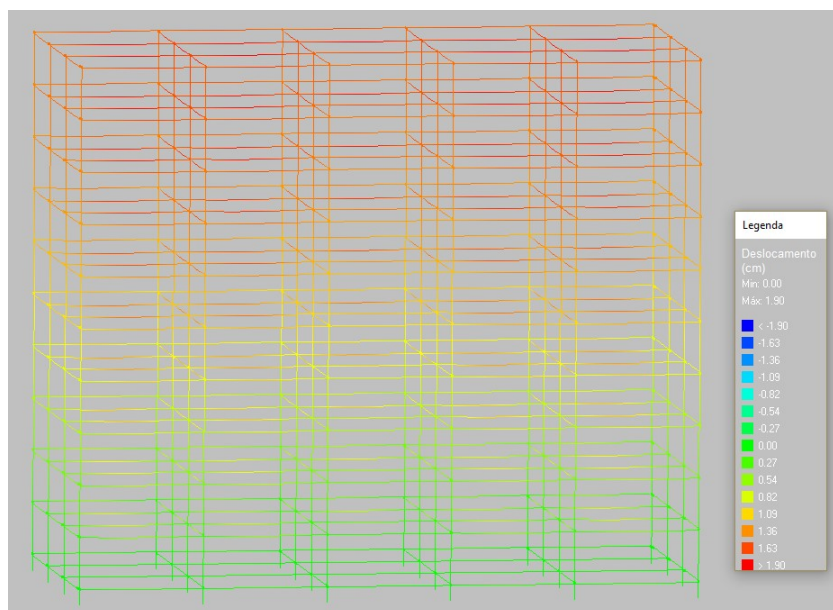
Fonte: O autor

Figura 26 - 3D: Modelo 2 – Nervurada



Fonte: O autor

Figura 27 - Deslocamentos: Modelo 2 - Nervurada



Fonte: O autor

Os resultados de materiais, para o Modelo 2 – Nervurada estão apresentados na Tabela 39 e o quantitativo com as dimensões das cubetas e meias cubetas utilizadas nesse modelo são apresentados na Tabela 40.

Tabela 39 - Consumo de materiais: Modelo 2 - Nervurada

CONSUMO DE MATERIAIS: MODELO 2 - NERVURADA					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	31182.6	16593.5	92750.6	140526.7
	CA60	3374.4	11683.8	9345.0	24403.2
	Total	34556.9	28277.3	102095.7	164929.9
Volume concreto (m ³)	C-35	282.3	409.5	1582.9	2274.8
Área de forma (m ²)		4235.2	2886.0		7121.2
Consumo de aço (kg/m ³)		122.4	69.1	64.5	72.5

Fonte: O autor

Tabela 40 - Bloco de enchimento: Modelo 2 – Nervurada

Blocos de enchimento					
Tipo	Nome	Dimensões(cm)			Quantidade
		hb	bx	by	
Cubetas	B20/80/80/8	20	80	80	9680
	B20/40/80	20	40	80	1960
	B20/80/40	20	80	40	1260

Fonte: O autor

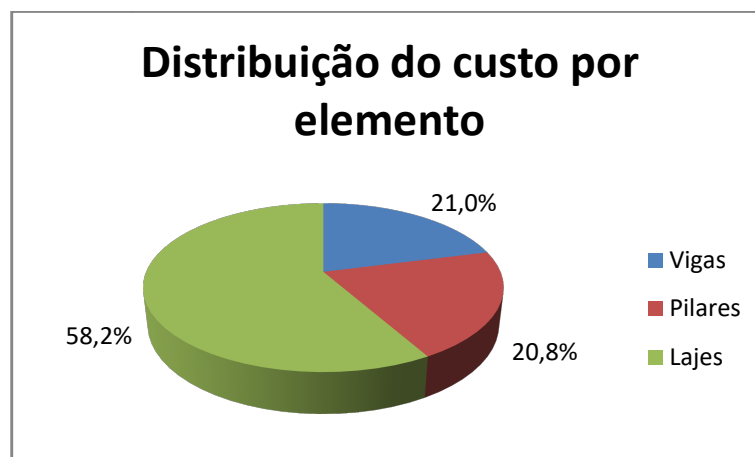
Os resultados quanto ao custo da estrutura são apresentados nas Tabelas 41 e no Gráfico 10.

Tabela 41 - Relação custo por elemento: Modelo 2 – Nervurada

Relação custo por elemento (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Vigas	433018.70	350565.95	783584,66
Pilares	402698.73	374508.98	777207,71
Lajes	1257582.01	917418.67	2175000,68
TOTAL	2093299.45	1642493.60	3735793,04

Fonte: O autor

Gráfico 10 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 2 – Nervurada



Fonte: O autor

Comparativo entre soluções estruturais

Demonstra-se na Tabela 42 o comparativo de materiais e custos, entre as 3 soluções estruturais adotadas para o Modelo 2 (7,50 x 7,50m), uso de laje maciça, pré-moldada treliçada e nervurada com cubetas. Os Gráficos 11 a 14 apresentam os resultados percentuais referentes aos dados da tabela 42.

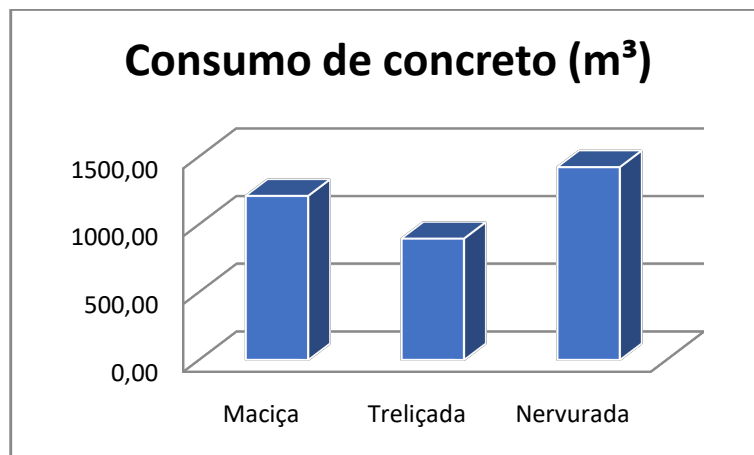
Assim como os resultados obtidos no Modelo 1, a solução com laje pré-moldada treliçada apresentou menor consumo entre os materiais, assim como, menor custo final da estrutura. A modulação com lajes nervuradas por apresentar o menor consumo de fôrma, entre as três soluções, assume, no entanto, a segunda posição no consumo de aço que resultou em um custo menor em relação à estrutura com laje maciça, abrindo uma vantagem considerável.

Tabela 42 - Comparativo de materiais e custo: Modelo 2

Modelo 2 7.5x7.5	Consumo de material			Custo total
	Concreto (m ³)	Forma (m ²)	Aço (kg)	R\$
Maciça	1890,40	15111,80	175731,60	3.877.500,31
Treliçada	1441,60	8755,30	147761,50	2.874.412,95
Nervurada	2274,80	7121,20	164929,90	3.735.793,04

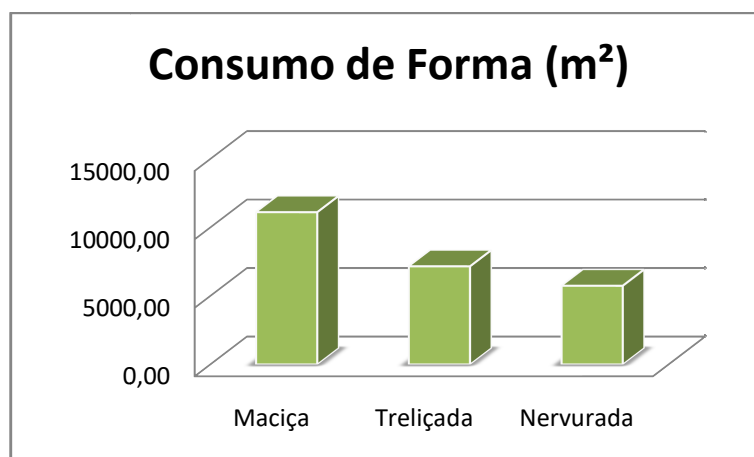
Fonte: O autor

Gráfico 11 – Comparativo do consumo de concreto: Modelo 2



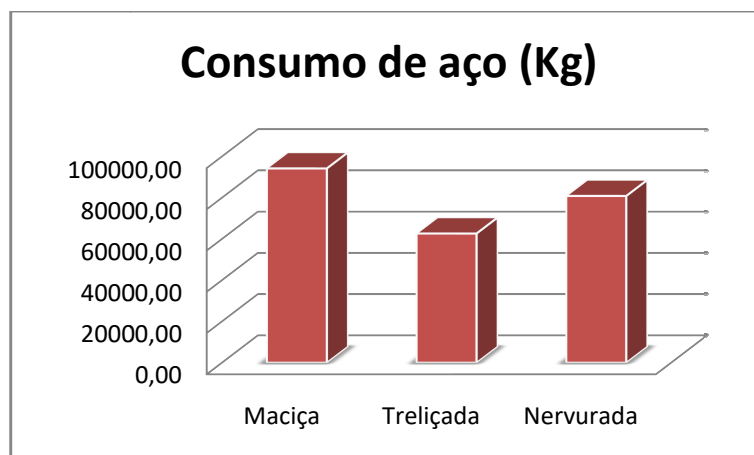
Fonte: O autor

Gráfico 12 – Comparativo do consumo de forma: Modelo 2



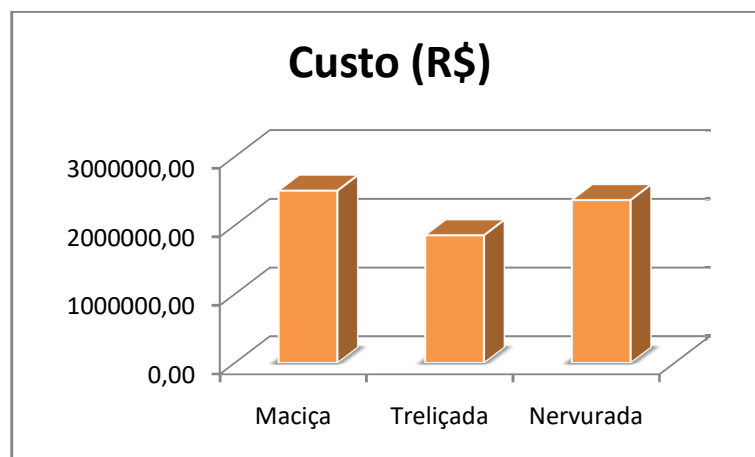
Fonte: O autor

Gráfico 13 – Comparativo do consumo de aço: Modelo 2



Fonte: O autor

Gráfico 14 – Comparativo dos custos totais: Modelo 2

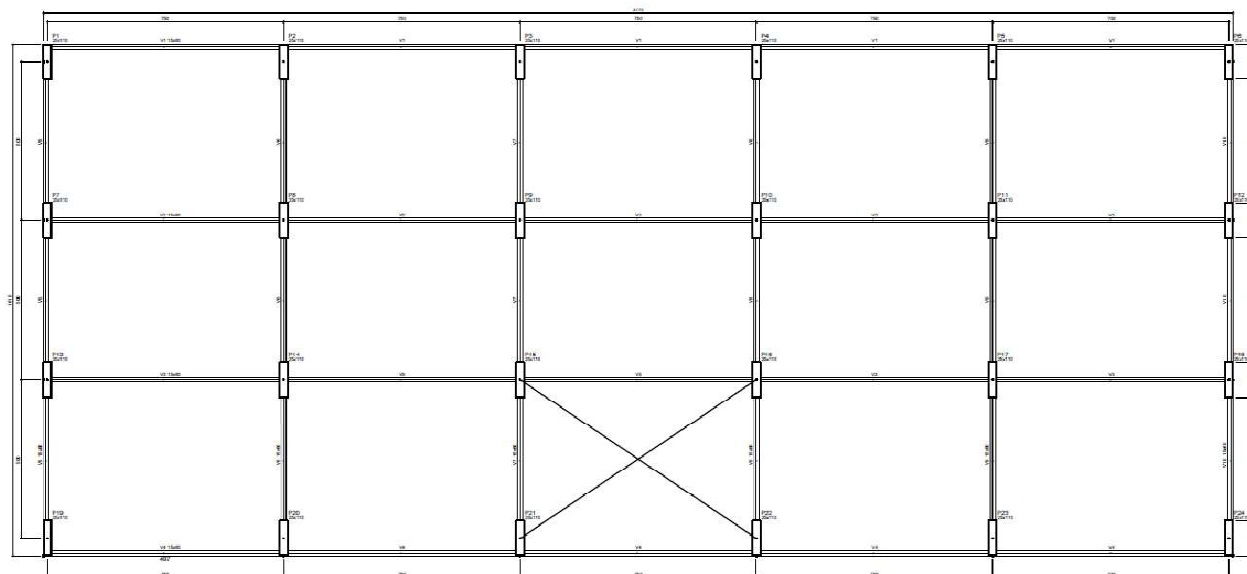


Fonte: O autor

5.3 Modelo 3

O modelo 3 adotado corresponde a simulação de estruturas com distâncias verticais eixos de pilares de 5,0 m e 7,50 m as distâncias dos eixos de pilares na horizontal, resultando em vãos de 7,5 x 5,0 m, com 10 pavimentos. Após o processamento da estrutura, geraram-se os relatórios de quantitativos e custos de materiais das estruturas a fim de compará-las. A planta de fôrma adotada para esse modelo é apresentada na Figura 28.

Figura 28 - Planta de Fôrma: Modelo 3



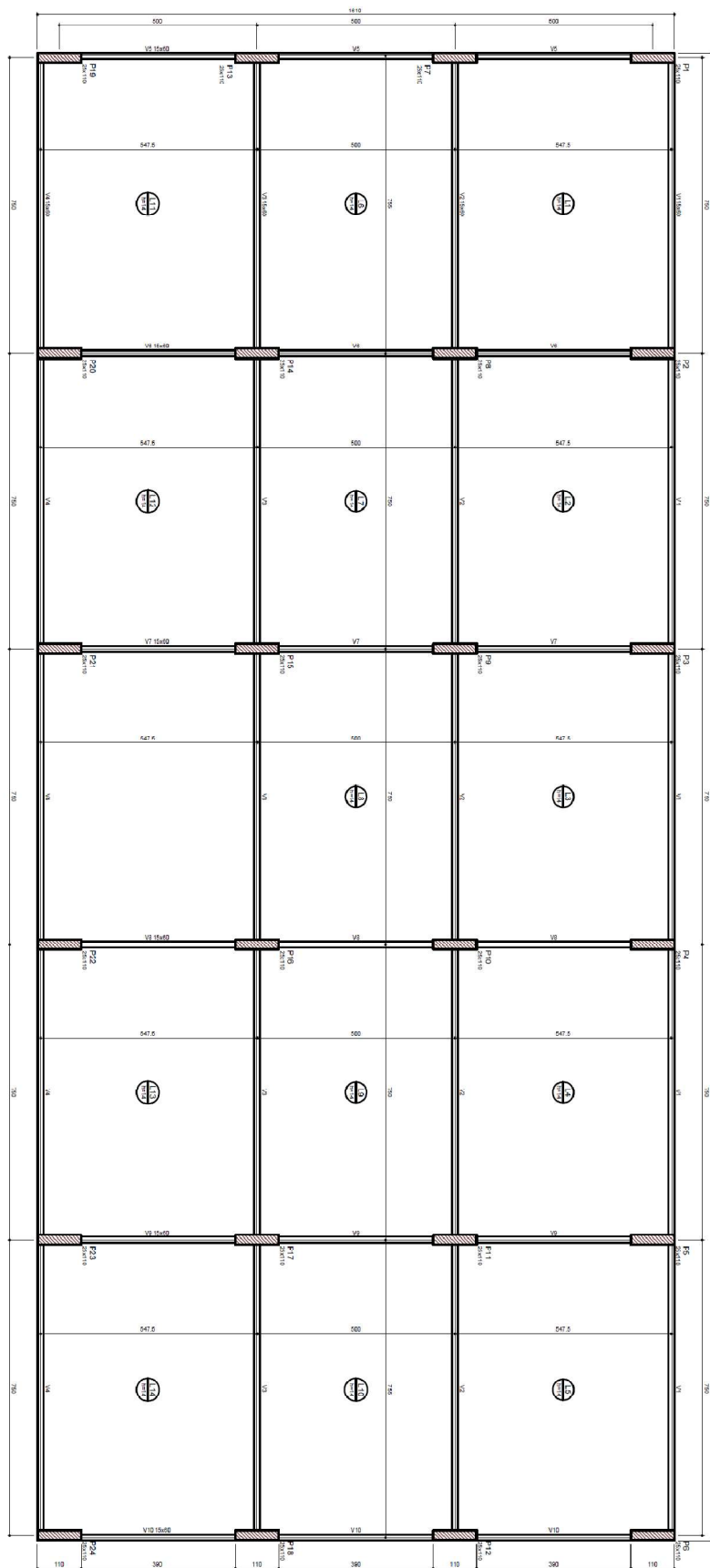
Fonte: O autor

Os resultados do processamento das estruturas referentes aos três tipos de lajes adotados foram os seguintes:

Maciça

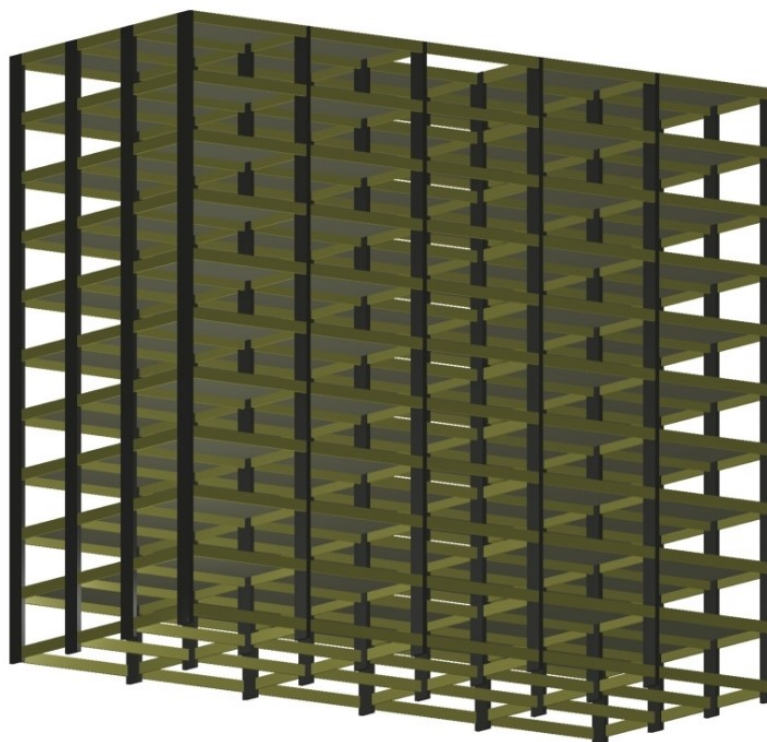
A estrutura com o sistema formado por laje maciça apresentou a necessidade de redimensionamento até que obtivesse a altura ($h = 14$ cm) de laje suficiente para atender os requisitos para o dimensionamento das peças. Entretanto, as dimensões dos pilares e vigas utilizadas para o lançamento, assim como suas posições e quantidades foram mantidas e apresentaram resultados satisfatórios para obter uma estrutura estável e sem erros. A Figura 29 corresponde à planta de forma resultante do processamento e a Figura 30 a estrutura em 3D. O deslocamento apresentado foi na ordem de 1,40 cm, como apresentado no pórtico unifilar, na Figura 31.

Figura 29 - Forma Modelo 3: Maciça



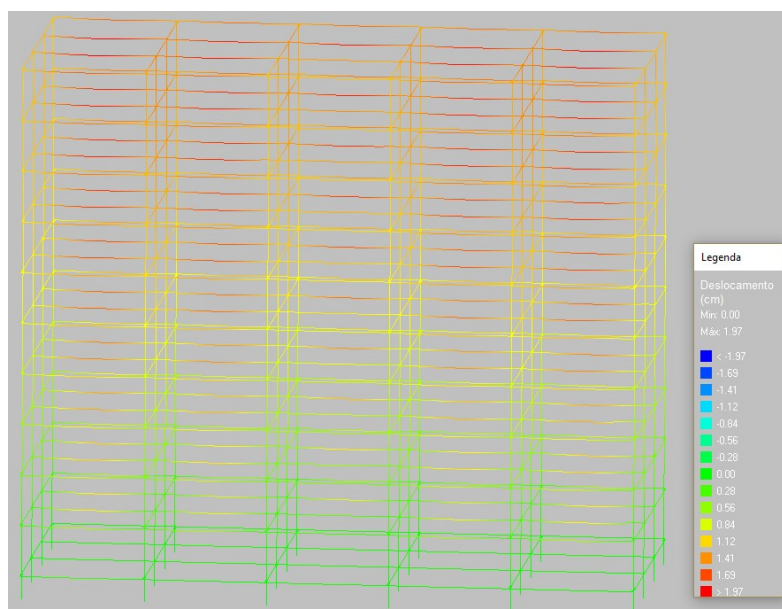
Fonte: O autor

Figura 30 - 3D: Modelo 3 - Maciça



Fonte: O autor

Figura 31 - Deslocamentos: Modelo 3 - Maciça



Fonte: O autor

Os resultados de materiais, para o Modelo 3 – Maciça estão apresentados nas Tabelas 43.

Tabela 43 - Consumo de materiais: Modelo 3 - Maciça

CONSUMO DE MATERIAIS: MODELO 3 - MACIÇA					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	23773.2	10437.8	48225.1	82436.0
	CA60	3211.7	3962.2	4551.9	11725.7
	Total	26984.9	14399.9	52776.9	94161.7
Volume concreto (m ³)	C-35	242.3	214.5	752.2	1209.0
	Área de forma (m ²)	3633.8	2106.0	5373.1	11112.9
Consumo de aço (kg/m ³)		111.4	67.1	70.2	77.9

Fonte: O autor

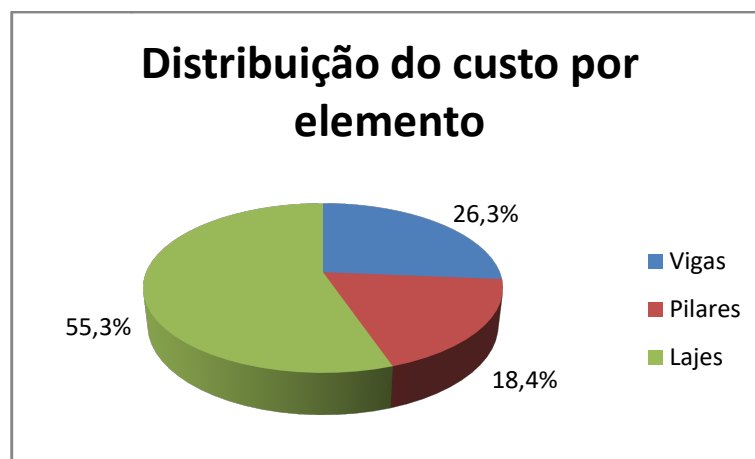
15. Os resultados quanto ao custo da estrutura são apresentados na Tabela 44 e no Gráfico 15.

Tabela 44 - Relação custo por elemento: Modelo 3 - Maciça

Relação custo por elemento (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Vigas	360326.50	299232.68	659559,18
Pilares	233055.08	228462.91	461517,99
Lajes	710460.75	674405.04	1384865,79
TOTAL	1303842.33	1202100.63	2505942,96

Fonte: O autor

Gráfico 15 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 3 – Maciça

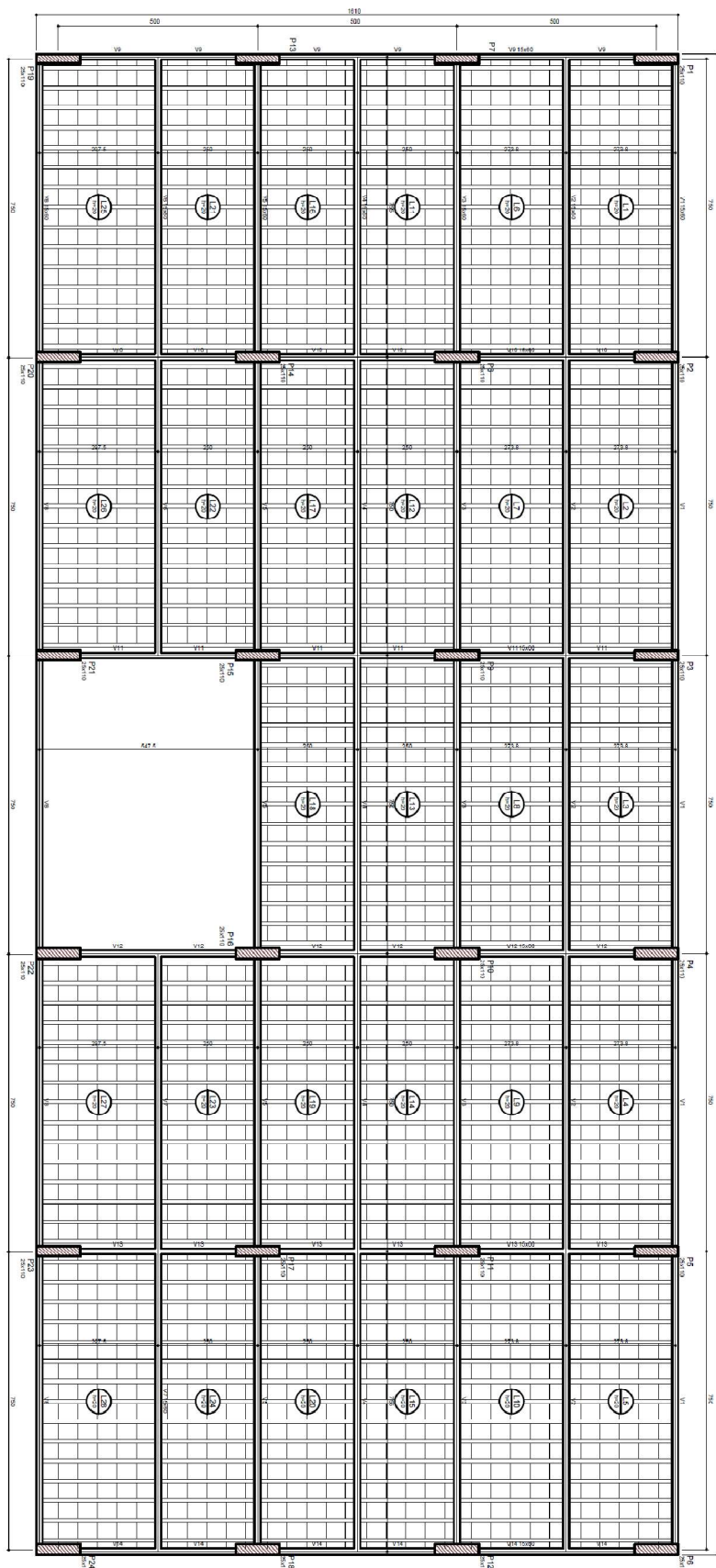


Fonte: O autor

Treliçada

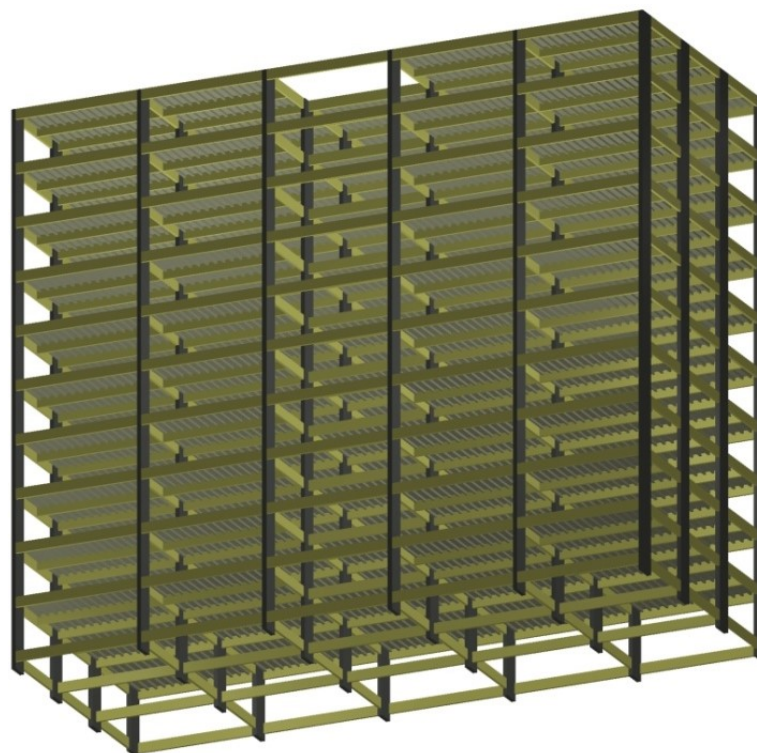
Para o caso da laje treliçada foi necessário o reprocessamento da estrutura para que atendesse as necessidades do dimensionamento dos elementos estruturais, por isso os vãos foram divididos simetricamente no centro, com adição de novas vigas horizontais, obtendo assim, planos de lajes menores com dimensões aproximadas de 2,50 x 7,50 m e lajes com espessura de ($h = 20$ cm). As dimensões dos outros elementos vigas e pilares foram mantidos, com isso, após o processamento obteve-se uma estrutura dimensionada sem erros. A planta de forma do pavimento tipo dessa estrutura é apresentada na Figura 32 e na Figura 33 à estrutura em 3D. O deslocamento da estrutura foi na ordem de 1,30 cm, apresentado no pórtico unifilar, na Figura 34.

Figura 32 - Forma Modelo 3: Trelçada



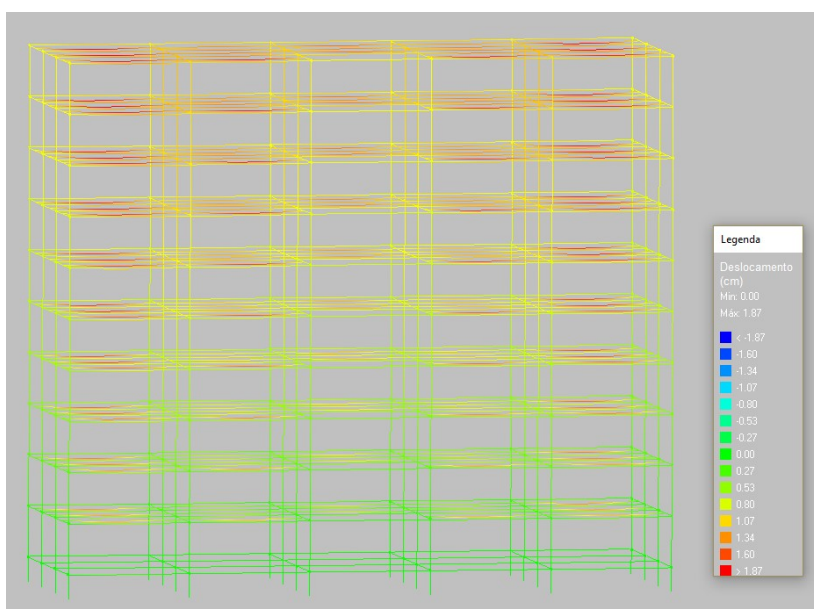
Fonte: O autor

Figura 33 - 3D: Modelo 3 – Treliçada



Fonte: O autor

Figura 34 - Deslocamentos: Modelo 3 - Treliçada



Fonte: O autor

O resumo do consumo de aço, concreto e forma, para o Modelo 3 – Treliçada é apresentado na Tabelas 45 e o quantitativo com as dimensões do bloco de EPS utilizado nesse modelo é apresentado na Tabela 46.

Tabela 45 - Consumo de materiais: Modelo 3 - Treliçada

CONSUMO DE MATERIAIS: MODELO 3 - TRELIÇADA					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso + 10 % (kg)	CA50	28969,80	9519,10		38488,90
	CA60	4927,80	3606,70	1961,30	10495,80
	CA60	Treliças		13613,80	13613,80
	Total	33897,60	13125,80	15575,10	62598,50
Volume concreto (m ³)	C-25	336,90	214,50	342,40	893,80
Área de forma (m ²)		5053,00	2106,00		7159,00
Consumo de aço (kg/m ³)		100,62	61,19	45,49	70,04

Fonte: O autor

Tabela 46 - Blocos de enchimento: Modelo 3 - Treliçada

Blocos de enchimento					
Tipo	Nome	Dimensões(cm)			Quantidade
		hb	bx	by	
EPS Unidirecional	B16/40/40	16	40	40	24960

Fonte: O autor

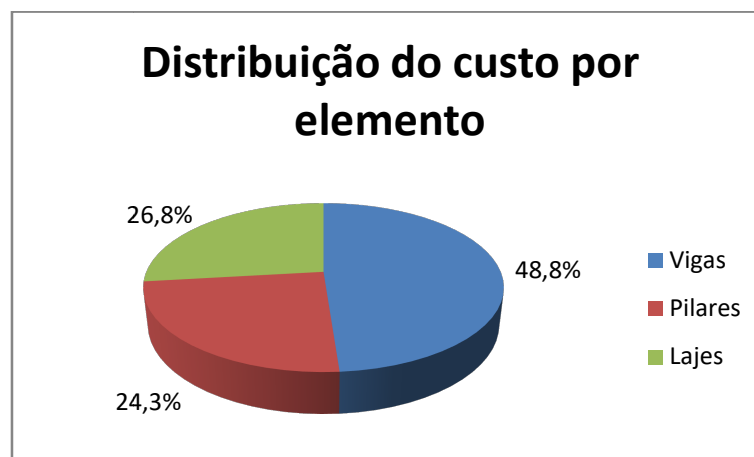
Os resultados quanto ao custo da estrutura são apresentados na Tabela 47 e no Gráfico 16.

Tabela 47 - Relação custo por elemento: Modelo 3 - Treliçada

Relação custo por elemento (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Vigas	486388.13	420040.71	906428.84
Pilares	227016.42	225000.72	452017.15
Lajes	341416.92	156809.12	498226.04
TOTAL	1054821.47	801850.55	1856672.02

Fonte: O autor

Gráfico 16 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 3 – Treliçada

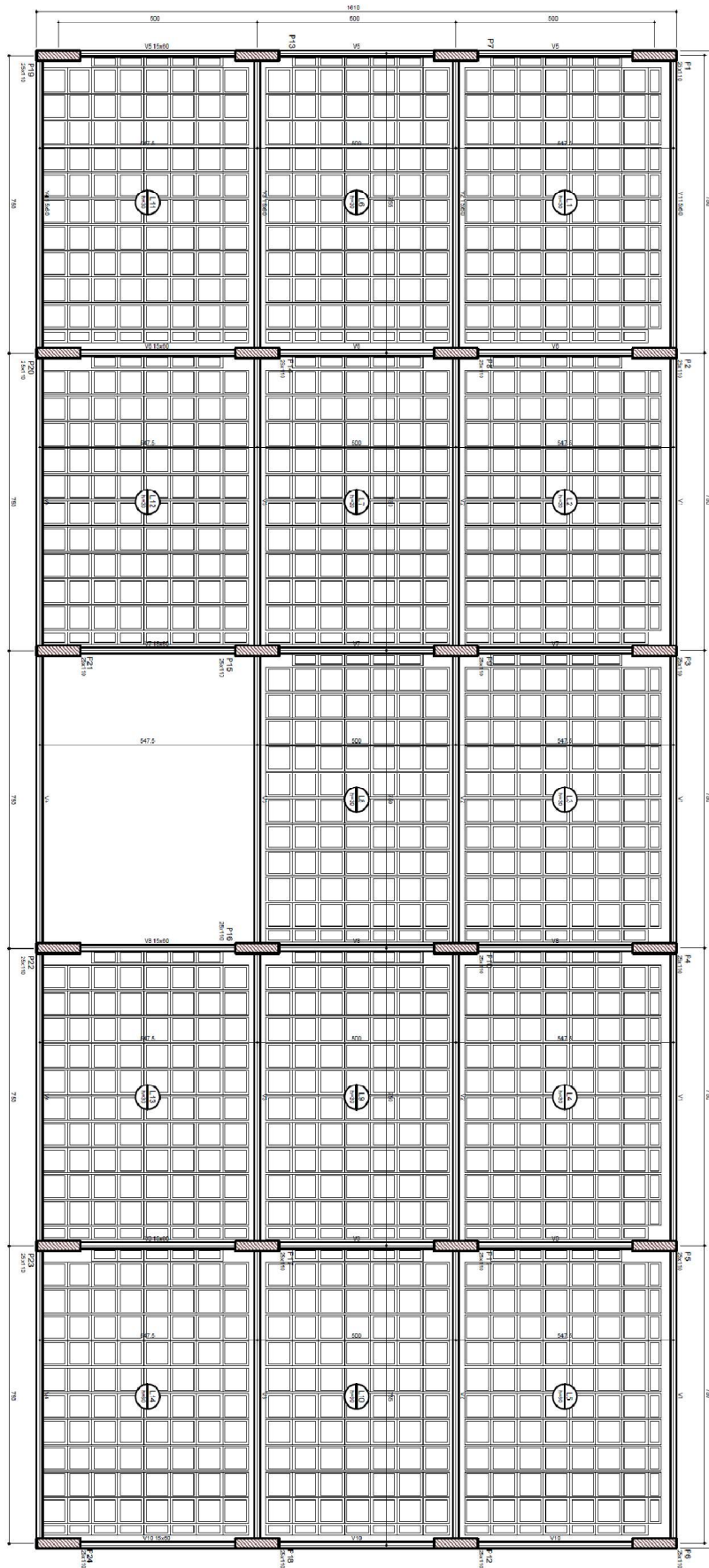


Fonte: O autor

Nervurada

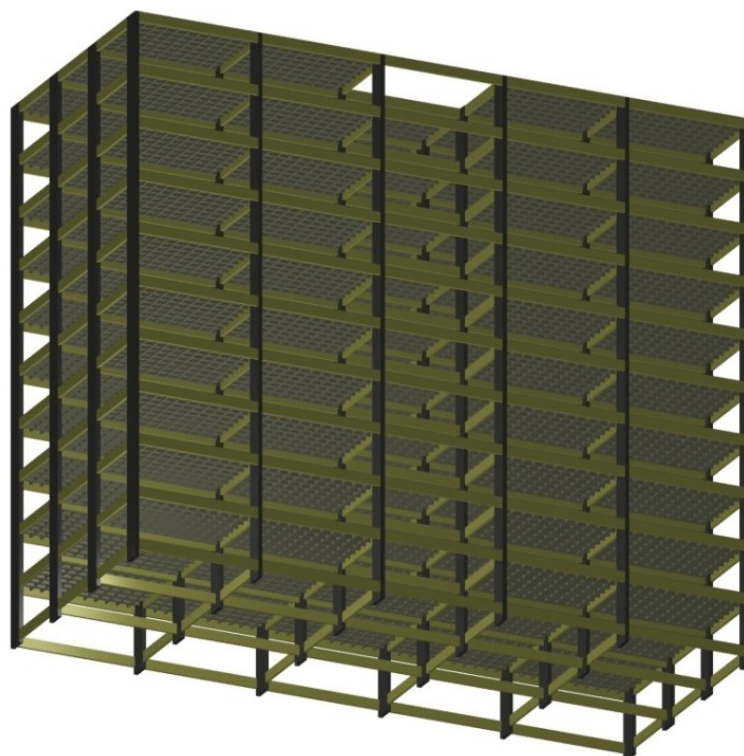
Na estrutura com o sistema formado por laje nervurada com cubetas, as dimensões pré-dimensionadas dos pilares e vigas, utilizadas no lançamento dos elementos no programa foram mantidas, entretanto, reprocessamentos foram necessários com novas alturas de cubetas para obter uma estrutura estável e sem erros nos elementos estruturais assim, a espessura final das lajes nervuradas ficou com ($h = 30$ cm). A Figura 35 corresponde à planta de forma resultante do processamento e a Figura 36 a estrutura em 3D. O deslocamento apresentado foi na ordem de 1,40cm, como apresentado no pórtico unifilar, na Figura 37.

Figura 35 - Forma Modelo 3: Nervurada



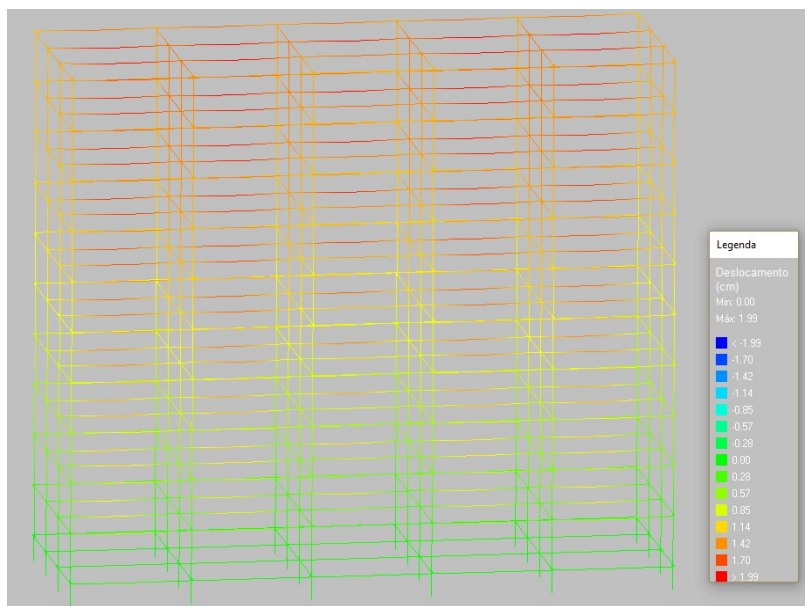
Fonte: O autor

Figura 36 - 3D: Modelo 3 – Nervurada



Fonte: O autor

Figura 37 - Deslocamentos: Modelo 3 – Nervurada



Fonte: O autor

Os resultados de materiais, para o Modelo 3 – Nervurada estão apresentados na Tabela 48 e o quantitativo com as dimensões das cubetas e meias cubetas utilizadas nesse modelo são apresentados na Tabela 49.

Tabela 48 - Consumo de materiais: Modelo 3 - Nervurada

CONSUMO DE MATERIAIS: MODELO 3 - NERVURADA					
		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	24610.1	10569.5	29280.9	64460.5
	CA60	3079.5	3900.7	9367.3	16347.5
	Total	27689.6	14470.2	38648.2	80808.0
Volume concreto (m ³)	C-35	242.3	214.5	964.5	1421.2
Área de forma (m ²)		3633.8	2106.0		5739.8
Consumo de aço (kg/m ³)		114.3	67.5	40.1	56.9

Fonte: O autor

Tabela 49- Blocos de enchimento: Modelo 3 - Nervurada

Blocos de enchimento					
Tipo	Nome	Dimensões(cm)			Quantidade
		hb	bx	by	
Cubetas	B18/66/66	18	66	66	10200
	B18/33/66	18	33	66	500
	B18/66/33	18	66	33	1720

Fonte: O autor

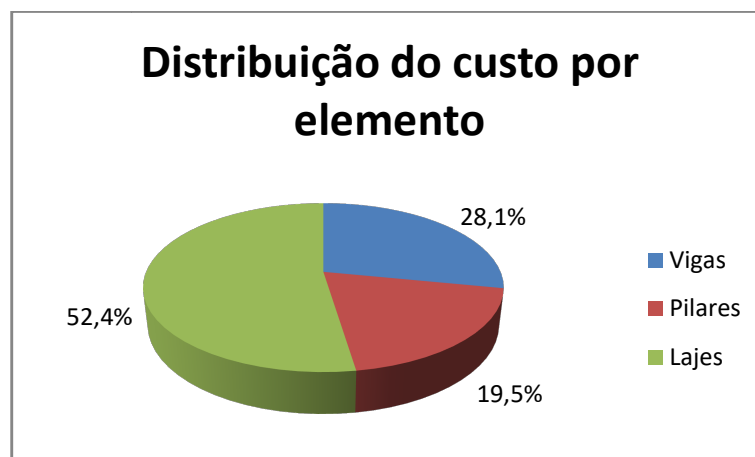
Os resultados quanto ao custo da estrutura são apresentados na Tabela 50 e no Gráfico 17.

Tabela 50 - Relação custo por elemento: Modelo 3 - Nervurada

Relação custo por elemento (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Vigas	364832.07	300999.27	665831,34
Pilares	233248.29	228060.85	461309,15
Lajes	722940.25	518909.75	1241850,01
TOTAL	1321020.62	1047969.88	2368990,50

Fonte: O autor

Gráfico 17 – Distribuição do custo por elemento: Modelo 3 – Nervurada



Fonte: O autor

Comparativo entre soluções estruturais

Demonstra-se na Tabela 51 o comparativo de materiais e custos, entre as 3 soluções estruturais adotadas para o Modelo 3 (7,50x5,00m), com o uso de laje maciça, pré-moldada treliçada e nervurada com cubetas. Os Gráficos 18 a 21 apresentam os resultados percentuais referentes aos dados da tabela 51.

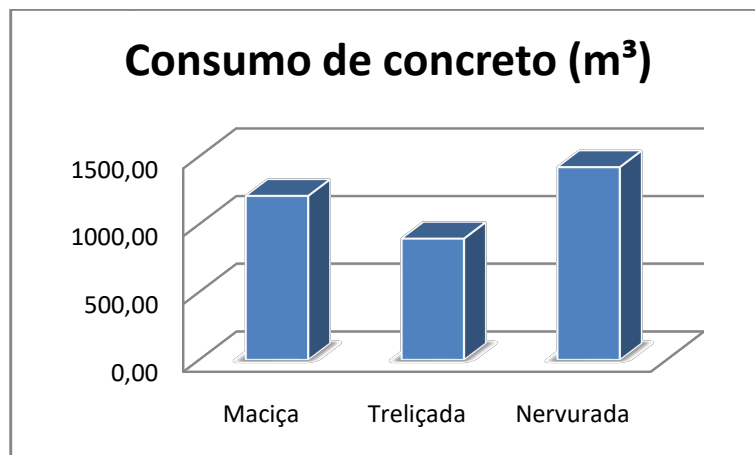
Assim como os resultados obtidos nos Modelos 1 e 2, a solução com laje pré-moldada treliçada apresentou menor consumo entre os materiais, assim como, menor custo final da estrutura. A modulação com lajes nervuradas por apresentar o menor consumo de fôrma, entre as três soluções, assume, no entanto, a segunda posição no consumo de aço que resultou em um custo menor em relação à estrutura com laje maciça, abrindo uma vantagem considerável também neste caso.

Tabela 51 - Comparativo de materiais e custo: Modelo 3

Modelo 3 7.5x5.0	Consumo de material			Custo total
	Concreto (m ³)	Forma (m ²)	Aço (kg)	R\$
Maciça	1209,00	11112,90	94161,70	2.505.942,96
Treliçada	893,80	7159,00	62598,50	1.856.672,02
Nervurada	1421,20	5739,80	80808,00	2.368.990,50

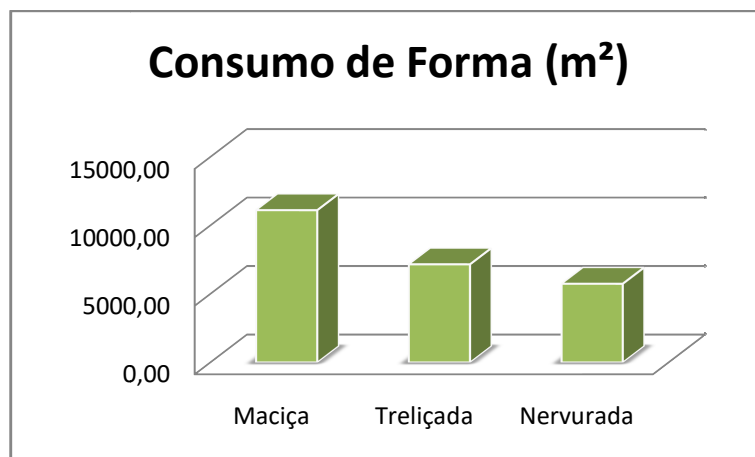
Fonte: O autor

Gráfico 18 – Comparativo do consumo de concreto: Modelo 3



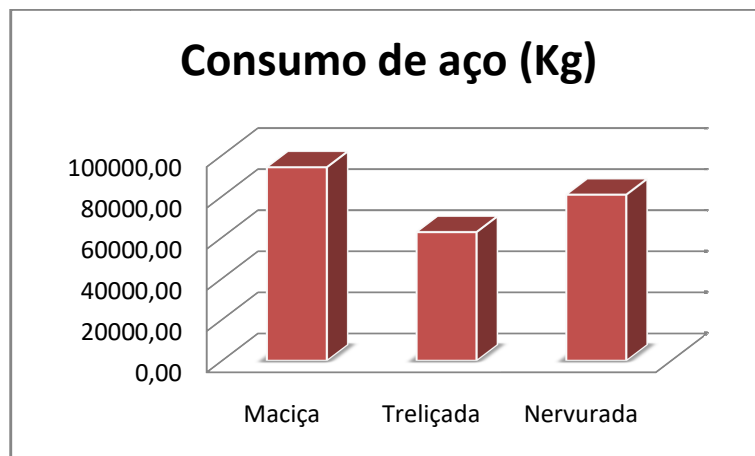
Fonte: O autor

Gráfico 19 – Comparativo do consumo de forma: Modelo 3



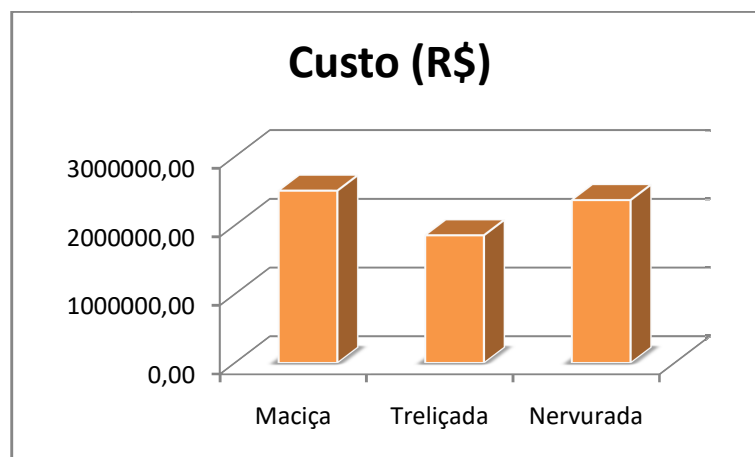
Fonte: O autor

Gráfico 20 – Comparativo do consumo de aço: Modelo 3



Fonte: O autor

Gráfico 21 – Comparativo dos custos totais: Modelo 3

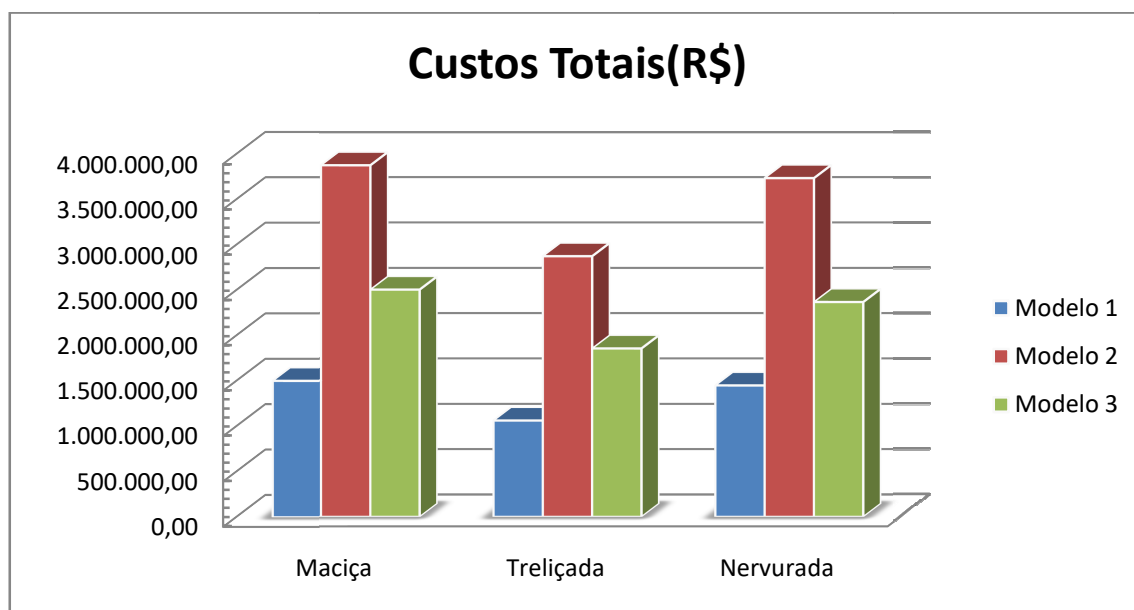


Fonte: O autor

Comparativo total de custos

Neste estudo de caso, a solução em lajes treliçada com EPS apresentou o menor custo total e a solução maciça o maior, para os três modelos analisados. As lajes nervuradas se apresentaram como segunda opção em todos os casos, com custos próximos às lajes maciças, nessas situações.

Gráfico 22 – Comparativo do custo total dos modelos propostos



Fonte: O autor

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

No decorrer do trabalho pode-se perceber a relevância de um estudo que busque a determinação de alternativas de modelos estruturais pré-definidos, como opção para os arquitetos durante a elaboração dos projetos arquitetônicos. Entretanto, sabe-se que dessas informações extraídas nesse trabalho, os custos finais de uma estrutura são diretamente dependentes do modelo arquitetônico e dos elementos escolhidos para compor essa estrutura. Por isso, entende-se que quando o projeto arquitetônico é racional, modulado, auxilia consideravelmente ao engenheiro calculista a ser também racional em seus resultados.

No modelo 1, onde a modulação utilizada para os pilares foi 5m, foram obtidos os menores custos, em razão da estrutura ser de menores vãos, entretanto, seus resultados em percentual se assemelharam as demais estruturas analisadas. O modelo 2, com modulação entre pilares de 7,5 m, caracterizou-se como o de maior custo, motivado sobretudo, do ponto de vista estrutural, pois esse vão provoca maiores esforços internos e deslocamentos nos elementos estruturais (nas vigas), que implicaram num aumento considerável no consumo de materiais. O modelo 3 representa uma solução intermediária aos modelos 1 e 2. A funcionalidade de modulação entre pilares distintas, com 5,0 m e 7,5 m, resultou em planos de menor área, auxiliando na solução de lajes e na redução dos deslocamentos, assemelhando-se ao modelo 1. O consumo de materiais também é intermediário em relação a esses dois modelos, assim como o custo final das estruturas analisadas.

Verificou-se que os custos das lajes, em comparação com os outros elementos, vigas e pilares, apresentaram os maiores percentuais em todos os sistemas estruturais formados por lajes maciças, como mostram os gráficos 1, 8 e 16. Nos modelos de lajes pré-moldadas treliçadas, as vigas corresponderam aos elementos mais onerosos, quase metade do custo total das estruturas, as lajes, entretanto, corresponderam aos elementos de menor valor monetário no modelo 1 (gráfico 2) e em segundo lugar quase que empatado com os pilares nos outros dois modelos, com vãos maiores (gráficos 9 e 16). As estruturas formadas por lajes nervuradas com cubetas e lajes maciças tiveram esses elementos como sendo o de maior custo final, em comparação com os outros elementos de composição da estrutura. Ressalta-se nesse caso, que essas modulações com lajes nervuradas seguiram o recomendado pela norma NBR 15200:2012, quanto às dimensões da capa, gerando um superdimensionamento das estruturas, aumentando o consumo de concreto e aço, que oneraram diretamente o custo total das estruturas.

Analisando-se os custos totais dos sistemas propostos, constatou-se que o **Sistema de lajes treliçadas apresentou-se como a solução mais econômica**, em todos os Modelos, entre as vantagens apresentadas por Muniz (1991) apud Spohr (2008), que foram significativas para atingir esses resultados em relação às lajes maciças foi a diminuição do peso próprio da laje, que resultou em estruturas com melhor resultado do ponto de vista estrutural, com esforços internos e deslocamentos menores nas vigas na qual se apoiaram, resultando em um menor consumo de materiais. Outra vantagem, que a torna concorrente em relação às nervuradas com cubetas a economia de formas e de escoramento.

As soluções estruturais com lajes nervuradas com cubetas têm como principais vantagens citadas por Silva (2002), a redução do peso próprio da estrutura, entretanto, esse fator está em função da capa de concreto adotada, para atender as normas de desempenho das edificações e as normas de incêndio esse resultado não apresentou um favorecimento em relação à laje maciça, por resultar em espessuras muito próximas. O reaproveitamento das cubetas nos pavimentos durante a gestão executiva da obra, também é considerada uma vantagem para essa solução, entretanto, nesse estudo não foi possível considerá-las.

As lajes maciças se apresentaram nesse estudo como soluções de maior custo, sendo o consumo de fôrmas, a origem dos maiores quantitativos de materiais, porém, Carvalho e Figueiredo Filho (2015) destacam que em edificações altas e que repetem os pavimentos, como nos casos apresentados nesse estudo, os custos com formas e escoramentos são reduzidos, pois podem ser reaproveitadas várias vezes, entretanto, nesse trabalho, esse fator não foi considerado.

Esse trabalho não tem a intenção de generalizar a escolha da alternativa estrutural, pois sabe-se que este depende de várias variáveis, entretanto, apresenta um parâmetro que pode auxiliar na seleção da alternativa estrutural para cada obra. Vale ressaltar também nesse estudo, que 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: o tempo de execução, a mão de obra para a execução da estrutura, a disponibilidade dos materiais a serem aplicados, além da compatibilização com o projeto arquitetônico que será proposto.

Para terminar, ficam com sugestões, alguns temas para futuras pesquisas:

- Analisar os modelos com vãos de 7,5m, adotando solução estrutural em concreto protendido;
- Fazer um estudo comparativo de custos para as soluções adotadas no projeto, englobando fundações e reaproveitamento de fôrmas e cubetas;

- Ampliar nesse estudo o tipo de soluções estruturais, com outras opções de lajes.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118:2014**. Projeto e Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014;
- _____. **NBR 14432:2001**. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001;
- _____. **NBR 14859-1**: Lajes pré-fabricadas de concreto. Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis - Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 15200:2012**. Projeto de estruturas de concreto em situações de incêndio. Rio de Janeiro, 2012;
- _____. **NBR 15575:2013**. Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 6120:1980**. Cargas para o cálculo de estruturas das edificações. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. **NBR 6123:1988**. Forças devidas ao vento. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. **NBR 7480:2007**. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.
- 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.1.
- ARAÚJO, J.M. **Curso de concreto armado**. 3 ed. Rio Grande: Dunas, 2010a. v.4.
- ARCELORMITTAL. **Manual técnico de lajes treliçadas**. 42 p., Jul. 2010. Disponível em: < <http://longos.arcelormittal.com.br/pdf/produtos/construcao-civil/outros/manual-tecnico-trelicas.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2018.
- BASTOS, P. S. S. **Lajes de Concreto**. Notas de aula, Disciplina Estruturas de Concreto I, Bauru/SP, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia – Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2015, 215p. Disponível em: < www.feb.unesp.br/pbastos>. Acesso em: 10 set. 2018.
- CAIO, F. **Análise comparativa entre sistemas estruturais de lajes maciças e nervuradas treliçadas**. 2014.77f. Trabalho de conclusão de curso – Centro Universitário UNIVATES, Universidade de Porto Alegre, Lajeado. 2014.
- CARVALHO, R. C. FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturais usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4 ed. São Carlos: EdUFSCar, 2015. 415p.

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.

KEMCZINSKI, P. G. **Cálculo e detalhamento de estrutura de concreto armado de um edifício residencial.** 2015. 121f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, Florianópolis. 2015.

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.

NERVO, R. **Análise comparativa dos sistemas estruturais de lajes convencionais e lajes nervuradas.** 2012. 77f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Santa Cruz. Bahia, Santa Cruz. 2012.

O que o Eberick faz, 2018. Disponível em: <https://www.altoqi.com.br/eberick/>. Acesso em: 10 out. 2018.

PINHEIRO, L.M.; MUZARDO, C.D.; SANTOS, S.P. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios.** São Carlos, 2007. Pré-dimensionamento (Capítulo 5); p.51-56.

PIRES, G. M. **Estudo do pré-dimensionamento de pilares.** 2011. 113f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, Ijuí. 2011.

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.

SILVA, M. A. F. **Projeto e Construção de lajes nervuradas de concreto armado.** 2005. 242f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, São Carlos. 2005.

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. Rio Grande do Sul, Santa Maria. 2008.