



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BRUNO PEREIRA DE SOUSA

**ESTUDO COMPARATIVO DE CUSTOS ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS DE
CONCRETO ARMADO PARA UMA ARQUITETURA**

João Pessoa, PB

2018

BRUNO PEREIRA DE SOUSA

**ESTUDO COMPARATIVO DE CUSTOS ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS DE
CONCRETO ARMADO PARA UMA ARQUITETURA**

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

Orientador: Professor Dr. Enildo Tales Ferreira

João Pessoa, PB

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S725e Sousa, Bruno Pereira de.

Estudo comparativo de custos entre soluções estruturais de concreto armado para uma arquitetura / Bruno Pereira de Sousa. - João Pessoa, 2018.
92f. : il.

Orientação: Enildo Tales Ferreira.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Concreto armado. 2. Lajes nervuradas. 3. Lajes treliçadas. 4. Lajes maciças. I. Ferreira, Enildo Talles. II. Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

BRUNO PEREIRA DE SOUSA

ESTUDO COMPARATIVO DE CUSTOS ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS DE CONCRETO ARMADO PARA UMA ARQUITEURA

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



Professor Dr. Enildo Tales Ferreira

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

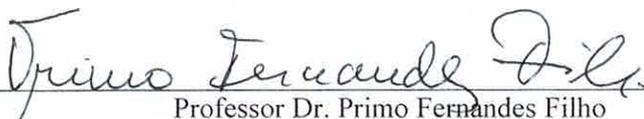
APROVADO



Professor Dr. Carlos Antônio Taurino de Lucena

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

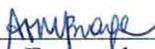
APROVADO.



Professor Dr. Primo Fernandes Filho

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

Aprovado



Profª. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Matrícula Siape: 1668619

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Dedico este trabalho aos meus pais, que são tudo para mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por iluminar meu caminho em momentos difíceis, pelas oportunidades e por colocar pessoas muito especiais nessa jornada.

Aos meus pais, Francisco e Julia, pelo amor e valores transmitidos, não importando a distância. Palavras são poucas para descrever a importância de vocês na minha vida.

A todos os meus familiares, pelos gestos, palavras de apoio e o sentimento de sempre poder contar com eles.

Ao meu orientador, Enildo Tales Ferreira, por todos os ensinamentos compartilhados acerca das estruturas e da vida, além da disposição e empenho para que esse trabalho fosse desenvolvido. Ao professor Primo, pela amizade nesses dois anos como meu orientador de monitoria. Ao professor Taurino, pela disponibilidade em participar da banca examinadora.

A todos os amigos do curso, pelos momentos de alegria e desespero compartilhados. Todos sabemos o quanto foi esperado esse momento e fico grato por terem feito parte dessa caminhada.

RESUMO

Este trabalho trata de um estudo comparativo de custos finais para estruturas de concreto armado. A realização do mesmo foi feita através da análise de quantitativos de materiais e seus custos para quatro modelos de estruturas: lajes maciças convencionais (Modelo I); lajes nervuradas apoiadas em vigas (Modelo II); lajes treliçadas com enchimento em blocos de poliestireno expandido (Modelo III) e lajes nervuradas sem vigas de apoio (Modelo IV). As estruturas foram concebidas a partir do projeto arquitetônico de uma edificação de uso misto. Após realização de uma revisão bibliográfica, a modelagem das estruturas foi realizada a partir da ferramenta computacional Eberick 2018, sob mesmos critérios de análise e dimensionamento, possibilitando a geração de quantitativos de materiais e relatório de custos. Analisando-se esses dados foi verificado que o Modelo III apresentou o menor custo entre as estruturas estudadas.

Palavras-chave: Concreto Armado. Lajes nervuradas. Lajes treliçadas. Lajes maciças.

ABSTRACT

This paper address a comparative study of final costs for reinforced concrete structures. The accomplishment of the same one was made through the analysis of quantitative of materials and its costs for four models of structures: conventional solid slabs (Model I); ribbed and waffle slabs supported on beams (Model II); lattice girder slabs with expanded polystyrene block (Model III) and ribbed and waffle slabs without support beams (Model IV). The structures were conceived from the architectural design of a building of mixed use. After a bibliographic review, the modeling of the structures was accomplished through using the Eberick 2018 computational tool, under the same criteria of analysis and design, allowing the generation of quantitative materials and cost reporting. Through the analysis of the data provided, it has been verified that Model III presented the lowest cost among the studied structures.

Keywords: Reinforced concrete. Waffle slabs. Lattice girder slabs. Solid Slabs

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA).....	26
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	27
Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.....	27
Tabela 4 - Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), em minuto.....	34
Tabela 5 - Classificação das edificações quanto à sua ocupação	35
Tabela 6 - Dimensões mínimas para lajes contínuas.....	36
Tabela 7 - Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelo	36
Tabela 8 - Dimensões mínimas para nervuradas armadas em uma direção	37
Tabela 9 - Dimensões mínimas para nervuradas contínuas.....	37
Tabela 10 - Cobrimentos nominais.....	44
Tabela 11 - Carregamentos na estrutura.....	44
Tabela 12 - Armaduras adicionais para laje treliçada de 16 cm.....	50
Tabela 13 - Armaduras adicionais para laje treliçada de 20 cm.....	51
Tabela 14 - Armaduras adicionais para laje treliçada de 25 cm.....	51
Tabela 15 - Pré-dimensionamento de lajes treliçadas	52
Tabela 16 - Pré-dimensionamento dos outros elementos da estrutura	53
Tabela 17 - Resultados de processamento para o Modelo I	54
Tabela 18 - Resultados de processamento para o Modelo II.....	55
Tabela 19 - Resultados de processamento para o Modelo III.....	56
Tabela 20 - Resultados de processamento para o Modelo IV	57
Tabela 21 - Custos de concreto.....	57
Tabela 22 - Custos de formas	58
Tabela 23 - Custos de aço.....	58
Tabela 24 - Custos de lajes nervuradas	59
Tabela 25 - Custos de lajes treliçadas.....	59
Tabela 26 - Consumo de concreto moldado in loco	60
Tabela 27 - Índice de consumo de Concreto	62
Tabela 28 - Consumo de formas em madeira	63
Tabela 29 - Taxa de forma.....	64
Tabela 30 - Consumo de aço	65
Tabela 31 - Taxa de aço.....	67

Tabela 32 - Custos por elemento estrutural	67
Tabela 33 - Custos referentes a insumos	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de lajes maciças	18
Figura 2 - Planta de forma de pavimento em laje nervurada.....	19
Figura 3 - Utilização de formas reaproveitáveis em lajes nervuradas.....	20
Figura 4 - Laje pré-fabricada do tipo treliçada	22
Figura 5 - Armação em forma de treliça espacial.....	22
Figura 6 - Lajes nervuradas sem vigas	23
Figura 7 - Integração entre pré-dimensionamento e concepções arquitetônicas e estruturais..	25
Figura 8 - Modelo de pórtico espacial	31
Figura 9 - Modelo de pórtico espacial integrado	31
Figura 10 - Fatores que influenciam o custo final de estrutura	32
Figura 11 - Fachada sudoeste	39
Figura 12 - Fachada noroeste.....	39
Figura 13 - Subsolo	40
Figura 14 - Térreo.....	40
Figura 15 – Mezanino.....	41
Figura 16 – Pavimento tipo	42
Figura 17 - Pórtico 3D do lançamento da estrutura.....	43
Figura 18 - Gráfico de carga nos pilares (Pilar tipo 1)	46
Figura 19 - Gráfico para flambagem (Pilar tipo 1).....	46
Figura 20 - Gráfico de carga nos pilares (Pilar tipo 2)	47
Figura 21 - Gráfico de altura de vigas	48
Figura 22 - Consumo de concreto para vigas, lajes e total.....	61
Figura 23 - Gráfico comparativo de consumo de formas para vigas e lajes e total.....	63
Figura 24 - Consumo de aço para pilares e fundações	65
Figura 25 - Gráfico de consumo de aço para os quatro modelos estruturais.....	66
Figura 26 - Impacto de insumos nos modelos estruturais	69
Figura 27 - Gráfico comparativo de acréscimo de custos em relação ao Modelo III.....	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivos gerais	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	CONCEPÇÃO ESTRUTURAL	15
2.2	SISTEMAS E ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	16
2.2.1	Sistema de lajes maciças apoiadas em vigas	17
2.2.2	Lajes nervuradas apoiadas em vigas	19
2.2.3	Lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas.....	21
2.2.4	Lajes nervuradas sem vigas.....	23
2.3	PRÉ-DIMENSIONAMENTO	25
2.4	CRITÉRIOS DE PROJETO	26
2.4.1	Parâmetros de durabilidade.....	26
2.4.2	Ações e combinações de ações	28
2.4.3	Estados-limites e verificação de segurança	28
2.4.4	Modelos de cálculo e utilização de softwares para análise estrutural ..	29
2.5	CUSTOS E QUANTITATIVOS DE MATERIAIS	32
2.6	EXIGÊNCIAS NORMATIVAS QUANTO A SITUAÇÕES DE INCÊNDIO	33
3	METODOLOGIA	38
3.1	ESTUDO DE CASO – APRESENTAÇÃO DA ARQUITETURA.....	38
3.2	LANÇAMENTO DA ESTRUTURA	42
3.3	CRITÉRIOS DE PROJETO	43
3.4	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS	45
3.4.1	Pré-dimensionamento de pilares.....	45

3.4.2	Pré-dimensionamento de vigas.....	47
3.4.3	Pré-dimensionamento de lajes maciças	48
3.4.4	Pré-dimensionamento de lajes nervuradas com vigas	49
3.4.5	Pré-dimensionamento de lajes treliçadas com enchimento em EPS.....	50
3.4.6	Pré-dimensionamento de lajes nervuradas sem vigas.....	52
3.4.5	Pré-dimensionamento de outros elementos da estrutura	52
3.5	ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS.....	53
3.5.1	Modelo I: lajes maciças apoiadas em vigas.....	54
3.5.2	Modelo II: lajes nervuradas apoiadas em vigas	54
3.5.3	Modelo III: lajes treliçadas apoiadas em vigas.....	55
3.5.4	Modelo IV: Lajes nervuradas sem vigas	56
3.6	CUSTOS UNITÁRIOS DE INSUMOS	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	CONSUMO DE CONCRETO.....	60
4.2	CONSUMO DE FORMA EM MADEIRA	62
4.3	CONSUMO DE AÇO.....	64
4.3	COMPARATIVO DE CUSTOS FINAIS DE ESTRUTURA.....	67
4.4	INFLUÊNCIA DA ARQUITETURA NA ESTRUTURA.....	70
5	CONCLUSÃO	71
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	APÊNDICE A - PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL – TÉRREO.....	76
	APÊNDICE B - PLAMTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL MEZANINO.....	80
	APÊNDICE C - PLANTA DE FORMA DO PAVIMENTO TIPO.....	84
	APÊNDICE D - PLANTA DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL COBERTA.....	88

1 INTRODUÇÃO

A busca por arquiteturas de formas variadas, decorrentes de novas possibilidades de uso dos espaços das edificações, aliada aos avanços das técnicas construtivas e a necessidade de redução de consumo de material e de mão de obra tem gerado um incremento no grau de complexidade do processo de concepção de uma estrutura.

Segundo Dácio Carvalho (2009), o objeto do projeto estrutural é a busca por ideias que visem solucionar os problemas referentes ao caminhamento das forças solicitantes e o espaço, possibilitando que o ele permaneça desimpedido para uso e movimento humano. Destarte, a forma que o direcionamento de tais esforços é feito é chamada de concepção estrutural. Nesta fase, busca-se que a estrutura seja funcional e que aperfeiçoe as particularidades estéticas do espaço que ela cobre.

Desse modo, diante de uma infinidade de possibilidades de se conceber uma estrutura, cabe ao projetista decidir qual modelo será o mais apropriado para a ocasião, levando-se em conta diversos fatores, tais como: sistemas estruturais, materiais, normas técnicas, complexidade de projeto, mão-de-obra qualificada disponível, segurança, tempos de execução, custo dentre outros. Às vezes, não existe uma solução que atenda perfeitamente a todos os critérios mencionados acima, sendo necessária avaliação criteriosa por parte do projetista acerca dos benefícios e desvantagens de cada solução estrutural adotada, levando-se em conta que a estrutura deve atender a requisitos gerais, como capacidade resistente, desempenho em serviço, durabilidade e integração com demais projetos.

Muitas vezes, todavia, a solução para o problema de concepção estrutural consiste em determinar qual solução atende aos esforços solicitantes e aos espaços definidos na arquitetura com o menor custo possível. Tal análise para o problema é pertinente, já que segundo Mattos (2006), o custo de estrutura de uma edificação pode chegar a uma ordem de 35,7%, enquanto custos dos projetos executivos podem variar de 1,6% a 2,7% do custo total de um edifício, sendo menos onerosa a correção na fase de projeto do que em uma obra já executada (GOLDMAN, 1986 *apud* CORRÊA E NAVEIRO, 2005)

De acordo com Spohr (2008, p.13) “[...] a busca por soluções mais econômicas que as convencionais se tornou uma preocupação para os construtores. ” A escolha do sistema estrutural não pode ser realizada sem um estudo prévio. Esta decisão é de extrema importância, pois irá refletir em várias etapas da construção, além do custo final da obra.

Para Albuquerque (1999), a idealização de uma estrutura econômica mudou ao longo do tempo. No passado, buscava-se estruturas com as menores dimensões possíveis; atualmente,

busca-se a padronização dos elementos e conseqüentemente das formas necessárias para execução da estrutura, propiciando maior produtividade de mão-de-obra e reaproveitamento de materiais. O uso dessa alternativa deve-se a percepção dos projetistas de que o custo da estrutura não se resume a aço e concreto, sendo levados em consideração formas (representam até 30% do custo total da mesma), tempo de execução e mão-de-obra empregada.

Diante da pluralidade de concepções estruturais possíveis de serem projetadas, este trabalho buscará subsidiar a escolha do sistema estrutural para uma edificação de uso misto por meio de comparativo de custos de estruturas de concreto armado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos gerais

Comparar os custos finais relativos às estruturas de concreto armado, considerando-se diferentes concepções estruturais, através de estudo de caso de uma edificação de uso misto, por meio da utilização do software de cálculo estrutural Eberick 2018.

1.1.2 Objetivos específicos

Avaliar as opções estruturais utilizadas para este estudo de caso e comparar os quantitativos de materiais referentes aos quatro modelos de estruturas em concreto armado, considerados a seguir:

Modelo I: Lajes maciças apoiadas em vigas;

Modelo II: Lajes nervuradas apoiadas em vigas com uso de moldes reaproveitáveis;

Modelo III: Lajes treliçadas apoiadas em vigas com blocos de enchimento de EPS;

Modelo IV: Lajes nervuradas sem vigas com uso de moldes reaproveitáveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

Segundo Rebello (2007), a concepção estrutural é a fase em que se é criado um sistema capaz de manter uma determinada forma. Mesmo sendo uma etapa subjetiva, na qual a experiência e o talento do profissional são cruciais para o bom desenvolvimento de um projeto, é inegável que o melhor caminho para se chegar a melhor concepção de uma estrutura é através da integração e discussão entre as diversas disciplinas envolvidas no projeto do empreendimento como um todo e seus respectivos profissionais.

A necessidade de integração entre os diversos projetistas envolvidos é elucidada por Corrêa e Naveiro (2005) ao afirmar que a mesma tem como fim a otimização das soluções técnicas e econômicas. Dessa forma, quanto mais complexo o empreendimento a ser desenvolvido, é indispensável a troca de informações entre as diversas atividades técnicas de projeto. Ainda assim, a forma com a qual a integração é feita varia conforme empresa, equipe de projeto e empreendimento.

“Um arranjo estrutural adequado consiste em atender, simultaneamente, os aspectos de segurança, economia (custo), durabilidade e os relativos ao projeto arquitetônico (estética e funcionalidade). Em particular, a estrutura deve garantir a segurança contra os Estados Limites, nos quais a construção deixa de cumprir suas finalidades”. (ALVA, 2007, p.1)

Ainda para Alva (2007, p.1), além dos critérios de resistência, durante o desenvolvimento da concepção estrutural deve-se preocupar com a funcionalidade da edificação, ou seja, a aplicabilidade dos espaços que serão construídos. Para isso, o projeto arquitetônico representa a base para a elaboração de um projeto estrutural, sendo os elementos da estrutura posicionados e dimensionados de forma que respeitem as imposições arquitetônicas dos ambientes dos vários pavimentos.

Não obstante, para Monteiro (2017), existem fatores que direcionam a escolha do melhor sistema estrutural para uma edificação, os mais importantes são os seguintes:

- a) características do empreendimento: Existem características (altura da edificação, uso comercial ou residencial, geometria, repetitividade, etc) que irão direcionar a escolha da melhor concepção estrutural do empreendimento [...];
- b) fluxo de caixa da obra: a característica do desembolso dos investidores irá determinar o ritmo desejado para a construção e, conseqüentemente, os processos a serem utilizados. Por isso, processos industrializados, tais como, estruturas metálicas e pré-moldadas são viabilizadas em empreendimentos industriais, shoppings etc [...];

- c) filosofia de trabalho da construtora: muitas construtoras possuem critérios de execução que limitam ou direcionam a concepção estrutural [...].

O processo de concepção estrutural depende dos sistemas estruturais que serão adotados, mas de forma geral pode-se seguir o seguinte fluxograma de ações, de acordo com Barboza (2008, p. 8-9):

- a) o conjunto da estrutura deve atender tanto quanto possível a forma, a estética, as condições impostas pelo projeto arquitetônico;
- b) deve-se procurar embutir os elementos estruturais, geralmente as vigas e os pilares nas paredes de alvenaria de vedação;
- c) o posicionamento dos elementos estruturais na estrutura da construção pode ser feito com base no comportamento primário dos mesmos;
- d) a transmissão das cargas deve ser feita de forma mais direta possível, pelo caminho mais curto. Deve-se evitar, sempre que possível, transmitir as cargas de vigas importantes sobre outras vigas (apoios indiretos), e apoio de pilares sobre vigas (chamadas vigas de transição);
- e) as dimensões da estrutura em planta devem ser limitadas (geralmente a 30 m no máximo), a fim de diminuir os efeitos da retração e da variação de temperatura, principalmente. Isso pode ser obtido pela especificação de juntas de separação (também chamadas juntas de dilatação), que resultam em blocos de estruturas independentes, que não interagem entre si;
- f) em edifícios de múltiplos pavimentos a verificação da estabilidade global da estrutura assume grande importância, porque a ação horizontal do vento alcança valores significativos. A especificação da seção transversal das vigas, e principalmente dos pilares, deve ser feita de maneira muito criteriosa e a estrutura de contraventamento deve ser avaliada cuidadosamente;
- g) em edifícios com garagens o posicionamento dos pilares deve ser feito cuidadosamente a fim de possibilitar o maior número possível de vagas e facilitar o fluxo dos veículos.

2.2 SISTEMAS E ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Os sistemas estruturais podem ser compreendidos pela solidarização de diversos elementos estruturais dispostos racionalmente e de maneira adequada em relação aos espaços, provendo ao edifício resistência perante às cargas atuantes e garantindo sua estabilidade (ALVA, 20007, p.6). Dito isto, os sistemas estruturais de concreto armado serão estudados no presente trabalho.

O concreto armado é obtido pela associação de concreto simples e armadura, de tal modo que ambos os materiais resistam aos esforços solicitantes de forma cooperativa.

Carvalho (2007, p. 19-20) elencou as vantagens e desvantagens do concreto armado quanto ao seu uso estrutural:

- a) vantagens:
 - boa resistência às solicitações prevalentes;

- boa trabalhabilidade;
- proporciona obtenção de estruturas monolíticas;
- técnicas executivas difundidas em todo Brasil;
- economia em relação às estruturas de aço;
- durabilidade;
- permite uso da pré-moldagem;
- resistência a choques e vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e desgastes mecânicos.

b) desvantagens:

- resulta em elementos de maiores dimensões que o aço, podendo elevar o seu custo;
- reformas e adaptações são, muitas vezes, de difícil execução;
- são necessários formas e escoramentos que, geralmente, precisam permanecer no local até que o concreto alcance resistência adequada.

Os elementos utilizados em estruturas de concreto armado são classificados em três tipos, de acordo com a norma NBR 6118:2014, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

Elementos Lineares: são aqueles no qual o comprimento longitudinal supera no mínimo três vezes a maior dimensão da seção transversal, sendo comumente chamados de barras.

Elementos bidimensionais: são elementos no qual a espessura é muito menor que as demais.

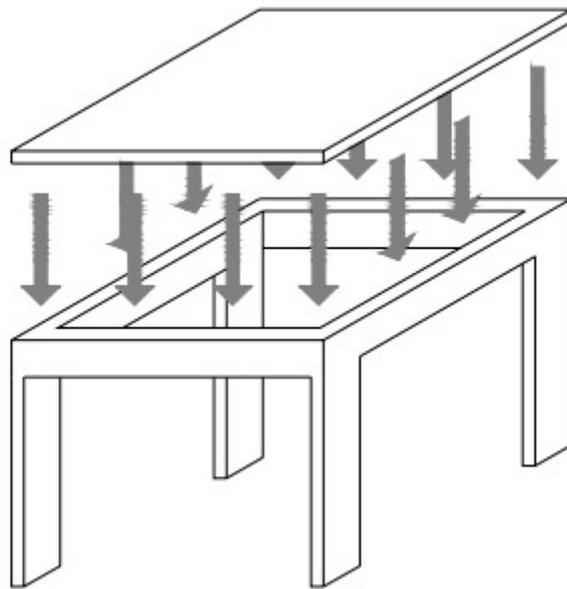
Elementos Tridimensionais: são os elementos os quais as suas três dimensões apresentam a mesma ordem de grandeza.

Assim, conhecido o material concreto armado e os elementos que compõem os sistemas estruturais do mesmo, cabe a este estudo destacar os seguintes modelos, os quais se diferenciam, na maior parte, pela solução adotada para o piso de seus pavimentos.

2.2.1 Sistema de lajes maciças apoiadas em vigas

Laje maciça é aquela composta integralmente por concreto, sendo inseridas armaduras de flexão e eventualmente de cisalhamento. Neste sistema, as lajes são vinculadas às vigas, sendo que as últimas transmitem as cargas para pilares, conforme a Figura 1. As lajes maciças possuem espessuras geralmente entre 7 cm a 15 cm, sendo projetadas para os mais diversos tipos de construção. (BASTOS, 2015, p.1)

Figura 1 - Sistema de lajes maciças



Fonte: Barboza (2008)

A transferência dos esforços nas lajes maciças para seus apoios ocorre de forma diferente do que nas pré-moldadas. Ela transmite as cargas em todas as vigas em seu entorno, o que gera um melhor aproveitamento das peças estruturais, ao passo que as cargas podem apresentar a mesma ordem de grandeza. Outra vantagem desse sistema está no fato de poder se embutir vários tipos de instalações na laje maciça quando realizada a concretagem. Contudo, para esse sistema, deve-se avaliar os custos referentes às formas das lajes, que podem representar uma grande parcela de custo para a estrutura. Esse problema pode ser amenizado com a repetição de pavimentos, a medida em que é possível realizar o reaproveitamento do mesmo jogo de fôrmas. (SILVA, 2002, p.16).

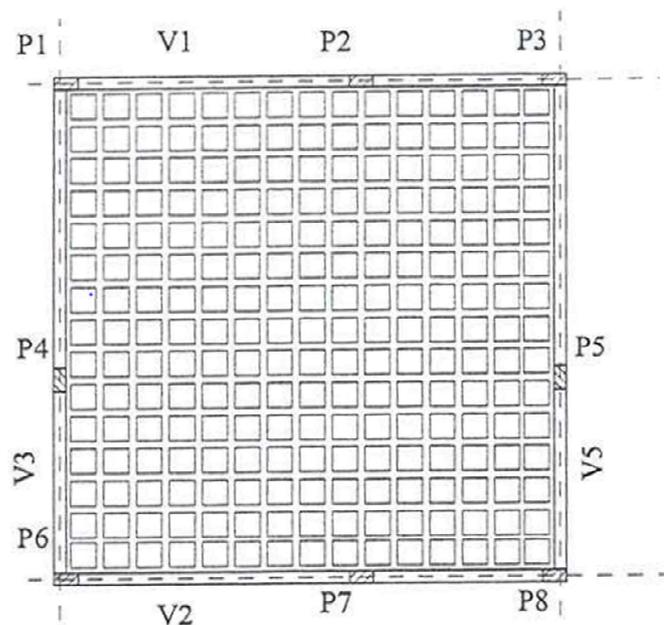
O dimensionamento de lajes pode ser feito através da aplicação da Teoria de Placas baseada na Teoria da Elasticidade, sendo que este método possibilita o cálculo manual sem auxílio de computadores. Aliando-se um dimensionamento mais simples com a facilidade de execução, este tipo de laje se tornou uma solução bastante popular entre as construtoras.

Geralmente, projetistas adotam vãos entre 3,5 e 5,0m. Vãos maiores que estes podem se tornar demasiadamente custosos por exigirem grandes volumes de concreto (BARBOZA, 2008, p.20).

2.2.2 Lajes nervuradas apoiadas em vigas

A ABNT NBR 6118:2014, em seu item 14.7.7 define que lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte. Não obstante, tal material de enchimento não contribui para aumentar a rigidez da laje nervurada. Dessa forma, a associação formada pela nervura e a capa de concreto que proporciona a resistência da peça. A Figura 2 mostra o esquema do sistema de lajes nervuradas apoiadas em vigas:

Figura 2 - Planta de forma de pavimento em laje nervurada



Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009, p.44)

Para Carvalho e Pinheiro (2009, p.13) as lajes nervuradas caracterizam uma evolução em relação às maciças. Seu comportamento estrutural semelhante ao das placas aliado à eficiência de vigas na flexão proporciona rigidez aumentada e peso próprio reduzido aos elementos. Dessa forma, reduz-se a quantidade de material, mostrando-se a economia desse sistema, principalmente em vãos grandes.

Barboza (2008, p.39) afirma que o comportamento estático da laje nervurada é intermediário entre o de uma grelha e o de uma laje maciça. Ainda assim, a ABNT NBR

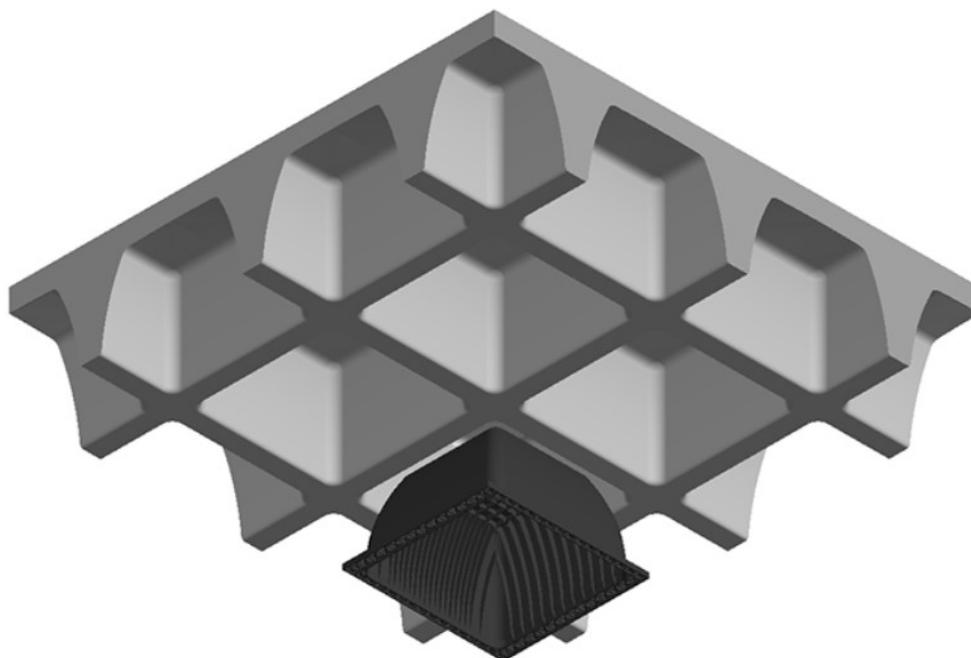
6118:14 (item 14.7.7) permite o cálculo como placa no regime elástico, sendo este método chamado de simplificado. Havendo-se necessidade de um cálculo mais refinado, deve-se determinar os esforços solicitantes e os deslocamentos considerando-se a analogia de grelha, ou o que é ainda mais refinado, considerar o método dos elementos finitos.

Dentre as soluções que podem ser adotadas em projetos de lajes nervuradas, destacam-se: uso de materiais inertes, tais como EPS (poliestireno expandido), blocos de concreto celular autoclavado, blocos cerâmicos etc; materiais reaproveitáveis, como moldes de polipropileno, conhecidos na construção civil como “cubetas”.

Os moldes de polipropileno (Figura 3) foram desenvolvidos especialmente para construção de lajes nervuradas. Esta tecnologia foi desenvolvida na Inglaterra, sendo utilizada em vários países, inclusive o Brasil. (SILVA, 2002, p.25). Segundo Carvalho e Pinheiro (2009, p16), esses moldes são encontrados nas mais diversas dimensões, atendendo a projetos mais simples e sofisticados, além de propiciar precisão nas dimensões e no acabamento.

Algumas vantagens do uso de moldes reaproveitáveis, segundo Silva (2002, p.26), está na não incorporação do peso à laje, na eliminação de uso de compensado e inertes, no fácil manuseio na obra, fácil montagem e desforma e boa estética, após execução.

Figura 3 - Utilização de formas reaproveitáveis em lajes nervuradas



Fonte: Lajes Atex

Tendo isso em vista, Bastos (2015, p.66) conclui que as lajes nervuradas apresentam as seguintes vantagens em relação às lajes maciças de concreto:

- a) Menor peso próprio;
- b) Menor consumo de concreto;
- c) Redução de fôrmas;
- d) Maior capacidade de vencer grandes vãos;
- e) Maiores planos lisos (sem vigas).

A norma NBR 6118:2014 (item 13.2.4.2) prescreve 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. No caso de existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10mm, o valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser 5 cm. Para tubulações com diâmetro \varnothing maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de $4 \text{ cm} + \varnothing$, ou $4 \text{ cm} + 2 \varnothing$ no caso de haver cruzamento destas tubulações;

Quanto a espessura da nervura, a norma acima não permite valor inferior a 5 cm, sendo que nervuras inferiores a 8 cm não podem conter armaduras de compressão. Ainda para o projeto de lajes nervuradas, as seguintes condições devem ser atendidas:

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

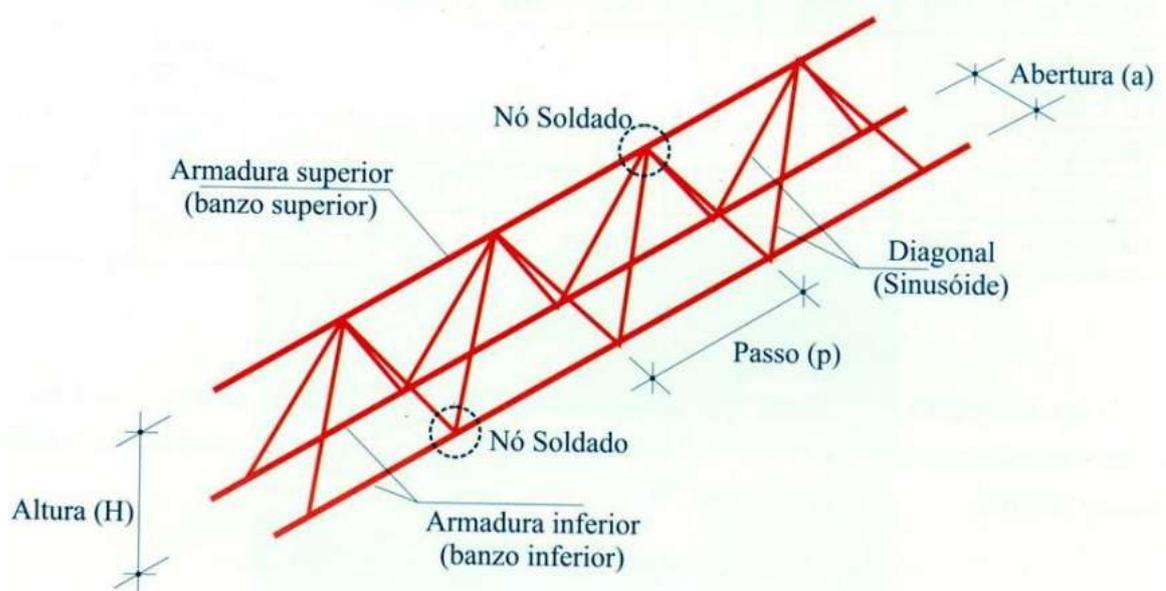
2.2.3 Lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas

“A laje treliça (Figura 4) surgiu na Europa com o propósito de ser uma opção mais econômica que as lajes maciças de concreto, sendo utilizada em vários países do mundo. Possibilitam vencer grandes vãos com menor peso próprio e redução de mão-de-obra durante sua execução” (BASTOS, 2015, p.77).

Figura 4 - Laje pré-fabricada do tipo treliçada

Fonte – Faulim (1998) apud Bastos (2015, p.76)

As vigotas treliçadas (Figura 5) são constituídas por barras inferiores, superiores e diagonais soldadas formando treliças. As duas barras de aço localizadas na parte inferior resistem aos momentos fletores positivos. A barra disposta superiormente é um elemento construtivo, empregada devido a facilidade de fabricação e tem como função combater fissuras durante o transporte do elemento. As barras dos banzos superior e inferior são ligadas por diagonais a elas soldadas, podendo ter função de armadura transversal, além de proporcionar boa ligação entre o concreto pré-moldado das vigotas e o concreto moldado no local. (FIGUEIREDO FILHO e CARVALHO, 2004, *apud* BARBOZA, 2008, p.60)

Figura 5 - Armação em forma de treliça espacial

Fonte: Faulim (1998) apud Bastos (2005, p.77)

Desta forma, tem-se que as solicitações de flexão e cisalhamento são resistidas pelo conjunto formado pela vigota treliçada solidarizada com uma capa de concreto. Somados a isso, os blocos de enchimento têm a finalidade de dar forma ao concreto e proporcionar um acabamento liso das superfícies. Preferencialmente, os blocos de enchimento devem ser leves e de baixo custo. Entre os mais usados, pode-se citar os blocos cerâmicos, os de EPS e os de concreto celular autoclavado. (BASTOS, 2015, p.77-78)

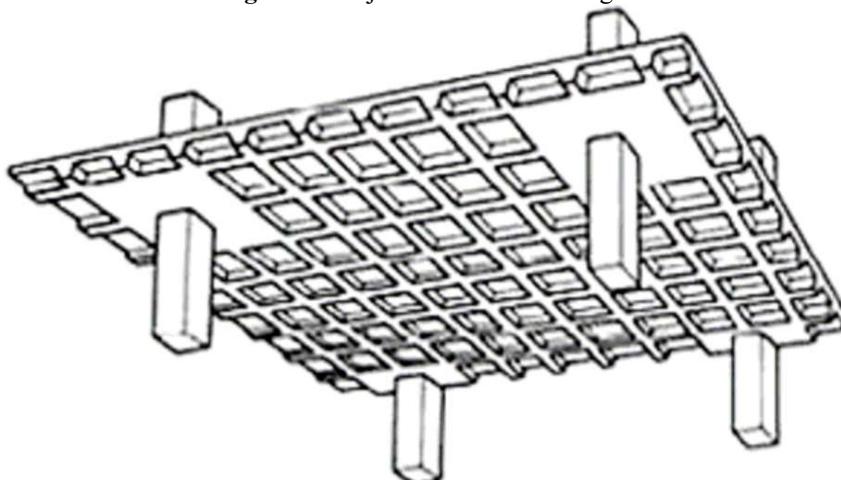
2.2.4 Lajes nervuradas sem vigas

A norma NBR 6118:2014 define que lajes-cogumelo são lajes apoiadas diretamente em pilares com capitéis, enquanto lajes lisas são apoiadas nos pilares sem capitéis.

Nesses tipos de laje, deve-se atentar para alta concentração de tensões de cisalhamento na interface laje-pilar, fenômeno chamado de punção. Somando-se a isso tensões normais devido a momentos fletores, há um agravamento do problema, podendo causar a ruína da laje, que quando ocorre, é de forma frágil e abrupta. Para contornar esse problema, pode ser realizado um engrossamento da seção da laje na região do pilar, sendo o mesmo chamado de capitel(CARVALHO E PINHEIRO, 2009, p.81)

Ainda de acordo com Carvalho e Pinheiro (2009, p.88), a utilização de lajes nervuradas e lisas (Figura 7) acarreta a diminuição de material utilizado, em relação às lajes lisas maciças, e conseqüentemente das cargas em pilares e fundações. Deve-se atentar, entretanto, que nas zonas dos pilares, faz-se uso dos capitéis, visando combater os esforços de punção na região.

Figura 6 - Lajes nervuradas sem vigas



Fonte: Nawy (1985) apud Barboza (2008, p.44)

Montoya *et al* (2000) *apud* Pinto (2016, p.14) recomenda as dimensões mínimas para as lajes nervuradas sem vigas que, embora não sendo obrigatórias, devem ser respeitadas se a análise for feita por métodos simplificados:

- a) a espessura total h da laje nervurada não deve ser inferior a 15 cm nem $1/28$ do maior vão;
- b) a mesa de compressão deve ter espessura h_f maior que 5 cm ou superior a $1/10$ do maior espaçamento entre nervuras;
- c) a largura das nervuras devem respeitar as condições: $b_w \geq \{7h_a/7 \text{ ncm} /4$;
- d) o número de nervuras em cada direção deve ser superior a 6 e o espaçamento entre as nervuras inferior a 1 m;
- e) deve ser executada uma nervura no perímetro da laje com largura mínima de 25cm ou h ;
- f) os maciços devem ter uma largura mínima de $0,15L$ nas duas direções ortogonais

Carvalho e Pinheiro (2009, p.82-85) também elencaram uma série de vantagens das lajes sem vigas, descritas abaixo:

- a) adaptabilidade a diversas formas e ambientes, oferecendo ampla liberdade na definição de espaços internos;
- b) simplificação de formas e cimbramento, reduzindo o consumo desses materiais em relação aos sistemas convencionais com vigas, além de maior facilidade de execução na obra e racionalização desses insumos;
- c) simplificação de armaduras, devido ausência de vigas são eliminadas todas as armaduras e operações a elas correlatas, tais como cortes, dobramentos e colocação;
- d) simplificação da concretagem;
- e) melhoria da qualidade final e diminuição de revestimentos;
- f) redução da altura total do edifício, pois havendo limitação da altura total do edifício, as lajes sem vigas possibilitam sua diminuição ou aumento no número de pavimentos;
- g) simplificação de instalações prediais, ao diminuir a quantidade de curvas e de furos em vigas;
- h) redução de tempo de execução e custos

Como desvantagens desse sistema, os mesmos autores citam a possibilidade de punção, os deslocamentos transversais da laje e a instabilidade do edifício às ações laterais.

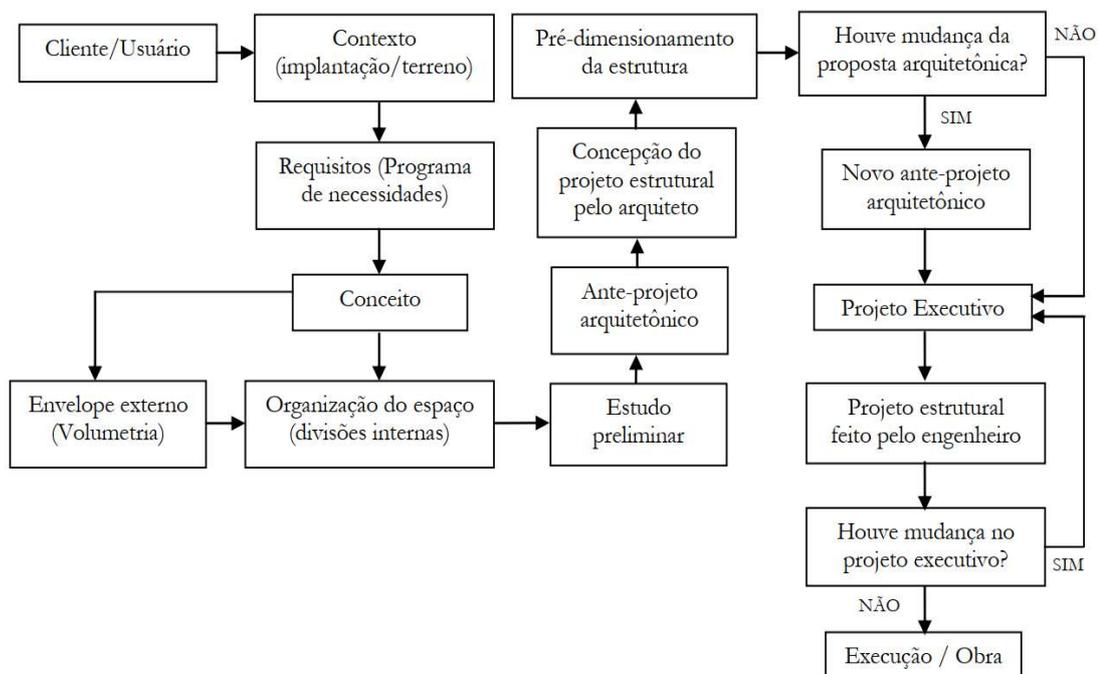
2.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Durante a etapa de pré-dimensionamento, tem-se uma avaliação das prováveis dimensões dos elementos estruturais, de maneira que o projetista possa avaliar tanto seu peso próprio quanto a interferência dos mesmos com os espaços arquitetônicos e instalações. O pré-dimensionamento pode ser feito por meios de fórmulas empíricas, tabelas e gráficos que hoje estão disponíveis para uma grande variedade de sistemas estruturais. Não obstante, tem-se que esta etapa é bastante pragmática, baseando-se em mecanismos independentes da subjetividade do projetista. (REBELLO, 2007)

Para Melo (2013), no pré-dimensionamento, a obtenção da seção dos elementos é realizada desde a concepção do arranjo estrutural, levando-se em conta o comportamento estrutural de cada peça e as exigências normativas associadas. Neste contexto, numerosos fatores influenciam o resultado: material empregado, vãos livres, carregamentos, vinculação das peças, atendimento aos critérios de resistência, estabilidade e deslocamentos.

A Figura 7 mostra o fluxograma de ações que demonstra a integração entre as concepções arquitetônicas e estruturais com a fase de pré-dimensionamento dos elementos.

Figura 7 - Integração entre pré-dimensionamento e concepções arquitetônicas e estruturais



Melo (2013)

2.4 CRITÉRIOS DE PROJETO

2.4.1 Parâmetros de durabilidade

Para a ABNT NBR 6118:2014, “as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil”.

Sendo atendidas as condições referentes a drenagem de águas sobre superfícies de concreto, disposições arquitetônicas ou construtivas, além de controle de fissuração e outras medidas especiais quanto à durabilidade de estruturas, tem-se que a mesma é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto de cobrimento de armadura.

A determinação do cobrimento da armadura está vinculada à agressividade do ambiente ao qual a estrutura está inserida. Nos projetos de estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com o apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA)

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

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

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

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

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – Tabela 6.1

Quanto a correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto, a norma prescreve na Tabela 2:

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

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

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – Tabela 7.1

A execução do projeto deve respeitar os cobrimentos mínimos, dados na Tabela 3. A norma ainda indica a possibilidade de reduzir o cobrimento das peças em 5 mm caso se utilize um concreto de categoria superior à requerida pela Tabela 2

Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

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

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

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – Tabela 7.2

2.4.2 Ações e combinações de ações

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, em seu item 11.2, “na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em exame, levando-se em conta os possíveis estados-limites últimos e os de serviço”. No mesmo item da norma, tem-se que as ações consideradas no cálculo estrutural são classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais, de acordo com a ABNT NBR 8681, sendo que para a aplicabilidade das mesmas deve-se levar em consideração as particularidades de cada tipologia construtiva, bem como as normas a elas aplicáveis.

Ainda de acordo com a NBR 6118:2014 (item 11.6), os valores característicos F_k das ações são estabelecidos em função da variabilidade de suas intensidades. Tais valores estão definidos na seção supracitada ou em normas específicas como a NBR 6120:1980.

A respeito dos carregamentos, a NBR 6118:2014 (item 11.8) define:

Um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período preestabelecido. A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura; a verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos e aos estados-limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e de combinações de serviço, respectivamente.

As ações acrescentadas em cada uma das combinações devem ser analisadas com seus números representativos, multiplicados pelos referentes coeficientes de ponderação. As combinações das ações necessárias às verificações dos estados-limites último e de serviço são definidas no item 11.8 da NBR 6118:2014, para diversas possibilidades, e os critérios gerais são dados no item 4.3.3 da NBR 8681:2003 (CARVALHO, 2007, p.55).

2.4.3 Estados-limites e verificação de segurança

Os estados-limite considerados no cálculo de estruturas de concreto são: estado-limite último e estado-limite de serviço. O estado-limite último é aquele relacionado ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação, no todo ou em parte, do uso da estrutura.

De acordo com a NBR 6118:2014 (item 10.3) as estruturas devem sempre ser verificada em relação aos seguintes estados-limites últimos:

- a) estado-limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- b) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica definida na Seção 14, e admitindo-se, em geral, as verificações separadas das solicitações normais e tangenciais; todavia, quando a interação entre elas for importante, ela estará explicitamente indicada nesta Norma;
- c) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- d) estado-limite último provocado por solicitações dinâmicas;
- e) estado-limite último de colapso progressivo;
- f) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando exposição ao fogo, conforme a ABNT NBR 15200;
- g) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, considerando ações sísmicas, de acordo com a ABNT NBR 15421;
- h) outros estados-limites últimos que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.

Ainda de acordo com a referida norma, em seu item 10.4, estados-limites de serviço são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas. São definidos no item 3.2 da norma:

- a) formação de fissuras: estado em que se inicia a formação de fissuras [...];
- b) abertura de fissuras: estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados em 13.4.2 [...];
- c) deformações excessivas: estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal [...];
- d) descompressão: estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção [...];
- e) descompressão parcial: estado no qual garante-se a compressão na seção transversal, na região onde existem armaduras ativas [...];
- f) compressão excessiva: estado em que as tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido. Usual no caso do concreto protendido na ocasião da aplicação da protensão [...];
- g) vibrações excessivas: estado em que as vibrações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção.

Tendo tudo isso em vista, o item 12.5.2 da norma ABNT NBR 6118:2014 prescreve que as solicitações devido às combinações de ações solicitantes para o tipo de construção não devem superar as resistências dos elementos da estrutura, ficando definida, dessa forma, a condição analítica de segurança.

2.4.4 Modelos de cálculo e utilização de softwares para análise estrutural

Na etapa da análise estrutural são obtidos os esforços internos e externos da estrutura devidos às ações impostas a partir de um modelo estrutural. Ao final da mesma, são obtidos

resultados de esforços, deslocamentos e deformações na estrutura em estudo (MARTHA, 2010).

Dessa forma, para TQS Informática¹:

Um bom modelo estrutural para o cálculo de edifícios de concreto deve ser realista, isto é, precisa contemplar considerações como estas: a heterogeneidade do material (concreto mais aço), seu comportamento não-linear, a fissuração do concreto, suas alterações ao longo do tempo (fluência), a correta rigidez da ligação entre os elementos, tratamento adequado das ações (verticais e horizontais) e o efeito incremental das cargas verticais.

Assim, França Junior (2015) descreve os principais modelos de análise de estruturas:

Modelo de vigas contínuas: consiste em separar a estrutura, tratando lajes, vigas e pilares de forma independente. Este tipo de modelo estrutural é um dos mais antigos utilizados para análise de estruturas, tendo sido utilizado em épocas em que o cálculo era realizado manualmente.

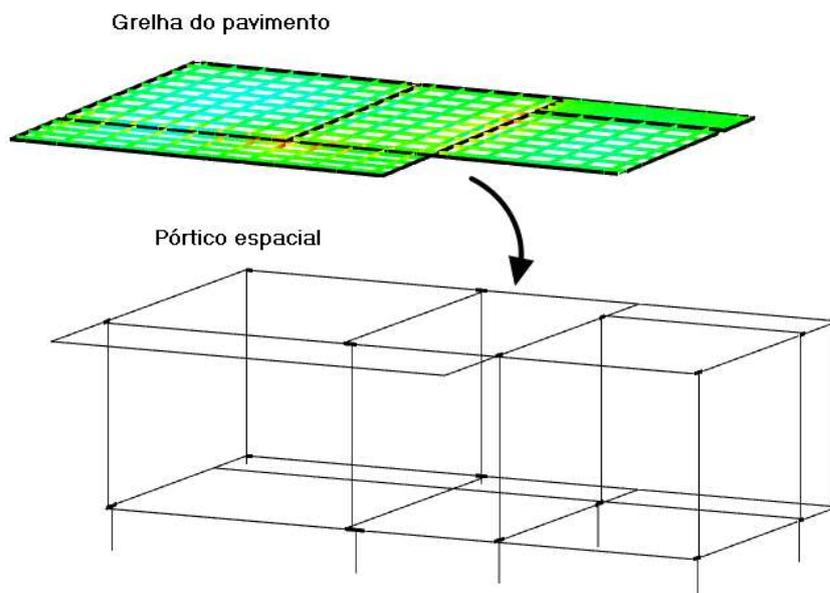
Lajes por métodos aproximados e vigas discretizadas em grelha: permite a análise de um pavimento isolado e a consideração de que as vigas interajam entre si. Nota-se que esse sistema não leva em conta as lajes, tendo seus esforços calculados separadamente por métodos aproximados e depois transferidos às vigas do pavimento.

Vigas e lajes discretizadas em grelha: conhecido como analogia por grelha, o método consiste em subdividir o pavimento em alinhamentos de elementos lineares (barras), formando uma grelha, de tal forma que simulem vigas e lajes durante a análise da estrutura.

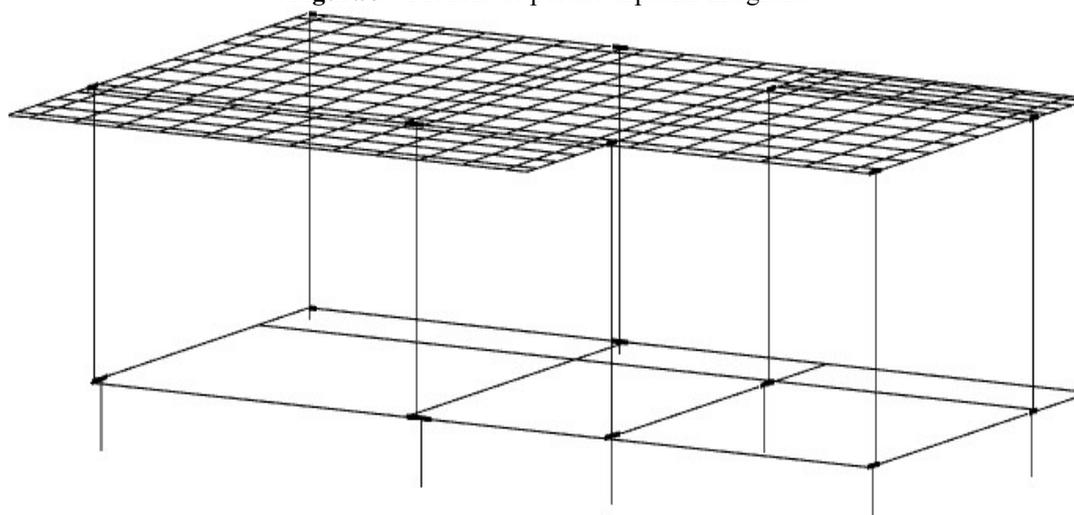
Pórtico espacial: caracterizado pela análise conjunta de elementos de barra (vigas, pilares) e de chapa (lajes) em um plano tridimensional, o pórtico espacial assume um modelo mais realista de análise, ao passo em que é possível considerar a ação simultânea de ações horizontais e verticais na estrutura em caso. A Figura 8 ilustra esse modelo:

¹ Disponível em < <http://www.tqs.com.br/conheca-os-sistemas-cadtqs/analise-estrutural/analise-estrutural>>.

Acesso em: 24 out. 2018.

Figura 8 - Modelo de pórtico espacialFonte: AltoQi²

Pórtico espacial com vigas e lajes discretizadas em grelha: modelo em que as lajes são analisadas concomitantemente com as vigas em cada pavimento, através do sistema de grelha. Esse modelo considera o efeito que as lajes exercem sobre a rigidez da estrutura como um todo, sendo o mesmo chamado de “diafragma rígido”.

Figura 9 - Modelo de pórtico espacial integrado

Fonte: AltoQi

Tendo tudo isso em vista, Fischer (2003) afirma que a medida que as estruturas fiquem mais esbeltas e arrojadas, as análises e os cálculos para as mesmas tornam-se cada vez mais

² Disponível em < <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360001391833-Como-optimar-entre-o-modelo-de-analise-integrado-ou-de-grelha-com-portico-espacial>> Acesso em 24 de out. 2018

complexos e sofisticados. Os cálculos que antes eram feitos com pequenas máquinas de calcular passaram a ser feitos por microcomputadores e softwares criados com função de auxiliar o projetista estrutural.

Para o presente trabalho, a análise estrutural será feita utilizando o software Eberick 2018. No Eberick, existem dois modelos para análise da estrutura, o modelo integrado, e o modelo separado de grelhas e pórtico espacial. A decisão por qual modelo será utilizado para análise deve levar em consideração como será realizada a análise em cada caso e quais consequências essa escolha pode ter no dimensionamento dos elementos estruturais. Tendo isso em vista, o modelo separado de grelhas e pórtico espacial será utilizado para realização da análise das estruturas deste estudo.

2.5 CUSTOS E QUANTITATIVOS DE MATERIAIS

Para Monteiro (2017), o elemento essencial a ser apreciado durante a fase da concepção estrutural é a sua construtibilidade, ou seja, qual esquema estrutural que levará a um processo de execução mais produtivo, diminuindo-se assim, o custo final do empreendimento. Para que cheguemos a uma solução que contemple o exposto, deve-se considerar os fatores ilustrados na Figura 10:

Figura 10 - Fatores que influenciam o custo final de estrutura



Fonte: Adaptado de Monteiro (2017)

Uma maneira de se avaliar o custo da estrutura de uma edificação está no emprego de índices de consumos de materiais. Apesar de cada empreendimento ter suas particularidades, a relação entre os quantitativos empregados apresenta um comportamento de forma geral.

Os principais índices são descritos por Mattos (2006):

Espessura média: espessura que o volume de concreto do pavimento atingiria se fosse distribuído regularmente pela área do pavimento. Para estruturas abaixo de 10 pavimentos adota-se um valor entre 12 e 16 centímetros como referência. Acima de 10 pavimentos, entre 16 e 20 centímetros.

Taxa de aço: relação entre peso de armação e volume de concreto. Para estruturas abaixo de 10 pavimentos adota-se um valor entre 83 e 88 kg/m³ como referência. Acima de 10 pavimentos, entre 88 e 100 kg/m³.

Taxa de forma: relação entre a área de forma e volume de concreto. Adota-se um valor entre 12 e 14 m² por m³ de concreto.

2.6 EXIGÊNCIAS NORMATIVAS QUANTO A SITUAÇÕES DE INCÊNDIO

A norma ABNT NBR 15200:2012 define os critérios que as estruturas de concreto devem obedecer para que as mesmas contenham e estanquem o fogo, impedindo a sua propagação. Tal característica é chamada de função corta-fogo. Além disso, a estrutura deve manter sua função de suporte, não perdendo suas funções de resistência e estabilidade perante a situações de incêndio.

A ABNT NBR 15200:2012 apresenta como estruturas e compartimentos de edificações devam se comportar, para que seja evitado o colapso estrutural em caso de incêndio. As exigências de resistência ao fogo são definidas na norma ABNT NBR 14432:2001, podendo ser formuladas com base em modelos de incêndio real, no entanto, o mais comum é exigir que a estrutura resista a um tempo preestabelecido (TRRF – tempo requerido de resistência ao fogo) submetida a uma elevação de temperatura no entorno do elemento estrutural.

O TRRF pode ser definido de acordo com as Tabelas 4 e 5, retiradas da NBR 14432:2001:

Tabela 4 - Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), em minuto

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

Fonte: Tabela A.1 ABNT NBR 14432:2001

Tabela 5 - Classificação das edificações quanto à sua ocupação

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Descrição	Exemplos
A	Residencial	A-1	Habitações unifamiliares	Casas térreas ou assobradadas, isoladas ou não
		A-2	Habitações multifamiliares	Edifícios de apartamento em geral
		A-3	Habitações coletivas	Pensionatos, internatos, mosteiros, conventos, residenciais geriátricos
B	Serviços de hospedagem	B-1	Hotéis e assemelhados	Hotéis, motéis, pensões, hospedarias, albergues, casas de cômodos
		B-2	Hotéis residenciais	Hotéis e assemelhados com cozinha própria nos apartamentos (incluem-se apart-hotéis, hotéis residenciais)
C	Comercial varejista	C-1	Comércio em geral, de pequeno porte	Amarinhos, tabacarias, mercearias, fruteiras, 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 (<i>shopping centers</i>)
D	Serviços profissionais pessoais e técnicos	D-1	Locais para prestação de serviços profissionais ou condução de negócios	Escritórios administrativos ou técnicos, consultórios, instituições financeiras (que não estejam incluídas em D-2), repartições públicas, cabeleiros laboratórios de análises clínicas sem internação, centro profissionais e outros
		D-2	Agências bancárias	Agências bancárias e assemelhados
		D-3	Serviços de reparação (exceto os classificados em G e I)	Lavanderias, assistência técnica, reparação e manutenção de aparelhos eletrodomésticos, chaveiros, pintura de letreiros e outros
E	Educacional e cultura física	E-1	Escolas em geral	Escolas de primeiro, segundo e terceiro graus, cursos supletivos e pré-universitário e outros
		E-2	Escolas especiais	Escolas de artes e artesanato, de línguas, de cultura geral, de cultura estrangeira e outras
		E-3	Espaço para cultura física	Locais de ensino e/ou práticas de artes marciais ginástica (artística, dança musculação e outros) esportes coletivos (tênis, futebol e outros que não estejam incluídos em F-3), sauna, casas de fisioterapia e outros
		E-4	Centros de treinamento profissional	Escolas profissionais em geral
		E-5	Pré-escolas	Creches, escolas maternas, jardins-de-infância
		E-6	Escolas para portadores de deficiências	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e outros
F	Locais de reunião pública	F-1	Locais onde há objetos de valor inestimável	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e outros
		F-2	Templos e auditórios	Igrejas, sinagogas, templos e auditórios em geral
		F-3	Centros esportivos	Estádios, ginásios e piscinas cobertas com arquibancadas, arenas em geral
		F-4	Estações e terminais de passageiros	Estações rodoferroviárias, 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: Tabela B. 1 ABNT NBR 14432:2001

Para verificação das estruturas em situação de incêndio, a norma 15200:2012 em seu item 8.2 define o método tabular, que recomenda as dimensões mínimas para que os elementos estruturais atendam às situações de incêndio. De acordo com o método, os elementos que obedecem aos valores de dimensões mínimas indicadas pelo método atendem aos requisitos da norma para situações de incêndio. Os valores para lajes são definidos de acordo com as Tabelas 6 a 9:

Tabela 6 - 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: ABNT NBR 15200:2012 – Tabela 7

Tabela 7 - Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelo

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

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

Fonte: ABNT NBR 15200:2012 – Tabela 8

Tabela 8 - Dimensões mínimas para nervuradas armadas em uma direção

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: ABNT NBR 15200:2012 – Tabela 9

Tabela 9 - Dimensões mínimas para nervuradas contínuas

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

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

Fonte: ABNT NBR 15200:2012 – Tabela 10

Ainda acerca das dimensões mínimas dos elementos a norma não permite a consideração do revestimento na determinação das dimensões mínimas da seção transversal de pilares e lajes lisa ou cogumelo. Para outros elementos, não há essa restrição.

3 METODOLOGIA

A avaliação dos custos de estrutura será com base em soluções de concreto armado para a arquitetura existente. Para isso, foram desenvolvidos os seguintes modelos estruturais:

Modelo I: Lajes maciças apoiadas em vigas;

Modelo II: Lajes nervuradas com uso de moldes reaproveitáveis apoiadas em vigas;

Modelo III: Lajes treliçadas apoiadas em vigas;

Modelo IV: Lajes nervuradas sem vigas com uso de moldes reaproveitáveis.

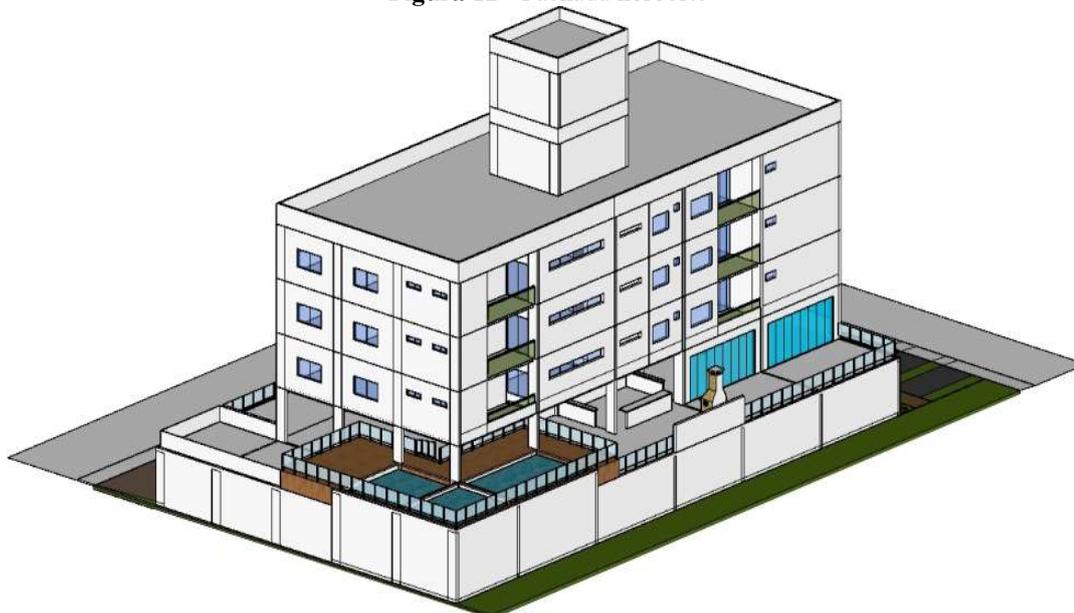
Para tanto, os modelos estruturais acima foram lançados com base no projeto arquitetônico. Procurou-se manter para todos os modelos as mesmas características com relação à disposição e geometria dos elementos estruturais. Entretanto, algumas alterações pontuais foram necessárias em alguns modelos de forma a adequar as estruturas aos critérios de resistência e serviço definidos em norma. Tais alterações serão explanadas nas seções seguintes. Não obstante, os critérios adotados em relação aos materiais, durabilidade, carregamentos, dimensionamento etc. foram replicados em todos os modelos elencados acima.

3.1 ESTUDO DE CASO – APRESENTAÇÃO DA ARQUITETURA

A arquitetura que servira como base para o projeto estrutural trata-se de um edifício de uso misto, sendo previstas atividades de uso comercial e residencial no mesmo. O projeto foi desenvolvido e gentilmente cedido pelos arquitetos Camila Rocha, Joshua Silva, Marina Monteiro e Kennedy Enio. As Figuras 11 e 12 ilustram as fachadas sudeste e noroeste do empreendimento:

Figura 11 - Fachada sudoeste

Fonte: Rocha *et al* (2018)

Figura 12 - Fachada noroeste

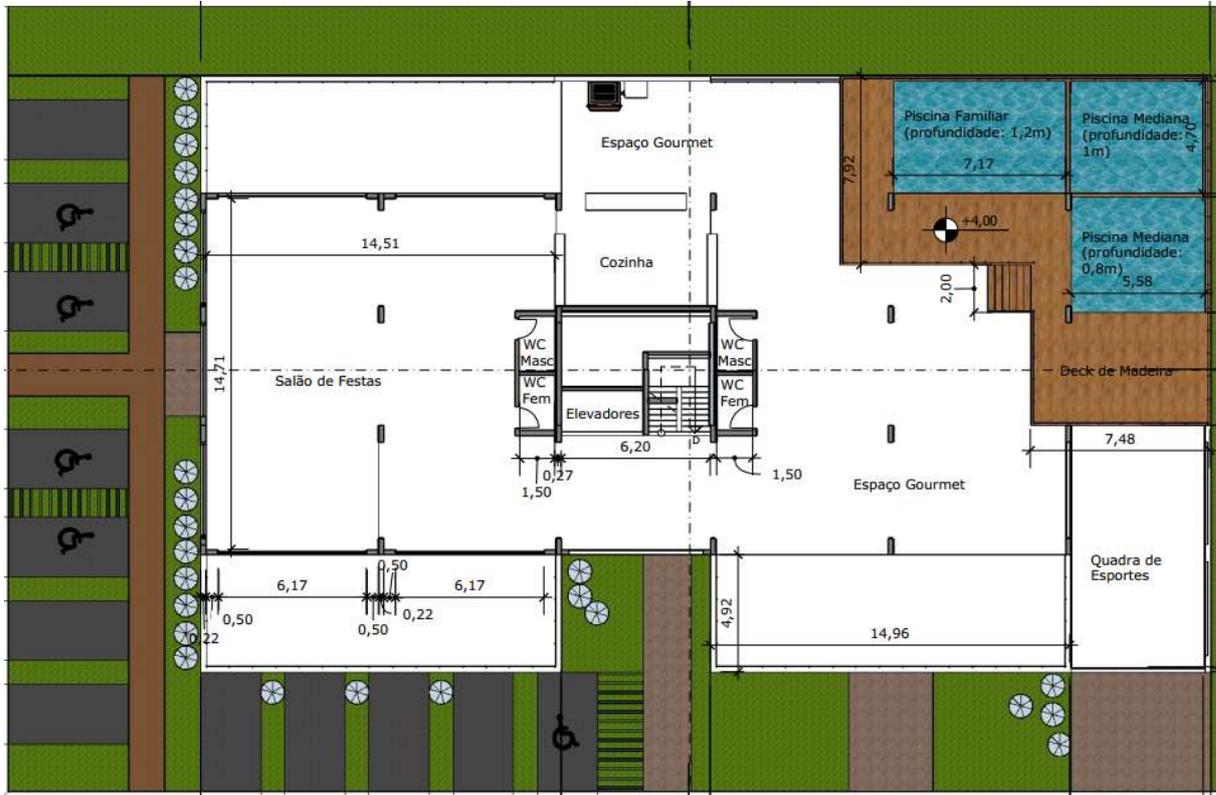
Fonte: Rocha *et al* (2018)

O edifício apresenta uma área construída total de aproximadamente 5260 m², subdividida nos seguintes níveis:

Nível -3,00 m (Subsolo): compreende estacionamento com 22 vagas para veículos (Figura 13):

Nível +3,00 (Mezanino): engloba as áreas comuns do edifício, sendo elas um espaço gourmet, salão de festas, quadra de esportes e deck com piscina;

Figura 15 – Mezanino



Fonte: Rocha *et al* (2018)

Níveis +6,00, +9,00 e +12,00 (Tipo): compreende as unidades residenciais, sendo duas por pavimento, conforme Figura 16;

Nível +15,00 (Coberta): cobertura do edifício;

Nível +16,00 (Casa de máquinas): laje de abrigo a casa de máquinas do elevador;

Nível +18,10 (Barrilete): nível de fundo da caixa d'água;

Nível + 19,60 (Caixa d'água): nível da tampa da caixa d'água

Figura 16 - Pavimento tipo



Fonte: Rocha *et al* (2018)

3.2 LANÇAMENTO DA ESTRUTURA

O lançamento da estrutura foi realizado de forma a respeitar ao máximo as formas e espaços definidos pela arquitetura. Começando pela locação dos pilares, tem-se que o projeto arquitetônico já dispôs previamente os pilares em suas plantas. Dessa forma, nota-se a preocupação do profissional responsável pela arquitetura com a estrutura do empreendimento ao se distribuir os pilares de forma modulada com espaçamentos bem definidos entre si.

Respeitando-se a distribuição original dos pilares, foram lançadas as vigas dos pavimentos, que ao ligar-se aos pilares formam os painéis que receberão as lajes. Após o lançamento desses elementos é possível notar uma uniformidade entre os vãos dos elementos. Tal modulação é importante, pois significa que os esforços serão distribuídos de forma homogênea pela estrutura.

Além dos elementos descritos anteriormente, também foram lançadas as escadas, a rampa de ligação entre subsolo e térreo, os reservatórios e as piscinas da área comum. Os elementos de fundação adotados serão as sapatas. A Figura 17 mostra uma visão 3D do lançamento da estrutura:

Figura 17 - Pórtico 3D do lançamento da estrutura



Fonte: O autor

3.3 CRITÉRIOS DE PROJETO

Esta seção explanará os critérios de projeto comuns a todos os modelos adotados neste estudo de caso. Para considerações adicionais não explícitas neste segmento foram adotadas as configurações padrão do programa Eberick 2018.

Em relação às exigências de durabilidade das estruturas, a edificação situada em meio urbano foi adotada a classe de agressividade II, sendo a agressividade moderada com risco de deterioração pequeno.

Para o concreto, considerando-se a associação entre classe de agressividade e a qualidade do concreto, tem-se que o valor mínimo a ser empregado seria um concreto de classe C25. Apesar disso, foi considerado para o projeto um concreto classe C35. Ainda assim, foi adotada a consideração da norma que permite a redução dos cobrimentos em 5 mm devido a utilização de um concreto de classe superior à exigida pela mesma. Dessa forma, os cobrimentos adotados estão explícitos na Tabela 10:

Tabela 10 - Cobrimentos nominais

Elemento	Peças internas (cm)	Peças Externas (cm)	Peças em contato com o solo (cm)
Laje	-	2,0	2,5
Viga	2,0	2,5	2,5
Pilar	2,0	2,5	4,0
Reservatório	-	3	-
Sapata	-	-	4,5

Fonte – O Autor

Referente às armaduras, foram adotados os aços CA-50 para barras e CA-60 para os estribos. Os carregamentos adotados seguem as prescrições da ABNT NBR 6120:1980. Seguem os valores na Tabela 11:

Tabela 11 - Carregamentos na estrutura

Descrição do carregamento	Tipo	Unidade	Valor
Concreto Armado	Peso Próprio	Kgf/m ³	2500
Água	Permanente	Kgf/m ³	1000
Paredes de alvenaria	Permanente	Kgf/m ³	1300
Revestimento reservatório, casa de máquinas, escadas	Permanente	Kgf/m ²	70
Revestimento de piso	Permanente	Kgf/m ²	100
Locais com acesso restrito: cobertura, reservatório	Acidental	Kgf/m ²	50
Dormitórios, salas, copa, cozinha e banheiro	Acidental	Kgf/m ²	150
Dispensa, área de serviço e lavanderia	Acidental	Kgf/m ²	200
Áreas comuns, escadas, terraço, corredores	Acidental	Kgf/m ²	300
Lavanderia, cozinhas não-residenciais, restaurante	Acidental	Kgf/m ²	300
Lojas	Acidental	Kgf/m ²	400
Quadra de esportes	Acidental	Kgf/m ²	500
Casa de máquinas do elevador	Acidental	Kgf/m ²	750

Fonte: O autor

A influência do vento também foi considerada no projeto. De acordo com o mapa de isopleias disponível na ABNT NBR 6123:1988, a velocidade do vento adotada é de 30 m/s devido à localização do edifício na cidade de João Pessoa – PB. Seguindo ainda as considerações dessa norma, temos fator topográfico S_1 igual a 1, rugosidade do terreno Categoria II e fator estatístico $S_3 = 1$ (para hotéis, residências, comércio, indústria). Somado a isso, temos que a maior dimensão horizontais ou vertical da edificação é menor que 20 m.

As fundações do edifício serão em sapatas. A sapata é definida na ABNT NBR 6118:2014 como “estruturas de volume usadas para transmitir ao terreno as cargas de fundação, no caso de fundação direta”. Desta forma, tem-se que o solo do terreno tem uma tensão admissível de 4 kgf/cm², sendo a mesma obtida após técnicas de melhoramento de solo.

Por fim, deve-se atentar para as prescrições das normas ABNT NBR 14432:2001 e ABNT NBR 14432:2001 acerca da conformidade das estruturas de concreto em relação a situações de incêndio. Para isso, o edifício foi classificado como C-2 (comércio de grande e médio porte) na tabela B.1 da NBR 14432:2001. Dessa forma, o TRRF adotado foi de 60 minutos, visto que a altura da edificação está entre 12m e 23 m e com profundidade do solo inferior a 10m.

3.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS

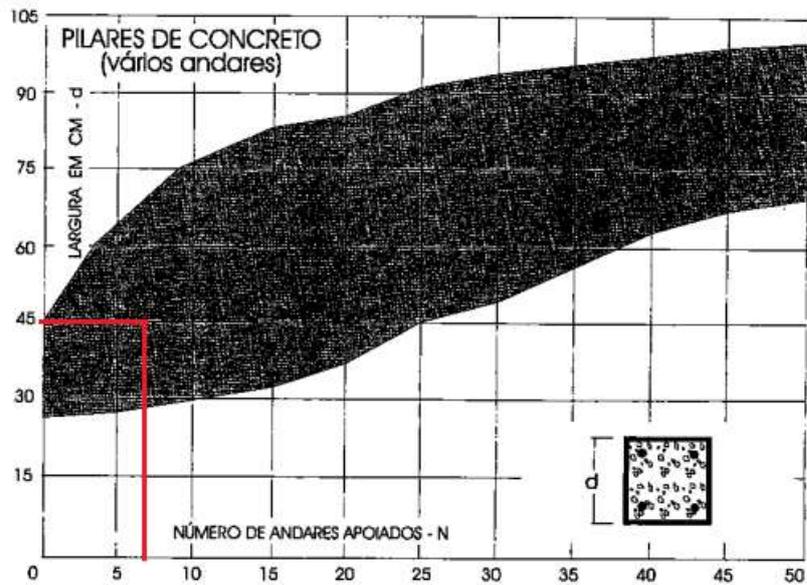
3.4.1 Pré-dimensionamento de pilares

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 (item 13.2.3), a seção transversal de pilares não pode apresentar dimensões menores que 19 cm. Entretanto, pode considerar-se dimensões entre 14 cm e 19 cm, desde que os esforços solicitantes de cálculo sejam multiplicados por um coeficiente adicional γ_n . De qualquer forma, a norma não permite pilar com seção transversal inferior a 360 cm².

Para pré-dimensionamento dos pilares, tendo em vista as considerações normativas, foi adotado o processo gráfico apresentado por Rebello (2007). Tal processo consiste em determinar as dimensões com base no número de pavimentos apoiados e na altura não travada do pavimento. Essa última característica deixa implícito a preocupação do método com o fenômeno da flambagem que pode ocorrer nos pilares esbeltos.

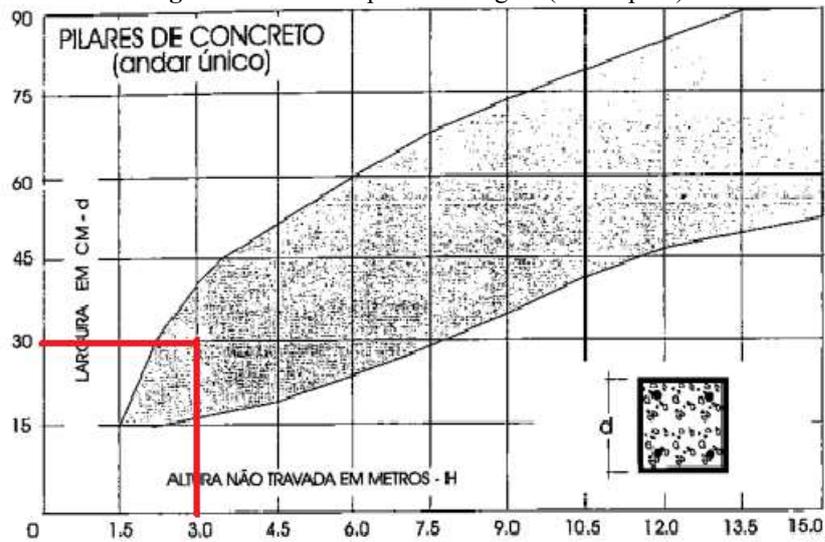
Para os pilares que recebem cargas do pavimento coberta e/ou superiores até o subsolo o pré-dimensionamento foi o seguinte, ilustrados conforme Figuras 18 a 20:

Figura 18 - Gráfico de carga nos pilares (Pilar tipo 1)



Fonte: Adaptado de Rebello (2007)

Figura 19 - Gráfico para flambagem (Pilar tipo 1)

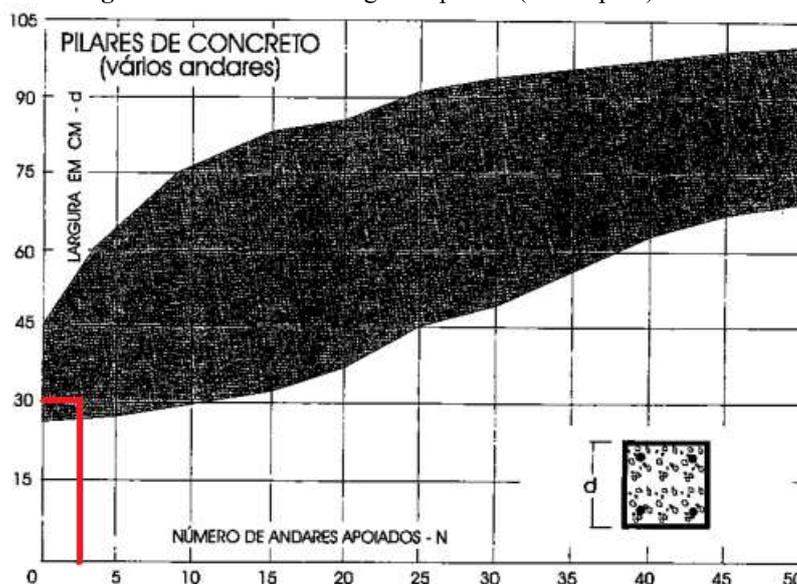


Fonte: Adaptado de Rebello (2007)

Com os valores do gráfico, adota-se um valor de d igual a 45 cm, o que equivale a uma área de 2.025 cm². Para melhor atender as imposições arquitetônicas, vale-se de uma seção equivalente de pilar de 25 por 80 cm, com área de 2.000 cm².

Para os pilares que nascem na fundação e morrem no pavimento mezanino, denominados Tipo 2, tem-se o gráfico:

Figura 20 - Gráfico de carga nos pilares (Pilar tipo 2)



Fonte – Adaptado de Rebello (2007)

Para estes pilares, o gráfico para flambagem é igual aos pilares pré-dimensionados anteriormente, dessa forma adotaremos a seção d igual a 30 cm com área de 900 cm². Assim, como nos pilares anteriores, opta-se por usar uma seção equivalente, adotando-se assim as dimensões de 20 por 45 cm, preservando a área original.

3.4.2 Pré-dimensionamento de vigas

Para vigas, a norma NBR 6118:2014 em seu item 13.2.2 indica que a seção transversal de vigas não pode ter largura menor que 12 cm, sendo 15 cm no caso de vigas-parede. Em casos excepcionais, pode-se diminuir esses limites, respeitando um mínimo absoluto de 10 cm, sendo respeitadas condições de alojamento de armaduras e de lançamento e vibração do concreto.

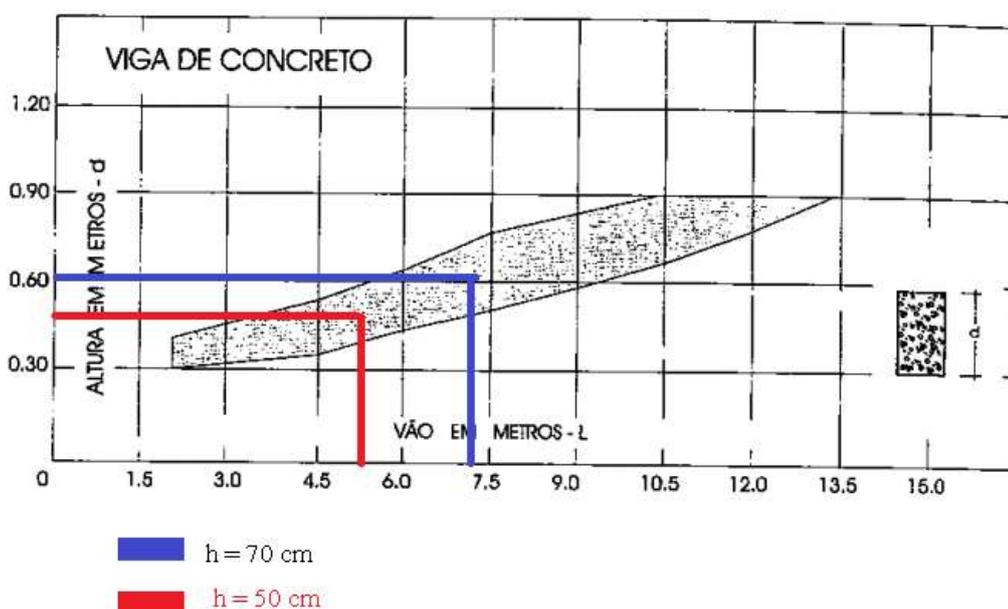
O procedimento elaborado por Rebello (2007, p.192) permite o pré-dimensionamento de vigas contínuas de acordo com a magnitude de carga a qual está submetida. Para este estudo de caso, foi adotado a opção de cargas grandes, principalmente devido aos grandes valores de cargas acidentais nos pavimentos mezanino e térreo, além da quantidade de carga de paredes no pavimento tipo. Dessa forma, a altura das vigas será correspondente a 10% do valor do maior vão.

Para as vigas com vão de 5,00 m adotou-se uma altura de 50 cm. Já para as vigas com maior vão de 7,50 m, a altura segundo o critério anterior seria de 75 cm, entretanto, adotando-se este valor significaria a interferência da viga na arquitetura, visto que a edificação tem um

pé esquerdo de 3,00 e a altura livre mínima do teto de um imóvel deve ser 2,40 segundo o Regulamento Geral de Edificações Urbanas. Tendo em vista essas considerações, adotou-se uma altura para essas vigas de 60cm

Verificando-se esse pré-dimensionamento de acordo com o método gráfico desenvolvido pelo mesmo autor, de acordo com a Figura 21 temos que as alturas estimadas anteriormente encontravam-se nos valores usuais para essa estrutura:

Figura 21 - Gráfico de altura de vigas



Fonte: Adaptado de Rebello (2007)

Ainda segundo Rebello, a largura da viga deve variar entre 1/4 e 1/3 da altura da mesma. Tendo em vista a padronização das larguras das vigas, adotaremos a largura como sendo 1/4 da largura das vigas de 60 cm, chegando a um valor de 15cm.

3.4.3 Pré-dimensionamento de lajes maciças

As condições normativas para as espessuras de lajes maciças são estabelecidas pela ABNT NBR 6118:2014, item 13.2.4.1:

- 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;
- f) 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com o mínimo de 1/42 para lajes de piso biapoiadas e 1/50 para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel

A espessura da laje maciça pode ser estimada de acordo com Rebello (2007, p.159), que afirma que a mesma é dada por 2% da média dos vãos. Adotando-se os vãos médios das lajes como 7,5 m e 5,0, temos que:

$$h = 2\% \cdot \frac{l+L}{2} = 0,02 \cdot \frac{7,5+5}{2} = 0,125 \text{ m} \quad (1)$$

Assim, adota-se a espessura de 13 cm para lajes maciças.

3.4.4 Pré-dimensionamento de lajes nervuradas com vigas

Atendidos aos critérios da norma, explícitos no item 2.2.2 deste estudo, tem-se que o método de Rebello (2007, p.181) indica dimensões para mesa da laje, a largura das nervuras e seu espaçamento. Para a altura da laje, temos que ela é dada por 4% da média dos vãos. Assim, temos que:

$$h = 4\% \cdot \frac{l+L}{2} = 0,04 \cdot \frac{7,5+5}{2} = 0,250 \text{ m} = 25 \text{ cm} \quad (2)$$

A largura das nervuras deve compreender entre 1/4 e 1/3 da altura da laje. Adotando-se como 1/4 de sua altura, temos:

$$bw = \frac{1}{4} \cdot 25 = 6,25 \text{ cm} \quad (3)$$

O espaçamento entre as nervuras deve estar entre um valor entre 1,5h e 2h. Adotando-se 2h, temos:

$$s = 2 \cdot 25 = 50 \text{ cm} \quad (4)$$

Deve-se atentar, no entanto, que os valores pré-dimensionados por este método não atendem aos requisitos da norma ABNT NBR 15200:2012, referente ao projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Para o edifício em estudo, cujo TRRF está classificado em 60 minutos, temos um valor de largura da nervura mínimo de 12 cm, de acordo com a Tabela 9 da mesma norma.

Ainda se considerando a norma de incêndio, o valor de capa de concreto mínimo seria de 8 cm, mas considerando-se uma dedução nessa espessura referente a camada de revestimento 4 cm poderíamos adotar a espessura da mesa de 4cm.

De forma a atender todos os critérios mencionados anteriormente, foi adotado para laje nervurada uma altura de 23 cm, com capa de 5 cm, largura da nervura de 12cm e espaçamento entre eixos da nervura de 66 cm, de acordo com catálogos da fabricante de formas ATEX.

3.4.5 Pré-dimensionamento de lajes treliçadas com enchimento em EPS

As lajes treliçadas podem ser pré-dimensionadas a partir de tabelas de fabricantes de vigotas treliçadas. Neste estudo, serão utilizadas as tabelas da ArcelorMittal (Tabelas 12 a 15). A metodologia consiste em determinar treliça, bloco de enchimento e capa com base nos vãos das lajes e seus carregamentos.

Tabela 12 - Armaduras adicionais para laje treliçada de 16 cm

Enchimento = Bloco EPS (Altura = 12 cm) - Distância entre linhas de escoras = 1,50 m																	
Modelo	Designação	Altura da laje	Altura capa	Consumo de concreto	Peso próprio	Cargas acidentais kgf/m ²											
TB 12M	TR12645	16 cm	4 cm	56 litros/m ³	157 Kgf/m ²	50 Kg/m ²	100 Kg/m ²	150 Kg/m ²	200 Kg/m ²	250 Kg/m ²	300 Kg/m ²	350 Kg/m ²	400 Kg/m ²	450 Kg/m ²	500 Kg/m ²	550 Kg/m ²	600 Kg/m ²
Vão livre (m)	3.00							1 Ø 4,2	1 Ø 4,2	1 Ø 5,0	2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	2 Ø 5,0	3 Ø 4,2	4 Ø 4,2	4 Ø 4,2	3 Ø 5,0
	3.20							1 Ø 4,2	1 Ø 5,0	2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	4 Ø 4,2	3 Ø 5,0	1 Ø 10,0	4 Ø 5,0
	3.40		1 Ø 4,2					1 Ø 5,0	2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	3 Ø 4,2	4 Ø 4,2	4 Ø 4,2	1 Ø 10,0	4 Ø 5,0	4 Ø 5,0	1 Ø 12,5
	3.60		1 Ø 4,2	2 Ø 4,2				2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	3 Ø 4,2	4 Ø 4,2	3 Ø 5,0	4 Ø 5,0	4 Ø 5,0	2 Ø 6,0	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5
	3.80	1 Ø 4,2	1 Ø 4,2	2 Ø 5,0	3 Ø 4,2			3 Ø 4,2	4 Ø 4,2	1 Ø 10,0	4 Ø 5,0	2 Ø 5/16	4 Ø 5,0	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	3 Ø 5/16
	4.00	1 Ø 4,2	1 Ø 5,0	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	1 Ø 10,0		4 Ø 4,2	4 Ø 5,0	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	3 Ø 5/16	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16
	4.20	1 Ø 4,2	2 Ø 4,2	4 Ø 4,2	3 Ø 5,0	4 Ø 5,0		2 Ø 5/16	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	2 Ø 10,0	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16
	4.40	1 Ø 5,0	2 Ø 5,0	2 Ø 6,0	4 Ø 5,0	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5		4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0
	4.60	2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	1 Ø 10,0	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0		3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	1 Ø 10,0	1 Ø 10,0				
	4.80	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	4 Ø 5,0	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16		4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	3 Ø 10,0	3 Ø 10,0	2 Ø 12,5		
	5.00	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	3 Ø 6,0	1 Ø 12,5	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16		4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0						
	5.20	3 Ø 4,2	3 Ø 5,0	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16										
	5.40	4 Ø 4,2	4 Ø 5,0	4 Ø 6,0													
	5.60	4 Ø 4,2	4 Ø 5,0														
5.80	1 Ø 10,0	2 Ø 5/16															

Fonte: ArcelorMittal

Tabela 13 - Armaduras adicionais para laje treliçada de 20 cm

Enchimento = Bloco EPS (Altura = 16 cm) - Distância entre linhas de escoras = 1,70 m																	
Modelo	Designação	Altura da laje	Altura capa	Consumo de	Cargas acidentais kgf/m ²								Peso próprio				
TB 16L	TR16745	20 cm	4 cm	63 litros/m ²	50 Kg/m ²	100 Kg/m ²	150 Kg/m ²	200 Kg/m ²	250 Kg/m ²	300 Kg/m ²	350 Kg/m ²	400 Kg/m ²	450 Kg/m ²	500 Kg/m ²	550 Kg/m ²	600 Kg/m ²	175 Kgf/m ²
4.00						1 Ø 4,2	2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	3 Ø 4,2	4 Ø 4,2	2 Ø 6,0	1 Ø 10,0	4 Ø 5,0	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	
4.20					1 Ø 4,2	1 Ø 4,2	2 Ø 5,0	3 Ø 4,2	4 Ø 4,2	3 Ø 5,0	4 Ø 5,0	4 Ø 5,0	3 Ø 6,0	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	4 Ø 6,0	
4.40					1 Ø 4,2	1 Ø 5,0	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	3 Ø 5,0	4 Ø 5,0	4 Ø 5,0	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	2 Ø 10,0	
4.60					1 Ø 4,2	2 Ø 4,2	4 Ø 4,2	4 Ø 4,2	4 Ø 5,0	4 Ø 5,0	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	
4.80					1 Ø 5,0	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	1 Ø 10,0	4 Ø 5,0	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	
5.00					2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	1 Ø 10,0	4 Ø 5,0	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	
5.20					2 Ø 4,2	3 Ø 4,2	4 Ø 5,0	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	
5.40					2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	4 Ø 5,0	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	2 Ø 12,5	4 Ø 10,0
5.60					2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	2 Ø 12,5	4 Ø 10,0	
5.80					4 Ø 4,2	1 Ø 10,0	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	2 Ø 10,0	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0					
6.00					4 Ø 4,2	4 Ø 5,0	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0						
6.20					1 Ø 10,0	2 Ø 5/16	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	4 Ø 5/16						
6.40					1 Ø 10,0	2 Ø 5/16	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16									
6.60					4 Ø 5,0	1 Ø 12,5											
6.80					4 Ø 5,0	1 Ø 12,5											

Fonte: ArcelorMittal

Tabela 14 - Armaduras adicionais para laje treliçada de 25 cm

Enchimento = Bloco EPS (Altura = 20 cm) - Distância entre linhas de escoras = 1,60 m																	
Modelo	Designação	Altura da laje	Altura capa	Consumo de	Cargas acidentais kgf/m ²								Peso próprio				
TB 20L	TR20745	25 cm	5 cm	80 litros/m ²	50 Kg/m ²	100 Kg/m ²	150 Kg/m ²	200 Kg/m ²	250 Kg/m ²	300 Kg/m ²	350 Kg/m ²	400 Kg/m ²	450 Kg/m ²	500 Kg/m ²	550 Kg/m ²	600 Kg/m ²	217 Kgf/m ²
3.50							1 Ø 4,2	1 Ø 4,2	1 Ø 4,2	1 Ø 5,0	2 Ø 4,2	2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	4 Ø 4,2	
3.80							1 Ø 4,2	1 Ø 5,0	2 Ø 4,2	2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	4 Ø 4,2	2 Ø 6,0	1 Ø 10,0	
4.10						1 Ø 4,2	1 Ø 5,0	2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	4 Ø 4,2	3 Ø 5,0	1 Ø 10,0	4 Ø 5,0	4 Ø 5,0	
4.40					1 Ø 4,2	1 Ø 4,2	2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	4 Ø 4,2	3 Ø 5,0	1 Ø 10,0	4 Ø 5,0	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	
4.70					1 Ø 4,2	1 Ø 5,0	2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	4 Ø 4,2	1 Ø 10,0	4 Ø 5,0	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	
5.00					1 Ø 5,0	2 Ø 4,2	4 Ø 4,2	2 Ø 6,0	4 Ø 5,0	4 Ø 5,0	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	
5.30					2 Ø 4,2	2 Ø 5,0	3 Ø 5,0	4 Ø 5,0	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	
5.60					2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	4 Ø 5,0	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	2 Ø 10,0	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	3 Ø 10,0	
5.90					2 Ø 5,0	4 Ø 4,2	2 Ø 5/16	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	3 Ø 10,0	4 Ø 10,0	
6.20					4 Ø 4,2	1 Ø 10,0	1 Ø 12,5	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	3 Ø 10,0	2 Ø 12,5	4 Ø 10,0	4 Ø 10,0	
6.50					4 Ø 4,2	4 Ø 5,0	4 Ø 6,0	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	3 Ø 10,0	4 Ø 10,0	4 Ø 10,0	4 Ø 10,0	4 Ø 10,0	
6.80					1 Ø 10,0	2 Ø 5/16	3 Ø 5/16	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	3 Ø 10,0	4 Ø 10,0	4 Ø 10,0				
7.10					4 Ø 5,0	1 Ø 12,5	4 Ø 5/16	4 Ø 5/16	3 Ø 10,0	3 Ø 10,0	4 Ø 10,0						
7.40					2 Ø 5/16	4 Ø 6,0											
7.70					1 Ø 12,5	3 Ø 5/16											

Fonte: ArcelorMittal

Devido aos vãos lançados inicialmente serem da ordem de 5,0 m a 5,5 m, optou-se pela inserção de vigas na direção vertical das lajes, a fim de dividir a estrutura em painéis de menores vãos. Assim, pode-se considerar como maior vão um valor de 3,80 m para efeito de pré-dimensionamento. Estimaremos uma altura de laje para cada pavimento, visando manter uniformidade dos elementos. Dessa forma, o pré-dimensionamento resulta na seguinte tabela:

Tabela 15 - Pré-dimensionamento de lajes treliçadas

Pavimento	Maior Carga Acidental (kgf)	Altura da laje (cm)	Capa (cm)	Bloco de enchimento (cm/cm/cm)
Térreo	500	16	4	12/40/40
Mezanino	400	16	4	12/40/40
Tipo	200	16	4	12/40/40
Coberta	50	16	4	12/40/40

Fonte – O autor

3.4.6 Pré-dimensionamento de lajes nervuradas sem vigas

Como base para o pré-dimensionamento das lajes nervuradas sem vigas utilizaremos o mesmo que foi calculado para as lajes nervuradas convencionais. Dessa forma, seria utilizado a laje com uma altura de 26 cm, com capa de 5 cm, largura da nervura de 12cm e espaçamento entre eixos da nervura de 66 cm. Observa-se, no entanto, o descumprimento das recomendações da norma NBR 15200:2012 em relação a espessura da capa de concreto, pois a mesma norma fala que não é possível considerar o revestimento na obtenção da espessura da capa de concreto. Dessa forma, utiliza-se a capa de 8 cm de espessura. Nota-se, com isso, o atendimento desse pré-dimensionamento às considerações sobre dimensões mínimas de lajes nervuradas sem vigas realizadas no item 2.2.4 deste trabalho.

3.4.7 Pré-dimensionamento de outros elementos da estrutura

Para elementos como vigas-baldrame, escadas, reservatórios, piscinas e rampas, procurou-se chegar a valores de dimensões desses elementos de forma que eles não variem em todos os modelos estruturais adotados. Os mesmos estão discriminados na Tabela 16:

Tabela 16 - Pré-dimensionamento dos outros elementos da estrutura

Elemento	Dimensões
Escada	10 cm (espessura)
Rampa	13 cm (espessura)
Laje – Piscina	16 cm (espessura)
Laje – Fundo do reservatório	16 cm (espessura)
Laje – Tapa do reservatório	12 cm (espessura)
Laje - Casa de máquinas	10 cm (espessura)
Paredes - Piscina	15 cm x 100 cm (seção transversal)
Paredes - Reservatório	15 cm x 150 cm (seção transversal)
Viga baldrame	20 cm x 40 cm (seção transversal)

Fonte: O autor

Para as fundações em sapata, o software Eberick calcula automaticamente as dimensões desses elementos.

3.5 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS

A análise e dimensionamento dos elementos da estrutura será feito através do software Eberick 2018, desenvolvido pela empresa AltoQi. Acerca do programa, a mesma afirma:

O AltoQi Eberick é destinado ao projeto de edificações em concreto armado. Possui um poderoso sistema gráfico de entrada de dados, associado à análise da estrutura em um modelo de pórtico espacial e a diversos recursos de dimensionamento e detalhamento dos elementos. [...]A estrutura da edificação é definida através de pavimentos, que representam os diferentes níveis existentes no projeto arquitetônico. O lançamento dos elementos é feito de forma gráfica, diretamente sobre a planta arquitetônica, permitindo definir diversas hipóteses no cálculo do modelo. O programa possibilita a visualização da estrutura completa em 3D e os resultados são fornecidos através de janelas de dimensionamento em forma de planilha. O detalhamento dos elementos segue as práticas usuais do mercado brasileiro e pode ser organizado em pranchas para posterior plotagem.

Registrados os valores das ações, lançados e pré-dimensionados os elementos estruturais, segue-se para a etapa de análise da estrutura. O Eberick 2018 gera automaticamente as seguintes combinações durante a sua análise estrutural: combinações últimas, de construção, de fundação, frequentes, quase permanentes e raras. Ao processar a estrutura, o Eberick utiliza-se das combinações de carregamento geradas para o cálculo dos esforços na estrutura através do modelo de grelhas e pórtico espacial. Esses esforços serão utilizados para o

dimensionamento dos elementos estruturais. Ao fim desta etapa, o mesmo emite a janela de resultados de análise, tratando do sucesso da mesma (ou dos erros de dimensionamento ocorridos nos elementos estruturais), além de informações sobre os deslocamentos horizontais da estrutura, do valor do parâmetro de estabilidade γ_z e dos resultados do processo iterativo de análise não-linear P- Δ .

3.5.1 Modelo I: lajes maciças apoiadas em vigas

Para este modelo, a estrutura foi processada e todos os seus elementos foram dimensionados com sucesso.

Através da janela de resultado da análise foram extraídos os seguintes dados a respeito da estrutura:

Tabela 17 - Resultados de processamento para o Modelo I

Carga Vertical Total (tf):	4487,92
Deslocamento horizontal (cm):	
Direção X	0,13 (limite 1,51)
Direção Y	0,18 (limite 1,51)
Coefficiente Gama-Z:	
Direção X	1,15 (limite 1,10)
Direção Y	1,03 (limite 1,10)

Fonte: O autor

A partir dos resultados da análise, nota-se um coeficiente Gama-Z igual a 1,15. Dessa forma, a ABNT NBR 6118:2014 classifica a estrutura como de nós móveis, sendo necessária uma verificação de análise não-linear. O Eberick faz essa análise por meio do processo P- Δ . Para o modelo em questão, a análise P- Δ da estrutura foi realizada com sucesso, não apresentando nenhum erro.³

3.5.2 Modelo II: lajes nervuradas apoiadas em vigas

³ Com relação à estabilidade de estruturas e seus métodos de análise, o Autor recomenda a leitura do material da TQS disponível em <http://www.tqs.com.br/recursos-do-site/downloads/doc_download/115-analise-da-estabilidade-de-edificios-com-estrutura-de-concreto-armado>. Acesso em 24 de out. 2018

Para este modelo, a estrutura foi processada e todos os seus elementos foram dimensionados com sucesso. Através da janela de resultado da análise foram extraídos os seguintes dados a respeito da estrutura:

Tabela 18 - Resultados de processamento para o Modelo II

Carga Vertical Total (tf):	4212,82
Deslocamento horizontal (cm):	
Direção X	0,13 (limite 1,51)
Direção Y	0,18 (limite 1,51)
Coeficiente Gama-Z:	
Direção X	1,14 (limite 1,10)
Direção Y	1,03 (limite 1,10)

Fonte: O autor

Com relação a estabilidade global da estrutura, tem-se que a análise não linear pelo processo P- Δ não apresentou nenhum erro.

3.5.3 Modelo III: lajes treliçadas apoiadas em vigas

Para o modelo de lajes treliçadas, as dimensões pré-dimensionadas não atenderam aos critérios de dimensionamento. Dessa forma, foi necessário a realização de ajustes no modelo estrutural.

Para as lajes do pavimento térreo, foi necessário aumentar sua seção de 16 para 20 cm, bem como aumentar as larguras das vigas do pavimento para 25 cm. Para receber as vigas dessa largura foi necessário alterar dimensões dos pilares de 20x45 cm para 25x35, de forma a facilitar a execução das vigas se que apoiam nos mesmos. Ainda assim, as lajes L1, L2, L3, L4, L7, L8, L9, L10 e L41 apresentaram problemas de flecha excessiva. O problema foi resolvido aumentando a espessura da capa para 6cm.

As lajes do mezanino tiveram suas armaduras dimensionadas com sucesso. Entretanto, as lajes L25, L28, L37, L40 apresentaram deslocamentos excessivos. Assim, o problema foi resolvido aumentando a seção das lajes do pavimento de 16 cm para 20 cm.

As lajes dos pavimentos tipos foram dimensionadas corretamente com seu pré-dimensionamento, mas as flechas para aceitabilidade sensorial apresentaram-se acima dos valores limites. Para solucionar esse problema, aumentou-se a largura das vigas desse

pavimento para 20 cm e a seção das lajes para 20 cm. Ainda assim, as L1, L2, L9, L10, L11 apresentaram deslocamentos excessivos. Foi aumentada a capa de concreto para 6 cm como solução para a situação.

Feitos esses ajustes, temos que a estrutura não apresentou mais erros de dimensionamento nem deslocamentos excessivos. Nota-se também que a estrutura atendeu os valores-limites de deslocamentos horizontais, além do parâmetro de estabilidade global Gama-Z, indicando que a mesma é uma estrutura de nós fixos. A Tabela 19 mostra o resultado do processamento da estrutura:

Tabela 19 - Resultados de processamento para o Modelo III

Carga Vertical Total (tf):	4198,75
Deslocamento horizontal (cm):	
Direção X	0,11 (limite 1,51)
Direção Y	0,14 (limite 1,51)
Coefficiente Gama-Z:	
Direção X	1,09 (limite 1,10)
Direção Y	1,03 (limite 1,10)

Fonte: O autor

3.5.4 Modelo IV: Lajes nervuradas sem vigas

Neste modelo, todas as lajes pré-dimensionadas não foram suficientes para atender os critérios de dimensionamento. Dessa forma, foram necessários vários ajustes na estrutura.

Inicialmente, fez-se necessário alterar as dimensões dos pilares da estrutura, haja vista que pilares com formas mais próximas ao quadrado apresentam melhor comportamento estrutural para esse tipo de laje. Assim, os pilares de dimensões 20x45 cm passaram a ter 30x30 cm e os pilares com 25x80 cm passaram a ser de 30x65 cm.

Para as lajes do pavimento térreo, chegou-se a uma laje de 43 cm de altura, utilizando-se a cubeta de dimensões 35/80/80 cm com capa de 8 cm. Além disso, foi necessário aumentar a largura das vigas ao redor da escada e fosso do elevador, para um valor de 25 cm, visando prover largura de apoio suficiente para ancorar as barras da armadura positiva das lajes.

Para todos os outros pavimentos, a laje de altura 33 cm atendeu aos critérios de dimensionamento e de deslocamentos. Para o pavimento tipo, foi necessário aumentar a largura da viga para 20 cm, visando prover ancoragem para as barras da laje L1. Nos outros pavimentos não foram necessários ajustes no pavimento.

Ainda com relação aos elementos nesse modelo estrutural foram adotados capiteis nos pilares centrais dos pavimentos, com espessura equivalente ao da sua respectiva laje e para suas dimensões foi adotado o mínimo configurado pelo software: 252,5x332,5 cm.

Os resultados da análise foram:

Tabela 20 - Resultados de processamento para o Modelo IV

Carga Vertical Total (tf):	4206,46
Deslocamento horizontal (cm):	
Direção X	0,17 (limite 1,51)
Direção Y	0,26 (limite 1,51)
Coefficiente Gama-Z:	
Direção X	1,15 (limite 1,10)
Direção Y	1,06 (limite 1,10)

Fonte: O autor

3.6 CUSTOS UNITÁRIOS DE INSUMOS

Para avaliar os custos finais referentes às estruturas dos quatro modelos do presente estudo de caso serão empregados os dados referentes aos custos unitários de insumos disponíveis no Eberick 2018. Vale salientar que é possível editar os referidos custos de forma que os mesmos se adaptem à realidade da região e às técnicas executivas empregadas. Entretanto, para este trabalho, considera-se satisfatório adotar os valores pré-configurados pelo programa para efeito comparativo de custo das estruturas. Os custos referentes ao concreto são referentes ao metro cúbico de concreto e estão detalhados na Tabela 21:

Tabela 21 - Custos de concreto

Classe	Material (R\$/m ³)	Execução (R\$/m ³)
C20	228,55	92,53
C25	244,37	95,11
C30	261,13	131,50
C35	272,28	131,50
C40	284,42	131,50
C45	335,02	50,96
C50	402,81	50,96

Fonte: O autor

Os custos referentes às formas de madeira variam conforme o elemento estrutural a ela associado. Deve-se atentar que o Eberick não leva em consideração em seus custos a possibilidade de reaproveitamento das mesmas. Dessa forma, no presente estudo as formas não serão consideradas reaproveitáveis. Seus custos estão detalhados na Tabela 22:

Tabela 22 - Custos de formas

Elemento	Material (R\$/m²)	Execução (R\$/m²)
Vigas	46,70	55,93
Pilares	51,65	78,67
Lajes	44,27	73,53
Escadas	44,27	73,53
Fundações	69,56	73,52
Reservatórios	2,89	9,93
Muros	69,56	73,52

Fonte: O autor

Os custos de aço são dados em relação ao peso do mesmo e variam conforme o diâmetro da barra ou fio utilizado, conforme a Tabela 23:

Tabela 23 - Custos de aço

Diâmetro (mm)	Tipo de Aço	Material (R\$/kg)	Execução (R\$/kg)
3,2	CA60	4,96	3,99
3,4	CA60	4,96	3,99
4,0	CA60	4,96	3,99
4,2	CA60	4,96	3,99
4,6	CA60	4,82	3,19
5,0	CA60	4,82	3,19
6,0	CA60	4,00	4,88
6,3	CA50	4,82	4,88
7,0	CA60	4,07	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	1,98
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

Fonte: O autor

Para lajes nervuradas, deve-se estimar os custos referentes aos blocos de enchimento, podendo ser apresentados por unidade ou por metro quadrado, conforme a Tabela 24:

Tabela 24 - Custos de lajes nervuradas

Cubeta Plástica	Por área de laje		Por bloco de enchimento	
	(R\$/m²)		(R\$/un)	
	Material	Execução	Material	Execução
B 18/66/66	26,36	45,91	10,88	0,00
B 25/80/80	26,36	45,91	10,88	0,00
B 35/80/80	26,36	45,91	10,88	0,00

Fonte: O autor

Para as lajes treliçadas, deve-se elencar os custos referentes aos blocos de enchimento e às vigotas treliçadas. Os valores dos mesmos encontram-se na Tabela 25:

Tabela 25 - Custos de lajes treliçadas

Vigota Treliçada	Custo da Vigota		Bloco EPS	Por bloco de enchimento	
	(R\$/m²)			(R\$/un)	
	Material	Execução		Material	Execução
TR 08645	27,88	21,64	B 08/40/40	3,14	0,00
TR 12645	50,12	21,64	B 12/40/40	4,71	0,00
TR 16745	50,12	21,64	B 16/40/40	6,28	0,00
TR 20745	62,91	21,64	B 20/30/125	23,01	0,00

Fonte: O autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão feitas as comparações entre os modelos estruturais adotados, sendo analisados tanto quantitativos totais quanto índices de consumo de insumos. Em seguida, serão apresentados os resultados para cada estrutura apreciada em termos de custos.

Os quantitativos de materiais foram obtidos através da ferramenta “Resumo de Materiais” do Eberick 2018, que permite a exportação das quantidades de concreto, aço e forma de acordo com pavimento e peça estrutural, além de elencar os custos totais da estrutura.

4.1 CONSUMO DE CONCRETO

O consumo total de concreto para os quatro modelos estruturais estudados é mostrado na Tabela 26:

Tabela 26 - Consumo de concreto moldado in loco

Elemento	Modelo I (m³)	Modelo II (m³)	Modelo III (m³)	Modelo IV (m³)
Vigas	189,70	189,70	287,20	131,00
Pilares	112,80	112,40	112,40	110,30
Lajes	494,10	418,80	278,90	743,70
Escadas	8,10	8,10	8,10	8,10
Fundações	48,50	45,10	44,60	60,90
Reservatórios	39,40	39,40	39,40	39,40
Total	892,6	813,50	770,60	1.093,40

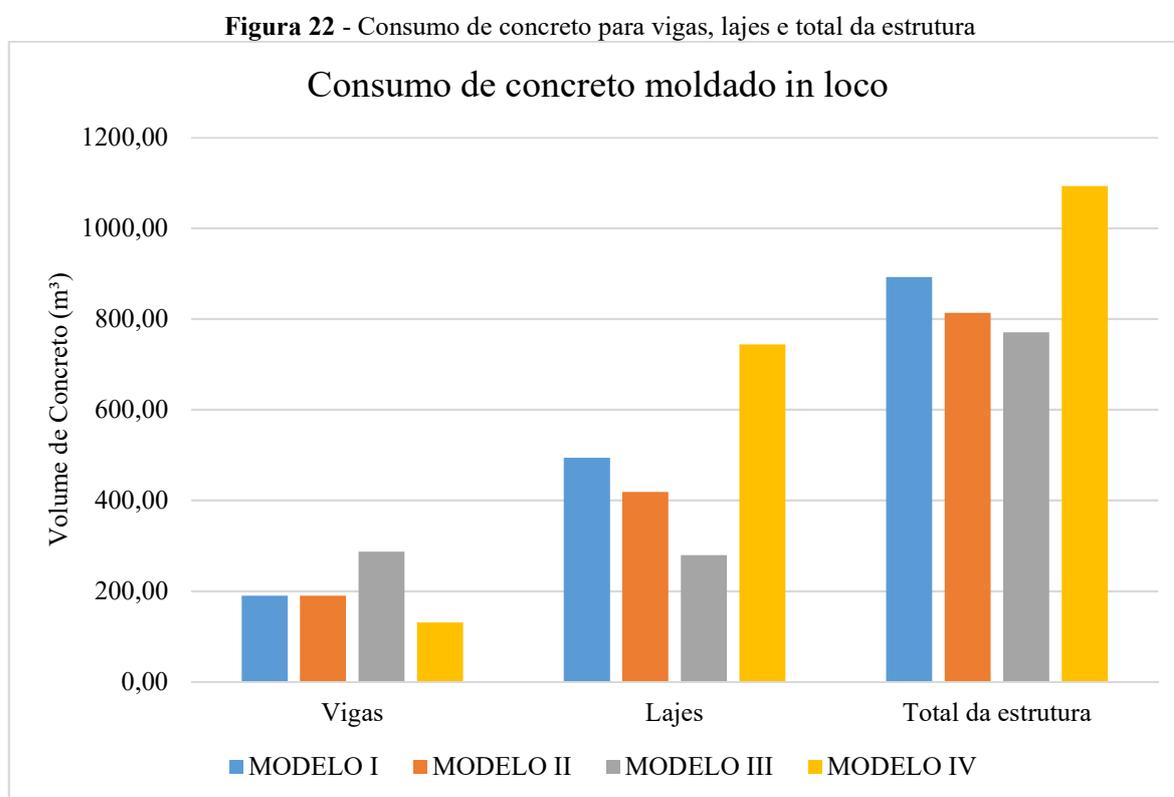
Fonte: O autor

Cabe destacar que nesses quantitativos não estão incluídos os volumes de concreto referentes às vigotas pré-fabricadas. Nota-se a igualdade nos valores dos volumes de concreto referentes às escadas e aos reservatórios (piscina e caixa d'água) devido seus lançamentos terem sido iguais em todos os modelos.

Quanto aos pilares percebe-se uma pequena diferença de volume referente ao Modelo IV em relação aos Modelos I, II, III. A mesma pode ser explicada devido ao ajuste nas dimensões dos pilares para servir de apoio para as lajes lisas nervuradas, reduzindo um pouco sua seção transversal e tornando mais quadrados.

Com relação às fundações nota-se que os Modelos I, II e III apresentam valores semelhantes de consumo de concreto. Destoando desses números, encontram-se as fundações do Modelo IV, apresentando um gasto de concreto 32,2% superior à média dos modelos anteriores. Isso pode ser justificado pela natureza do sistema estrutural, pois devido à ausência ou número reduzido de vigas a estrutura apresenta-se menos rígida, permitindo maiores deslocamentos horizontais, e conseqüentemente transmitindo maiores esforços para as fundações que, por fim, necessitam de maiores dimensões para resistir a esses esforços.

Para vigas e lajes, a Figura 22 mostra um gráfico comparativo de consumo desses elementos.



Fonte: O autor

Os Modelos I e II apresentam o mesmo quantitativo para vigas, pois tiveram nas suas estruturas o mesmo resultado de pré-dimensionamento das seções das vigas e pilares. Nota-se um maior consumo de concreto para o Modelo III, já que foi necessário a adição de vigas de modo que os critérios de dimensionamento e de deslocamentos fossem respeitados para as lajes treliçadas. O menor consumo foi para o Modelo IV, pois nesse modelo as lajes nervuradas não eram apoiadas em vigas, existindo esses elementos apenas nos contornos dos pavimentos e na região da escada e fosso do elevador.

Quanto às lajes, nota-se um menor consumo de concreto para o Modelo III, mostrando a economicidade do sistema de lajes treliçadas. Há de salientar que o tal quantitativo não inclui o concreto pré-fabricado das vigotas treliçadas. Em seguida, tem-se o Modelo II, mostrando-se também econômico nesse quesito, pois percebe-se que o tipo de laje escolhida para essa área (5,0x7,5)m influi no consumo de concreto. Como alternativas mais onerosas temos os Modelos I e IV, sendo que este último apresenta cerca de 87% a mais de consumo em relação à média dos outros três modelos. Tal comportamento pode ser explicado pela necessidade de espessura da laje para suportar esforços de flexão e punção, além do fato de necessitar de 8 cm de capa para atender às normas referentes à incêndio em estruturas de concreto.

Com base no índice espessura média de concreto, que se trata da relação entre o volume de concreto e a área construída, é possível aferir a coerência dos modelos através da comparação com os valores referência recomendados por Botelho e Marquetti (2007). Os mesmos indicam que para esse índice um valor razoável encontra-se em torno de 23 cm. Os valores de espessura média encontram-se na Tabela 27 e mostram o Modelo IV acima desse limite.

Tabela 27 - Índice de consumo de Concreto

Modelo	Volume concreto (m³)	Espessura média (cm)
I	892,60	21,18
II	813,50	19,30
III	770,60	18,28
IV	1.093,40	25,94

Fonte: O autor

4.2 CONSUMO DE FORMA EM MADEIRA

O consumo total de formas de madeira obtido para as estruturas em estudo é dado na Tabela 28. Para escadas, reservatórios, pilares e fundações, as mesmas considerações que foram feitas para consumo de concreto também podem ser aplicadas na análise de consumo de formas, pois nesses elementos uma variação no consumo de concreto acarretará alteração no gasto com formas, devido este ser uma característica que depende essencialmente da geometria dos elementos estruturais.

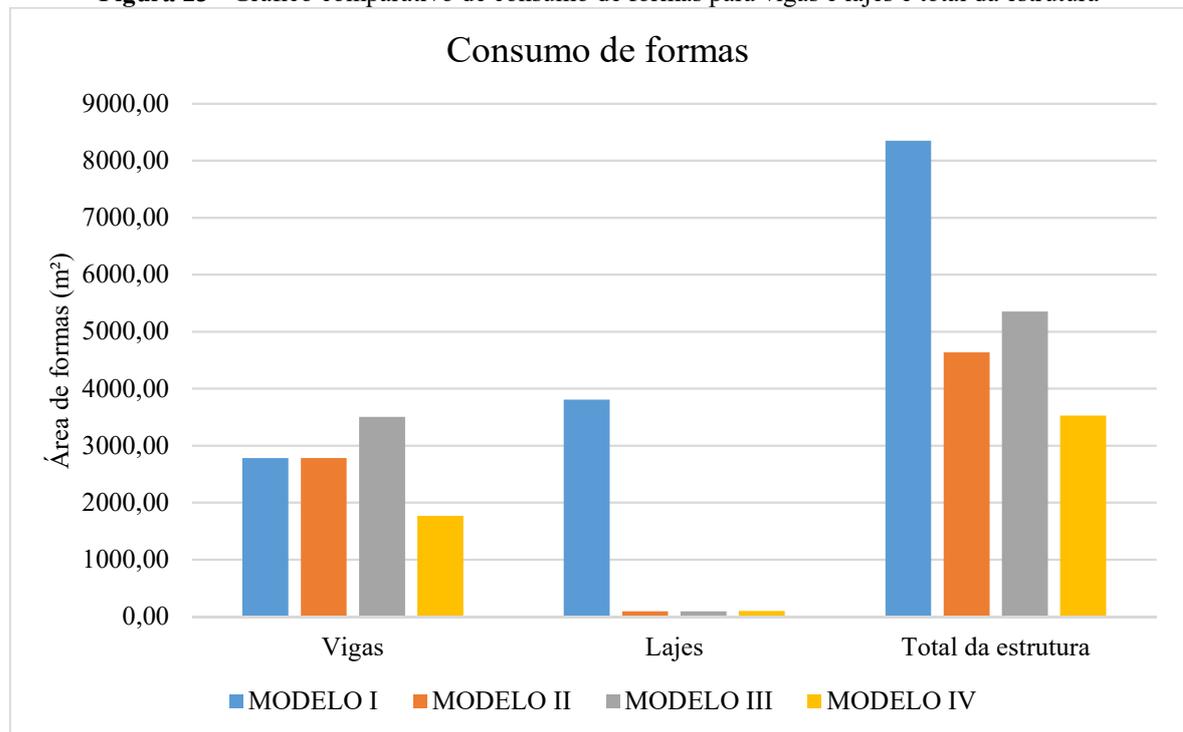
Tabela 28 - Consumo de formas em madeira

Elemento	Modelo I (m ²)	Modelo II (m ²)	Modelo III (m ²)	Modelo IV (m ²)
Vigas	2.777,80	2.777,80	3.504,80	1.763,70
Pilares	1.236,40	1.232,20	1.222,90	1.123,20
Lajes	3.802,30	90,20	89,30	96,60
Escadas	93,00	93,00	92,40	93,00
Fundações	64,90	62,40	61,80	72,80
Reservatórios	378,00	378,00	378,10	378,00
Total	8.352,40	4.633,60	5.349,30	3.527,30

Fonte: O autor

Para vigas e lajes, a Figura 23 expõe o consumo com formas nesses elementos:

Figura 23 - Gráfico comparativo de consumo de formas para vigas e lajes e total da estrutura



Fonte: O autor

Para vigas, a análise de formas segue às mesmas considerações quanto ao consumo de concreto. O Modelo IV apresenta menor consumo, devido ao menor número desses elementos nessa solução. Os Modelos I e II apresentaram-se com valores intermediários, enquanto que o

Modelo III foi mais dispendioso quanto a esse quesito, devido ao mesmo apresentar um maior número de vigas na sua estrutura.

Em relação às lajes, nota-se uma grande discrepância em relação aos quantitativos de formas entre o Modelo I e os Modelos II, III e IV. Isso ocorreu devido ao grande consumo de formas em madeira para o sistema de lajes maciças em relação àqueles utilizados nos outros modelos, que utilizam blocos de enchimento ou moldes reaproveitáveis para moldar as lajes, não sendo esses elementos contabilizados. Para estes modelos, os únicos quantitativos de formas referentes a lajes são devidos à rampa que liga o subsolo ao térreo e à casa de máquinas do elevador, pois esses elementos utilizam lajes maciças.

Dessa forma, analisando-se o quantitativo total de formas, tem-se o Modelo I como mais oneroso nesse quesito, com consumo 53% superior à média dos outros modelos. Já a solução mais econômica foi o Modelo IV, com consumo 35% inferior à média dos outros modelos.

Avaliando-se o índice de taxa de forma das soluções e tomando-se como referência o valor de 12 a 14 m² por m³ de concreto estabelecido por Mattos (2006), tem-se que as estruturas deste estudo atendem a essa referência, conforme Tabela 29:

Tabela 29 - Taxa de forma

Modelo	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Índice de forma (m²/m³)
I	892,60	8352,40	9,36
II	813,50	4633,60	5,70
III	770,60	5349,30	6,94
IV	1093,40	3527,30	3,23

Fonte: O autor

4.3 CONSUMO DE AÇO

De forma semelhante aos itens anteriores, consumo total de aço foi obtido a partir dos quatro modelos estudados nesse trabalho. Os resultados estão na Tabela 30.

Para análise de cada elemento estrutural, tem-se que as considerações feitas para consumo de concreto e de formas são pertinentes, à medida que o aumento ou redução de dimensões ou quantidades de elementos também implicam em variação do consumo de aço nos elementos estruturais. Nota-se que há uma variação no peso de aço para reservatórios se compararmos o Modelo III perante os Modelos I, II e IV.

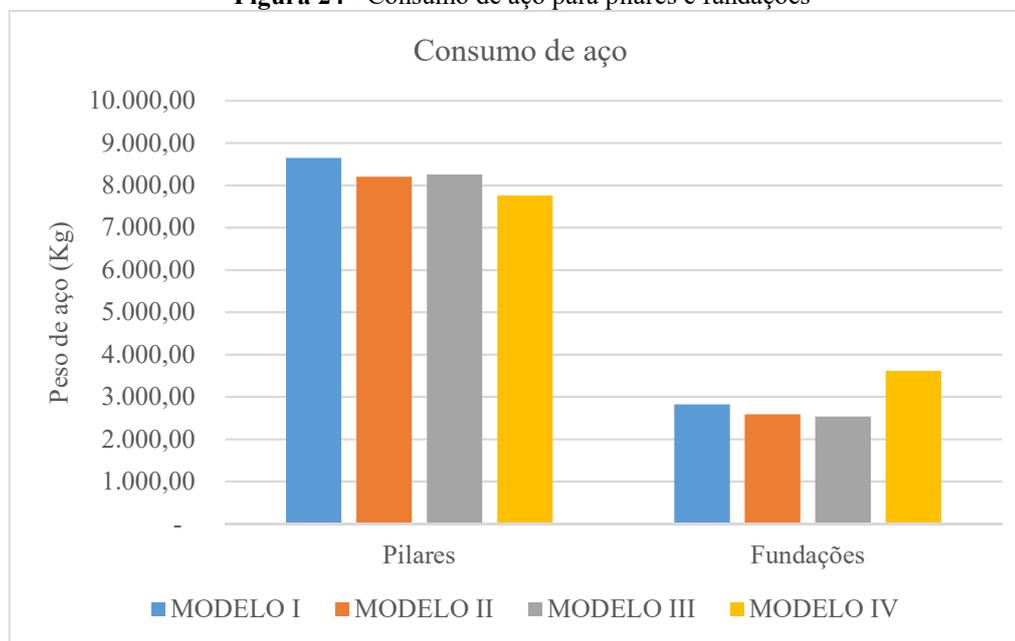
Tabela 30 - Consumo de aço

Elemento	Modelo I (Kg)	Modelo II (Kg)	Modelo III (Kg)	Modelo IV (Kg)
Vigas	16.275,00	14.626,10	21.798,20	8.613,10
Pilares	8.645,40	8.200,20	8.256,30	7.756,60
Lajes	31.464,00	21.475,50	13.532,60	47.850,80
Escadas	339,60	346,10	300,80	359,70
Fundações	2.825,40	2.588,90	2.534,90	3.612,50
Reservatórios	5.806,10	5.693,30	4.528,30	5.335,80
Total	65.355,50	52.930,10	50.951,10	73.528,50

Fonte: O autor

Cabe salientar que para pilares e fundação passamos a ter diferenças mais significativas no consumo de aço, como mostra a Figura 24. Tais variações podem ser explicadas pelas diferenças de materiais de cada sistema de laje, que acabam por influenciar nos esforços determinados no dimensionamento de armaduras.

Figura 24 - Consumo de aço para pilares e fundações

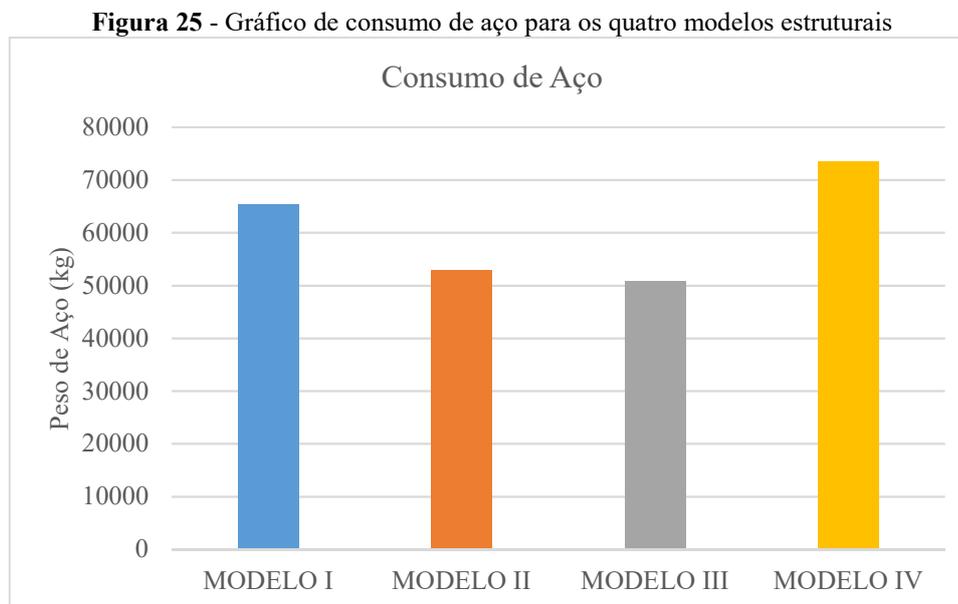


Fonte: O autor

Para os pilares, ocorreram menores variações nesses quantitativos, sendo o Modelo IV mais econômico. Para fundações tem-se que o Modelo III apresentou-se mais econômico. Tal comportamento pode ser explicado devido aos pavimentos de lajes treliçada serem mais leves

e, portanto, transmitirem menos cargas às fundações. Ainda assim, nota-se que o Modelo IV foi o que apresentou maior consumo de aço, podendo esse fenômeno ser explicado aos maiores esforços nas sapatas dessa estrutura.

Analisando este item através da comparação entre os modelos estruturais usados, conforme a Figura 25:



Fonte: O autor

O Modelo III, de lajes treliçadas, apresentou-se como mais vantajoso nesse item, apesar de apresentar maior consumo de aço para vigas, sua economia é sensível quando os outros elementos são comparados, principalmente as lajes. Nota-se que para as lajes, estão inclusos nesses valores os pesos das treliças e armaduras adicionais necessárias a suportar os esforços nas mesmas.

O Modelo II apresentou-se bastante econômico neste item, sendo apenas 3,74 % mais dispendioso em relação ao Modelo III, demonstrando a eficiência do sistema de lajes nervuradas, sendo capazes de resistir a maiores esforços de flexão e com menor consumo de material.

Em termos de consumo de aço por volume de concreto, temos os seguintes resultados, conforme a Tabela 31:

Tabela 31 - Taxa de aço

Modelo	Volume de concreto (m³)	Peso de armação (kg)	Taxa de aço (kg/m³)
I	892,60	65.355,50	73,22
II	813,50	52.930,10	65,06
III	770,60	50.951,10	66,12
IV	1.093,40	73.528,50	67,25

Fonte: O autor

Em relação a esse índice, vemos que todos os modelos atendem ao limite entre 83 e 88 kg/m³ sugerido por Mattos (2006), sendo o Modelo II o mais eficiente, reforçando ainda mais a economicidade do sistema de lajes nervuradas convencionais.

4.3 COMPARATIVO DE CUSTOS FINAIS DE ESTRUTURA

Neste item, serão avaliados os custos dos quatro modelos estruturais adotados para esse estudo de caso. Para tanto, serão utilizados os quantitativos de materiais obtidos anteriormente, sendo os mesmos multiplicados pelos custos unitários definidos no item 3.6.

Os resultados de custos por elemento estrutural são mostrados na Tabela 32:

Tabela 32 - Custos por elemento estrutural

Elemento	Modelo I (R\$)	Modelo II (R\$)	Modelo III (R\$)	Modelo IV (R\$)
Vigas	482.095,19	472.626,91	633.611,46	301.403,88
Pilares	272.701,99	269.395,72	268.232,11	249.373,10
Lajes	930.426,45	717.430,84	358.882,06	1.000.281,09
Escadas	17.173,91	17.193,40	16.695,28	17.604,25
Fundações	45.141,21	42.103,66	40.715,55	55.171,01
Reservatórios	68.140,98	67.121,58	57.844,84	64.118,87
Total	1.815.679,73	1.585.872,11	1.375.981,30	1.687.952,20

Fonte: O autor

O Modelo III (lajes treliçadas) foi o que apresentou o menor custo, sendo o mesmo 13,24% menor que o Modelo II, que foi o segundo mais econômico. O modelo que se

apresentou mais oneroso foi o de lajes maciças convencionais, sendo 7,56% mais caro que a solução de lajes nervuradas lisas, o segundo mais caro.

Da tabela acima, temos que os custos com escadas e pilares pouco variaram para os modelos estruturais. Para vigas, tem-se que o Modelo III foi mais oneroso devido à maior quantidade de vigas requeridas para o tipo de laje. O custo de lajes se mostrou variado, com os Modelo I e IV sendo mais caros e o Modelo III bem mais econômico (com custo 2,80 vezes menor que a solução em laje nervurada lisa). Com relação às fundações, o Modelo IV se apresentou mais custoso em relação aos outros, que se mantiveram numa mesma faixa de custo.

A quantificação dos custos referentes aos insumos consumidos pelos modelos deste trabalho está apresentada na Tabela 33:

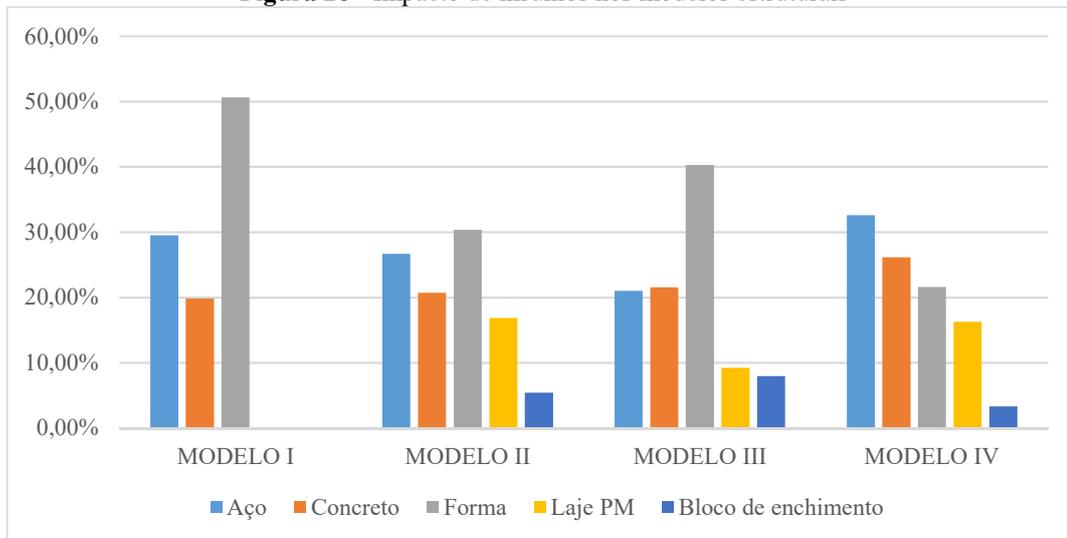
Tabela 33 - Custos referentes a insumos

Insumo	Modelo I (R\$)	Modelo II (R\$)	Modelo III (R\$)	Modelo IV (R\$)
Aço	536.051,11	422.979,35	289.387,70	550.370,51
Concreto	360.410,57	328.492,46	296.315,31	441.524,62
Forma	919.218,00	481.024,24	553.920,71	364.963,41
Laje PM	-	267.489,30	127.110,68	274.909,34
Bloco de enchimento	-	85.886,72	109.246,88	56.184,32
Total	1.815.679,69	1.585.872,07	1.375.981,28	1.687.952,20

Fonte: O autor

A Figura 26 ilustra o impacto dos insumos nos sistemas estruturais.

Do gráfico, tem-se que o custo relativo às formas é o mais oneroso nos Modelos I, II e III., podendo chegar a pouco mais de 50% do valor da estrutura, no caso de lajes maciças. No Modelo IV, há predominância de custos com aço, chegando a pouco mais de 30% do valor total.

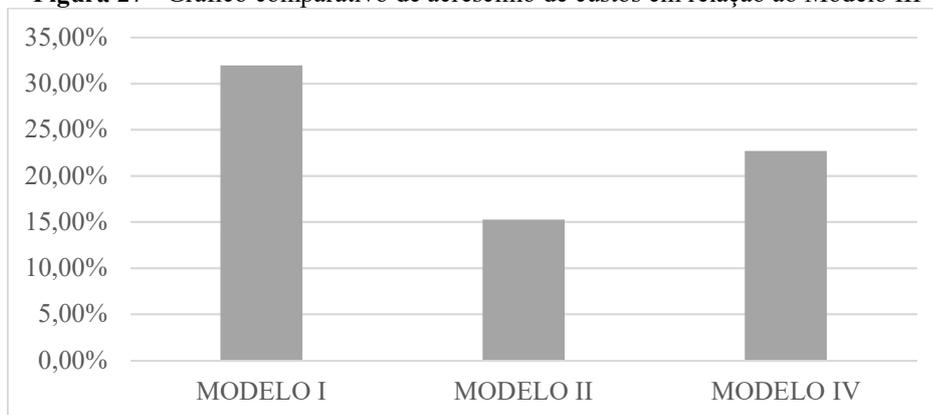
Figura 26 - Impacto de insumos nos modelos estruturais

Fonte: O Autor

A respeito dos custos dos insumos, é necessário fazer algumas observações:

- não foi considerado reaproveitamento de formas. Vale ressaltar que o Modelo I, referente às lajes maciças, poderia ter um custo mais competitivo em relação aos outros modelos em caso de reaproveitamento do material, visto que apenas nesse sistema são utilizadas formas de madeiras para lajes;
- para os Modelos II e IV, que adotam soluções em lajes nervuradas com cubetas também não foi considerado o reaproveitamento dos moldes, o que também pode gerar uma economia significativa no custo final da estrutura.

Pode-se concluir que o sistema mais econômico referente a custos de estruturas de concreto armado foi o modelo de lajes treliçadas. A Figura 27 mostra um comparativo percentual entre esse modelo e as outras estruturas adotadas:

Figura 27 - Gráfico comparativo de acréscimo de custos em relação ao Modelo III

Fonte: O autor

4.4 INFLUÊNCIA DA ARQUITETURA NA ESTRUTURA

Nesta seção serão feitas considerações a respeito da influência da variável arquitetura na escolha dos elementos estruturais e qual impacto nos seus custos.

Para a edificação deste trabalho, foi percebida a importância dada pelo arquiteto à modulação dos espaços, ao ser definido previamente o posicionamento de pilares na arquitetura, respeitando os espaços da arquitetura, bem como outros elementos do projeto, como vagas de garagem do subsolo e lojas. Isso possibilitou uma maior uniformização da distribuição de carga nas lajes, vigas e pilares, de modo que não resultasse em estruturas com dimensões subdimensionadas ou com dimensões muito acima do necessário, o que diminui custos com aço e concreto. Esse padrão também possibilitou que quase não houvessem elementos estruturais com dimensões diferentes nos pavimentos, sendo essa homogeneidade importante quando levamos em consideração os custos com formas de madeira, sendo este o insumo mais oneroso em três dos modelos estudados neste trabalho.

Deve-se notar, contudo, que apesar do sistema de lajes treliçadas ter sido mais econômico para a arquitetura apresentada não quer dizer que ele sempre seja o mais viável. Arquiteturas com diferentes características de uso, com maiores cargas, ou com maior número de pavimentos-tipo ou ainda com necessidade de vãos ainda maiores podem necessitar de sistemas estruturais diferentes, o que reforça ainda mais o estudo da interação entre arquitetura e estrutura.

5 CONCLUSÃO

Os custos de estrutura de uma edificação são levantados a partir da quantificação de seus insumos, tais como: consumo de aço, concreto, formas, tempos de execução, entre outros.

Dessa forma, este trabalho verificou os quantitativos e os custos para quatro modelos estruturais: o Modelo I, com lajes maciças apoiadas em vigas; o Modelo II, com lajes nervuradas apoiadas em vigas; o Modelo III, de lajes treliçadas e o Modelo IV, com lajes nervuradas lisas.

A partir das metodologias e dos parâmetros adotados, tem-se que o Modelo III, constituído de lajes treliçadas com enchimento em blocos de EPS, apresentou os menores custos finais de estrutura de concreto armado, apontando menores consumos de concreto e aço entre os modelos estudados. O Modelo II apresenta-se em seguida, sendo 15,25% mais cara que o Modelo III. O Modelo IV apresentou-se 22,67% mais oneroso que a solução em lajes treliçadas, sendo que o mesmo teve o maior consumo de concreto e aço e o menor consumo de formas entre as estruturas comparadas. Como modelo mais dispendioso, tem a estrutura com lajes maciças (Modelo I), importando um valor 31,96% maior que a solução mais econômica e apresentando o maior consumo de formas entre as estruturas deste estudo.

De forma geral, podemos concluir que a arquitetura é de grande importância no processo de determinação de quais sistemas estruturais são mais econômicos de modo que variações na arquitetura tenham impactos diferentes na concepção do sistema de lajes a ser adotado no projeto, devendo cada caso ser estudo conforme suas características e particularidades.

A etapa de projeto deve ser estudada de forma integrada, envolvendo os profissionais responsáveis pelas diversas disciplinas de projeto do empreendimento. Dessa forma, tem-se uma estrutura funcional, atendendo às formas definidas pela arquitetura e respeitando os critérios de segurança.

Dessa forma, ressalta-se a utilidade deste estudo no qual os projetistas de estruturas possam analisar os quantitativos de materiais e custos referentes aos sistemas estruturais abordados, podendo utilizá-lo para subsidiar a escolha de solução estrutural em seu projeto.

Para pesquisas futuras, sugerem-se:

- Utilização de outros sistemas estruturais, como a protensão e estruturas pré-moldadas;
- Avaliar custo de materiais e mão-de-obra a partir de dados de construtoras locais;
- Analisar a viabilidade de uma concepção estrutural a partir do seu tempo de execução e prazos finais de obra.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14432:2001**. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15200:2012**. Projeto de estruturas de concreto em situações de incêndio. Rio de Janeiro, 2012;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118:2014**. Projeto e Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6120:1980**. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6123:1988**. Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988;

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.

ALTOQI. **Guia de ajuda do AltoQI Eberick**. Disponível em: <http://help.altoqi.com.br/Eberick/default.aspx?pageid=altoqi_eberick>. Acesso em: 24 out. 2018.

ALVA, G. M. S. **Concepção estrutural de edifícios em concreto Armado**. Notas de aula. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2007, 23 p. Disponível em: <<http://www.ceap.br/material/MAT16082010230324.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2018.

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: 24 out. 2018.

BARBOZA, Marcos Robiati. **Concepção e análise de estruturas de edifícios em concreto armado**. 2008. 161 p. Relatório Final de Iniciação Científica (Graduação em Engenharia Civil)-, UNESP, Baurú, 2008. Disponível em: <<https://www.buildin.com.br/concepcao-estrutural/>>. Acesso em: 24 out. 2018.

BASTOS, P. S. S. **Lajes de concreto**. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Bauru, 2015. 115 p. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Lajes.pdf>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

BOTELHO, M. H. C. MARCHETTI, O. **Concreto armado eu te amo**. v. 2, 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2007.

CARVALHO, Dácio. Conceitos e aspectos gerais do relacionamento entre engenheiros de estruturas e arquitetos. **Jornal TQS**, [S.l.], p. 41-42, jan. 2009.

CARVALHO, R. C. FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturais usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003**. 3 ed. São Carlos: EdUFSCar, 2007. 368 p.

CARVALHO, R. C. PINHERO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: volume 2**. São Paulo: Pini, 2009.

CORRÊA, R. M.; NAVIERO, R.M. **Importância do ensino da integração dos projetos de arquitetura e estrutura de edifício: Fase de lançamento das estruturas**. Disponível em: <http://www.arquitetura.uema.br/arquivos/material/marciamarques/texto_03.pdf>. Acesso em: 24 out. 2018.

FISCHER, Nádia. **Softwares auxiliam o cálculo estrutural**. 2003. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/73/artigo285268-1.aspx>>. Acesso em: 24 out. 2018.

FRANÇA JUNIOR, Davidson de Oliveira. **Análise estrutural de um edifício em concreto armado com quatro pavimentos: estudo de caso para diferentes modelos estruturais.** 2015, 121 pág. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2015.

LAJES ATEX . **Catálogo de formas.** S/d. Disponível em:
<<http://www.atex.com.br/pt/formas/laje-nervurada/>>. Acesso em: 24 out. 2018.

MARTHA, Luiz Fernando. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos.** 1º Ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2010.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamentos de obras: dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos.** 1ª ed. São Paulo: Editora Pini, 2006.

MELO, P. R. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira, de aço e de concreto para auxílio à concepção de projetos arquitetônicos.** 2013. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

MONTEIRO, M. **Concepção estrutural: qual a melhor para o meu empreendimento?** 2017. Disponível em: <<https://www.buildin.com.br/concepcao-estrutural/>>. Acesso em: 24 out. 2018.

PINTO, L. E. M. **Otimização do projeto de lajes lisas nervuradas com painéis sólidos de diferentes tamanhos.** 2016. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

REBELLO, Y. C. P. **A concepção estrutural e a engenharia.** 2007. Disponível em:
<<http://www.ceap.br/material/MAT16032009171558.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2018.

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

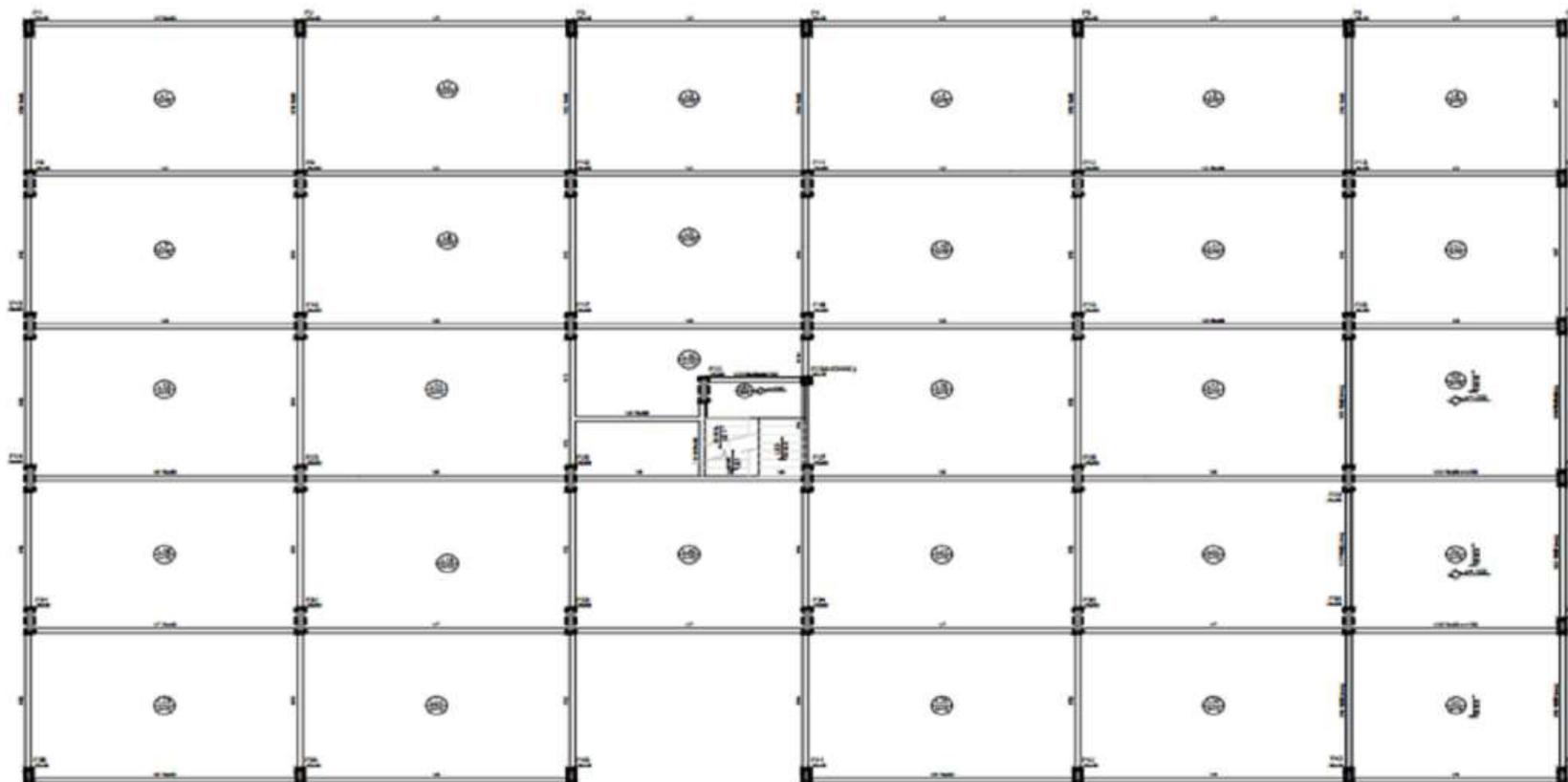
ROCHA, C *et al.* **Projeto arquitetônico de prédio de uso misto.** 2018. Plantas diversas e imagens das fachadas.

SILVA, A. R. **Análise comparativa de custos de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado**. 2002. 211 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas)- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

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

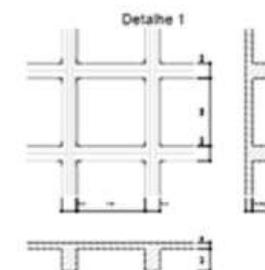
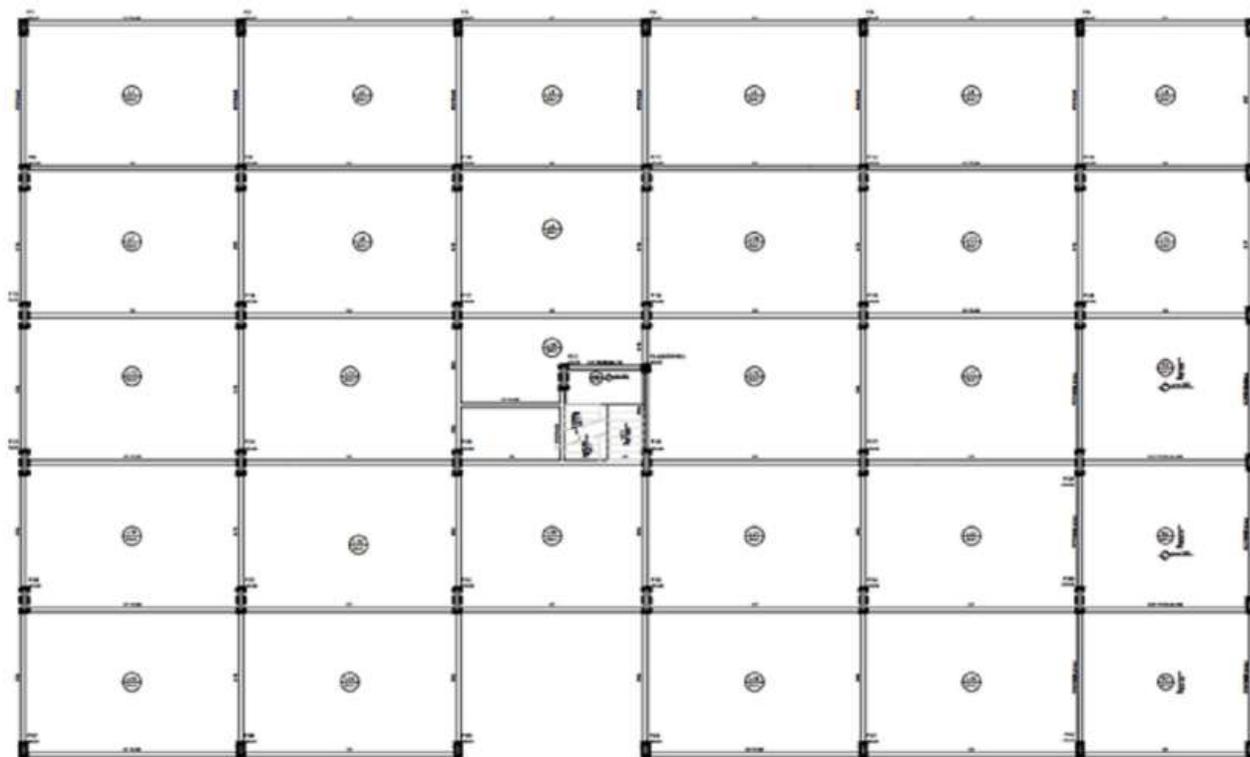
TQS INFORMÁTICA LTDA. **Análise estrutural**. S/d. Disponível em <<http://www.tqs.com.br/conheca-os-sistemas-cadtqs/analise-estrutural/analise-estrutural>>. Acesso em: 24 out. 2018.

APÊNDICE A – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL- TÉRREO



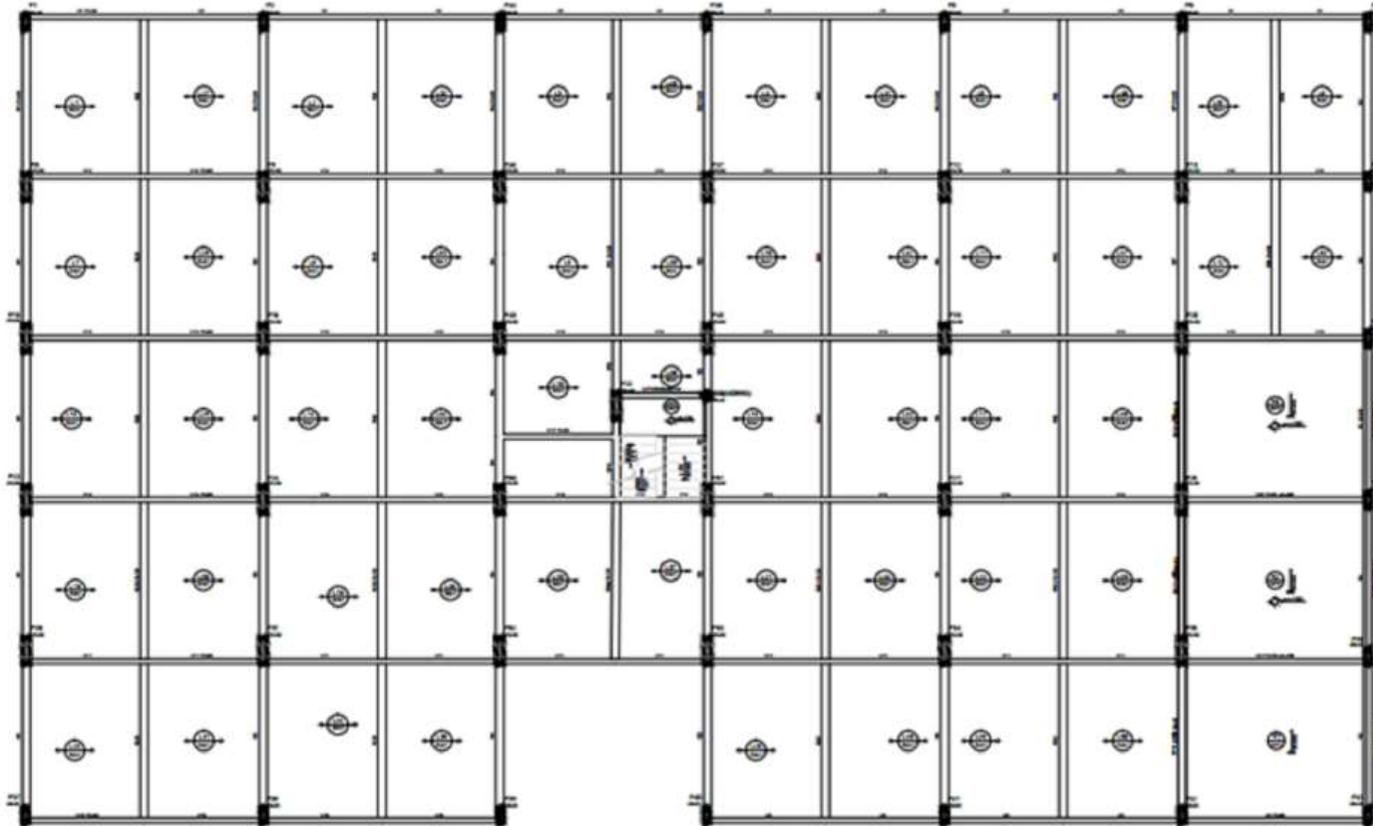
1 MODELO I

APÊNDICE A – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL- TÉRREO



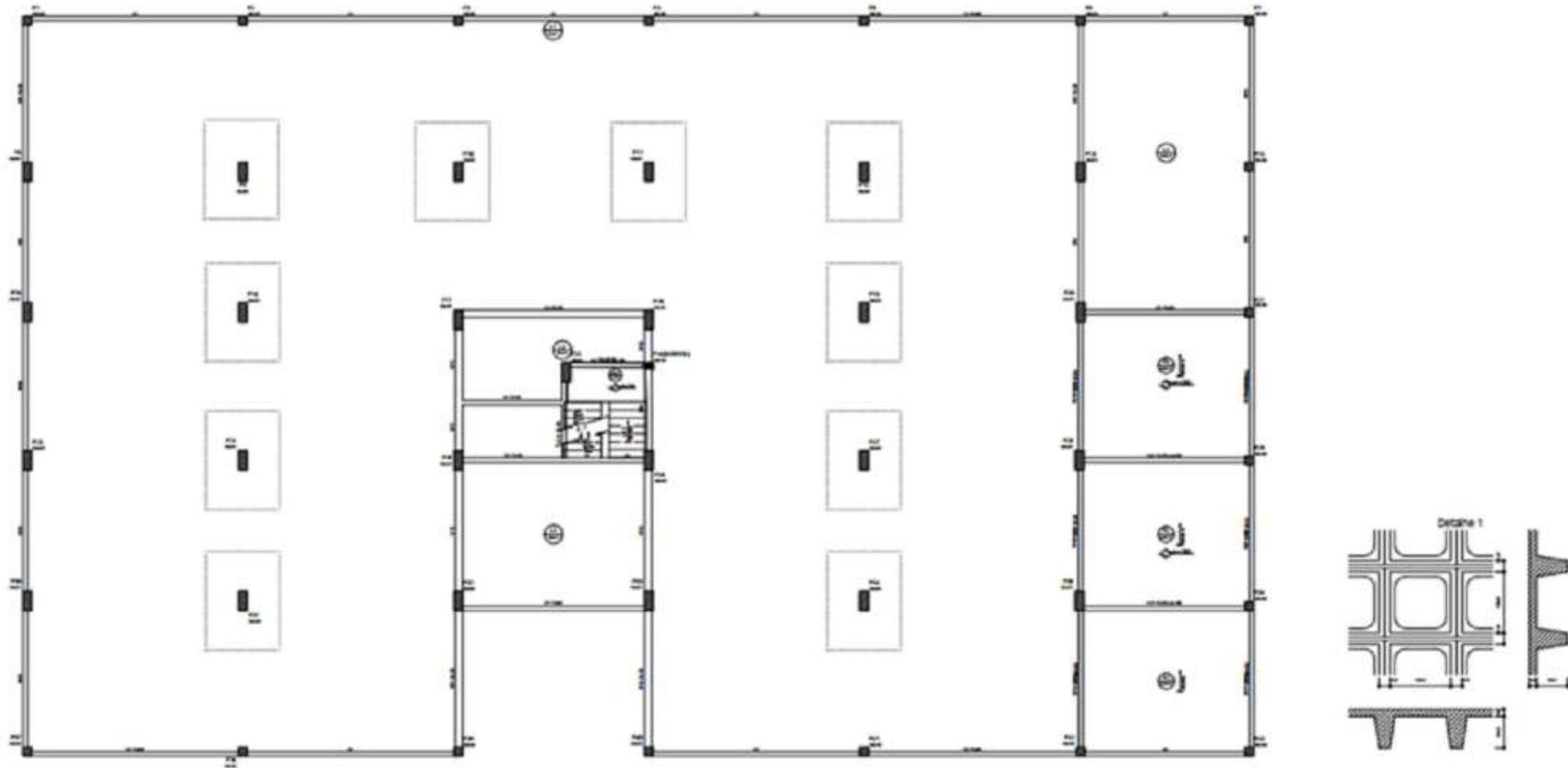
2 MODELO II

APÊNDICE A – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL- TÉRREO



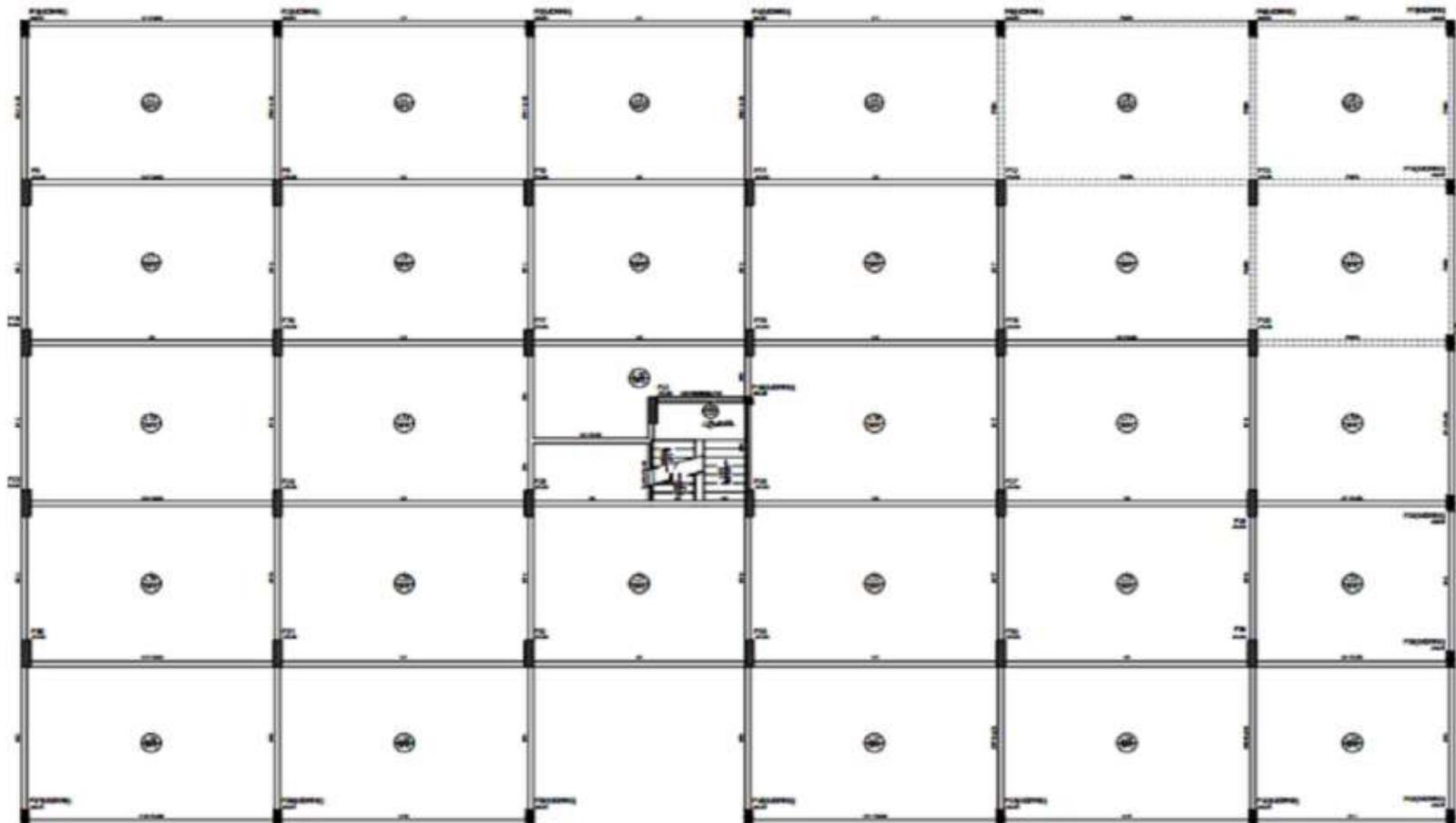
3 MODELO III

APÊNDICE A – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL- TÉRREO



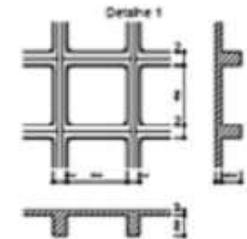
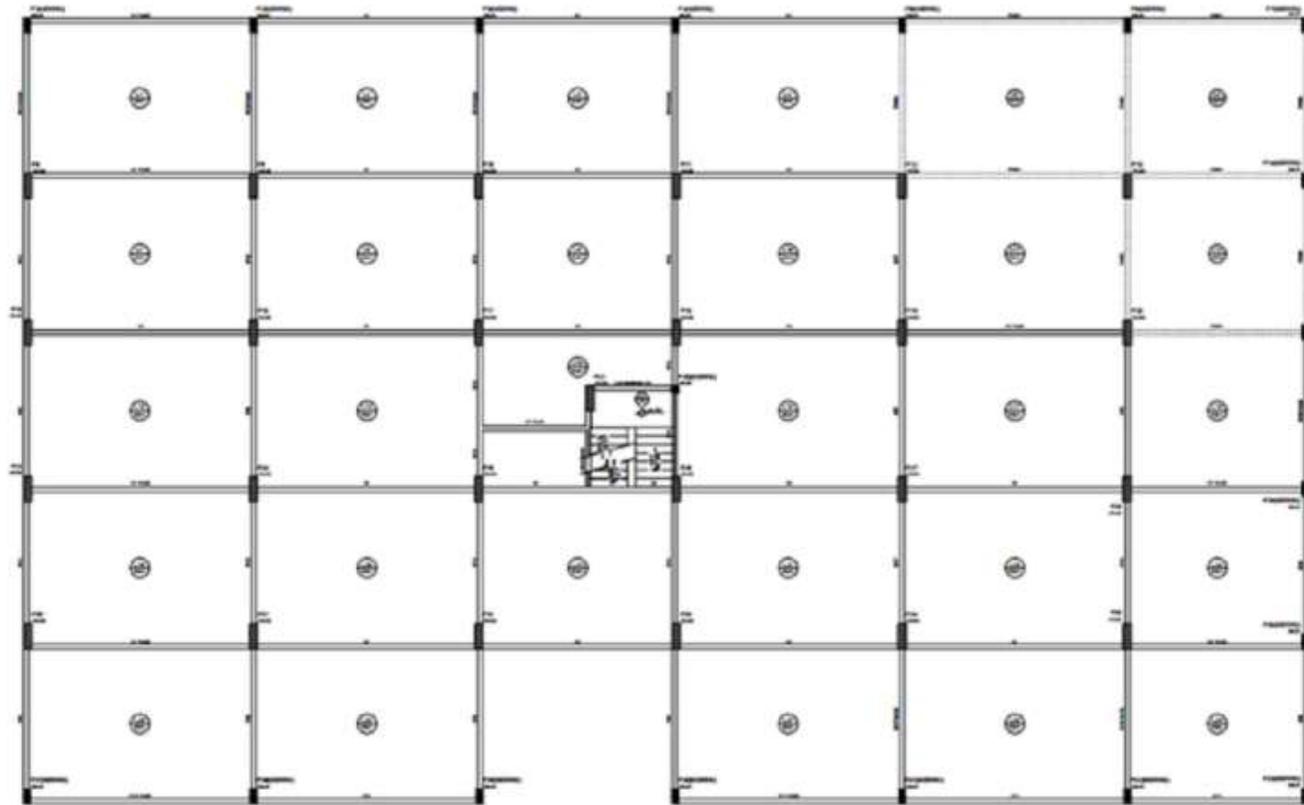
4 MODELO IV

APÊNDICE B – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL- MEZANINO



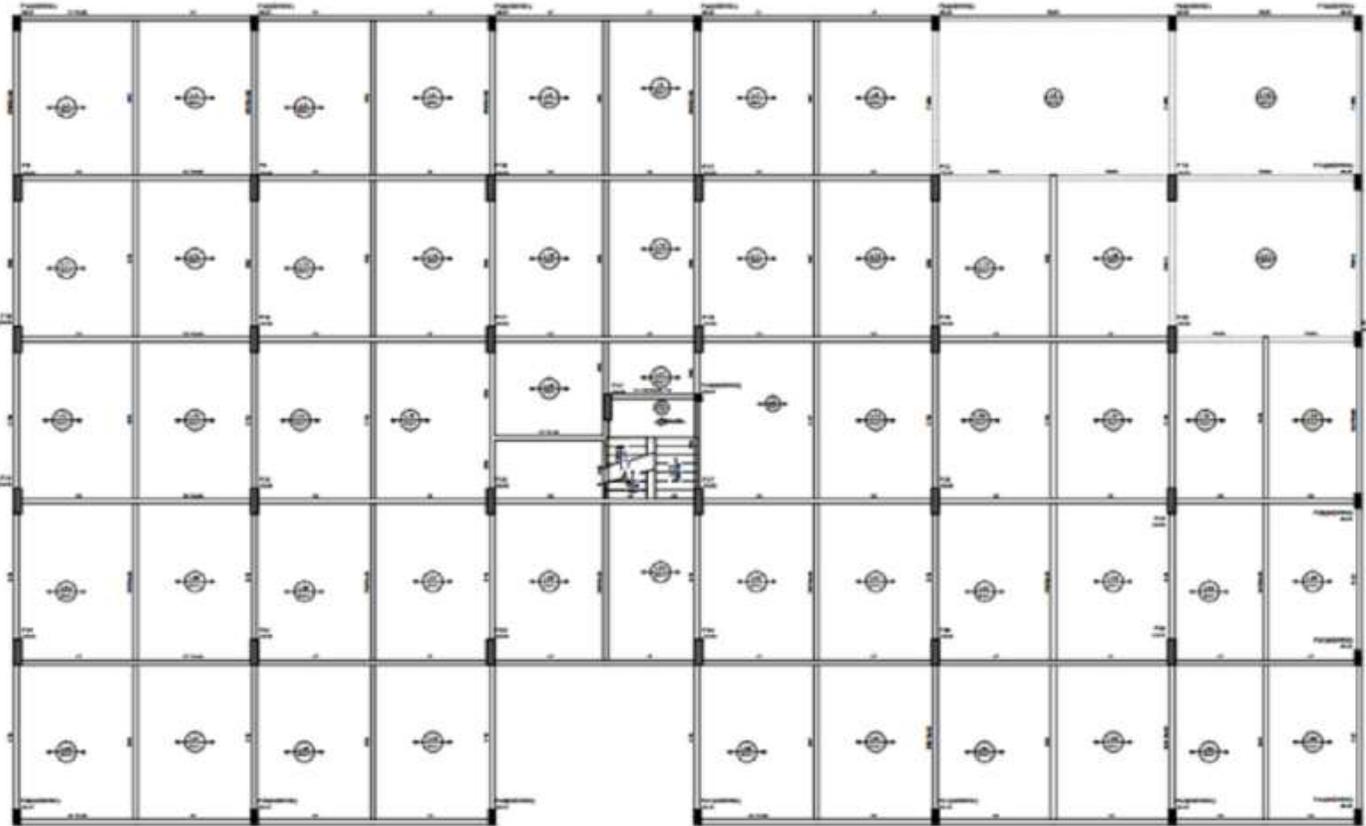
1 MODELO I

APÊNDICE B – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL- MEZANINO



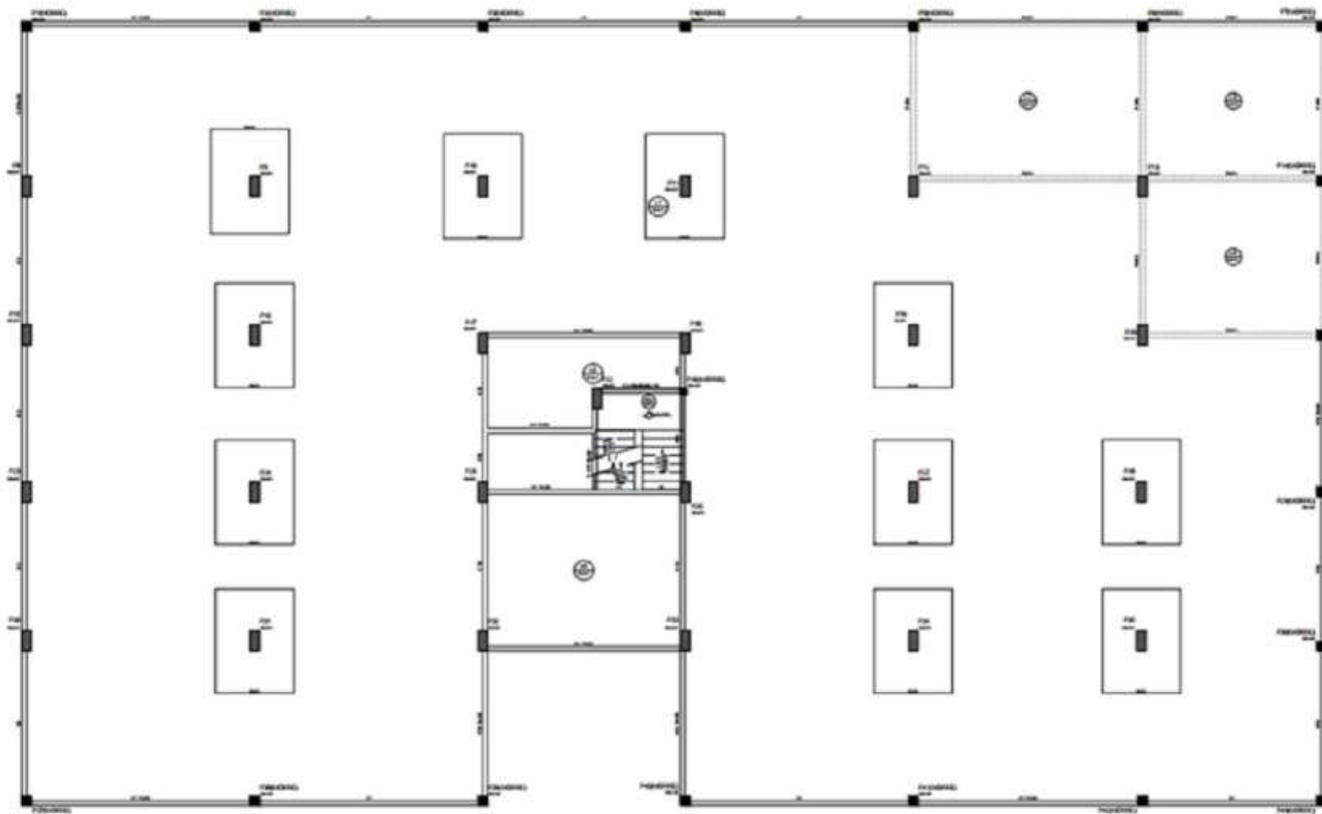
2 MODELO II

APÊNDICE B – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL- MEZANINO



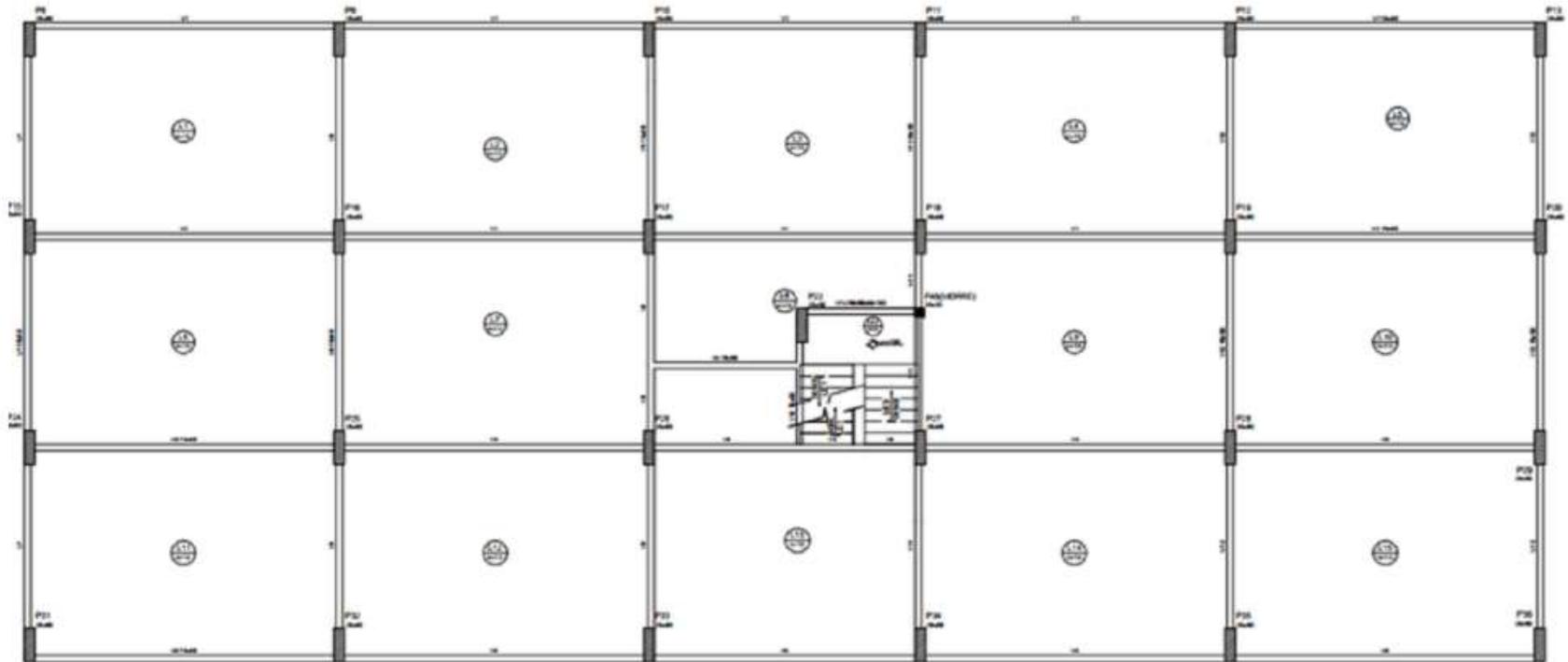
3 MODELO III

APÊNDICE B – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL- MEZANINO



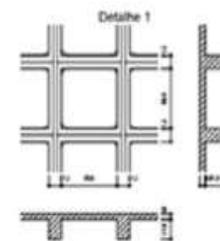
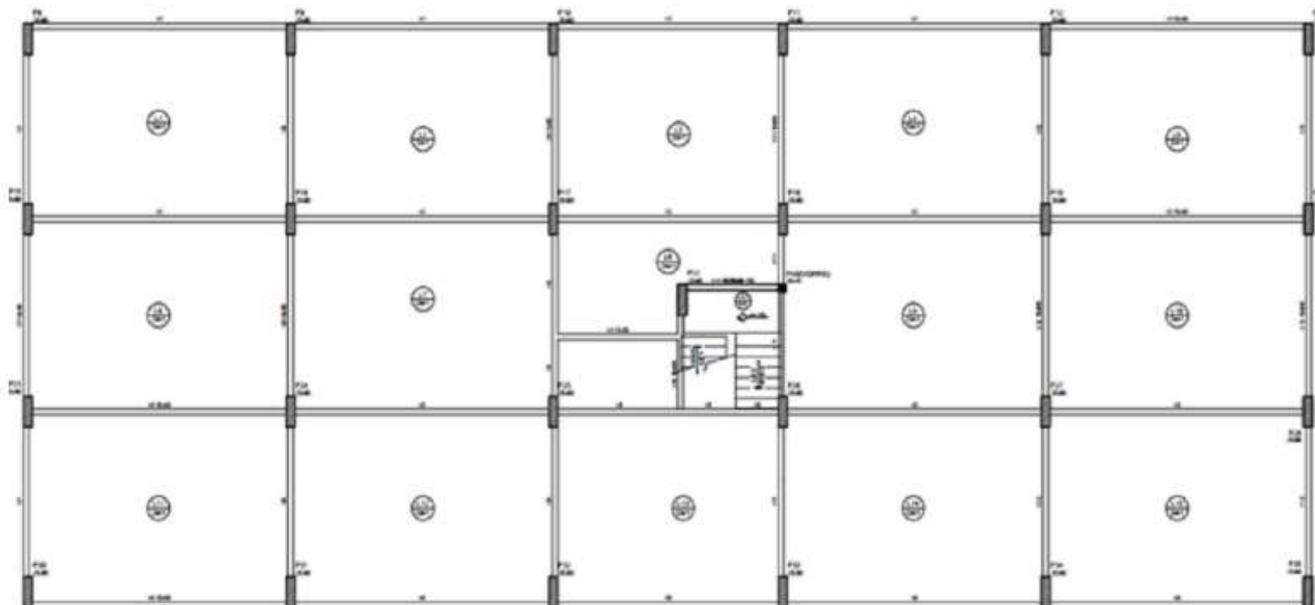
4 MODELO IV

APÊNDICE C – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TIPO



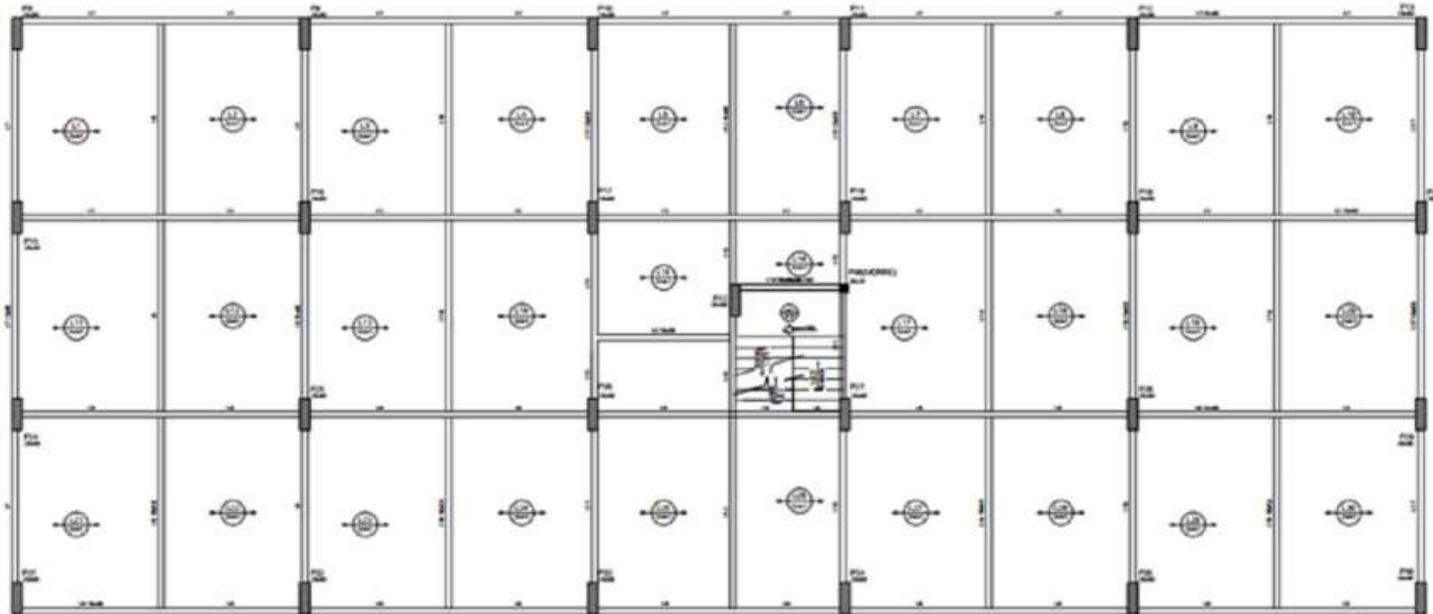
1 MODELO I

APÊNDICE C – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TIPO



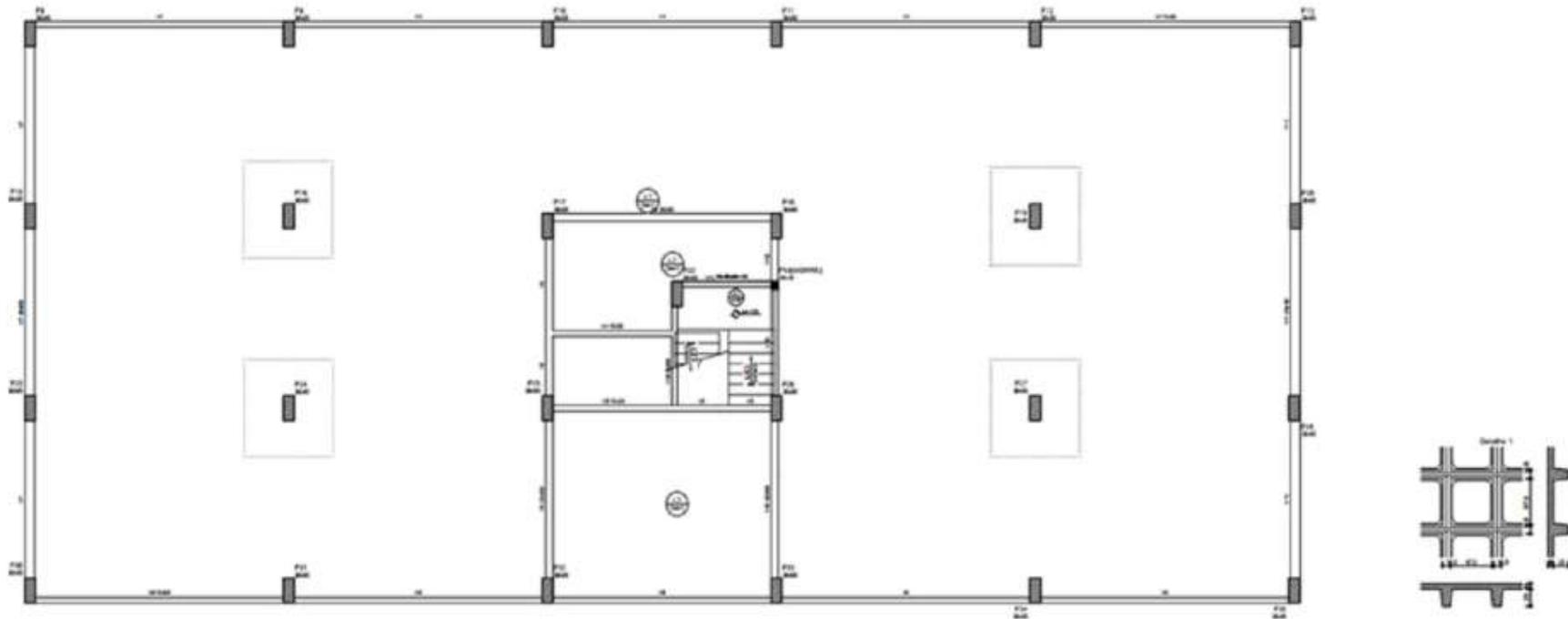
2 MODELO II

APÊNDICE C – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TIPO



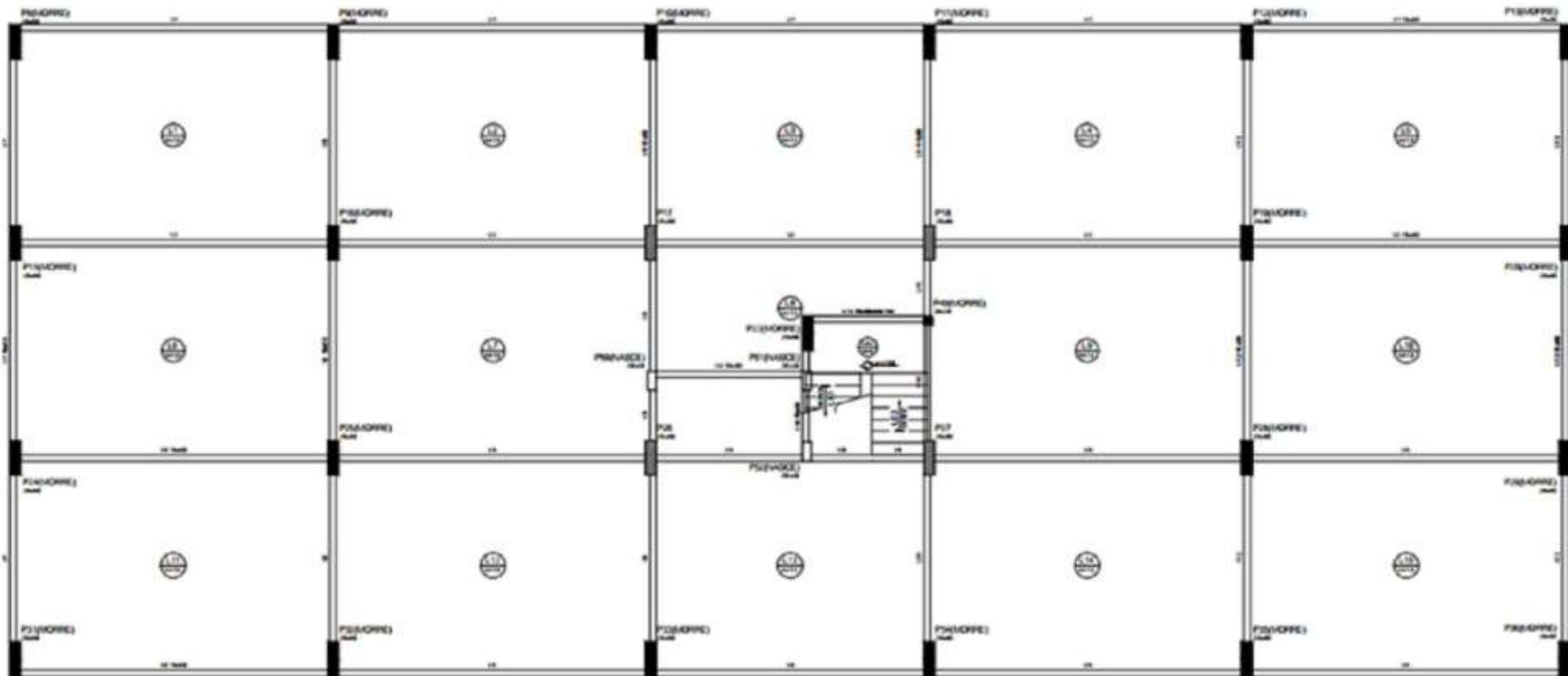
3 MODELO III

APÊNDICE C – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TIPO



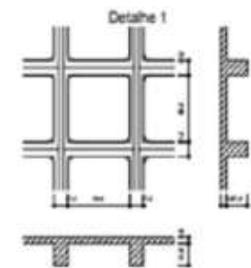
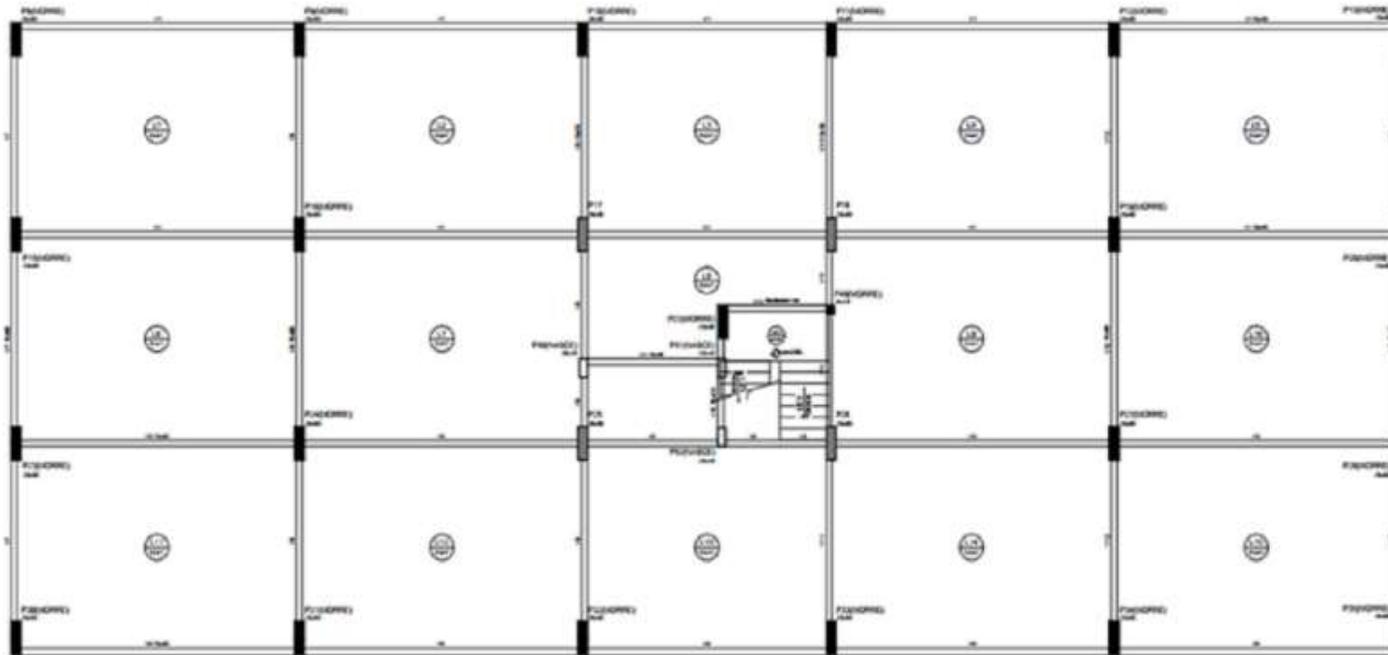
4 MODELO IV

APÊNDICE D – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL COBERTA



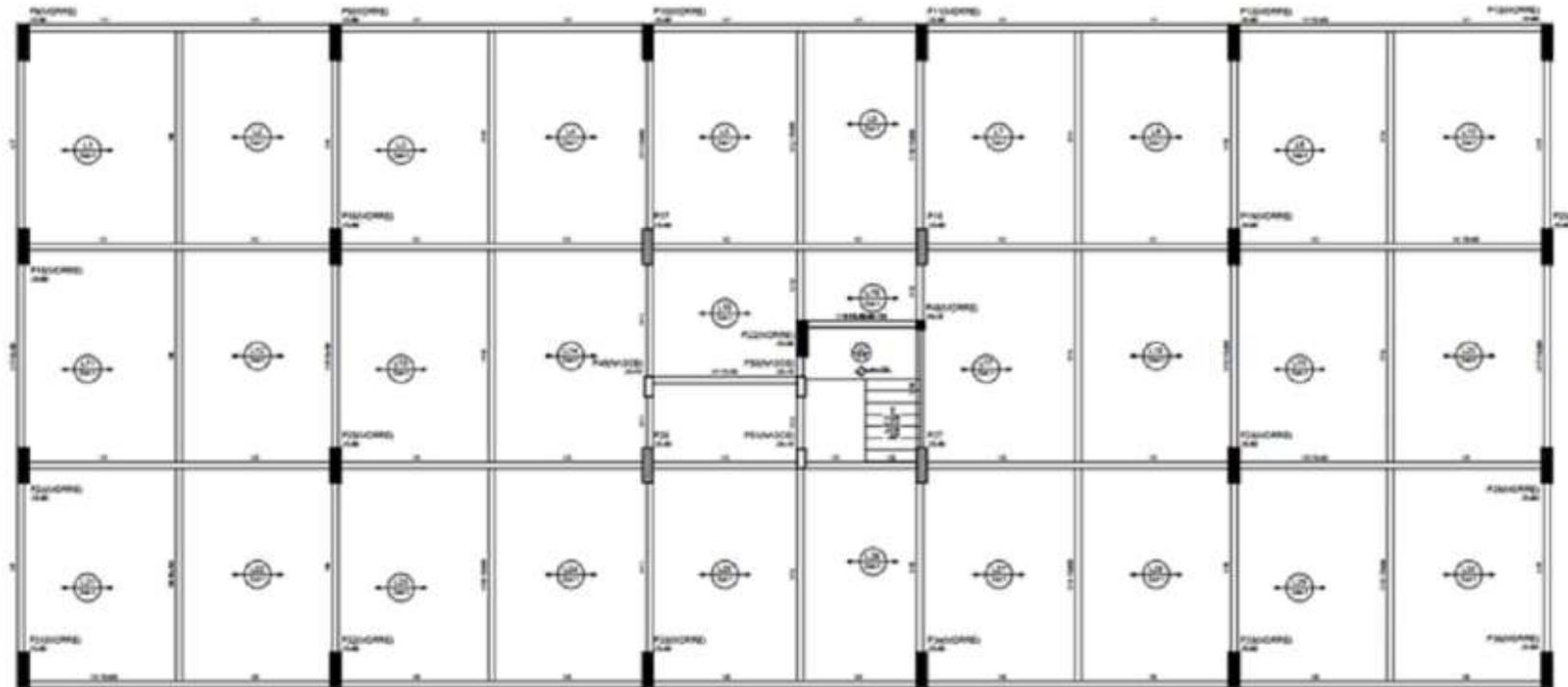
1 MODELO I

APÊNDICE D – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL COBERTA



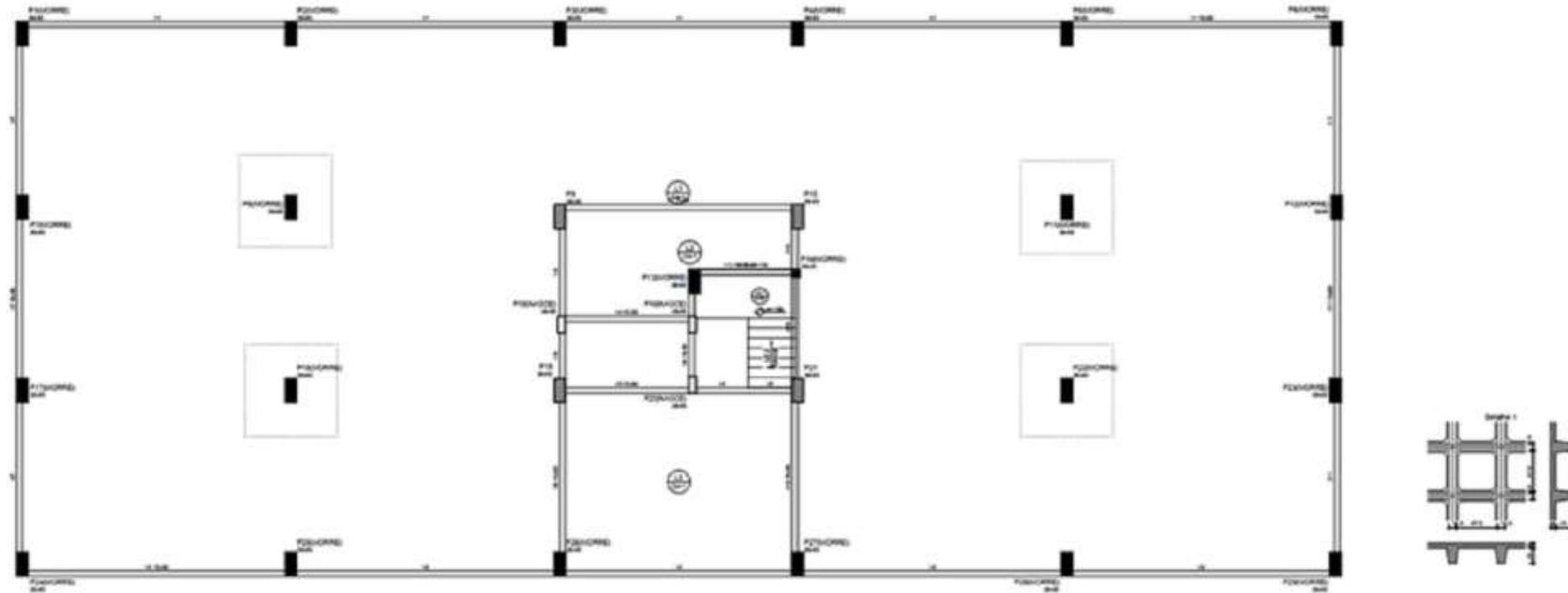
2 MODELO II

APÊNDICE D – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL COBERTA



3 MODELO III

APÊNDICE D – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL COBERTA



4 MODELO IV