



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

DIEGO DA SILVA AMORIM

**ESTUDO COMPARATIVO DE QUANTITATIVOS DE INSUMOS E CUSTOS
TOTAIS ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS DE LAJE PARA UM
DETERMINADO PROJETO ARQUITETÔNICO**

João Pessoa

2018

DIEGO DA SILVA AMORIM

**ESTUDO COMPARATIVO DE QUANTITATIVOS DE INSUMOS E CUSTOS
TOTAIS ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS DE LAJE PARA UM
DETERMINADO PROJETO ARQUITETÔNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal da Paraíba, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira

João Pessoa

2018

A524e Amorim, Diego da Silva

Estudo comparativo de quantitativos de insumos e custos totais entre soluções estruturais de laje para um determinado projeto arquitetônico./
Diego da Silva Amorim. – João Pessoa, 2018

80f. il.:

Orientador: Prof. Enildo Tales Ferreira.

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

1. Concreto Armado 2. Lajes treliçadas 3. Lajes maciças 4. Lajes
nervuradas. I. Título

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

DIEGO DA SILVA AMORIM

ESTUDO COMPARATIVO DE QUANTITATIVOS DE INSUMOS E CUSTOS TOTAIS ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS DE LAJE PARA UM DETERMINADO PROJETO ARQUITETÔNICO

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



Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

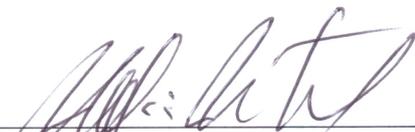




Prof. Dr. Carlos Antônio Taurino de Lucena

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

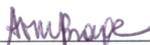




Prof. Dr. Ubiratan Henrique Oliveira Pimentel

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB





Prof.^a Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Matrícula Siape: 1668619

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que, com palavras e gestos, deram-me forças para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meus pais, Dorivaldo e Marineide, que apesar da vida não ter lhes permitido o acesso à educação formal, sempre reconheceram a importância da busca pelo conhecimento, sendo minha incessável fonte de incentivo e apoio. O orgulho e amor que vocês sentem por mim é reflexo dos sonhos um dia em mim depositados.

A toda minha família, por todas as palavras de incentivo, também agradeço à minha irmã, Deisiane, pela compreensão, carinho e paciência na convivência diária

Ao meu professor orientador, Enildo Tales Ferreira, pela sua confiança, disposição, envolvimento com o trabalho e bons préstimos em compartilhar seus conhecimentos relacionados ao concreto armado. Aos professores Taurino e Ubiratan, que gentilmente se dispuseram a participar da banca examinadora.

Aos demais professores universitários e da educação básica, dos quais tive oportunidade de ser aluno ao longo de toda minha vida, por terem contribuído com minha formação ética e profissional. Aos técnicos-administrativos da universidade, que atuam nos bastidores, sem reconhecimento dos alunos, e que se tornaram meus colegas de profissão.

A Leandro Guedes e Leandro Vaz, que contribuíram diretamente com este trabalho, sempre dispostos a ouvir minhas ideias e expressar contribuições. Aos amigos da faculdade, em especial Lays Rayanne, Amanda Lacerda, Ramon Burkhard, Emanuel Matias, Carolina Wanderley, Ana Rachel Melo, Camila Pereira e Afonso Eris, por todo o conhecimento desenvolvido e compartilhado em grupo, além dos momentos de descontração.

A todos os meus amigos, em especial aos de longa data, com os quais compartilho os momentos de alegria e de tristeza, e são testemunhas da realização e do significado pessoal que esta etapa representa na minha vida. Agradeço o apoio de vocês.

À Universidade Federal da Paraíba, aos órgãos de fomento à pesquisa e aos programas institucionais de apoio às atividades de ensino, pesquisa e extensão, por acreditarem que a educação pública pode ser de qualidade.

RESUMO

Este trabalho trata de um estudo comparativo de custos totais e quantitativos de insumos para uma estrutura de concreto armado. Um edifício originalmente concebido com lajes pré-fabricadas treliçadas com blocos de enchimento cerâmicos (chamado modelo 1). Para isto, propõem-se três novos modelos estruturais: utilizando lajes treliçadas com blocos de enchimento de poliestireno expandido (EPS) sem alteração do vigamento original (modelo 2), com lajes maciças (modelo 3) e com lajes nervuradas moldadas no local com cubetas (modelo 4), ambos com diminuição de vigas. O dimensionamento e a obtenção de índices de consumos de concreto, aço, forma e custos (totais e por elemento estrutural) para as soluções elencadas foram realizados com o auxílio do programa Eberick versão 2018, sob os mesmos critérios de cálculo. Pôde-se observar a variação dos índices de consumos de concreto, aço e forma entre os modelos propostos e a solução mais adequada do ponto de vista econômico, para este caso específico (modelo 2).

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

ABSTRACT

This paper is based on a comparative research of overall costs and quantities of materials for a reinforced concrete structure. The building originally designed with precast lattice-reinforced concrete slabs, and brick filler blocks (called model 1). For this, three new structural models are proposed: using precast lattice-reinforced concrete slabs with filler blocks of expanded polystyrene (EPS) maintaining the original framework (model 2), with solid slabs (model 3) and waffle slabs with moulds (model 4), both reducing the number of beams. The design and results in terms of concrete, steel, formwork usage indexes and costs (total and by structural elements) to the indicated solutions were accomplished with the support of Eberick version 2018 software, under the same calculation criteria. It was possible to observe the variation of the concrete, steel and formwork consumption indexes among the proposed models and the most economically adequate solution for this specific case (model 2).

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

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental.....	16
Quadro 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.....	16
Quadro 3 – Correspondência entre a classe de agressividade e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.....	17
Quadro 4 – Especificações técnicas das treliças.....	26
Quadro 5 – Características de blocos de enchimento cerâmicos.....	27
Quadro 6 – Estimativas de gastos por etapa de obra (%).....	32
Quadro 7 - Pavimentos da estrutura.....	38
Quadro 8 – Cobrimento das armaduras de acordo com o tipo de elemento.....	40
Quadro 9 – Características do concreto adotadas nos projetos.....	40
Quadro 10 – Características do vento adotadas nos projetos.....	41
Quadro 11 – Custos referentes ao concreto.....	46
Quadro 12 – Custos referentes ao aço.....	47
Quadro 13 – Custos referentes às formas.....	47
Quadro 14 – Custos referentes às lajes treliçadas com enchimento cerâmico.....	48
Quadro 15 – Custos referentes às lajes treliçadas com enchimento de EPS.....	48
Quadro 16 – Custos referentes às lajes nervuradas de cubetas.....	48
Quadro 17 – Índices de consumo de concreto.....	49
Quadro 18 – Espessuras médias de projeto.....	51
Quadro 19 – Índices de consumo de forma.....	51
Quadro 20 – Índices de consumo de forma por volume de concreto (m^2/m^3).....	53
Quadro 21 – Índices de consumo de aço por área.....	54
Quadro 22 – Índice de consumo de aço por volume de concreto.....	54
Quadro 23 – Relação de custos totais por elemento.....	56

Quadro 24 – Relação de custo total por material.....	58
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Discretização de uma laje em uma malha de grelha plana.....	20
Figura 2 – Esquema de sistema construtivo de lajes maciças de concreto armado.....	21
Figura 3 – Laje nervurada com superfície plana	23
Figura 4 – Laje nervurada com nervuras aparentes	23
Figura 5 – Seções transversais de lajes pré-moldadas.....	24
Figura 6 – Exemplo ilustrativo de vigota treliçada.....	25
Figura 7 – Elementos de enchimento de material cerâmico	27
Figura 8 – Ilustração de laje treliçada com bloco de enchimento de EPS.....	28
Figura 9 – Exemplo de sistema de escoramento para cubetas na concretagem de uma laje nervurada	30
Figura 10 – Fachada sudoeste do edifício	36
Figura 11 – Fachada nordeste do edifício.....	37
Figura 12 – Planta baixa pavimento térreo.....	38
Figura 13 – Planta baixa pavimento tipo	38
Figura 14 – Pórtico 3D da estrutura original	39
Figura 15 – Gráfico para pré-dimensionamento de lajes maciças em função do menor vão ...	44
Figura 16 – Consumos de concreto moldado in loco	50
Figura 17 – Consumos de forma.....	52
Figura 18 – Consumo de aço para pilares e fundações.....	55
Figura 19 – Consumos de aço para vigas, lajes e totais	55
Figura 20 – Custos totais para vigas, pilares e lajes	57
Figura 21 – Diferenças de custo em relação ao modelo original, para vigas, lajes e no total ..	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1 Lajes: generalidades	18
3.1.1 Classificação das lajes	18
3.1.2 Metodologias de cálculo dos esforços em lajes.....	19
3.2 Sistemas estruturais constituídos por lajes maciças.....	20
3.3 Sistemas estruturais compostos por lajes nervuradas	22
3.3.1 Lajes pré-fabricadas treliçadas	24
3.3.2 Lajes nervuradas moldadas no local com cubetas	29
3.4 Quantitativos e indicadores de consumo em projetos de estruturas de concreto armado	31
4 METODOLOGIA.....	34
4.1 Análise e dimensionamento estrutural	35
4.2 Estudo de caso – apresentação do edifício.....	36
4.2.1 Critérios de projeto	39
4.2.2 Modelo 1 – Lajes treliçadas com blocos de enchimento cerâmicos.....	42
4.2.3 Modelo 2 – Lajes treliçadas com blocos de enchimento de EPS	43
4.2.4 Modelo 3 – Lajes maciças	43
4.2.5 Modelo 4 – Lajes nervuradas moldadas no local com cubetas	45
4.3 Considerações sobre os custos dos insumos	46
5 RESULTADOS – ESTUDO COMPARATIVO	49
5.1 Comparativo em termos de consumo de concreto	49
5.2 Comparativo em termos de consumo de forma	51

5.3 Comparativo em termos de consumo de aço.....	53
5.4 Comparativo em termos de custo.....	56
6 CONCLUSÕES.....	59
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
APÊNDICE A – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-2,95	65
APÊNDICE B – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-5,90	69
APÊNDICE C – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-11,80	73
APÊNDICE D – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-14,75	77

1 INTRODUÇÃO

Na fase de concepção estrutural, se escolhe qual sistema estrutural é mais adequado para o projeto arquitetônico considerado. Esse procedimento é de fundamental importância, pois implica diretamente que a estrutura terá de atender as exigências do projeto arquitetônico, os requisitos de economia e, principalmente, de segurança. Esta é uma tarefa que depende do conhecimento de processos de cálculos, fica condicionada aos materiais a disposição do calculista, precisa considerar as disponibilidades de mão-de-obra e de equipamentos de construção, além de tantas outras variáveis que podem influenciar na definição do modelo estrutural que possibilite a eficiência global do projeto da construção.

Martha (2015) diz que o projeto estrutural tem por objetivo a concepção de uma estrutura que atenda a todos os requisitos para os quais ela será construída, satisfazendo questões de segurança, condições de utilização, econômicas, estética, questões ambientais, construtivas e restrições legais.

É importante que a escolha do sistema estrutural seja feita ainda na fase de concepção do projeto de arquitetura, pois ela traz implicações de forma e espaço arquitetônico e impõe restrições que devem ser observadas na projeção das edificações. Inojosa e Buzar (2015) destacaram a dificuldade de integração entre os projetos de arquitetura e estrutura, resumindo-a em dois fatores: "Primeiro, o fato de que na maioria dos casos os arquitetos não levam em conta a adequação do sistema estrutural ao projeto ainda na fase de criação. Segundo por existir um distanciamento do calculista com as questões formais e estéticas do projeto arquitetônico".

Além disso, a economicidade dos projetos de construção civil é um fator que deve ser observado. No que diz respeito ao projeto estrutural, diante das especificidades de cada situação, muitas vezes o problema consiste na determinação de uma estrutura que atenda às solicitações impostas de maneira mais econômica, proporcionando menores custos e uso racional dos insumos.

A construção civil aparece como um setor significativo da economia, representando uma parcela considerável da soma de todas as riquezas produzidas por um país. Segundo a Federação das Indústrias do Distrito Federal (FIBRA), a construção civil representou 6,2% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil em 2014. Este fato se estabeleceu em decorrência do crescimento do setor ao longo da história, diretamente ligado ao crescimento populacional e à expansão econômica.

Sendo uma atividade tão relevante, a construção civil requer uma grande quantidade de matérias-primas que tem sua origem na natureza, gerando grandes impactos ambientais. O uso racional destes recursos naturais é tema recorrente nas discussões atuais, visto que desenvolvimento sustentável se baseia na ideia de que eles são escassos. Isto significa que é pertinente encontrar formas de utilizar menos recursos, otimizando esta exploração, além de outras técnicas, como reuso ou reciclagem. Assim, é essencial que todos os envolvidos com o setor busquem constantemente formas de mitigar o impacto causado sobre o meio ambiente.

Então, diante das possibilidades multifatoriais que implicam sobre o emprego de um determinado sistema estrutural, é interessante que os projetistas busquem soluções que resultem em menores quantitativos de material, para que se possa garantir que os recursos estão sendo empregados da melhor maneira.

A relação entre quantidade de materiais e custo total da obra não é direta e é uma tarefa complexa. Albuquerque (1998) explica a evolução do conceito de estrutura econômica. Primeiramente havia uma preocupação em se trabalhar com estruturas mais esbeltas possíveis. Atualmente, é priorizada a padronização das formas, tanto para facilitar o reaproveitamento, quanto para aumentar a produtividade da mão-de-obra.

Sendo assim, faz-se necessária a relativização das situações, pois a economia em quantitativos pode representar aumento de custos, devido a fatores como os regionais, ligados à disponibilidade dos insumos e qualificação dos trabalhadores.

Restringindo a situação ao sistema estrutural de edifícios em concreto armado, alguns fatores que implicam diretamente nos quantitativos e custos vêm das escolhas feitas pelo projetista na fase da concepção estrutural. Por exemplo, a adoção de elementos pré-fabricados ou moldados in loco ou do tipo de laje empregado. A esta situação cabe uma análise caso a caso, em razão da dimensão das variáveis que influem neste processo.

Sendo assim, é pertinente uma análise comparativa em termos quantitativos dos materiais empregados para uma mesma solução projetual, tanto por aspectos econômicos quanto ambientais.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral: Comparar o custo entre as estruturas do modelo 1 (projeto original, em lajes treliçadas com blocos cerâmicos) com os modelos 2 (lajes treliçadas com blocos de EPS), 3 (lajes maciças) e 4 (lajes nervuradas com cubetas) em um estudo de caso para definir qual a solução entre os projetos estruturais apresenta melhor resultado.

Objetivos Específicos:

Para aumentar as opções de resultados da solução mais econômica para esse estudo de caso:

- Refazer os processos de cálculos substituindo as lajes treliçadas com blocos cerâmicos por blocos em EPS (poliestireno expandido).
- Rever o lançamento da estrutura desse estudo de caso reduzindo algumas vigas para adequar a utilização de lajes maciças ou nervuradas com formas em cubetas.
- Comparar os resultados de quantitativos de aço, concreto e forma para as soluções elencadas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As estruturas de concreto armado possuem uma empregabilidade muito variada. Pode-se destacar seu uso em barragens, pontes, obras de saneamento, de pavimentação, além de serem utilizadas tanto em casa simples quanto nos mais altos prédios do mundo. A maior parte das novas edificações construídas nas áreas urbanas brasileiras são baseadas no sistema de concreto armado, valendo tanto para construções formais quanto informais (SANTOS, 2008, p.15).

Em relação ao consumo deste material, estima-se que são consumidas anualmente 11 bilhões de toneladas de concreto, o que resulta em um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. Acredita-se que no Brasil saiam das dosadoras 30 milhões de metros cúbicos. (PEDROSO, 2009, p.14).

Devido a sua alta empregabilidade, é esperado que este material tenha uma série de vantagens, que ajudaram na consolidação do concreto armado na construção civil. Entre elas, Pinheiro (2007) destaca:

- É moldável, permitindo grande variabilidade de formas e concepções arquitetônicas.
- Apresenta boa resistência à maioria dos tipos de solicitação, desde que seja feito um correto dimensionamento e um adequado detalhamento das armaduras.
- A estrutura é monolítica, fazendo com que todo o conjunto trabalhe quando a peça é solicitada.
- Baixos custos dos materiais – água e agregados graúdos e miúdos.
- Processos construtivos conhecidos e bem difundidos em quase todo o país.
- Facilidade e rapidez na execução, principalmente se forem utilizadas peças pré-moldadas.
- O concreto é durável e protege a armação contra a corrosão.
- Os gastos de manutenção são reduzidos, desde que a estrutura seja bem projetada e adequadamente construída.
- O concreto é pouco permeável à água, quando executado em boas condições de plasticidade, adensamento e cura.
- É um material seguro contra o fogo, desde que a armadura seja convenientemente protegida pelo cobrimento.
- É resistente a choques e vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e a desgastes mecânicos.

Estas vantagens proporcionaram o advento do sistema estrutural formado por lajes, vigas e pilares como o mais comum e normalmente empregado nas obras da construção civil.

No que diz respeito à garantia da durabilidade destas estruturas, os principais mecanismos estabelecidos pelas normas brasileiras dependem da classe de agressividade

ambiental. Esta classificação, que pode ser vista no Quadro 1 (Tabela 6.1 da NBR 6118:2014), leva em consideração o tipo de ambiente ao qual o material estará exposto.

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível 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).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Tabela 6.1, ABNT NBR 6118:2014

As ações que implicam na perda da qualidade da estrutura, prejudicando a durabilidade, geralmente estão relacionadas a efeitos físicos e químicos, visto que as demais ações são previstas no dimensionamento. Estes limites normativos são explicitados na ABNT NBR 6118:2014. As principais recomendações dizem respeito a fator água/cimento, classe de resistência do concreto, cobrimento mínimo das armaduras e verificações de aberturas máximas de fissuras.

Quadro 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	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

NOTAS

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

2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Tabela 7.1, ABNT NBR 6118:2014

Quadro 3 – Correspondência entre a classe de agressividade e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ 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 tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: Tabela 7.2, ABNT NBR 6118:2014

Os Quadros 02 e 03 resumem as verificações que relacionam a classe de agressividade ambiental com qualidade do concreto e cobrimento mínimo da armadura, respectivamente. Em relação à abertura de fissuras, a ABNT NBR 6118:2014 estabelece que para classe I a abertura máxima é de 0,4 mm, para classes II e III, de 0,3 mm e para Classe IV, de 0,2 mm.

Além da durabilidade, as estruturas devem atender aos critérios de segurança e devem ter bom desempenho em serviço. Ter capacidade resistente significa que é preciso haver segurança à ruptura, ou seja, a estrutura deve suportar as ações previstas com margem de segurança. Bom desempenho em serviço significa a manutenção das condições de uso durante a vida útil, sem danos que possam prejudicar a utilização da estrutura. (BASTOS, 2014, p.35).

Estes critérios são atendidos pela utilização dos métodos de cálculo na ruptura, ou dos estados-limites. A ideia é que sempre as solicitações de cálculo, com cargas majoradas, sejam menores que as solicitações últimas, consideradas com os materiais tendo sua resistência minorada. Ataíde e Corrêa (2006) dizem que este método permite um processo mais racional para o dimensionamento, “pois envolve a identificação de todos os modos de colapso ou situações em que a estrutura deixaria de atender aos requisitos para os quais foi projetada, e a determinação de níveis satisfatórios de segurança para cada estado limite.”.

As ações podem ser definidas como as influências que provocam estados de tensão ou de deformação de uma estrutura. Elas se classificam em ações permanentes (peso próprio, retração, protensão, fluência e recalques), variáveis (acidental vertical, vento, temperatura), e excepcionais. Os valores representativos das ações são estabelecidos pela ABNT NBR 6120:1980. Estas ações devem ser combinadas por meio de coeficientes de ponderação, que

dependem de fatores probabilísticos e de simultaneidade. A ABNT NBR 6118:2014, no item 11, expõe o valor destes coeficientes e detalha os procedimentos de cálculo das combinações.

3.1 Lajes: generalidades

As lajes estão entre os elementos estruturais mais comuns e mais utilizados em projetos estruturais de edificações, tendo função arquitetônica de piso ou cobertura de ambientes. De modo geral, Bastos (2015, p.1) diz que lajes são “elementos planos bidimensionais, que são aqueles onde duas dimensões, o comprimento e a largura, são da mesma ordem de grandeza e muito maiores que a terceira dimensão, a espessura. As lajes são também chamadas elementos de superfície, ou placas.”.

A ABNT NBR 6118:2014 esclarece que laje é uma maneira usual de se chamar as placas de concreto armado. Segundo a norma, placas são “Elementos de superfície plana, sujeitos principalmente a ações normais a seu plano. As placas de concreto são usualmente denominadas lajes.”.

Nos procedimentos usuais de projeto, cada painel de laje que compõe o pavimento é tratado separadamente, como se ele fosse uma laje isolada. Cada painel é, assim, chamado de laje. Traçando uma analogia, seria como definir como viga cada trecho de uma viga contínua. É comum ouvir que um pavimento é formado por várias lajes. É usual que se faça o cálculo separado de cada laje (ARAÚJO, 2010, p. 9)

Além de distribuir as ações verticais que atuam sobre seu plano, as lajes desempenham um importante papel em relação à transmissão das ações horizontais. Por terem uma rigidez muito elevada em seu plano e promoverem uma ligação entre os elementos da estrutura, as lajes atuam também distribuindo as cargas horizontais do vento sobre os pórticos de contraventamento.

3.1.1 Classificação das lajes

As classificações mais usuais de laje levam em consideração as condições de apoio, a forma geométrica (a armação) e a natureza dos materiais constituintes.

Em relação à vinculação, as bordas das lajes podem ser elencadas em três tipos: borda livre, borda simplesmente apoiada e borda engastada. A borda livre representa ausência de apoio, ou seja, os deslocamentos naqueles pontos estão livres. Nos outros dois tipos de apoio, não há deslocamentos verticais, sendo que na borda engastada também há impedimento à rotação. Este é o caso considerado quando a laje apresenta continuidade com uma vizinha que tenha rigidez suficiente para restringir este deslocamento. (PINHEIRO, MUZARDO e SANTOS, 2010, p. 3).

Em relação à disposição da armação, as lajes podem ser classificadas em armadas em uma ou duas direções. As lajes armadas em uma direção possuem a relação entre o maior e o menor vão maior que 2, já as lajes armadas em duas direções possuem esta relação menor ou igual a 2. Em processos manuais, pode-se desconsiderar os momentos fletores atuantes na maior direção, combatendo-os com armaduras de distribuição.

A classificação de lajes de acordo com as características constituintes está relacionada à geometria da seção transversal da laje e ao seu processo construtivo. As principais distinções são feitas entre lajes maciças e nervuradas, moldadas in loco ou pré-fabricadas. Estas características serão abordadas adiante.

3.1.2 Metodologias de cálculo dos esforços em lajes

Em relação a determinação dos esforços e deslocamentos em lajes, a literatura detalha vários métodos. Araújo (2010) cita alguns métodos para lajes armadas em duas direções:

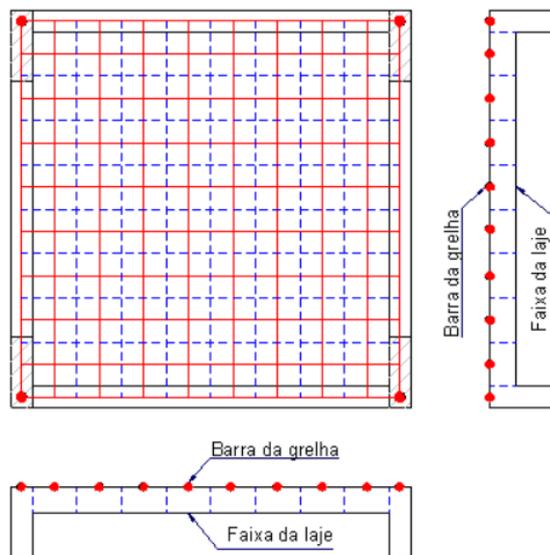
- Teoria das Grelhas;
- Teoria das linhas de ruptura;
- Teoria da flexão de placas;
- Analogia da grelha equivalente;
- Método das diferenças finitas.

Dentre eles, a analogia de grelha é muito utilizada pelos programas computacionais de dimensionamento de estruturas de concreto armado. Utilizando o processo de analogia de grelha em um programa de computador, é possível resolver pavimentos de edifícios com

grandes dimensões em planta, com diferentes contornos, com vazios e lajes com e sem vigas. (CARVALHO, 2007).

A ideia consiste em discretizar as placas em faixas, que serão substituídas por barras em seus eixos. A Figura 1 ilustra esta situação.

Figura 1 – Discretização de uma laje em uma malha de grelha plana



Fonte: AltoQI (2018)

Estas barras devem possuir as mesmas características de carregamento e de rigidez à flexão e torção das seções das placas. Com isso, há a substituição das lajes por uma malha de vigas (grelha) equivalente, que possuem aproximadamente o mesmo estado de deformação e mesmos esforços. Assim, com esses parâmetros, a matriz de rigidez da estrutura é montada.

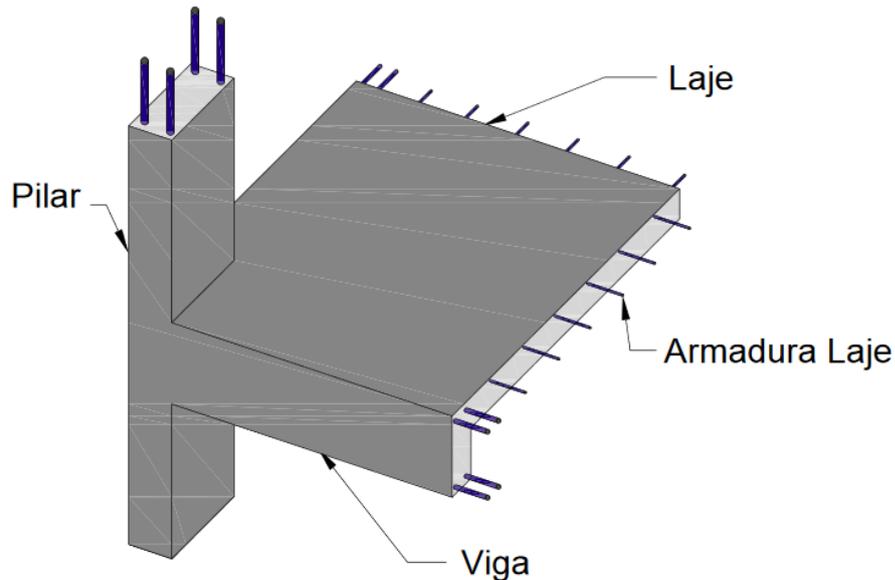
O guia de ajuda do programa AltoQI Eberick esclarece que a rigidez à flexão das vigas é importante, pois a compatibilidade de deformações é considerada. Uma vez que as lajes estão apoiadas em vigas que também se deformam, estes deslocamentos alteram os resultados dos esforços obtidos considerando as lajes com apoios indeslocáveis.

O artigo de Coelho (2013) detalha como o programa AltoQI Eberick utiliza o método matricial dos deslocamentos, a partir dos coeficientes de rigidez para barras de grelha, no cálculo dos esforços e deformações da grelha equivalente.

3.2 Sistemas estruturais constituídos por lajes maciças

Estes sistemas são formados por um conjunto de lajes maciças, apoiadas em vigas, que por sua vez apoiam-se em pilares. As lajes maciças têm sua espessura totalmente preenchida por concreto, sem vazios, contendo armaduras embutidas no concreto, e apoiadas ao longo de todo ou parte do perímetro (BASTOS, 2014). A Figura 2 ilustra um sistema estrutural composto por lajes maciças.

Figura 2 – Esquema de sistema construtivo de lajes maciças de concreto armado



Fonte: Spohr (2008)

As lajes maciças geralmente são moldadas no local e a concretagem é realizada em conjunto com as vigas, causando um efeito mais monolítico. Carvalho (2007, p. 292) explica que este tipo de laje causa um melhor aproveitamento das vigas do pavimento, pois distribui as reações em todas as vigas do contorno, diferente de outros tipos de laje. Por outro lado, ele também destaca o custo considerável das formas, ressaltando que estes custos caem consideravelmente se o pavimento se repetir e o reaproveitamento de formas e escoramentos for possível.

Este sistema apresenta menores deformações, pois as lajes maciças contribuem para o aumento da rigidez das vigas. Além disso, por ser um sistema tradicional, a mão-de-obra é bem treinada. Para grandes vãos, ele já começa a não ser indicado, já que as lajes necessitam de espessuras cada vez maiores, que geram por consequência aumento de peso próprio e de consumo de concreto, inviabilizando a solução. (SILVA, 2002, p.16).

Bastos (2014) destaca que “de modo geral não são aplicadas em construções residenciais e outras de pequeno porte, pois nesses tipos de construção as lajes nervuradas pré-fabricadas apresentam vantagens no aspecto custo e facilidade de construção.”.

Sobre os vãos indicados para se utilizar lajes maciças, a literatura indica que para valores acima de 6 metros, aproximadamente, seu uso torna-se menos interessante devido ao consumo de concreto e aço. Araújo (2010, p. 2) diz que para lajes com vãos maiores que 8 metros são empregadas geralmente lajes nervuradas.

Silva (2010) fez um estudo comparativo entre lajes maciças e nervuradas, comparando o consumo de materiais em função dos vãos empregados, e concluiu que para vãos menores que 6 metros as lajes maciças foram mais econômicas, considerando todos os painéis de laje apoiados. Em simulação com todos as lajes engastadas, ele concluiu que o emprego da laje maciça ainda era econômico abaixo de 8 metros, naquela situação específica.

Carvalho e Pinheiro (2009, p.13) dizem que para pavimentos em que o menor vão a ser vencido é pequeno ou médio (lajes com o menor vão inferior a 5 metros) e as cargas a serem suportadas não são muito elevadas, normalmente tem-se o emprego de lajes maciças apoiadas em vigas, pois a espessura demandada pelas lajes nesses casos é pequena. Entretanto, para grandes vãos, a laje maciça passa a ser antieconômica, pois a espessura da laje necessária para atender aos estados limites últimos e de serviço será elevada.

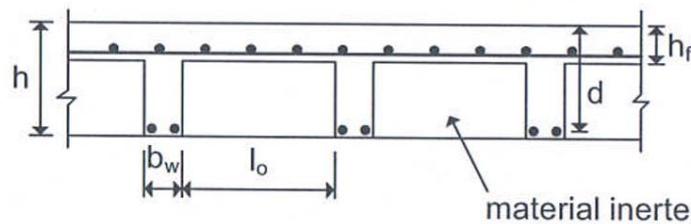
3.3 Sistemas estruturais compostos por lajes nervuradas

O item 14.7.7 da ABNT NBR 6118:2014 diz que lajes nervuradas são 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.

No dimensionamento à flexão de seções em concreto armado, a contribuição do concreto da zona tracionada é desconsiderada, ou seja, assume-se que toda a força de tração do momento resistente é absorvida pelo aço. Então essa porção de concreto acaba apenas sendo convertida em peso próprio, aumentando os quantitativos de materiais e consequentemente os custos. Sendo assim, lajes nervuradas conseguem um aumento significativo do braço de alavanca da seção resistente sem um engrossamento total da laje, por meio das nervuras.

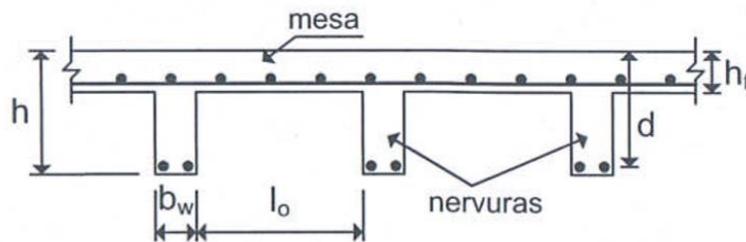
No espaço entre as nervuras pode ser colocado material inerte, sem função estrutural, que geralmente possui peso específico menor que o do concreto. As Figuras 3 e 4 ilustram cortes de lajes nervuradas nestas situações. Ele tem finalidade de tornar a superfície inferior plana ou servir de molde para a capa da laje e as nervuras. Os materiais mais utilizados são blocos cerâmicos, de poliestireno expandido (EPS) e de concreto ultraleve.

Figura 3 – Laje nervurada com superfície plana



Fonte: Araújo (2010)

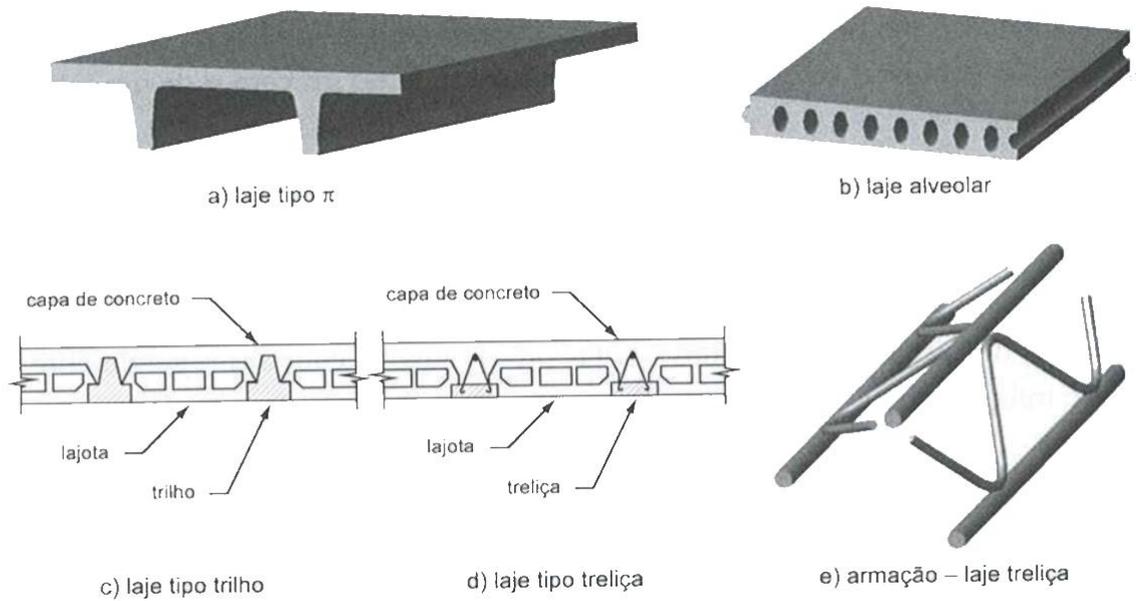
Figura 4 – Laje nervurada com nervuras aparentes



Fonte: Araújo (2010)

As lajes nervuradas classificam-se em pré-moldadas ou moldadas no local. As pré-moldadas podem ser nervuradas com vigotas, alveolares ou duplo tê (ou π). Exemplos de seções transversais de alguns tipos de lajes nervuradas pré-moldadas podem ser vistas na Figura 5 com destaque a armação treliçada. Neste estudo será abordado um tipo específico de lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas: as do tipo treliça.

Figura 5 – Seções transversais de lajes pré-moldadas



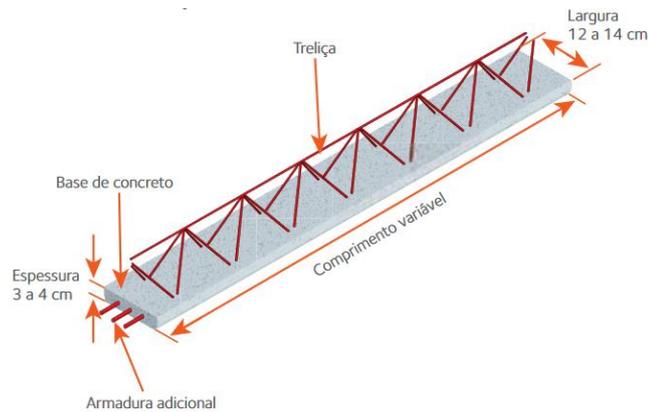
Fonte: Carvalho (2007)

Em relação às lajes nervuradas moldadas no local, elas podem utilizar moldes de plástico reforçado (chamados de cubetas), que podem ser reaproveitados, para a confecção das nervuras. Esta opção minimiza o uso de formas. Pode-se também utilizar um tablado de madeira, assim como nas lajes maciças, e substituir a parte do concreto tracionado por materiais mais baratos e leves, os materiais inertes explicitados anteriormente. (CARVALHO e PINHEIRO, 2009, v. 2, p. 17).

3.3.1 Lajes pré-fabricadas treliçadas

Referem-se a um tipo de laje nervurada unidirecional composta por vigotas pré-fabricadas com armaduras treliçadas. A NBR 14859-1:2016, que trata dos pré-requisitos dos elementos pré-fabricados empregados na construção destas lajes, em seu item 4.1.3, define vigota treliçada como “Elemento pré-fabricado estrutural constituído de concreto estrutural e armadura treliçada eletrossoldada, capaz de alojar, quando necessário, armadura passiva inferior de tração”. A Figura 6 ilustra uma vigota treliçada.

Figura 6 – Exemplo ilustrativo de vigota treliçada



Fonte: Manual técnico de lajes treliçadas ArcelorMittal (2010)

As armaduras são geralmente constituídas de aço CA-60. O Catálogo Técnico da Arcelormittal explica a constituição das treliças da seguinte maneira: ela é formada por um fio superior (banzo superior), que atua como armadura de compressão durante a montagem e concretagem da laje treliçada, e pode colaborar na resistência ao momento fletor negativo (em regiões do apoio central); dois fios inferiores (banzo inferior), os quais resistem às forças de tração oriundas do momento fletor positivo; as diagonais ou sinusoides, que, além de funcionarem como armadura resistente às forças cortantes (quando forem altas), servem para promover uma perfeita coesão ou aderência entre o concreto pré-moldado da vigota e o concreto do capeamento (moldado in loco).

As informações que podem ser vistas no Quadro 4 resumem as especificações técnicas das treliças mais utilizadas em lajes estruturais. A designação é realizada por um código iniciado por TR seguido do valor da altura da vigota em centímetros, da bitola da armadura do banzo superior (ΦS), das diagonais (ΦD) e do banzo inferior (Φi), em milímetros com zero casas decimais. Por exemplo, uma vigota TR16746 tem 16 cm de altura, fios de $\Phi 7$ mm para o banzo superior, $\Phi 4,2$ mm para as diagonais e fios de $\Phi 6$ mm para o banzo inferior.

Quadro 4 – Especificações técnicas das treliças

Designação	Altura (h) (cm)	Composição / Fios (mm)		
		Superior (ϕS)	Diagonal (ϕD)	Inferior (ϕI)
TR 08644	8,0	6	4,2	4,2
TR 08645	8,0	6	4,2	5
TR 12645	12,0	6	4,2	5
TR 12646	12,0	6	4,2	6
TR 16745	16,0	7	4,2	5
TR 16746	16,0	7	4,2	6
TR 20745	20,0	7	4,2	5
TR 20756	20,0	7	5	6
TR 25856	25,0	8	5	6
TR 25858	25,0	8	5	8
TR 30856	30,0	8	5	6
TR 30858	30,0	8	5	8

Fonte: Batista et al. (2010), apud Silva (2012)

Sobre dimensões mínimas em lajes treliçadas, as normas ABNT NBR 6118:2014 e a ABNT NBR 14859-1:2016 fixam os seguintes valores:

- A espessura da mesa deve ser maior ou igual a 1/15 da distância entre nervuras e não menor que 4 cm.
- A espessura das nervuras não deve ser inferior a 5 cm.
- A largura mínima da vigota treliçada (b_v) deve ser de 13 cm, com tolerância de 0,5 cm.
- A altura mínima da vigota treliçada (h_v) deve ser de 7,5 cm, com tolerância de 0,2 cm.

As principais vantagens do sistema composto por lajes treliçadas, em comparação ao sistema convencional de lajes maciças, são as seguintes (MUNIZ, 1991 apud SPOHR, 2008):

- Diminuição do peso próprio da laje, proporcionando alívio sobre as fundações.
- Redução significativa de formas e do escoramento.
- Redução da quantidade de estoque e movimentação de materiais no canteiro de obras.
- Lajes pré-fabricadas apresentam rapidez de execução.

Como principais desvantagens, podem ser destacados a dificuldade de execução das instalações prediais e os valores dos deslocamentos transversais, bem maiores que os apresentados por lajes maciças (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2007). Por isso, este

sistema é mais adequado para pavimentos com vãos pequenos e sem cargas excepcionais de utilização.

Em relação aos elementos de enchimento mais utilizados neste tipo de laje, destacam-se os blocos cerâmicos e blocos de EPS. Eles são considerados elementos pré-fabricados não estruturais e seus parâmetros, como dimensões, tolerâncias e cargas de ruptura, são estabelecidos pela norma ABNT NBR 14859-2:2016. Silva (2010) diz que embora estes elementos não sejam considerados estruturais para a resistência da laje, eles devem ter padrões de qualidade controlados, pois eles não devem se danificar durante o transporte, a montagem e concretagem, devido às chamadas ações de construção.

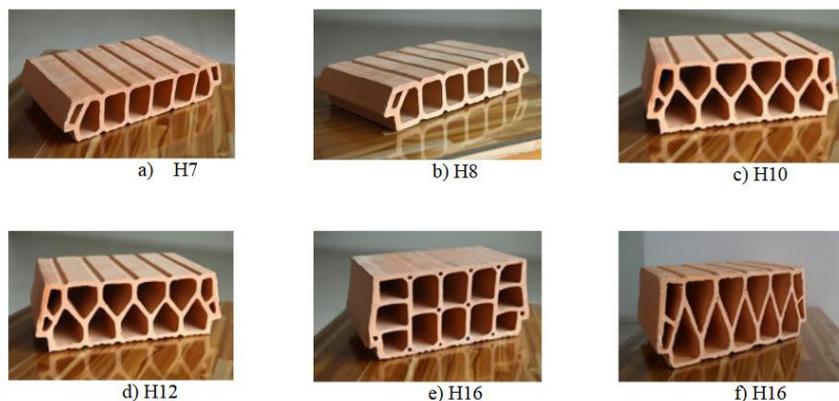
Os blocos cerâmicos, também chamados tavernas, são considerados de ruptura frágil. Silva (2012) elencou as características de alguns blocos cerâmicos encontrados no mercado, que podem ser vistas no Quadro 5. Além disso, pode-se ver diferentes tipos de blocos de enchimento cerâmico na Figura 7, destacando que os blocos cerâmicos mais comuns têm largura de 30 cm e comprimento de 20 cm.

Quadro 5 – Características de blocos de enchimento cerâmicos

Altura (H) x largura (L) x Comprimento(C) (cm)	Peso (kg)	Peças/m ²	Resistência (flexão) (KN)
7x30x20	2,75	13	≥0,7
8x30x20	3	13	≥0,7
9,5x30x20	3,4	13	≥1,0
11,5x30x20	4	13	≥1,0
16x30x20	4,9	13	≥1,0

Fonte: Silva (2012)

Figura 7 – Elementos de enchimento de material cerâmico



Fonte: Silva (2012)

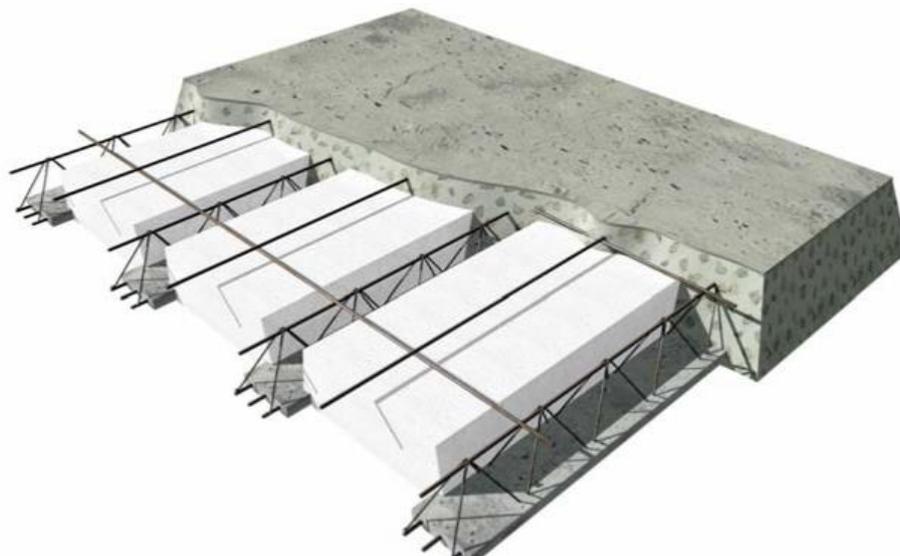
A ABNT NBR 14859-2:2016 normatiza a seguinte designação para os blocos cerâmico: Hc $h_e/b_e/c$, onde h_e representa a altura, b_e a largura e c o comprimento, respectivamente, em milímetros. O item 4.2 da referida norma determina as dimensões e tolerâncias que devem ser atendidas pelos fabricantes destes blocos.

Em relação ao EPS, diversos catálogos técnicos dos produtores deste tipo de bloco explicam que o poliestireno, um derivado de petróleo, plástico, passa por um processo de polimerização e expansão de 20 a 50 vezes, dando origem ao poliestireno expandido, resultando em um material com 98% de ar e 2% de matéria sólida.

Os blocos de EPS caracterizam-se por uma ruptura frágil, podem ser unidirecionais ou bidirecionais e os mais utilizados possuem um maior comprimento em comparação aos cerâmicos. Costumam ter dimensões como 1000 mm ou 1200 mm de comprimento. As larguras mais comuns encontradas nos catálogos são de 330 mm ou 400 mm. As alturas variam a partir de 6 mm, que são determinadas para o projeto de acordo com as alturas das treliças e da capa de concreto utilizada.

A ABNT NBR 14859-2:2016 também normatiza uma designação para os blocos em EPS: He $h_e/b_e/c$, onde h_e representa a altura, b_e a largura e c o comprimento, respectivamente, em milímetros. O item 4.2 da referida norma determina as dimensões e tolerâncias que devem ser atendidas pelos fabricantes destes blocos. A Figura 8 ilustra uma laje treliçada unidirecional com blocos de enchimento de EPS.

Figura 8 – Ilustração de laje treliçada com bloco de enchimento de EPS



Fonte: Pré-Mold RM (2012)

As principais vantagens do emprego de blocos cerâmicos são: o baixo custo; facilidade de encontrar no mercado, por ser acessível; a fácil execução, por se ter uma mão-de-obra mais treinada, promove um melhor isolamento térmico e acústico em relação à uma laje maciça por conta dos espaços vazados.

As principais desvantagens estão na impossibilidade de quebra de blocos, o peso específico superior em relação a outros enchimentos e a capacidade de absorção de água, que pode comprometer a água de amassamento do concreto caso não haja cuidado com a cura (DORNELES, 21014, p. 53). Além disso, a ruptura frágil e o peso do material para carga, descarga e transportes podem também ser considerados desvantagens.

O EPS tem como principal vantagem o fato de ser um material leve, que proporciona um menor peso próprio para a laje, logo um menor carregamento em toda a estrutura. Enquanto os blocos cerâmicos têm peso específico entre 1500 e 2000 kg/m³, o EPS tem entre 10 e 20 kg/m³. Além disso, podem-se elencar mais algumas vantagens: facilidade no transporte e rapidez na instalação; baixa absorção de água, rompimento dúctil que previne acidentes e conforto térmico.

Cabe destacar que a principal desvantagem do bloco de EPS é o custo mais elevado, que pode ser também influenciado pela indisponibilidade local do insumo. Além disso, Thessari (2006, p. 79) realizou uma pesquisa entre as empresas que utilizam EPS na construção civil. As desvantagens mais apontadas referiam-se a baixa aderência com o reboco, o preço elevado e a baixa resistência (quebra de blocos). Inclusive, o baixo peso requer maiores cuidados de armazenamento, e deve-se verificar a integridade dos blocos, garantindo a ausência de resíduos de EPS dentro das formas das vigas e pilares.

O emprego do sistema de lajes nervuradas treliçadas resulta em melhores soluções para pavimentos simples, com pequenos e médios vãos, empregados principalmente em construções residenciais e comerciais de pequeno e médio porte (casas, sobrados, pequenos edifícios). Nestes projetos, tem sido empregado cada vez mais os sistemas de lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas (compostas por trilhos ou treliças), em lugar do sistema de lajes maciças de concreto armado. (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2007, p. 64).

3.3.2 Lajes nervuradas moldadas no local com cubetas

A principal característica deste tipo de laje nervurada é que seu processo de concretagem é completamente realizado no local da obra, sendo assim necessitam do uso de formas e escoramento, diferente das lajes pré-fabricadas. Podem ser utilizados materiais de enchimento entre as nervuras, assim como nos sistemas de lajes nervuradas com vigotas, ou empregar formas especiais.

Fonseca (2015, p. 22) aponta que podem ser utilizados como materiais de enchimento, o EPS de alta densidade, o concreto celular e até mesmo os blocos cerâmicos podem ser utilizados posicionados sobre um tablado de madeira, devidamente espaçados para a confecção das nervuras.

Por outro lado, é também possível o uso de moldes plásticos. Estas formas, chamadas de caixotes ou cubetas, geralmente são constituídas por polipropileno ou metal. Carvalho e Pinheiro (2009, p. 16) dizem que os moldes podem ser encontrados com variadas dimensões e tem capacidade de suporte para o peso do concreto fresco, das armaduras, dos equipamentos e pessoas andando sobre a superfície da laje. Logo, eles servem de forma, e necessitam apenas de escoramento com o uso de barretes, travessas e pontaletes. Elas podem ser alugadas e permitem muitos reaproveitamentos. A Figura 9 mostra um exemplo de escoramento para cubetas.

Figura 9 – Exemplo de sistema de escoramento para cubetas na concretagem de uma laje nervurada



Fonte: AECweb

As lajes nervuradas com cubetas são mais utilizadas para lajes armadas em duas direções, com vãos de mais de cinco metros. Seu funcionamento é melhor para momentos positivos, visto que para combater os momentos negativos, as áreas de concreto das nervuras são pequenas e podem não proporcionar resistência suficiente. Sendo assim, é recomendado

que estas lajes não funcionem engastadas em seu entorno, e algumas vezes pode ser necessária a concretagem de regiões maciças próximas aos pilares.

Carvalho e Pinheiro (2009, p. 13) destacam as seguintes vantagens para esse sistema:

- Permitem vencer grandes vãos, liberando espaços, o que é vantajoso em locais como garagens, onde os pilares dificultam as manobras e podem ocupar regiões que serviriam para vagas.
- Podem ser construídas com a mesma tecnologia empregadas em lajes maciças.
- Tem grande versatilidade de aplicações, podendo ser utilizadas em pavimentos de edificações comerciais, residenciais, educacionais, garagens, etc.
- São também adequadas ao sistema de lajes sem vigas, em que podem ser necessárias regiões maciças apenas nas regiões dos pilares, onde há grande concentração de tensões.
- Consomem menos concreto e aço que outros sistemas similares, diminuindo o peso próprio e aliviando as fundações.
- Pelas suas características (grande altura e pequeno peso próprio), podem suportar cargas mais elevadas que as demais.

As principais desvantagens destacadas na literatura dizem respeito à dificuldade de passagem de tubulações, a demanda por maior pé-direito dos pavimentos, além de maiores custos envolvidos dependendo de fatores locais, como disponibilidade de equipamentos e mão-de-obra especializada.

Outro ponto desinteressante é em relação ao uso das formas de polipropileno refere-se ao aspecto estético das nervuras nas faces inferiores das lajes. Segundo Silva (2002), “Alguns arquitetos não aprovam o uso deste sistema pelo fato de a face inferior da laje não apresentar uma superfície plana, acarretando a necessidade do emprego de forros, aumentando o custo do sistema.”.

3.4 Quantitativos e indicadores de consumo em projetos de estruturas de concreto armado

Os dados mais importantes e estritamente necessários para a composição dos custos em estruturas de concreto armado são os quantitativos de concreto, aço e formas. Os blocos de

enchimento também precisam ser quantificados nas situações as quais se aplicam (nas lajes nervuradas).

Tomando como referência os dados trazidos no Quadro 6, publicados pela Revista Construção Mercado número 183, que mostram as estimativas percentuais de gastos por etapa de obra para o mês de julho de 2016, vê-se que os gastos na etapa construtiva da superestrutura variam entre 9,8 a 32,5 % dos custos totais das obras, variando de acordo com o padrão da edificação.

Quadro 6 – Estimativas de gastos por etapa de obra (%)

Estimativas de Gastos por Etapa de Obra (%)

Mês de referência: julho/16

ETAPAS CONSTRUTIVAS	HABITACIONAL						COMERCIAL		INDUSTRIAL
	RESIDENCIAL			PRÉDIO COM ELEVADOR FINO (4)	PRÉDIO SEM ELEVADOR		PRÉDIO COM ELEVADOR FINO (7)	PRÉDIO SEM ELEVADOR MÉDIO (8)	
	FINO (1)	MÉDIO (2)	POPULAR (3)		MÉDIO (5)	POPULAR (6)			
Serviços preliminares	2,6 a 3,7	2,6 a 4,1	0,7 a 1,3	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	1,1 a 2,2	0 a 1	0,4 a 0,9	1 a 1,9
Movimento de terra	0 a 1	0 a 1	0 a 1	0 a 1	0 a 1	0 a 1	0 a 1	0 a 1	0 a 1
Fundações especiais	-	-	-	3 a 4	3 a 4	3 a 4	3 a 4	3 a 4	4 a 5
Infraestrutura	6,9 a 7,5	3,5 a 4,1	2,3 a 4,1	1,8 a 2,4	3,5 a 4,1	4 a 4,5	2,9 a 3,5	4 a 4,9	2,7 a 3,5
Superestrutura	15,1 a 17,7	11,3 a 15,7	9,8 a 12,5	26,6 a 32,5	22,8 a 28,5	18,8 a 23,4	23,5 a 28,1	19,1 a 22,9	4,9 a 6,5
Vedação	4,7 a 7,8	8,4 a 13,2	8,4 a 15	3,7 a 5,1	5,1 a 10	9,1 a 15,6	3,6 a 5,1	5,5 a 8,7	1,9 a 3,4
Esquadrias	2,8 a 5,6	8,1 a 15	8,6 a 14,4	6,4 a 11,9	4,1 a 7,2	4 a 6,9	6 a 12	7,2 a 13,3	6,9 a 13
Cobertura	0 a 0,3	4 a 8,6	8,5 a 16,9	-	0,6 a 1,9	-	-	-	17,1 - 25,7
Instalações hidráulicas	10,9 a 12,8	11,1 a 13	11,2 a 12,1	10,5 a 12,3	9,8 a 11,5	9,6 a 10,6	9,5 a 10,5	7,5 a 8,4	4,4 a 5,3
Instalações elétricas	3,8 a 4,8	3,8 a 4,8	3,8 a 4,8	4,5 a 5,4	3,7 a 4,6	3,8 a 4,8	3,7 a 4,6	3,8 a 4,7	5 a 6
Impermeabilização e isolamento térmica	10,4 a 13,5	0,4 a 0,7	0,4 a 0,8	1,2 a 2,4	1,3 a 1,9	4,7 a 6	1,8 a 2,4	5,9 a 7,2	0,8 a 1,3
Revestimento (pisos, paredes e forros)	20 a 27,1	22 a 27,4	21,1 a 29,1	20,6 a 26,7	24,4 a 31	22,5 a 31,7	17,4 a 24,5	17,9 a 21,7	6,4 a 8,8
Vidros	1,9 a 3,5	0,5 a 1,1	1 a 1,9	1,5 a 2,9	0,5 a 1	0,5 a 0,9	1,9 a 3,5	1,7 a 3,4	0 a 0,4
Pintura	4,3 a 6,2	6,3 a 8,2	4 a 4,9	3,8 a 4,9	5,4 a 7,3	2,6 a 3,4	7,7 a 11,5	6,9 a 8,8	4,6 a 7
Serviços complementares	2,2 a 3,2	0,5 a 0,7	0,6 a 1,1	0,3 a 0,9	0 a 1,2	0,6 a 1,1	0 a 1,2	0 a 8,8	21 a 30,2
Elevadores	-	-	-	1,5 a 1,9	-	-	3 a 3,6	-	-

Veja as informações relativas às tipologias construtivas na tabela do Custo Unitário PINI de Edificações (Cupe).

Até o fechamento desta edição, o índice Fipe não foi divulgado.

Fonte: Construção Mercado (2016)

Estes dados comprovam a importância e relevância da orçamentação dos projetos estruturais, que geram considerável impacto no custo final da obra. Uma boa orçamentação depende essencialmente de uma estimativa de quantitativos de insumos mais próxima da realidade.

Os principais índices utilizados na avaliação de quantitativos em projetos de estruturas de concreto armado relacionam os quantitativos de concreto, aço e formas à área construída ou ao volume de concreto consumido. Alguns destes índices serão descritos a seguir.

A espessura média relaciona o volume de concreto consumido em toda a estrutura e a área construída. A relação entre o consumo de aço e de formas com a área construída também constituem mais dois índices comuns, que constituem taxas de aço e de forma por metro quadrado de área construída.

Além disso, existem os índices que relacionam área de forma com volume de concreto consumido e consumo de aço com volume de concreto consumido. Eles constituem taxas de aço e de forma por metro cúbico de concreto.

Alguns autores sugerem valores médios, que são muito utilizados para levantamentos preliminares de custos e análise de soluções por engenheiros orçamentistas. Mattos (2006, p. 41) diz que a espessura média normalmente oscila entre 12 e 16 cm para edifícios de até dez pavimentos. Ele também diz que a taxa de aço e de forma por metro cúbico de concreto oscilam entre 83 e 88 kg/m³ e entre 12 e 14 m²/m³, respectivamente.

Botelho e Marchetti (2007, p. 54) afirmam que a espessura média para a superestrutura composta por lajes, vigas e pilares pode ser considerada 23 centímetros. Eles também afirmam que a taxa de aço por metro cúbico de concreto pode ser considerada 100 kg/m³ e de forma, 12 m²/m³, para a superestrutura.

A busca por um valor de referência é difícil, pois depende de situações particulares. A depender da arquitetura e da estrutura lançada, pode haver redistribuição de esforços e compensação entre os diferentes elementos estruturais (lajes, vigas e pilares). Contudo, a busca por valores representativos é válida como uma primeira estimativa ou como parâmetro de controle de qualidade de projetos. (JABLONSKI, 2013, p. 68).

4 METODOLOGIA

A ideia principal consiste na comparação dos resultados do dimensionamento de um projeto estrutural de um edifício em concreto armado, que originalmente foi executado com lajes treliçadas com blocos cerâmicos, denominado neste trabalho como modelo 1 e a partir de alterações de tipos de lajes empregadas foram criados os modelos 2, 3 e 4, para em termos de quantitativos de materiais e custos envolvidos, poder fazer as comparações.

Pretende-se avaliar o impacto da escolha de outros sistemas estruturais no projeto, variando o tipo de laje e a quantidade de vigas e mantendo os mesmos pilares, tendo em vista as restrições arquitetônicas por conta das posições das paredes existentes.

De acordo com o objetivo geral foram criados os sistemas estruturais definidos abaixo com a intenção de poder comparar os custos finais dos modelos 2, 3 e 4 com o modelo 1 de referência, ou seja, o modelo no qual foi executado a edificação existente e definir o sistema de menor custo.

- Modelo 1: O projeto original, constituído por lajes treliçadas e blocos de enchimento cerâmicos.
- Modelo 2: Lajes treliçadas com blocos de enchimento de EPS.
- Modelo 3: Lajes maciças, com redução de vigas
- Modelo 4: Lajes nervuradas moldadas in loco com cubetas, com redução de vigas.

Como o escopo da investigação se restringe a influência da escolha do tipo de laje no sistema estrutural como um todo, decidiu-se que as prumadas dos pilares serão mantidas iguais em todos os modelos, assim como as seções transversais, de acordo com o dimensionamento realizado no modelo 1. A mesma hipótese foi assumida para as vigas dos pavimentos, procurou-se manter as seções transversais das vigas iguais em todos os modelos conforme projeto original. No modelo 2, adotou-se o mesmo vigaamento do projeto original para todos os pavimentos.

Por outro lado, nos modelos 3 e 4, avaliou-se a necessidade de redução de vigas, com a intenção de justificar o uso de lajes maciças e nervuradas com cubetas em substituição das treliçadas. Estas reduções foram realizadas de acordo com as recomendações citadas na

literatura para os vãos adequados a depender do tipo de laje. Estas considerações serão detalhadas nas seções adiante.

Além disso, todos os critérios de projeto foram considerados iguais aos do projeto original, como classe de agressividade ambiental, sobrecargas, propriedades dos materiais, ação do vento e a tensão do terreno, entre outras configuradas para atender as normas vigentes de estruturas de concreto armado.

4.1 Análise e dimensionamento estrutural

A ferramenta computacional utilizada para análise e dimensionamento estrutural foi o Eberick versão 2018. Desenvolvido pela companhia de tecnologia AltoQi, trata-se de um programa que permite a elaboração de projetos estruturais em concreto armado.

O programa possui uma interface de desenho assistido por computador (CAD) que permite a inserção de elementos estruturais, como lajes, vigas, pilares, escadas, reservatórios, entre outros. É possível a visualização do modelo criado em pórtico 3D. O dimensionamento é realizado conforme as normas brasileiras para o Estado Limite Último e de Serviço, nos esforços resultantes dos elementos estruturais para obtenção das armaduras.

Além disso, a ferramenta permite a geração automatizada de memoriais de cálculo com os critérios adotados no projeto, e de relatórios com resultados referentes a esforços, dimensionamentos, cargas na fundação e análise global. É possível extrair um resumo de materiais como o volume de concreto, peso de aço, área de forma, quantitativo de blocos de enchimento e consumo de aço. Também pode ser incluído o custo dos materiais e da mão-de-obra.

O guia de ajuda do Eberick, disponível no site da empresa AltoQi, resume o cálculo da estrutura nas seguintes etapas:

- Os painéis de laje são montados e calculados pelo processo de analogia de grelha.
- As reações das lajes são transmitidas às vigas que as apoiam.
- O pórtico espacial da estrutura é montado, recebendo o carregamento calculado pelas lajes.
- O pórtico é processado e os esforços solicitantes são utilizados para o detalhamento dos elementos estruturais.

Na análise estrutural o programa utiliza o método matricial da rigidez direta, obtendo os deslocamentos nodais, esforços internos e reações de apoio nos vínculos. O método de dimensionamento de pilares utilizado foi o da rigidez aproximada. A ação do vento é levada em conta, assim como uma avaliação simplificada dos efeitos de segunda ordem é realizada, por meio do coeficiente Gama-Z e o processo P-Delta.

4.2 Estudo de caso – apresentação do edifício

O projeto estrutural escolhido para ser utilizado neste trabalho advém de um projeto realizado na Rua Norberto de Castro Nogueira, setor 03, quadra 54, lote 133, localizado no bairro Jardim Oceania, no município de João Pessoa – PB. Trata-se de uma edificação para ser utilizada como um Flat, ou seja, um edifício com apartamentos e serviços de hotelaria. As Figuras 10 e 11 ilustram as fachadas norte e oeste do empreendimento, respectivamente.

Figura 10 – Fachada sudoeste do edifício



Fonte: 2R Arquitetura

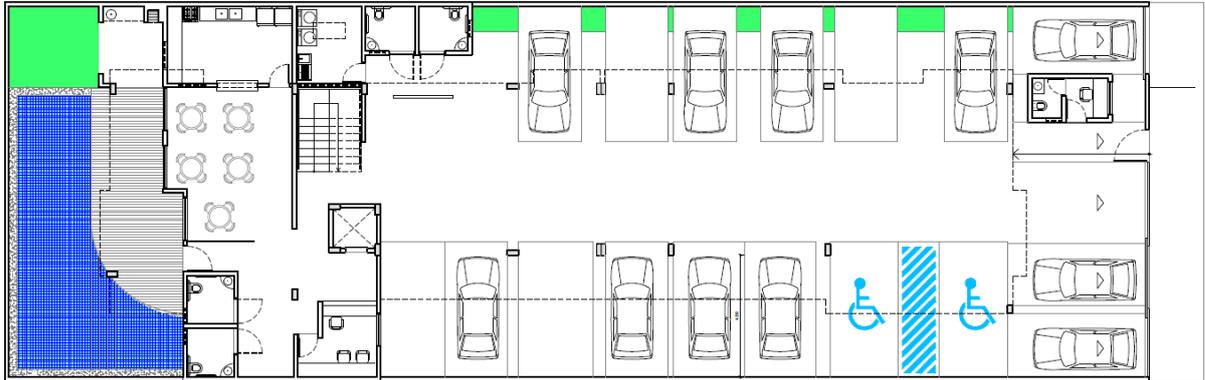
Figura 11 – Fachada nordeste do edifício



Fonte: 2R Arquitetura

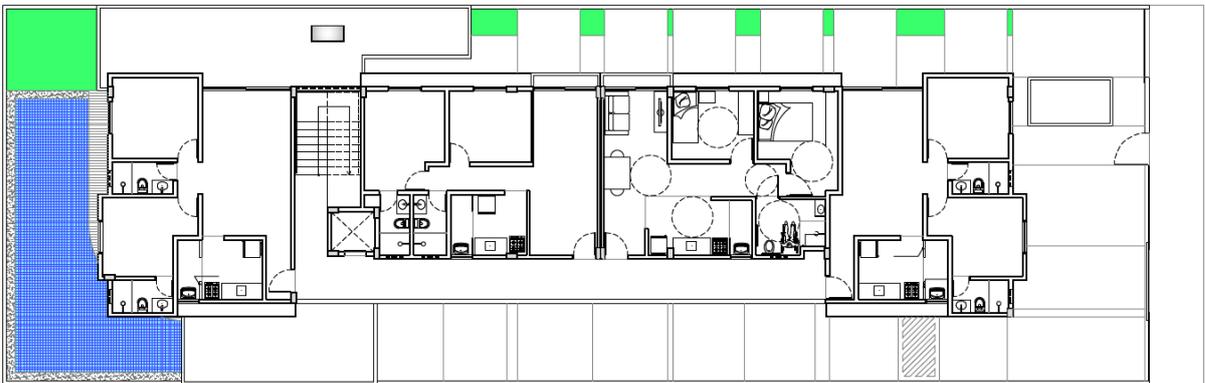
O edifício possui cinco pavimentos, sendo um semipilotis. O terreno possui 588 m² e a área construída total é de 1509,67 m². O pavimento térreo, que pode ser visto na Figura 12, abriga uma área de lazer com piscina e deck molhado, um restaurante, cozinha coletiva, lavanderia, banheiro, uma área administrativa/receptiva, além de 17 vagas de garagem. O pavimento tipo, ilustrado na Figura 13, é composto por quatro apartamentos de plantas variadas, compostos por sala, cozinha, quartos e banheiros.

Figura 12 – Planta baixa pavimento térreo



Fonte: 2R Arquitetura

Figura 13 – Planta baixa pavimento tipo



Fonte: 2R Arquitetura

A estrutura é composta por nove pavimentos, com distância de piso a piso de 2,95 metros de acordo com o projeto arquitetônico. A nomeação dos pavimentos da estrutura pode ser vista no Quadro 7, junto com a altura e o nível correspondentes.

Quadro 7 - Pavimentos da estrutura

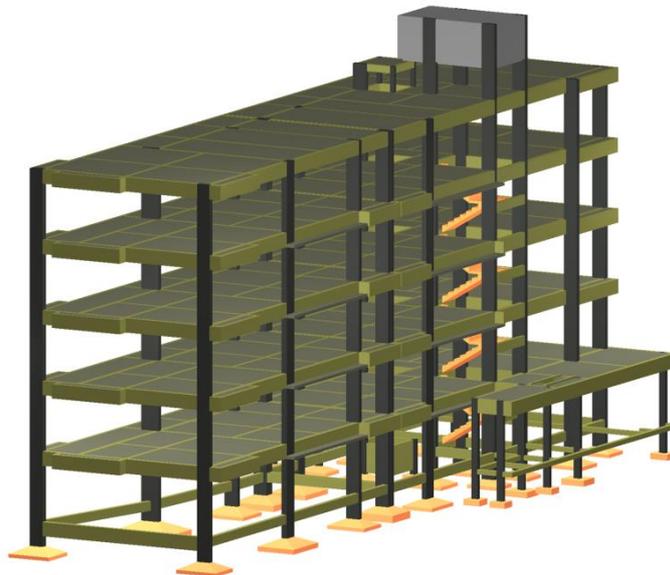
Pavimento	Altura (cm)	Nível (cm)
tampa	180	1790
fundo reservatório	25	1610
casa maq.	110	1585
nível - 14,75	295	1475
nível - 11,80	295	1180
nível - 8,85	295	885
nível - 5,90	295	590
nível - 2,95	295	295
vigas baldrame	150	0

Fonte: Do Autor

Manteve-se o reservatório, o pavimento da casa de máquinas, os lances de escada e o pavimento das baldrame em todos os modelos com as mesmas características do projeto original. O reservatório foi projetado com lajes maciças e vigas-paredes. As lajes da casa de máquinas e das escadas também foram mantidas como lajes maciças.

A solução adotada para as fundações no projeto original foi com sapatas isoladas. A tensão admissível do solo empregada foi igual a 4 kgf/cm^2 , após realizado um melhoramento do solo. Nos modelos estruturais propostos, manteve-se a adoção de sapatas, redimensionando-as de acordo com as cargas que os pilares transmitiram às fundações. A Figura 14 mostra uma visão 3D da estrutura original.

Figura 14 – Pórtico 3D da estrutura original



Fonte: Do autor

4.2.1 Critérios de projeto

Nesta seção serão definidos os critérios de projeto utilizados nos modelos estruturais. Primeiramente, os critérios comuns a todos os modelos serão explanados. Mais adiante, serão detalhados os critérios específicos de cada sistema estrutural, uma vez que alguns parâmetros são particulares e variam conforme o tipo de laje. Todas as características adotadas seguem as prescrições normativas.

Os parâmetros relatados nesta seção foram editados na interface do Eberick. Demais parâmetros não explanados aqui foram mantidos nas condições padrão (default) em todos os modelos, para que não gerem interferências nos comparativos.

A durabilidade da estrutura é uma condição necessária para garantia da segurança, estabilidade e desempenho em serviço durante sua vida útil. Em relação a isso, em todos os projetos, adotou-se a classe de agressividade ambiental II, de agressividade moderada e risco de deterioração da estrutura pequeno. Os cobrimentos das armaduras adotados de acordo com o tipo de elemento estão resumidos no Quadro 8.

Quadro 8 – Cobrimento das armaduras de acordo com o tipo de elemento

Elemento	Cobrimento (cm)		
	Peças externas	Peças internas	Peças em contato com o solo
Vigas	3,00	2,50	3,00
Pilares	3,00	2,50	3,00
Lajes	2,50	-	2,50
Reservatórios	3,00	-	3,00
Sapatas	-	-	3,00

Fonte: Do Autor

Em todos os modelos, as características do concreto e do aço foram mantidas inalteradas. O Quadro 9 mostra os valores de resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), do módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}), da resistência do concreto à tração direta (f_{ct}), do abatimento e do coeficiente de dilatação térmica utilizados nos projetos.

Quadro 9 – Características do concreto adotadas nos projetos

Elemento	f_{ck} (kgf/cm ²)	E_{cs} (kgf/cm ²)	f_{ct} (kgf/cm ²)	Abatimento (cm)	Coefficiente de dilatação térmica (°C)
Vigas	250	241500	26	5,00	0,00001
Pilares	250	241500	26	5,00	0,00001
Lajes	250	241500	26	5,00	0,00001
Reservatórios	250	241500	26	5,00	0,00001
Sapatas	200	212874	22	5,00	0,00001

Fonte: Do Autor

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

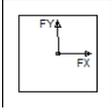
O peso específico considerado para os elementos de concreto armado foi de 2500 kgf/m³ e para as paredes de alvenaria considerou-se 1300 kgf/m³. Em relação à resistência do concreto, considerou-se que todos os elementos pertencem à classe C25, exceto as fundações, nas quais

se adotou classe C20. As sobrecargas consideradas foram de 250 kgf/m² para lajes de piso, 150 kgf/m² para lajes de cobertura e 300 kgf/m² para lajes de escada.

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

O efeito do vento também foi considerado na análise a partir dos parâmetros adotados para se definir as forças aplicadas sobre a estrutura. Estes parâmetros podem ser vistos no Quadro 10. A velocidade básica do vento foi considerada 30 m/s, conforme o item 5.1 da norma ABNT NBR 6123:1988, o qual mostra um mapa onde a cidade que a edificação está localizada, João Pessoa – PB, está entre duas isopletas de 30 m/s.

Quadro 10 – Características do vento adotadas nos projetos

Parâmetros	Valor adotado	Observações
Velocidade	30.00m/s	-
Nível do solo (S2)	100.00cm	-
Maior dimensão horizontal ou vertical (S2)	Entre 20 e 50 m	-
Rugosidade do terreno (S2)	Categoria II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.
Fator topográfico (S1)	1.0	Demais casos.
Fator estatístico (S3)	1.00	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.
Ângulo do vento em relação à horizontal	0°	
Direções de aplicação do vento	Vento X+ (V1) Vento X- (V2) Vento Y+ (V3) Vento Y- (V4)	-

Fonte: Do Autor

A não linearidade física foi considerada pelo programa de acordo com a rigidez dos elementos estruturais conforme elencado abaixo:

- Rigidez das vigas: 0,40 Eci.Ic
- Rigidez dos pilares: 0,80 Eci.Ic
- Rigidez das lajes: 0,50 Eci.Ic

As imperfeições geométricas globais devido ao desaprumo dos elementos verticais foram adotadas para as dimensões principais da estrutura (direções X e Y), as mesmas direções de atuação do vento, e são consideradas na combinação de ações para a verificação do ELU.

Além disso, os parâmetros para avaliação de estabilidade global (Gama-Z e P-Delta) são verificados.

As dimensões mínimas para os elementos estruturais sugeridas pela ABNT NBR 15200:2012 (Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio) foram desconsideradas porque o tempo requerido de resistência ao fogo para esta edificação é menor que 30 minutos.

4.2.2 Modelo 1 – Lajes treliçadas com blocos de enchimento cerâmicos

O modelo 1 é o originalmente proposto e que serviu de base para este estudo de caso, formado por lajes unidirecionais compostas por vigotas treliçadas com blocos de enchimento cerâmico. A espessura da capa de concreto empregada foi igual a 4 cm para todas as lajes treliçadas. O lançamento estrutural resultou no seguinte quantitativo de elementos estruturais:

- Para o pavimento “tampa”: 8 elementos de reservatório (lajes e vigas-parede).
- Para o pavimento “casa de máquinas”: 4 vigas e 1 laje.
- Para o pavimento “vigas baldrame”: 40 vigas, 31 sapatas e 1 laje.

Estes elementos elencados acima são comuns a todos os modelos e permanecerão inalterados, ou seja, não foi feita nenhuma inclusão ou exclusão de elemento nestes pavimentos. Abaixo, encontra-se elencado o número de elementos para os pavimentos que serão modificados ao longo desta pesquisa:

- Para o pavimento “nível-14,75”: 36 vigas e 31 lajes.
- Para o pavimento “nível-11,80”: 45 vigas e 43 lajes.
- Para os pavimentos “nível-8,85” e “nível-5,90”: 47 vigas e 43 lajes.
- Para o pavimento “nível-2,95”: 59 vigas e 52 lajes.

A primeira página dos Apêndices A, B, C e D mostram as plantas de forma dos pavimentos elencados acima, geradas pelo Eberick após o dimensionamento da estrutura, no qual se pode ter a ideia da disposição das vigas e das lajes nestes pavimentos. De acordo com os desenhos das plantas de forma, pode-se constatar que foram utilizadas pequenas lajes maciças em balanço, engastadas em vigas, com função de área técnica na fachada do edifício. Estas lajes também permaneceram inalteradas em todos os modelos.

A grande maioria das lajes treliçadas destes pavimentos resultou em espessura total de 12 cm, utilizando assim os blocos de enchimento de lajota cerâmica do tipo B8/25/20. Poucas

lajes exigiram espessura de 14 cm e blocos do tipo B10/30/20. Uma única laje resultou na espessura de 16 cm e blocos do tipo B12/30/20.

4.2.3 Modelo 2 – Lajes treliçadas com blocos de enchimento de EPS

Para este modelo, a intenção é observar a influência da troca do material de enchimento nos quantitativos e custos totais do projeto estrutural. Assim, decidiu-se manter as mesmas dimensões de lajes, vigas e pilares estabelecidas no modelo 1, substituindo apenas os blocos de enchimento cerâmico pelos blocos de EPS de alturas correspondentes, de modo a não alterar as espessuras totais das lajes. Esta substituição está elencada a seguir:

- Os blocos cerâmicos do tipo B8/25/20 foram substituídos pelos de EPS do tipo B8/30/125.
- Os blocos cerâmicos do tipo B10/30/20 foram substituídos pelos de EPS do tipo B10/40/40.
- Os blocos cerâmicos do tipo B12/30/20 foram substituídos pelos de EPS do tipo B12/30/125.

As plantas de forma dos pavimentos deste modelo estrutural podem ser vistas na segunda página dos Apêndices A, B, C e D, pelas quais se pode comprovar que a única diferença em relação ao modelo 1 diz respeito aos materiais de enchimento, as vigas permanecem inalteradas.

4.2.4 Modelo 3 – Lajes maciças

Neste modelo, os pavimentos “nível 14-75”, “nível 11,80”, “nível-8,85”, “nível-5,90” e “nível-2,95” sofreram alterações no número de vigas e lajes. A justificativa para o emprego de lajes maciças, neste caso, parte da constatação da capacidade de vencer maiores vãos e de suportar diretamente cargas de parede. Sendo assim, verificou-se que algumas vigas do modelo 1 poderiam ser retiradas, como as que foram empregadas devido ao modelo biapoiado das lajes treliçadas ou devido aos carregamentos de paredes de alvenaria.

Assim, uma hipótese levantada é que esta diminuição do número de vigas possa promover uma diminuição no custo total da estrutura, apesar do acréscimo esperado pela

utilização de lajes com áreas maiores que as do modelo 1, e suportando cargas de parede em algumas situações.

Um outro critério utilizado para a eliminação de vigas foi de dar preferência a vigas apoiadas em vigas, evitando assim retirar vigas que contribuem para o travamento dos pilares nas direções ortogonais principais. Isto se justifica pelo papel que estas vigas possuem na rigidez da estrutura tanto na formação de pórticos de contraventamento quanto na prevenção dos efeitos de flambagem.

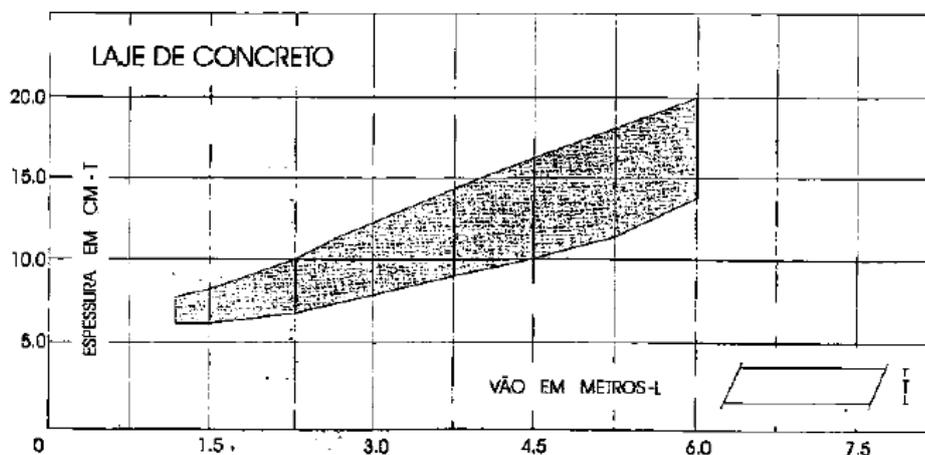
Sendo assim, aponta-se abaixo o número de elementos estruturais resultantes do lançamento estrutural nos pavimentos de interesse para o modelo 3:

- Para o pavimento “nível-14,75”: 36 vigas e 29 lajes.
- Para os pavimentos “nível-11,80”, “nível-8,85” e “nível-5,90”: 41 vigas e 29 lajes.
- Para o pavimento “nível-2,95”: 54 vigas e 37 lajes.

As vigas foram mantidas com as mesmas dimensões do modelo original (modelo 1), pois verificou-se que para os novos vãos resultantes da diminuição do número de vigas, as seções transversais das vigas restantes continuavam atendendo as recomendações de pré-dimensionamento.

Em relação ao pré-dimensionamento das lajes, utilizou-se o método gráfico proposto por Rebello (2007, p.80), que pode ser visto na Figura 15. De acordo com a nova disposição de vigas, verificou-se que os vãos se situam na faixa de valores próximos de 2 metros e menores que 4 metros. Sendo assim, adotou-se a espessura de 10 cm como inicial para todas as lajes deste modelo.

Figura 15 – Gráfico para pré-dimensionamento de lajes maciças em função do menor vão



Fonte: Rebello (2007, p.80)

Após o dimensionamento, todas as lajes permaneceram com espessura de 10 cm. A terceira página dos Apêndices A, B, C e D mostram as plantas de forma do modelo 3, sobre as quais se pode perceber a diminuição das vigas e aumento das áreas das lajes, em relação as mostradas nas páginas anteriores de cada Apêndice.

4.2.5 Modelo 4 – Lajes nervuradas moldadas no local com cubetas

As lajes nervuradas bidirecionais moldadas in loco com cubetas são as que apresentam maior rigidez, em comparação com as lajes adotadas anteriormente. Isto se deve a maior altura das nervuras proporcionada por este tipo de forma, sem causar um aumento significativo do consumo de concreto.

Sendo assim, seguiu-se a mesma lógica do modelo 3, propondo-se uma redução de vigas para adequar os vãos das lajes aos indicados na literatura, criando painéis de laje com formas mais quadradas e com mais de cinco metros de lado, onde possível. As vigas que contribuem para a amarração dos pilares foram fatores limitantes. Mesmo assim, chegou-se a uma configuração com um número menor de lajes e vigas do que o proposto na solução com lajes maciças, que está elencada a seguir:

- Para o pavimento “nível-14,75”: 34 vigas e 23 lajes.
- Para os pavimentos “nível-11,80”, “nível-8,85” e “nível-5,90”: 39 vigas e 27 lajes.
- Para o pavimento “nível-2,95”: 48 vigas e 30 lajes.

As plantas de forma correspondentes a estes pavimentos, geradas como resultado do dimensionamento da estrutura, encontram-se na quarta página dos Apêndices A, B, C e D.

Todas as lajes nervuradas foram consideradas simplesmente apoiadas. Adotou-se primeiramente a espessura de capa mínima necessária (4 cm). O pré-lançamento das lajes nervuradas foi feito da seguinte maneira: lançou-se todas as lajes com a menor altura possível de acordo com o grupo de cubetas disponibilizado pelo Eberick, que corresponde a cubeta B15/60/60. Após o processamento da estrutura, aumentou-se gradativamente a espessura das lajes que apresentaram erros de dimensionamento para se chegar a solução adequada.

Sendo assim, a maior parte das lajes resultaram em espessuras iguais 19 cm, correspondentes ao uso da menor cubeta disponível (B15/60/60), que possui 15 cm de altura. Outras lajes apresentaram espessuras de 22 cm, 25 cm, 28,5 cm e 30 cm, correspondendo às cubetas B18/60/60, B20/80/80/6.25, B22.5/90/90 e B 25/80/80, respectivamente.

4.3 Considerações sobre os custos dos insumos

O Eberick versão 2018 possui um recurso que permite realizar uma estimativa do custo da estrutura. Esta ferramenta será utilizada para se fazer um comparativo entre os modelos descritos anteriormente. Com ela, é possível extrair relatórios de custo de aço, concreto, forma e blocos de enchimento.

Segundo Teixeira (2010), esta ferramenta facilita a avaliação de alternativas do ponto de vista econômico, visto que um mesmo projeto pode ter diferentes soluções, umas mais econômicas que outras.

O programa estabelece custos unitários dos principais insumos das estruturas, que podem ser editados nas configurações pelo usuário. Além disso, a composição dos custos é estabelecida pela divisão em dois termos: custo de material e custo de execução.

A seguir serão mostrados todos os custos unitários utilizados nesta pesquisa, disponíveis nas configurações padrão do Eberick. Teixeira (2010) alerta sobre a necessidade do usuário em cadastrar os valores de custo conforme o local e as técnicas executivas empregadas. Entretanto, a manutenção de valores fixos (os disponibilizados pelo programa) para o cálculo dos custos em todos os modelos já atende o objetivo de estabelecer uma análise comparativa. A investigação dos custos de material e execução são influenciadas por uma série de variáveis, como localidade e especialização da mão-de-obra, que fogem ao escopo deste trabalho.

Os custos referentes ao concreto são expressos em R\$/m³ e variam de acordo com a classe, que é uma característica definida pela resistência característica (f_{ck}). Eles podem ser vistos no Quadro 11.

Quadro 11 – Custos referentes ao concreto

Custo do concreto (R\$/m ³)		
Classe	Material	Execução
C20	288,55	92,53
C25	244,37	95,11

Fonte: Do autor

Os custos do aço são dados em kg/m³ e variam de acordo com a classe do material (CA50 ou CA60) e com o diâmetro das barras. Estes valores são expressos no Quadro 12.

Quadro 12 – Custos referentes ao aço

Custo do aço (R\$/kg)			
Bitola	Aço	Material	Execução
3.2, 3.4, 4.0 e 4;2	CA60	4,96	3,99
4.6 e 5.0	CA60	4,82	3,19
6.0	CA60	4,00	4,88
6.3	CA50	4,82	4,88
7.0	CA60	4,07	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	0,70
20.0	CA50	4,22	0,41
22.2	CA50	4,84	0,20
25.0	CA50	4,84	0,20

Fonte: Do autor

Os custos com forma são dados R\$/m² e variam de acordo com o tipo de elemento estrutural. Eles podem ser vistos no Quadro 13. O Eberick não possui uma função que permita a compensação da reutilização de formas nos quantitativos, a maneira pela qual é possível levar em consideração este fato é pela alteração dos custos de forma em função do número de reutilizações. Neste trabalho, as formas não serão consideradas reutilizáveis.

Quadro 13 – Custos referentes às formas

Custo de forma (R\$/m²)		
Elemento	Material	Execução
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

Fonte: Do autor

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

suas dimensões. Os Quadros 14, 15 e 16 mostram estes custos para as lajes treliçadas com blocos de enchimento cerâmicos, com enchimento de EPS e para as lajes nervuradas com cubetas. O programa se refere às lajes com vigotas treliçadas como lajes PM (pré-moldadas).

Quadro 14 – Custos referentes às lajes treliçadas com enchimento cerâmico

Custo das lajes PM e blocos de enchimento cerâmicos				
Bloco	Custo da laje PM (R\$/m²)		Custo do bloco (R\$/unid)	
	Material	Execução	Material	Execução
B8/25/20	16,08	21,64	0,59	0,00
B10/30/20	18,05	21,64	0,59	0,00
B12/30/20	40,29	21,64	0,59	0,00

Fonte: Do autor

Quadro 15 – Custos referentes às lajes treliçadas com enchimento de EPS

Custo das lajes PM e blocos de enchimento de EPS				
Bloco	Custo da laje PM (R\$/m²)		Custo do bloco (R\$/unid)	
	Material	Execução	Material	Execução
B8/30/125	8,24	21,64	7,36	0,00
B10/40/40	3,33	21,64	3,93	0,00
B12/30/125	20,66	21,64	11,05	0,00

Fonte: Do autor

Quadro 16 – Custos referentes às lajes nervuradas de cubetas

Custo das lajes nervuradas com cubetas				
Cubeta	Custo da laje (R\$/m²)		Custo da cubeta(R\$/unid)	
	Material	Execução	Material	Execução
B15/60/60	26,36	45,91	10,88	0,00
B18/60/60	26,36	45,91	10,88	0,00
B20/80/80/6.25	26,36	45,91	10,88	0,00
B22.5/90/90	26,36	45,91	10,88	0,00
B25/80/80	26,36	45,91	10,88	0,00

Fonte: Do autor

5 RESULTADOS – ESTUDO COMPARATIVO

Todos os modelos propostos (modelos 2, 3 e 4) foram processados, analisados e dimensionados pelo Eberick algumas vezes até obter uma configuração de elementos sem nenhum erro de dimensionamento e de deslocamentos limites (flechas). Algumas vezes, foram necessárias efetuar correções, como o aumento da espessura de alguma laje, e reprocessar a estrutura para a correção de eventuais erros. Dessa maneira, teve-se a garantia de que todas as partes da estrutura foram levadas em consideração com segurança nos quantitativos e custos.

O programa permite a exportação de relatórios contendo o resumo de materiais da edificação e diagnósticos gerais da estrutura e com base nestes documentos se efetivou os comparativos em termos de consumo de materiais e de custos.

5.1 Comparativo em termos de consumo de concreto

Para se estabelecer um comparativo entre os modelos propostos, utilizou-se um índice que relaciona o consumo de concreto com a área construída da edificação. Este índice foi determinado para cada tipo de elemento estrutural do projeto em cada um dos modelos explanados anteriormente. Estes resultados são mostrados no Quadro 17.

Quadro 17 – Índices de consumo de concreto

Consumo de concreto por área (m ³ /m ²)				
Elemento	Treliçada Cerâmico	Treliçada EPS	Maciça	Nervurada
Vigas	0,11	0,11	0,1	0,09
Pilares	0,04	0,04	0,04	0,04
Lajes	0,05	0,04	0,08	0,09
Escadas	0	0	0	0
Fundações	0,01	0,01	0,01	0,01
Reservatórios	0	0	0	0
TOTAL	0,22	0,22	0,24	0,24

Fonte: Do autor

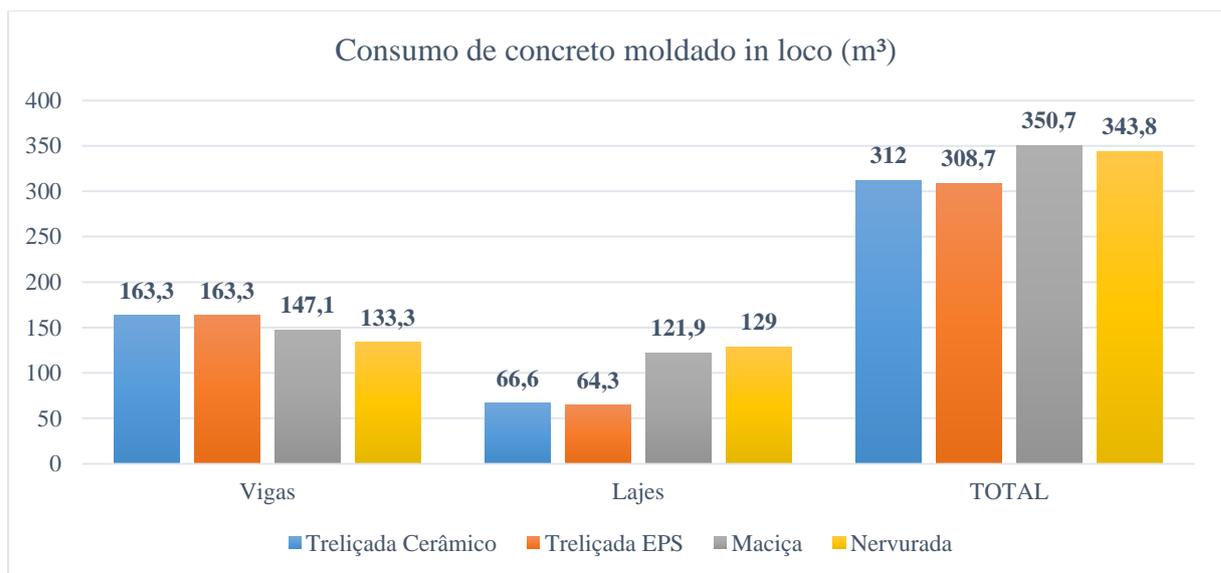
O concreto pré-fabricado componente das vigotas treliçadas não é contabilizado nestes consumos. A partir destes dados, pode-se ver que os reservatórios e escadas representam baixo consumo de concreto em relação à área da estrutura, com valores próximos a zero, logo causam pouca influência nos consumos totais.

Além disso, a alteração dos tipos de laje não causou mudanças significativas no consumo de concreto das fundações. Da mesma maneira, o consumo de concreto nos pilares e escadas permaneceram iguais, uma vez que as prumadas de pilares foram mantidas inalteradas entre os modelos, assim como a solução proposta para a escada.

Pode-se perceber uma diminuição gradativa no índice de consumo de concreto nas vigas, ocasionada pela redução da quantidade destes elementos nos sistemas com lajes maciças e lajes nervuradas. Em relação às lajes, observa-se que o modelo 2 (laje treliçada – EPS) apresenta o menor consumo de concreto, enquanto os modelos moldados no local (modelos 3 e 4) apresentam índices maiores.

A Figura 16 apresenta um gráfico no qual podem ser vistos os consumos de concreto pelas lajes, pelas vigas e o valor total de acordo com cada situação.

Figura 16 – Consumos de concreto moldado in loco



Fonte: Do autor

A partir do gráfico apresentado acima, é possível observar, partindo da solução com lajes maciças para a com lajes nervuradas, ambas totalmente moldadas no local, que a diminuição do consumo de concreto das vigas é menos significativa do que o aumento de consumo das lajes, por essa razão o modelo 3 (laje maciça) é o que apresenta o maior consumo total (350,7 m³).

O volume de concreto do sistema com lajes treliçadas de EPS é o menor dentre os apresentados, mas é muito próximo do volume obtido no projeto original (laje treliçada bloco cerâmico). O concreto moldado no local é utilizado nas lajes pré-moldadas para a concretagem

da capa e dos espaços entre os blocos, recobrando as vigotas. Sendo assim, pavimentos com maior quantidade de vigotas possuem mais espaços de preenchimento de concreto, resultando em consumos maiores, e estes valores dependem da relação entre as dimensões dos materiais de enchimento e as dimensões das lajes. O modelo 2, com blocos de EPS, foi o que apresentou o menor consumo.

O Quadro 18 mostra as espessuras médias de projeto, que relacionam o consumo total de concreto com a área construída total da edificação. Os valores estão coerentes com os recomendados por Botelho e Marchetti (2007, p. 54), em torno de 23 cm, e mostram que o sistema de lajes maciças apresenta maior consumo.

Quadro 18 – Espessuras médias de projeto

Espessuras médias de projeto (cm)			
Treliçada Cerâmico	Treliçada EPS	Maciça	Nervurada
21,8	21,5	24,5	23,7

Fonte: Do Autor

5.2 Comparativo em termos de consumo de forma

Primeiramente, para estabelecer este comparativo, utilizou-se o índice que relaciona o consumo de forma, em termos de área, com a área construída da edificação. De maneira análoga a realizada para o consumo de concreto, o índice foi estabelecido de acordo com o tipo de elemento estrutural em cada uma das quatro soluções de projeto abordadas. Estes dados podem ser vistos no Quadro 19.

Quadro 19 – Índices de consumo de forma

Consumo de forma por área (m²/m²)				
Elemento	Treliçada Cerâmico	Treliçada EPS	Maciça	Nervurada
Vigas	1,45	1,45	1,3	1,17
Pilares	0,46	0,46	0,46	0,46
Lajes	0,03	0,03	0,86	0,06
Escadas	0,04	0,04	0,04	0,04
Fundações	0,02	0,02	0,02	0,02
Reservatórios	0,05	0,05	0,05	0,05
TOTAL	2,06	2,06	2,73	1,79

Fonte: Do autor

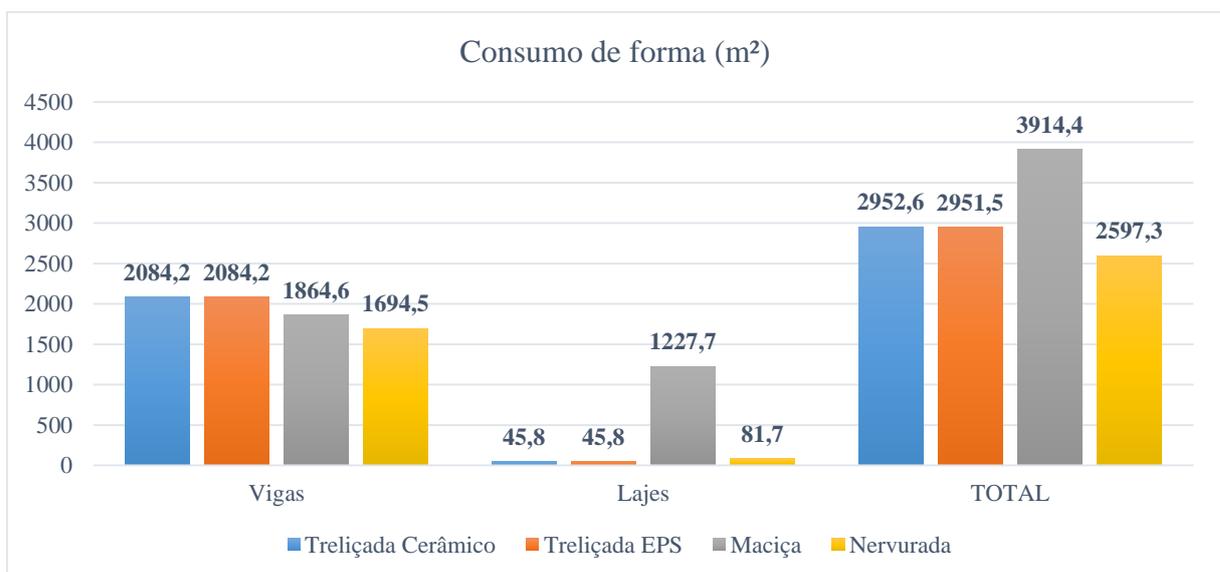
Pelos dados apresentados acima, pode-se observar que o sistema estrutural composto por lajes maciças é o que consome a maior quantidade de formas, aproximadamente 32% a mais que os sistemas com lajes treliçadas. Os dois sistemas compostos por lajes treliçadas apresentam o mesmo consumo de formas, pois a troca do material de enchimento não tem influência sobre o consumo de forma dos elementos em geral.

Devido à redução de vigas nos pavimentos, o índice de consumo de formas de vigas diminuiu dos modelos 1 e 2 com (1,45 m²/m²) para o modelo 3 (1,3 m²/m²) e 4 (1,17 m²/m²). Contudo, as lajes treliçadas não exigem formas e as maciças apresentam consumo considerável, verificados pelo índice que, para as lajes, sobe de 0,03 m²/m² (modelos 1 e 2) para 0,86 m²/m², no modelo 3.

O modelo com lajes nervuradas foi o que apresentou menor consumo de formas (0,06 m²/m²), uma vez que as cubetas de polipropileno não são contabilizadas como formas, e sim como materiais de enchimento. Pode-se ver que a solução com lajes nervuradas apresentou, para as lajes, índices de formas próximos aos das treliçadas, porém houve uma redução considerável de vigas que refletiram no índice final, fazendo com que o índice de formas do sistema 4, composto por lajes nervuradas, fosse o menor entre as alternativas (1,79 m²/m²).

A Figura 17 ilustra graficamente o consumo de forma nas vigas, nas lajes e o total, considerando também os pilares, fundações e escadas. Fica mais clara a tendência decrescente do consumo de formas nas vigas conforme a mudança do sistema e é destacada a diferença entre o sistema de lajes maciças e os demais, que possuem lajes que dispensam o uso de forma.

Figura 17 – Consumos de forma



Fonte: Do Autor

Outro índice utilizado para este comparativo é o que relaciona o consumo de forma por metro cúbico consumido de concreto. Os valores totais e elencados por elemento podem ser vistos no Quadro 20. Estes valores não permitem uma comparação direta entre sistemas estruturais distintos, visto que ele é influenciado por dois fatores (forma e concreto) que podem variar em taxas distintas. Entretanto, eles são úteis para se ter ideia da coerência do dimensionamento, a partir dos valores sugeridos pela literatura, e para servirem de comparativo entre projetos diferentes de mesmo sistema estrutural.

Quadro 20 – Índices de consumo de forma por volume de concreto (m^2/m^3)

Consumo de forma por volume de concreto (m^2/m^3)				
Elemento	Treliçada Cerâmico	Treliçada EPS	Maciça	Nervurada
Vigas	12,76	12,76	12,68	12,71
Pilares	12,29	12,29	12,29	12,29
Lajes	0,69	0,71	10,07	0,63
Escadas	11,43	11,43	11,43	11,43
Fundações	1,78	1,84	1,79	1,77
Reservatórios	12,52	12,52	12,52	12,52
TOTAL	9,46	9,56	11,16	7,56

Fonte: Do autor

5.3 Comparativo em termos de consumo de aço

Da mesma maneira realizada para os quantitativos de forma, obteve-se o consumo de aço por área e por volume de concreto total e divididos por elementos estruturais. Estes valores foram extraídos para os quatro modelos propostos neste trabalho.

Vale ressaltar que, em relação aos modelos 1 e 2, compostos por lajes pré-moldadas, os quantitativos de aço não incluem as armações treliçadas, tampouco as armaduras adicionadas às treliças para resistir aos esforços das lajes. Apenas incluem as armaduras extras construtivas, como a armadura de distribuição necessária na capa das lajes treliçadas, além da armadura das lajes maciças dos pavimentos inalterados e das lajes em balanço das áreas técnicas.

Os índices de consumo de aço por área e por volume de concreto podem ser vistos nos Quadros 21 e 22, logo abaixo.

Quadro 21 – Índices de consumo de aço por área

Consumo de aço por área (kg/m ²)				
Elemento	Treliçada Cerâmico	Treliçada EPS	Maciça	Nervurada
Vigas	9,2	8,82	7,93	6,84
Pilares	3,8	3,88	3,97	3,9
Lajes	0,51	0,54	4,78	4,01
Lajes PM	1,41	1,11	-	-
Escadas	0,13	0,13	0,13	0,13
Fundações	0,64	0,58	0,62	0,58
Reservatórios	0,47	0,47	0,47	0,47
TOTAL	16,16	15,53	17,91	15,94

Fonte: Do autor

Quadro 22 – Índice de consumo de aço por volume de concreto

Consumo de aço por volume de concreto (kg/m ³)				
Elemento	Treliçada Cerâmico	Treliçada EPS	Maciça	Nervurada
Vigas	80,74	77,41	77,31	74,35
Pilares	101,39	103,49	105,96	105,18
Lajes	10,89	12,08	56,27	44,99
Escadas	36,14	37,92	37,03	37,21
Fundações	52,54	50,67	51,94	50,5
Reservatórios	116,54	116,54	116,05	116,54
TOTAL	74,24	72,15	73,21	67,16

Fonte: Do autor

A partir dos dados acima, é possível observar que o sistema que apresentou menor índice de consumo de aço por área foi o de lajes treliçadas com EPS, com um total de 15,54 kg/m². Assim, em termos absolutos, esta solução é a que consome a menor quantidade de aço.

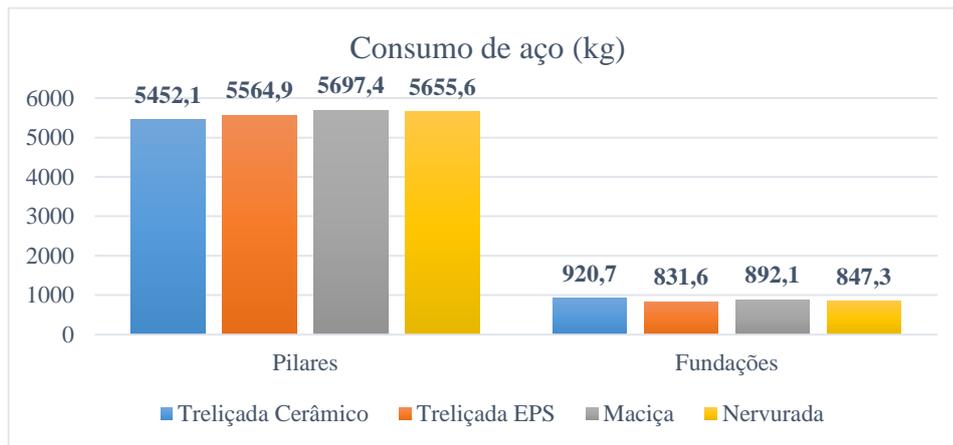
Por outro lado, o sistema com lajes nervuradas com cubetas apresenta o menor índice de consumo de aço por metro cúbico de concreto (67,17 kg/m³). Mesmo que esta solução demande uma quantidade maior de aço, em valor absoluto, ela apresenta o menor consumo de aço por metro cúbico de concreto. Isto destaca a maior eficiência das lajes nervuradas em otimizar a relação de consumos entre aço e concreto, principalmente devido à diminuição do volume de concreto nas zonas de tração, com o emprego do formato em nervuras.

Neste estudo de caso, uma particularidade dos índices de consumo de aço foi o fato de eles apresentarem variações significativas para os pilares e fundações. Diferentemente dos

índices de concreto e forma, que para eles permaneceram constantes, o consumo de aço foi alterado pelo dimensionamento das armaduras. A variação dos materiais e dos tipos de laje influenciam no peso próprio e provocam resultados de esforços distintos nos pilares e fundações, que são utilizados para o dimensionamento das armaduras.

A Figura 18 ilustra esta variação do consumo absoluto de aço nos pilares e fundações dos quatro sistemas analisados.

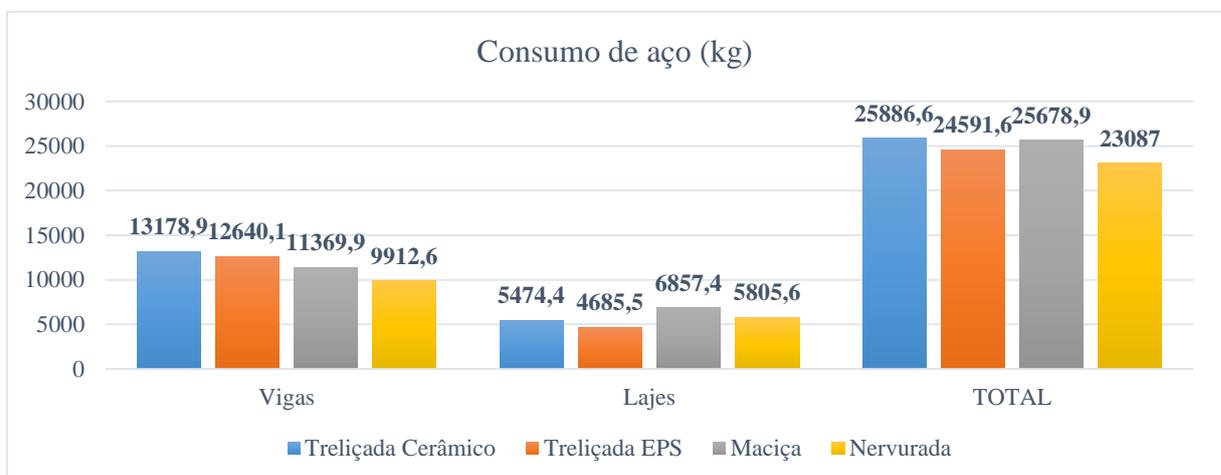
Figura 18 – Consumo de aço para pilares e fundações



Fonte: Do autor

De maneira análoga a apresentada para os quantitativos de concreto e forma, a Figura 19 mostra graficamente os consumos de aço nas lajes, vigas e em toda a estrutura, para cada modelo estrutural. Há uma ressalva em relação aos consumos de aço das lajes, que diferem dos índices apresentados nos Quadros 21 e 22: para ilustrar melhor as diferenças dos consumos entre lajes, considerou-se o total de aço incluindo as armações treliçadas.

Figura 19 – Consumos de aço para vigas, lajes e totais



Fonte: Do autor

No que diz respeito ao consumo total de aço, a proposta de lajes nervuradas apresentou menor consumo, depois a de lajes treliçadas de enchimento de EPS, de enchimento cerâmico e, por último, a de lajes maciças.

Cabe observar que o consumo de aço das vigas decresceu para o modelo com lajes de EPS devido à diminuição dos valores de carga das reações das lajes sobre as vigas. Também houve redução para os outros dois modelos, justificada pela redução de vigas.

5.4 Comparativo em termos de custo

Os custos resultantes para os quatro modelos abordados nesta pesquisa serão expressos em termos totais, distribuídos entre os elementos estruturais (vigas, lajes, pilares, escadas, fundações e reservatório) e distribuídos entre os materiais utilizados. Eles foram calculados a partir dos quantitativos de todos os insumos (concreto, aço, forma, elementos pré-moldados e blocos de enchimento, a depender do caso) e partir dos custos unitários definidos na seção 4.3.

Os resultados, que são apresentados no Quadro 23, representam a soma das seguintes parcelas: custos de material e custos de execução de cada elemento. Neste estudo de caso, a solução treliçada EPS apresentou o menor custo total e a solução maciça o maior.

Quadro 23 – Relação de custos totais por elemento

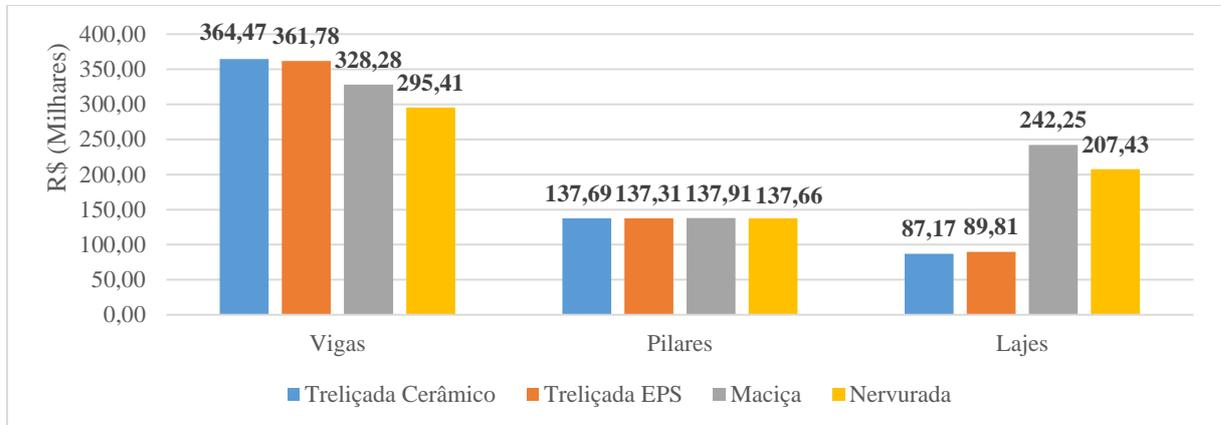
Relação de custo total por elemento (R\$)				
Elemento	Treliçada Cerâmico	Treliçada EPS	Maciça	Nervurada
Vigas	364.472,63	361.811,10	328.292,78	295.440,12
Pilares	137.693,36	137.310,09	137.909,82	137.661,73
Lajes	87.172,71	89.831,61	242.253,18	207.433,47
Escadas	10.140,21	10.206,08	10.148,48	10.149,76
Fundações	17.116,61	16.033,26	16.755,02	16.104,91
Reservatórios	8.397,86	8.397,86	8.370,29	8.397,86
TOTAL	624.993,38	623.590,01	743.729,57	675.187,85

Fonte: Do autor

Os custos de escadas e reservatórios são muito próximos entre os modelos. Tomando os valores obtidos para o modelo treliçada cerâmico como referência, as variações percentuais não chegam a 1%. É pertinente, então, uma comparação entre os custos das vigas, pilares e lajes,

uma vez que estes são os elementos que mais sofrem influência da escolha do tipo de laje. A Figura 20 mostra os custos totais para estes elementos, em milhares de reais.

Figura 20 – Custos totais para vigas, pilares e lajes



Fonte: Do autor

Tomando como referência o modelo 1 (treliçada cerâmico), para as vigas, o modelo treliçada EPS apresentou um custo menor devido a diminuição do peso próprio e os modelos de maciças e nervuradas apresentaram esta diminuição devido aos novos lançamentos com redução de vigas. Os pilares mantiveram-se com custos totais semelhantes, com variações menores que R\$ 700,00 entre os modelos (menos que 0,5 % de diferença). As lajes em EPS, as maciças e as nervuradas com cubetas tiveram um acréscimo de custo de 3,03%, 177,9% e 137,96%, em relação às lajes treliçadas com blocos cerâmicos.

Os custos podem ter origens diferenciadas, a depender do tipo de estrutura. Por exemplo, o modelo com lajes maciças tem custos definidos apenas por concreto, aço e formas. As lajes treliçadas também dependem dos custos das vigotas e blocos de enchimento e as lajes nervuradas dependem dos custos das cubetas.

O Quadro 24 relaciona os custos com os insumos utilizados em cada um dos modelos estruturais, resultando nos mesmos valores de custos totais citados anteriormente. Cabe esclarecer que a opção com lajes maciças é a única possui os custos dependentes apenas de concreto, aço e forma. As lajes treliçadas dependem do custo das vigotas por metro quadrado e das unidades de blocos de enchimento. As lajes nervuradas com cubetas, embora sejam moldadas no local, possuem seus custos contabilizados na linha “Laje pré-fabricada”, em função da área das lajes e na linha “Blocos de enchimento”, em função número de cubetas necessárias, da mesma maneira que as lajes treliçadas.

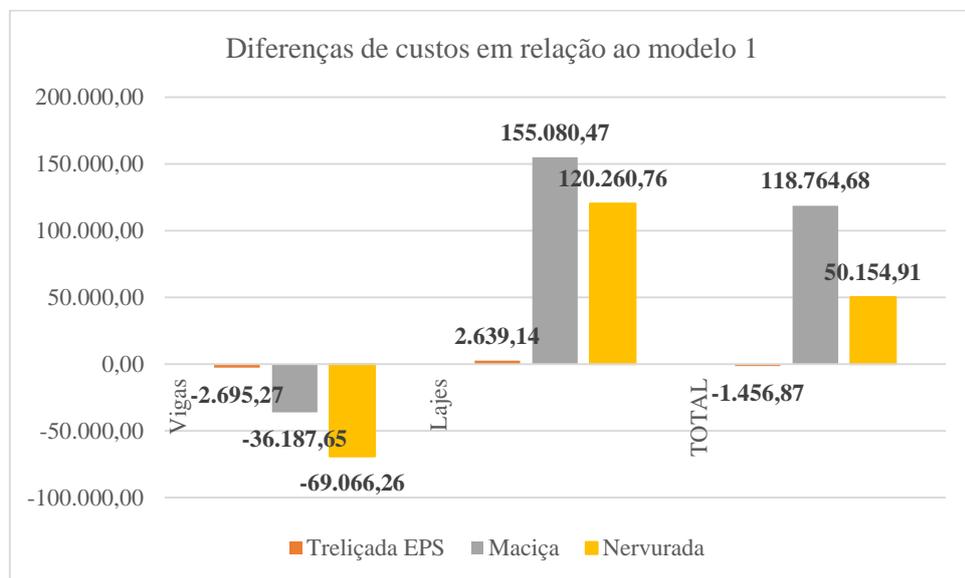
Quadro 24 – Relação de custo total por material

Relação custo por material (R\$)				
Elemento	Treliçada Cerâmico	Treliçada EPS	Maciça	Nervurada
Aço	148.447,90	145.358,65	190.774,42	169.193,65
Concreto	105.592,95	104.482,81	118.751,55	116.394,74
Formas	317.608,65	317.461,99	434.232,09	281.633,64
Laje pré-fabricada	44.060,23	33.856,00	-	84.022,91
Blocos de enchimento	9.283,65	22.377,06	-	23.903,36
TOTAL	624.993,38	623.536,51	743.758,06	675.148,29

Fonte: Do autor

A Figura 21 mostra as diferenças de custos em relação ao custo do modelo 1 para as vigas e as lajes, que são quem apresentam mudanças de custos mais significativas, conforme o Quadro 23. Elas permitem concluir que a diminuição dos custos das vigas não compensou o aumento dos custos das lajes nos modelos 3 (lajes maciças) e 4 (lajes nervuradas).

Figura 21 – Diferenças de custo em relação ao modelo original, para vigas, lajes e no total



Fonte: Do autor

6 CONCLUSÕES

Este trabalho verificou os quantitativos dos insumos e custos totais para quatro modelos estruturais: o projeto original, composto por lajes treliçadas com blocos de enchimento cerâmicos; o modelo 2, com lajes treliçadas com blocos de enchimento de EPS; o modelo 3, com lajes maciças reduzindo vigas e o modelo 4, com lajes nervuradas com cubetas reduzindo vigas.

Para o caso específico deste edifício, segundo as configurações pré-definidas do Eberick, sua metodologia de cálculo de quantitativos e de custos adotados, o modelo estrutural que apresentou o menor preço foi o com lajes treliçadas com blocos de EPS. O modelo 2 resultou no menor custo total, muito próximo do custo do projeto original, a diferença percentual foi de 0,23% (R\$ 1.456,87).

Estes resultados poderiam variar a partir de mudanças nos custos unitários dos insumos. Por exemplo, caso o custo do EPS seja mais alto do que o utilizado neste estudo, pode ser que o modelo original seja realmente o mais econômico. Verificou-se também que a solução com lajes maciças foi para este caso, a que apresentou maior custo total, 8,02 % mais cara (R\$ 118.764,68) que a original.

Pode-se concluir que a concepção estrutural exerce influência sobre os custos finais relacionados à estrutura de um edifício em concreto armado, ressaltando a importância da etapa de estudos preliminares, na quais se escolhe o sistema estrutural adotado a fim de atender as exigências arquitetônicas com economia e segurança.

Embora os quantitativos de concreto, aço e forma ajudem como indicadores de uso racional dos insumos, podendo servir de dados para compor um sistema de controle de qualidade de projetos personalizado, para obras semelhantes, possibilitando a localização de elementos que possam estar dando picos de consumo de materiais, eles por si só não exprimem viabilidade econômica.

Então, destacar como solução mais econômica um sistema estrutural baseando-se apenas nos quantitativos de concreto, aço e forma não é a forma mais adequada, pois além do custo total ser dependente de duas variáveis (quantitativos e custos unitários), podem existir elementos extras (blocos de enchimento e cubetas) que precisam ser contabilizados. É desta maneira, considerando todos os materiais envolvidos a depender de cada sistema estrutural, que os custos expressos neste trabalho foram gerados.

É necessário que o projetista tenha uma compreensão básica que as decisões e proposições sobre uma estrutura, como variação de carregamentos ou de propriedades dos materiais constituintes, geram implicações nos quantitativos e custos. É neste momento que o engenheiro deve se remeter aos conhecimentos teóricos das disciplinas, para fazer correlações dos resultados obtidos com devida fundamentação, levantar hipóteses e verificar qual solução é mais viável.

Os custos unitários dos insumos podem ser afetados por fatores como disponibilidade local, especialização da mão-de-obra e técnicas construtivas. Um estudo comparativo de custos de um projeto estrutural, com dois ou mais modelos propostos, variando os custos unitários, utilizando os pré-definidos pelo Eberick, os disponíveis no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e os obtidos de alguma construtora local, por exemplo, pode ser útil para verificar se esta diferença realmente pode alterar o resultado do modelo mais viável do ponto de vista econômico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AECWEB. **Exemplo de sistema de escoramento para cubetas na concretagem de uma laje nervurada.** In: Fôrma e escoramento para laje nervurada oferecem agilidade e economia de 20%. Disponível em: < https://www.portaldosequipamentos.com.br/emp/cont/m/forma-e-escoramento-para-laje-nervurada-oferecem-agilidade-e-economia-de-20_1120_5183>. Acesso em: 25 mai. 2018.
- ALBUQUERQUE, A.T. (1998). **Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado.** São Carlos, 1998. 97 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- ALTOQI. **Guia de ajuda do AltoQI Eberick.** Disponível em: < http://help.altoqi.com.br/Eberick/default.aspx?pageid=altoqi_eberick>. Acesso em: 19 mai. 2018.
- ARAÚJO, J. M. de. **Curso de Concreto Armado.** Rio Grande: Dunas, 2010, v. 2, 3. ed.
- 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: 22 mai. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 6120:** Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. **NBR 6123:** Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. **NBR 14859-1:** Lajes pré-fabricadas de concreto. Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis - Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 14859-2:** Lajes pré-fabricadas de concreto. Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma — Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 15200.** Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ATAÍDE, C. A. V., CORRÊA, M. R.S. **Estudo comparativo entre os métodos das tensões admissíveis e o método dos estados limites para alvenaria estrutural.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n.34, p.105-136, 2006.

- BASTOS, P. S. S. **Elementos estruturais**. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Bauru, 2015, p. 64-81. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Elem.%20Estrut.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 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, 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.
- COELHO, J. D. **Modelagem de lajes de concreto armado por analogia de grelha - conceitos iniciais**. Artigo da AltoQI. Disponível em: <http://faq.altoqi.com.br/content/245/600/pt-br/modelagem-de-lajes-de-concreto-armado-por-analogia-de-grelha-_conceitos-iniciais.html?highlight=analogia%20de%20grelha>. Acesso em: 19 mai. 2018.
- DORNELES, D. M. **Lajes na construção civil brasileira: estudo de caso em edifício residencial em Santa Maria – RS**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 77 p., 2014.
- FIGUÊREDO, P. **Construção civil representa 6,2% do PIB do Brasil. Federação das Indústrias do Distrito Federal – FIBRA**. Brasília, 14 fev. 2017. Disponível em: <<https://www.sistemafibra.org.br/fibra/sala-de-imprensa/noticias/1315-construcao-civil-representa-6-2-do-pib-brasil>>. Acesso em: 11 mai. 2018.
- FONSECA, L. P. DA. **Comparativo entre laje nervurada com vigas-faixa e laje maciça protendida**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 67 p., 2015.
- INOJOSA, L.S.P. BUZAR, M.A.R. **Sistemas Estruturais na Arquitetura**. Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo. Brasília, n. 15, pag.15-23, 2015.

- JABLONSKY, L. **Índices e taxas de consumo de materiais em função da tipologia estrutural**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 72 p., 2013.
- MARTHA, L. F. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 524 p. p. 1.
- MATTOS, A. D. **Como preparar orçamentos de obras: dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos**. 1ª ed. São Paulo: Editora Pini, 2006.
- PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**, São Paulo, ano XXXVII, n. 53, 2009.
- PINHEIRO, L. M., MUZARDO, C. D., SANTOS, S. P. **Lajes maciças – capítulo 11**. São Carlos, 2010. Disponível em:
<<http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/11%20Lajes%20Macicas.pdf>>.
Acesso em 19 mai. 2018.
- PRÉ-MOLD RM. **Catálogo Técnico de lajes treliçadas**. Disponível em: <
https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/Pre_mold_RM/Pre_mold_RM_paineltrelnerveps.pdf
>. Acesso em: 14 mai. 2018.
- REBELLO, Y. C. P. **Bases para projeto estrutural na arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editora, 2007. 287 p.
- REVISTA CONSTRUÇÃO MERCADO. São Paulo: Pini, n. 183, ano 69. Out. 2016.
- SANTOS, R. E. dos. **A armação do concreto no Brasil. História da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Educação, Belo Horizonte, 2008.
- SILVA, A. R. **Análise comparativa de custos de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- SILVA, R. B. **Contribuições à análise estrutural de lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. 2012. 150 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SILVA, L. P. **Estudo comparativo entre lajes nervuradas e maciças em função dos vãos entre apoios.** Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 98 p., 2010.

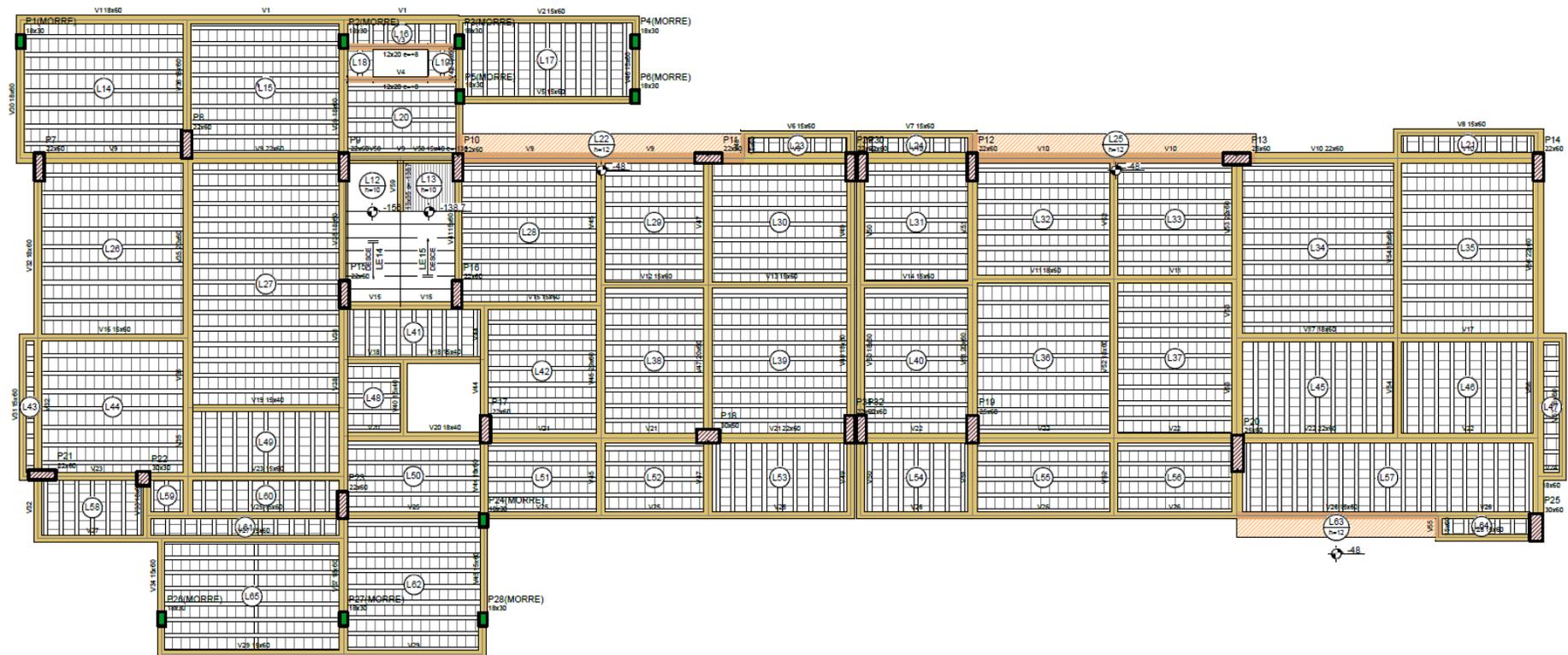
SPOHR, V. H. **Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TEIXEIRA, E. **Relatório de custos da estrutura – Parte 01.** Eberick Next: Blog de desenvolvimento colaborativo da AltoQI, 2016. Disponível em: <
<http://eberickv10next.altoqi.com.br/novos-recursos/resumo-custos-estrutura/>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

TESSARI, J. **Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 102 p., 2006.

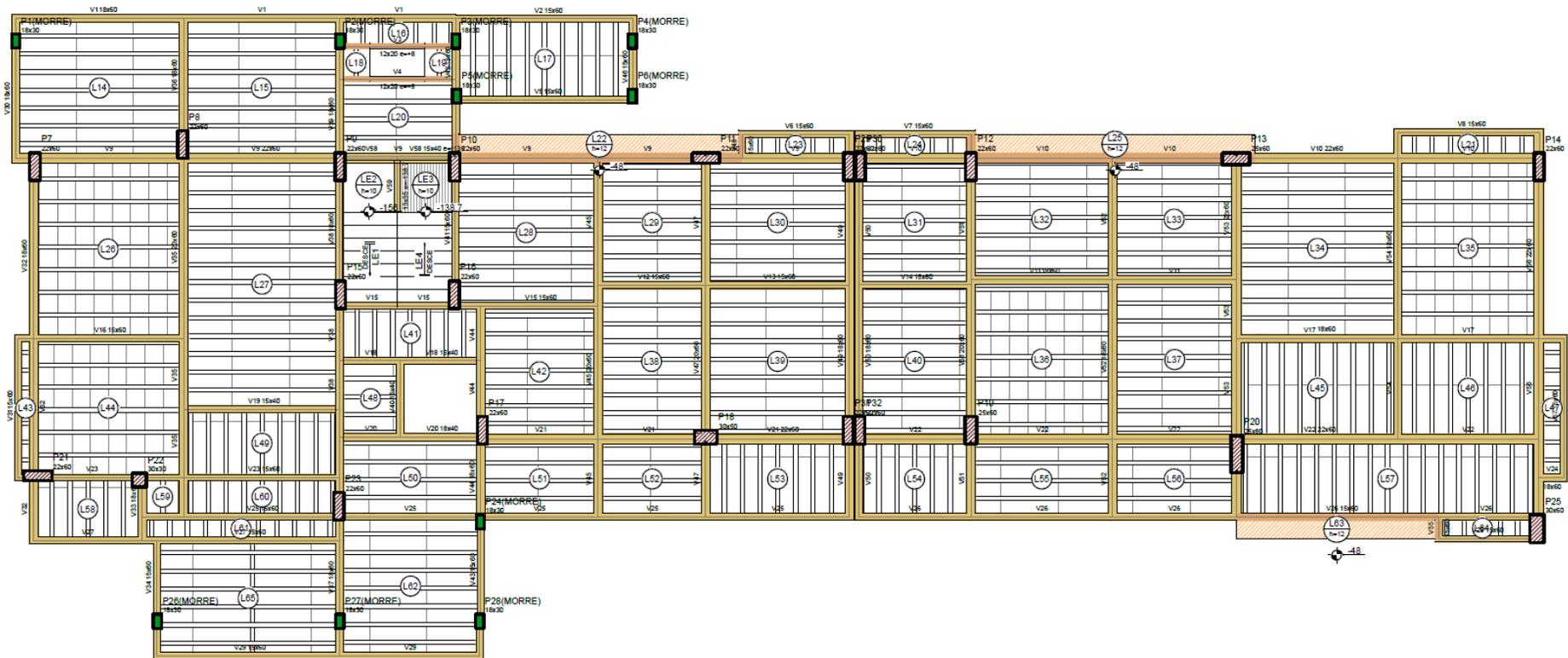
2R ARQUITETURA. **Projeto arquitetônico do edifício Ivanoé Júnior. 2014.** Plantas diversas e imagens das fachadas.

APÊNDICE A – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-2,95



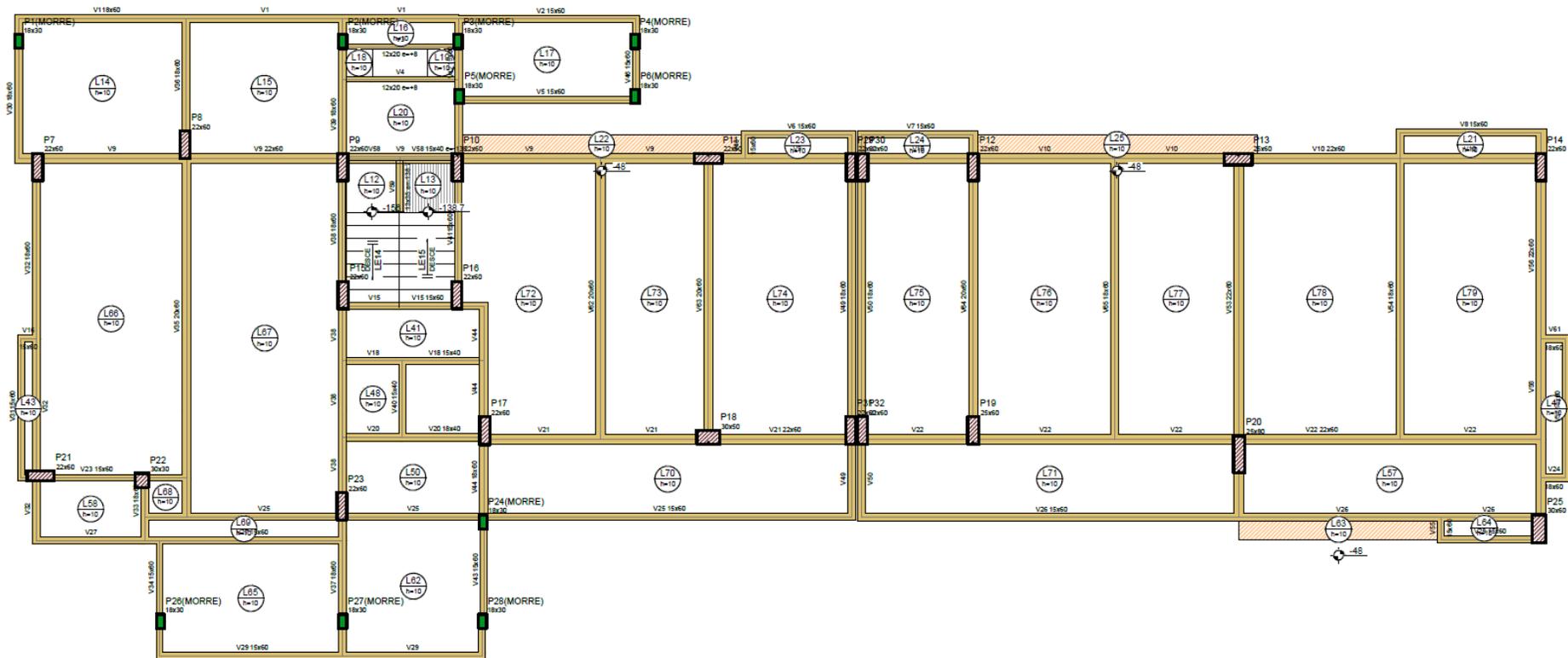
01 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 2,95 (TRELIÇADA - LAJOTA CERÂMICA)
ESCALA S/E

APÊNDICE A – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-2,95



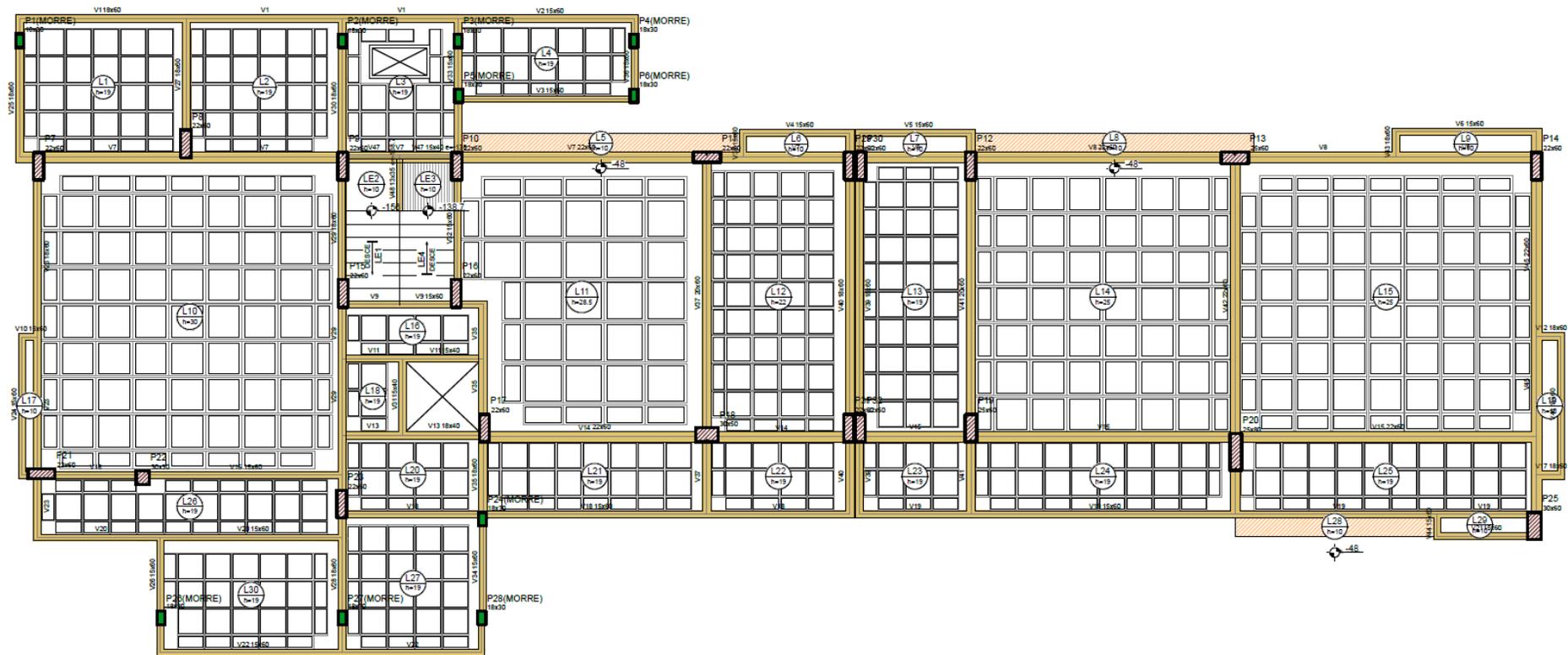
01 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 2,95 (TRELIÇADA - EPS)
ESCALA S/E

APÊNDICE A – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-2,95



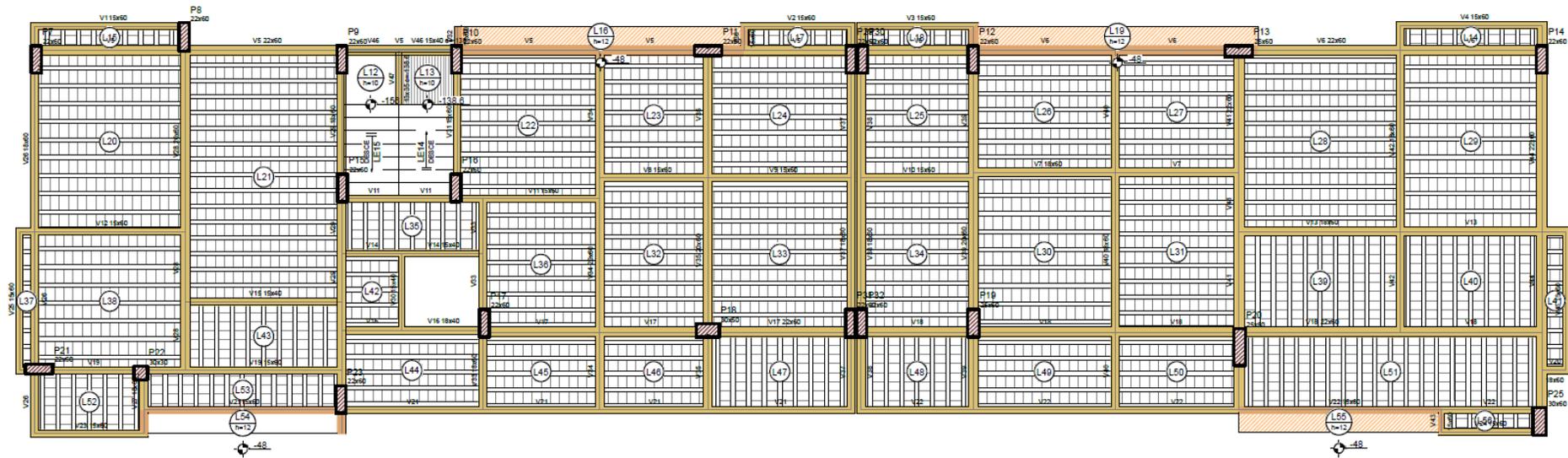
01 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 2,95 (MACIÇA)
ESCALA S/E

APÊNDICE A – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-2,95



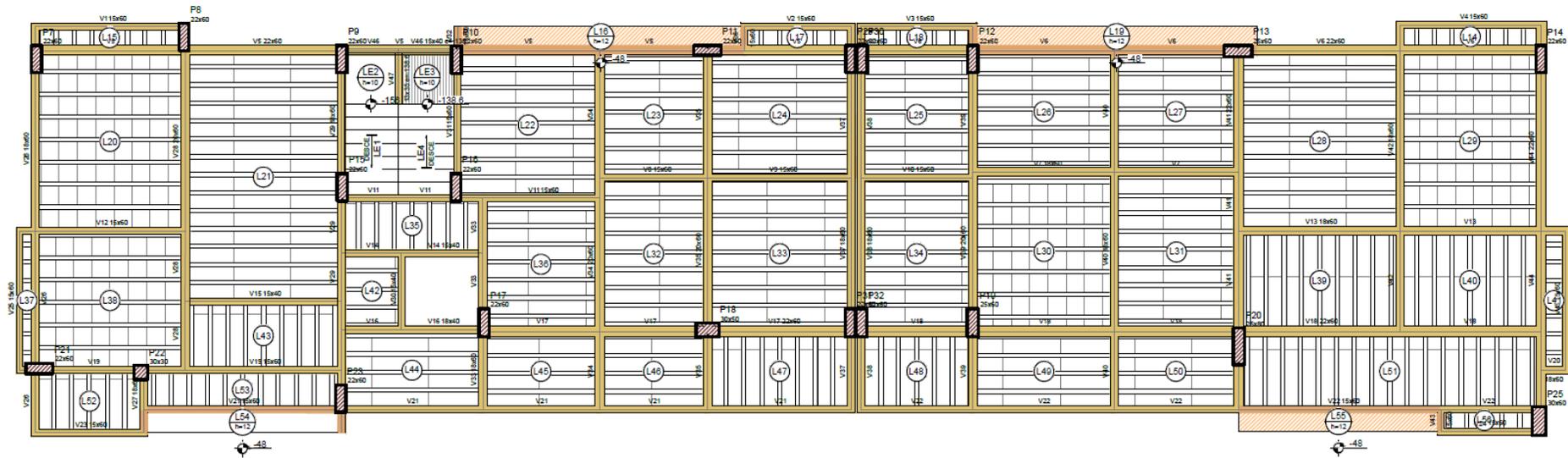
01 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 2,95 (NERVURADA)
ESCALA S/E

APÊNDICE B – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-5,90



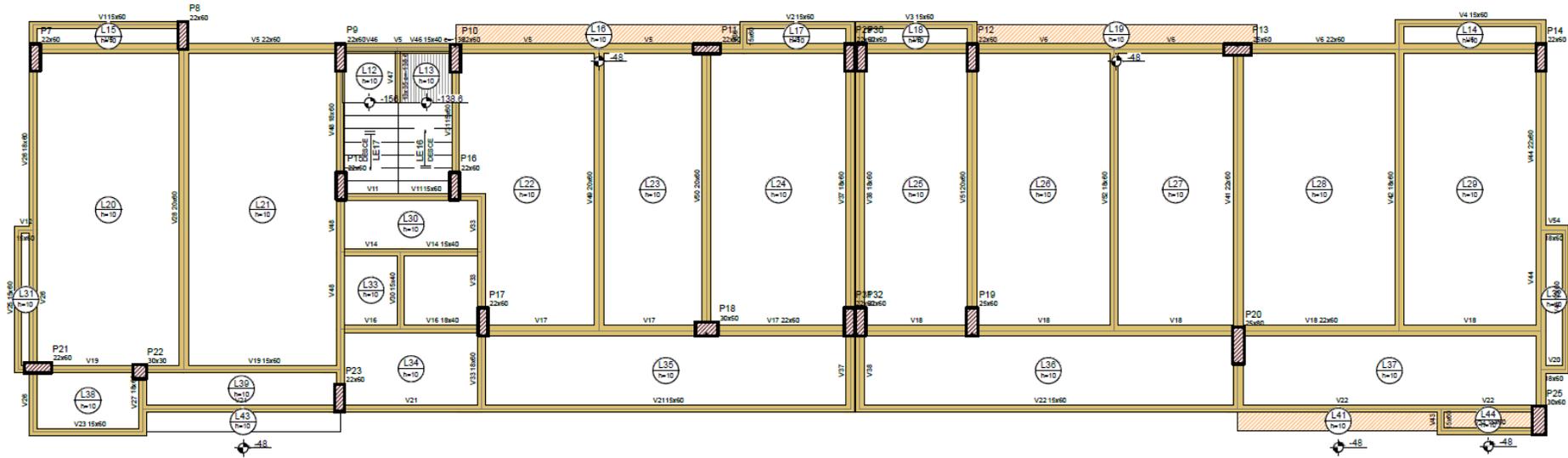
02 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 5,90 (TRELIÇADA - LAJOTA CERÂMICA)
ESCALA S/E

APÊNDICE B – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-5,90



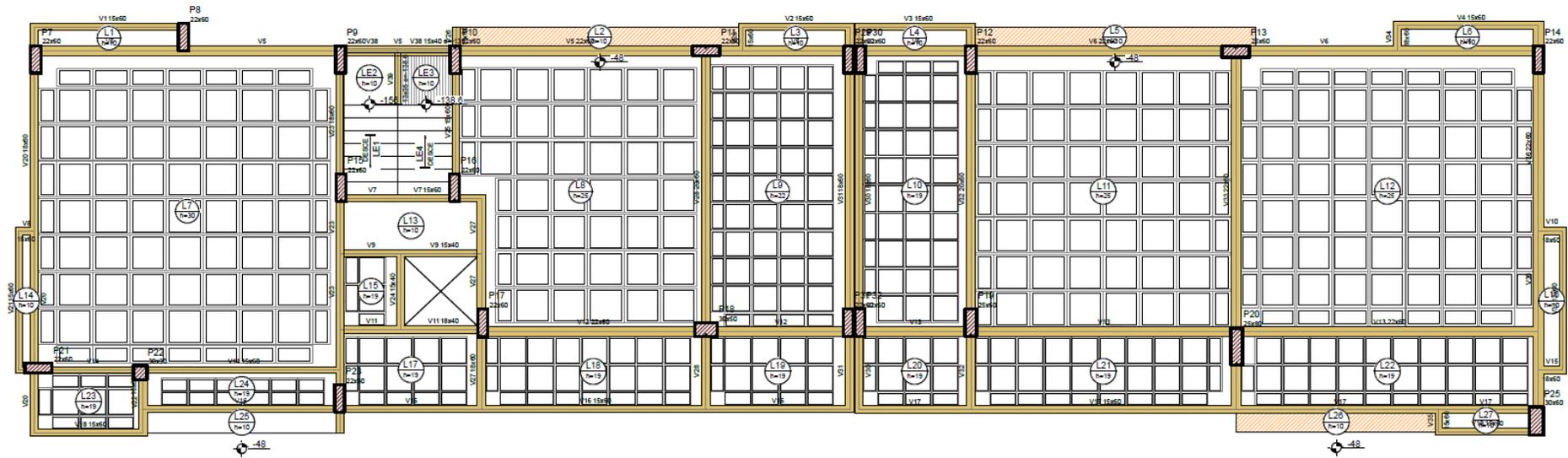
02 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 5,90 (TRELIÇADA - EPS)
ESCALA S/E

APÊNDICE B – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-5,90



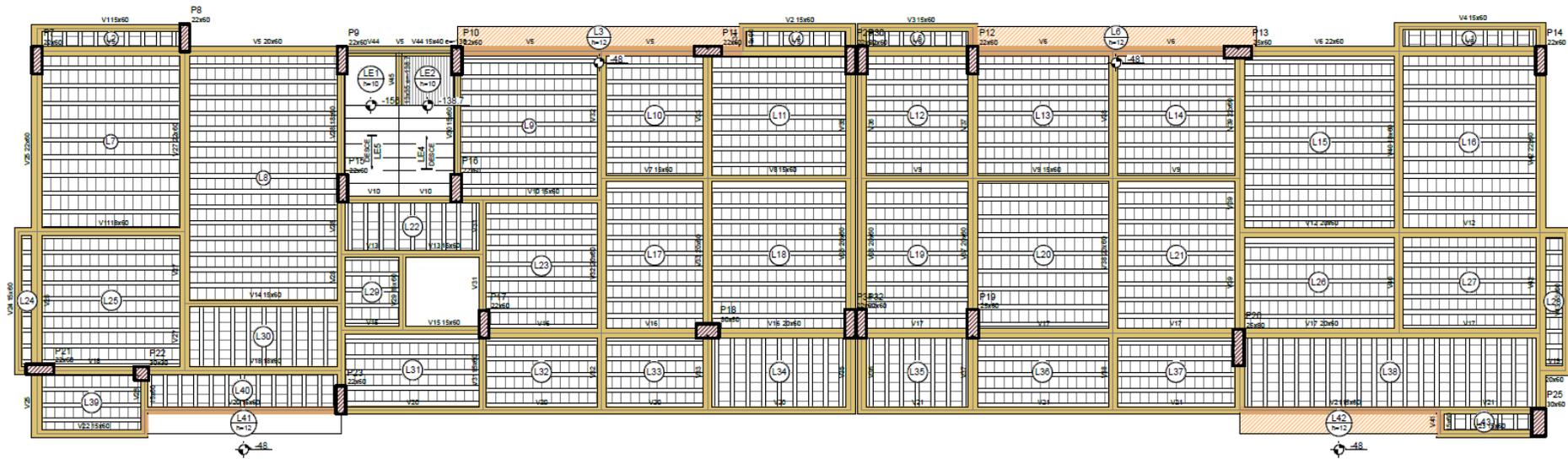
02 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 5,90 (MACIÇA)
ESCALA S/E

APÊNDICE B – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-5,90



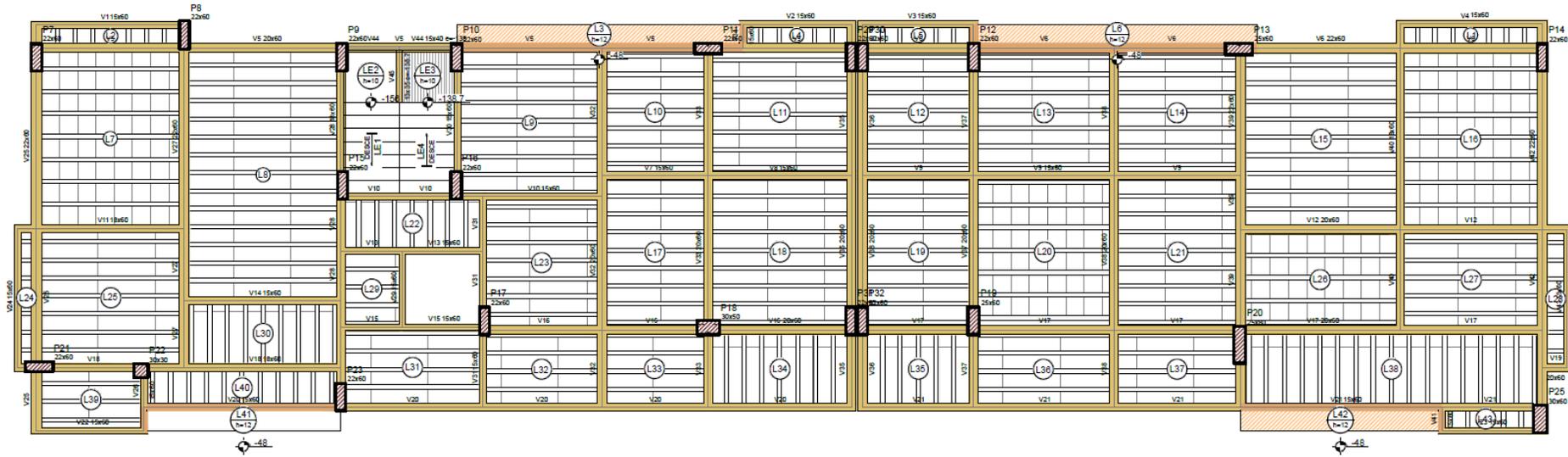
02 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 5,90 (NERVURADA)
ESCALA S/E

APÊNDICE C – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-11,80



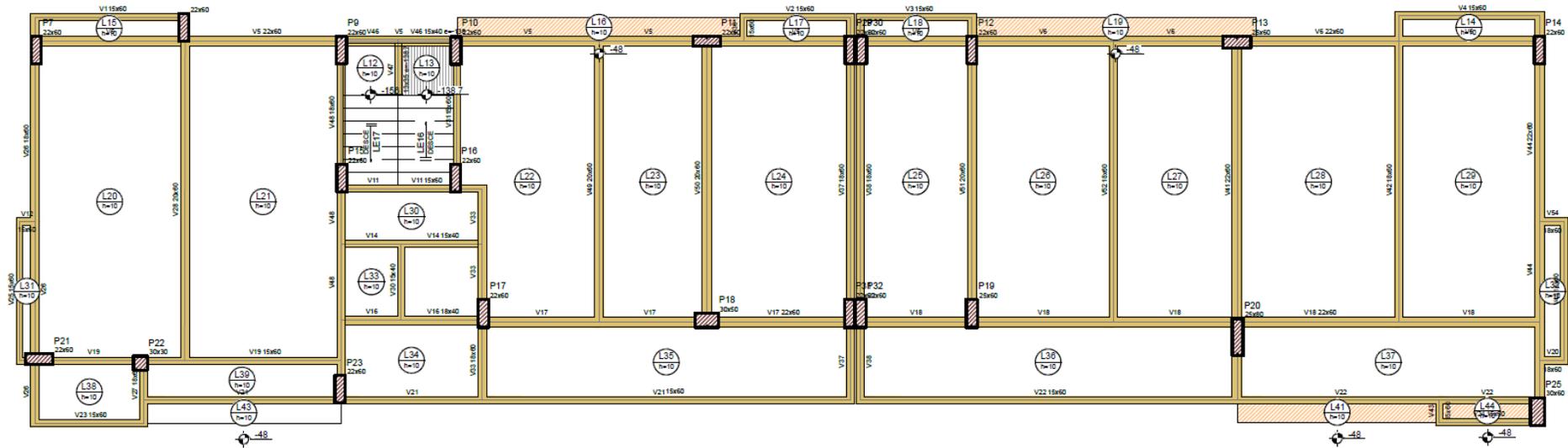
03 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 11,80 (TRELIÇADA - LAJOTA CERÂMICA)
ESCALA S/E

APÊNDICE C – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-11,80



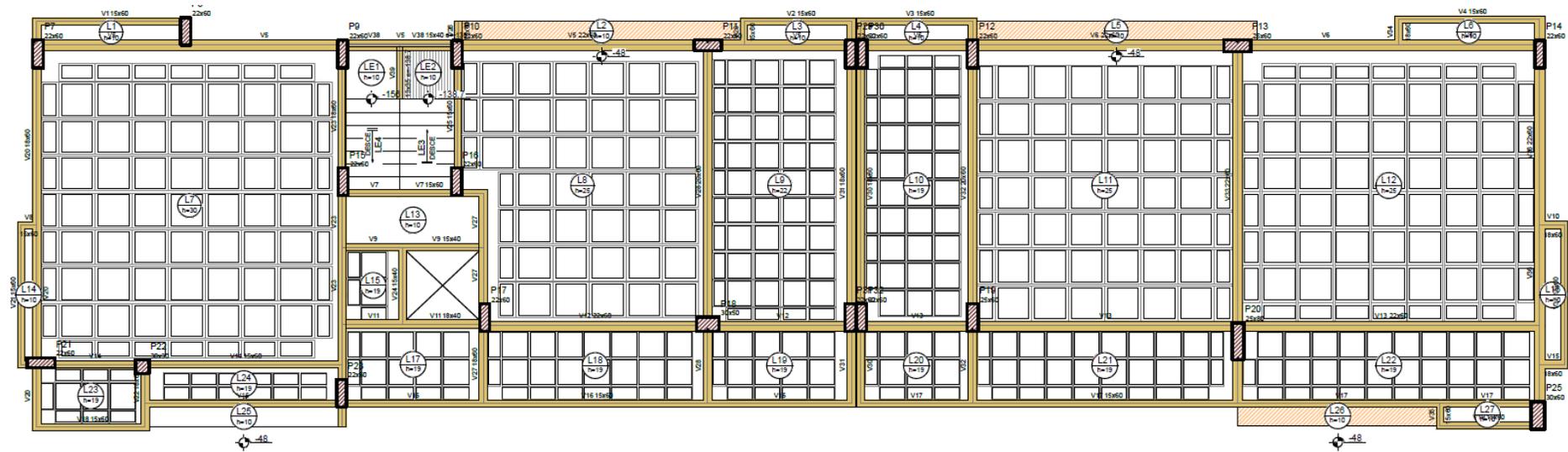
03 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 11,80 (TRELIÇADA - EPS)
ESCALA S/E

APÊNDICE C – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-11,80



03 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 11,80 (MACIÇA)
ESCALA S/E

APÊNDICE C – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-11,80



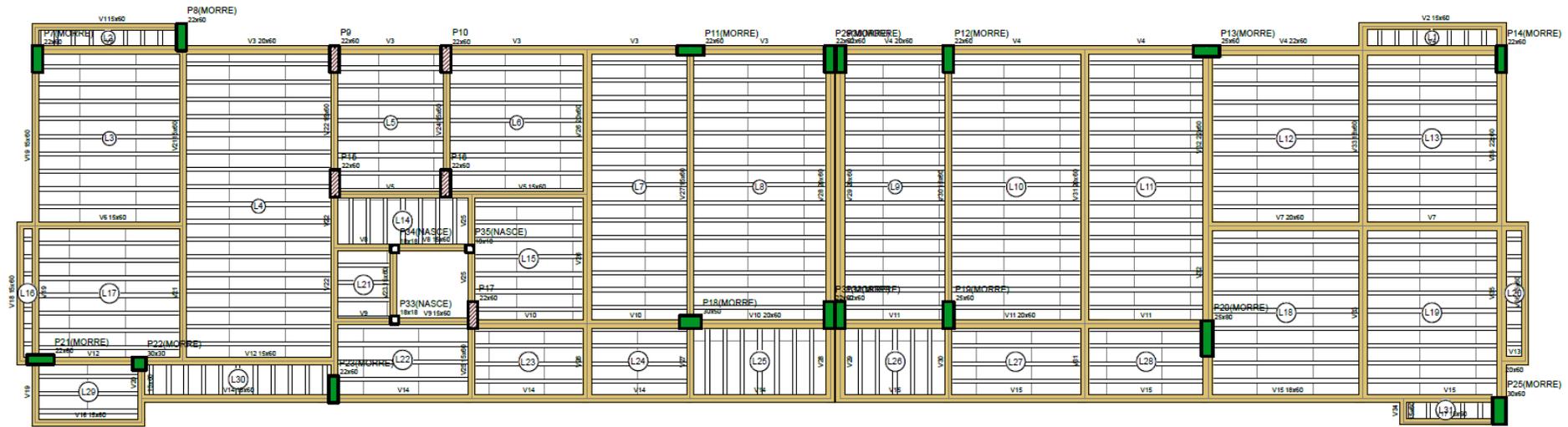
03 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 11,80 (NERVURADA)
ESCALA S/E

APÊNDICE D – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-14,75



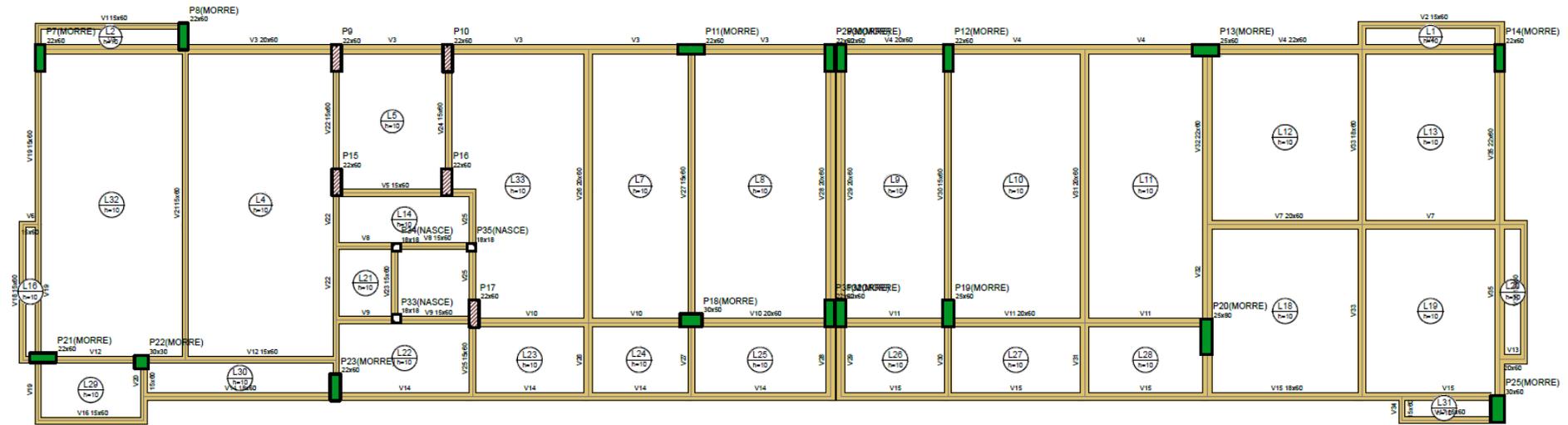
04 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 14,75 (TRELIÇADA - LAJOTA CERÂMICA)
ESCALA S/E

APÊNDICE D – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-14,75



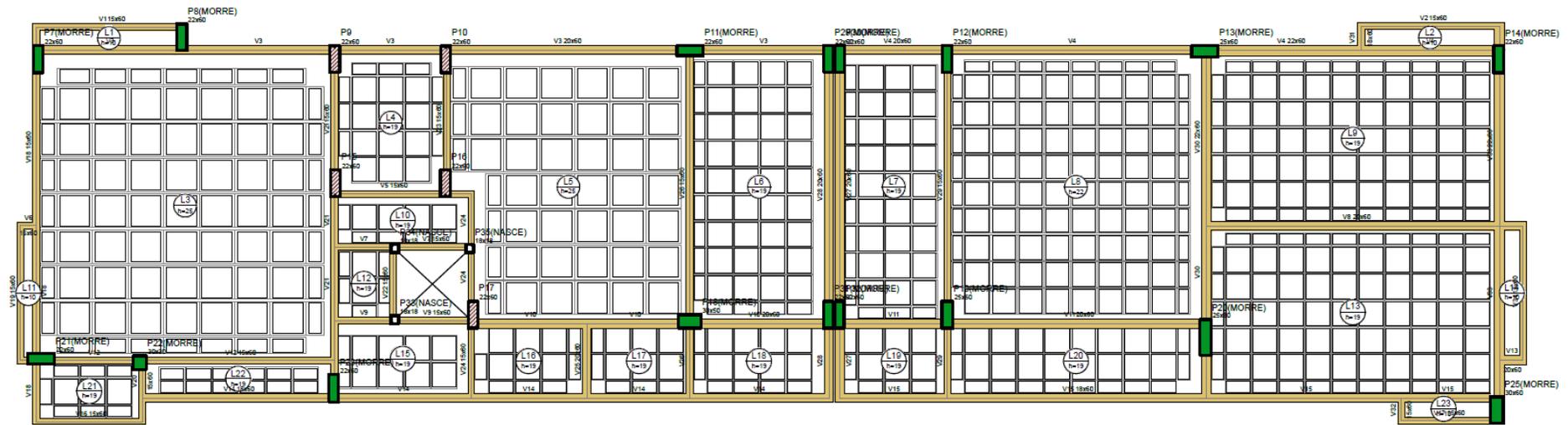
04 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 14,75 (TRELIÇADA - EPS)
ESCALA S/E

APÊNDICE D – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-14,75



04 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 14,75 (MACIÇA)
ESCALA S/E

APÊNDICE D – PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL-14,75



04 FORMA DO PAVIMENTO NÍVEL - 14,75 (NERVURADA)
ESCALA S/E