

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
ENGENHARIA CIVIL**

Carlhosman Rodrigues de Araujo Junior

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE CONCRETO
ARMADO EM FUNÇÃO DO TIPO DE LAJE**

Palmas – TO
2020

Carlhosman Rodrigues de Araujo Junior

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE CONCRETO
ARMADO EM FUNÇÃO DO TIPO DE LAJE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial à obtenção de título de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientadora: Prof. Dra. Orieta Soto Izquierdo

Palmas – TO
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

A663a Araujo Junior, Carlosman Rodrigues de.
Análise Comparativa Entre Sistemas Estruturais De concreto Armado Em
Função Do Tipo De Laje. / Carlosman Rodrigues de Araujo Junior. – Palmas,
TO, 2020.
97 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2020.

Orientadora : Orieta Soto Izquierdo

1. Análise Comparativa. 2. Custo, Consumo de materiais. 3. Laje maciça,
treliçada e lisa nervurada. 4. Estabilidade global. I. Título

CDD 624

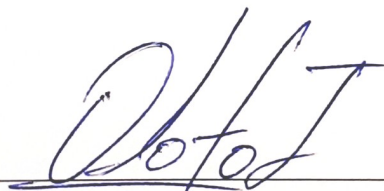
TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

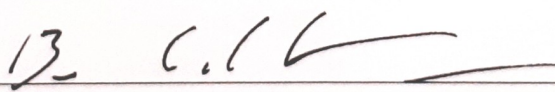
Carllosman Rodrigues de Araujo Junior

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE CONCRETO
ARMADO EM FUNÇÃO DO TIPO DE LAJE**

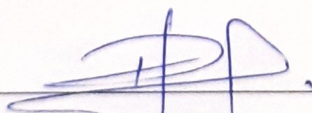
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial à obtenção de título de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientadora: Prof. Dra. Orieta Soto Izquierdo



Prof. Dra. Orieta Soto Izquierdo (Orientadora)
Universidade Federal do Tocantins



Prof. Dr. Bruno Carrilho de Castro
Universidade Federal do Tocantins



Prof. Me. Roldão Pimentel de Araujo Junior
Universidade Federal do Tocantins

Aos meus pais, Carlosman Rodrigues de Araujo e Maria Conceição Pereira de Almeida, e irmãs, Simone Oliveira de Araujo, Samila Oliveira de Araujo Silva, Carla Mízia de Almeida Araujo e Lara Sofia de Almeida Araujo, por todo apoio e dedicação a mim conferidos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo dom da vida e por todas as bênçãos derramadas sobre mim.

À minha família pelo total apoio, amor e compreensão, principalmente meus pais Carlosman Rodrigues de Araujo e Maria Conceição Pereira de Almeida, e irmãs, Simone Oliveira de Araujo, Samila Oliveira de Araujo Silva, Carla Mízia de Almeida Araujo e Lara Sofia de Almeida Araujo, que sempre estiveram ao meu lado, apesar da distância física.

Agradeço a minha avó querida, tios, primos e primas que sempre me incentivaram, acreditando no meu sonho.

Agradeço aos meus amigos que surgiram durante esta caminhada, pelo companheirismo e pela força que me foi repassada.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer ao corpo docente do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins por me proporcionarem as condições necessárias para que eu alcançasse meus objetivos, em especial, à minha orientadora, Orieta Soto Izquierdo, por todo tempo e atenção dedicado à minha pessoa, sempre muito solícita e amigável, sempre buscando o melhor para minha formação.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para que eu alcançasse essa vitória.

“Paciência e perseverança tem o efeito mágico de fazer as dificuldades desaparecerem e os obstáculos sumirem.”

(Jhon Quincy Adams)

RESUMO

O avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos beneficiou uma série de setores cruciais para o desenvolvimento mundial. Uma área que sofreu forte influência deste advento foi a engenharia civil. O surgimento de novos materiais, novas técnicas construtivas e o desenvolvimento de ferramentas computacionais cada vez mais potentes, são apenas alguns exemplos de benefícios agregados a este setor. Uma das aplicabilidades destas ferramentas (*softwares*) está ligada à análise e dimensionamento estrutural, proporcionando maior agilidade no processamento das estruturas e emissão dos resultados. É neste contexto que este trabalho foi proposto, o qual aborda uma análise comparativa de custos e consumo de materiais (aço, concreto e fôrma) entre três sistemas estruturais de concreto armado para um edifício comercial de múltiplos pavimentos, nos quais foram variados os tipos de laje. Para realizar a análise, foram definidos os três sistemas como: sistema estrutural convencional com lajes maciças (sistema estrutural 1); sistema estrutural convencional com lajes treliçadas (sistema estrutural 2); e sistema estrutural com lajes lisas nervuradas (sistema estrutural 3). O dimensionamento estrutural e a extração de quantitativos foram realizados com os *softwares* Eberick (para os sistemas estruturais 1 e 2) e Cypecad (para o sistema estrutural 3). O orçamento foi realizado com base nas composições de custos do Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Avaliou-se ainda a estabilidade global das estruturas através do coeficiente de estabilidade global Gama – Z (γ_Z). Após análise, constatou-se que o sistema estrutural 2 apresentou menor custo total dentre os três modelos analisados, com custo 15,57% menor que o sistema estrutural 1 (este sendo o de maior custo total). No tocante à estabilidade global, o sistema estrutural 3 obteve melhores resultados, com coeficiente de estabilidade menor entre os três modelos.

Palavras-chave: Análise comparativa. Custo. Consumo de materiais. Laje maciça. Laje treliçada. Laje lisa nervurada. Estabilidade global.

ABSTRACT

Technological advances in recent years have benefited a number of sectors that are crucial to world development. One area that was strongly influenced by this advent was civil engineering. The emergence of new materials, new construction techniques and the development of increasingly powerful computational tools are just some examples of benefits added to this sector. One of the applicability of these tools (software) is linked to the analysis and structural design, providing greater agility in the processing of structures and issuing of results. It is in this context that this work was proposed, which addresses a comparative analysis of costs and consumption of materials (steel, concrete and formwork) between three structural systems of reinforced concrete for a multi-storey commercial building, in which the types of slab were varied. To carry out the analysis, the three systems were defined as: conventional structural system with solid slabs (structural system 1); conventional structural system with lattice slabs (structural system 2); and structural system with smooth ribbed slabs (structural system 3). Structural design and quantitative extraction were performed with Eberick (for structural systems 1 and 2) and Cypecad (for structural system 3) software. The budget was made based on the cost compositions of the National System of Research on Costs and Indices of Civil Construction (SINAPI). The overall stability of the structures was also evaluated using the global stability coefficient Gamma - Z (γ_Z). After analysis, it was found that structural system 2 had the lowest total cost among the three models analyzed, with a cost of 15.57% lower than structural system 1 (this being the one with the highest total cost). With regard to overall stability, structural system 3 achieved better results, with a lower stability coefficient between the three models.

Keywords: Comparative analysis. Cost. Consumption of materials. Solid slab. Lattice slab. Ribbed smooth slab. Global stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ruptura de elemento estrutural no Estado-Limite Último.....	19
Figura 2 - Comportamento estrutural no Estado-Limite de Serviço: a) trincas nas alvenarias; b) mau funcionamento das esquadrias	19
Figura 3 - Valores do coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f3}$	21
Figura 4 - Valores do coeficiente γ_{f2}	22
Figura 5 - Comportamento não linear da estrutura.....	24
Figura 6 - Reações na barra indeformada.....	26
Figura 7 - Reações na barra deformada.....	26
Figura 8 - Influência das bordas na curvatura	29
Figura 9 - Sistema de viga e laje.....	30
Figura 10 - Vão da laje armada em duas direções.....	32
Figura 11 - Vão da laje armada em uma direção	33
Figura 12 - Treliça espacial	35
Figura 13 - Laje nervurada com treliça pré-moldada	35
Figura 14 - Parâmetros geométricos de lajes treliçadas	36
Figura 15 - Montagem de laje nervurada com cubetas plásticas.....	38
Figura 16 - Laje lisa nervurada apoiada diretamente sobre pilar	39
Figura 17 - Seção transversal de uma laje nervurada	40
Figura 18 - Custo total dos sistemas estruturais	47
Figura 19 - Layout do pavimento térreo	50
Figura 20 - Layout do pavimento tipo	51
Figura 21 - Modelo 3D do sistema estrutural 1	56
Figura 22 - Custo percentual por material do sistema estrutural 1	58
Figura 23 - Custo percentual por elemento do sistema estrutural 1	59
Figura 24 – Modelo 3D do sistema estrutural 2	60
Figura 25 - Custo percentual por material do sistema estrutural 2.....	63
Figura 26 - Custo percentual por elemento do sistema estrutural 2	63
Figura 27 - Modelo 3D do sistema estrutural 3.....	64
Figura 28 - Custo percentual por material do sistema estrutural 3.....	67
Figura 29 – Custo percentual por elemento do sistema estrutural 3.....	67
Figura 30 - Comparativo do coeficiente de estabilidade global γ_Z	68

Figura 31 - Comparativo de consumo de aço	70
Figura 32 - Comparativo de consumo de concreto.....	71
Figura 33 - Comparativo de consumo de fôrmas	72
Figura 34 - Comparativo de custo percentual por material	73
Figura 35 - Comparativo percentual por elemento estrutural.....	73
Figura 36 - Comparativo de custos totais	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de γ_Z e significado.....	28
Tabela 2 – Composição de custo unitário: armação estrutural aço CA-50	42
Tabela 3 - Custo total por material	46
Tabela 4 - Comparativo total de custos	48
Tabela 5 - Consumo de materiais do sistema estrutural 1	56
Tabela 6 - Índices do sistema estrutural 1	57
Tabela 7 - Coeficiente de estabilidade global γ_Z	57
Tabela 8 - Custos do sistema estrutural 1	58
Tabela 9 - Consumo de materiais do sistema estrutural 2	60
Tabela 10 - Índices do sistema estrutural 2	61
Tabela 11 - Coeficiente de estabilidade global γ_Z	62
Tabela 12 - Custos do sistema estrutural 2	62
Tabela 13 - Consumo de materiais do sistema estrutural 3	65
Tabela 14 - Índices do sistema estrutural 3	65
Tabela 15 - Coeficiente de estabilidade global γ_Z	66
Tabela 16 - Custos do sistema estrutural 3	66
Tabela 17 – Índices de consumo	69
Tabela 18 - Comparativo de custos totais.....	74

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Considerações Gerais	14
1.2. Problema	15
1.3. Justificativas.....	15
1.4. Objetivos.....	16
1.4.1. Objetivo geral	16
1.4.2. Objetivos específicos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Conceção estrutural	17
2.2. Ações e combinações.....	18
2.2.1. Estados-limites.....	18
2.2.2. Ações	20
2.2.3. Coeficientes de ponderação das ações	20
2.2.4. Combinações de ações	22
2.3. Análise não linear	23
2.3.1. Não linearidade física (NLF)	24
2.3.2. Não linearidade geométrica (NLG)	25
2.4. Efeitos de 2ª ordem e o processo P-Delta (P- Δ).....	27
2.5. Estabilidade global e o Coeficiente γZ	27
2.6. Lajes de concreto armado.....	29
2.6.1. Lajes maciças	30
2.6.2. Lajes nervuradas treliçadas	34
2.6.3. Lajes nervuradas moldadas <i>in loco</i>	38
2.7. Composição de custos.....	41
2.7.1. Composição de custos unitários.....	42
2.7.2. Sistema Nacional de Pesquisas e Índices da Construção Civil – SINAPI.....	43
2.8. Softwares utilizados no estudo	44
2.8.1. Eberick.....	44
2.8.2. Cypecad	45
2.9. Pesquisas relacionadas ao tema.....	46
3. METODOLOGIA.....	49

3.1.	Caracterização do edifício de estudo	49
3.2.	Sistemas estruturais adotados	52
3.3.	Ferramentas de cálculo e análise estrutural	52
3.4.	Parâmetros e critérios de comparação	53
3.5.	Dados de entrada para o dimensionamento estrutural.....	54
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1.	Sistema estrutural convencional com lajes maciças (sistema estrutural 1)..	55
4.2.	Sistema estrutural convencional com lajes treliçadas (sistema estrutural 2)	59
4.3.	Sistema estrutural com lajes lisas nervuradas (sistema estrutural 3)	64
4.4.	Análises comparativas entre os três sistemas estruturais	68
5.	CONCLUSÃO.....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
	APÊNDICE A - PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TÉRREO E TIPO – SISTEMA ESTRUTURAL 1	80
	APÊNDICE B - PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TÉRREO E TIPO – SISTEMA ESTRUTURAL 2	83
	APÊNDICE C - PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TÉRREO E TIPO – SISTEMA ESTRUTURAL 3	86
	APÊNDICE D – DETALHAMENTO DE VIGA E PILAR EXEMPLO – SISTEMA ESTRUTURAL 1	89
	APÊNDICE E – DETALHAMENTO DE VIGA E PILAR EXEMPLO – SISTEMA ESTRUTURAL 2	92
	APÊNDICE F – DETALHAMENTO DE VIGA E PILAR EXEMPLO – SISTEMA ESTRUTURAL 3	95

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Uma característica marcante da construção civil é o tradicionalismo, porém é notada uma crescente evolução no setor nos últimos anos. O surgimento de novos materiais, a adoção de novas técnicas construtivas e o uso de ferramentas computacionais avançadas, fazem parte desta nova etapa do mercado construtivo mundial. Viana e Alves (2013) assim como Pott, Bellei e Barbisan (2019), corroboram com essa ideia e afirmam que estas circunstâncias têm papel importante na eficiência de projetos, redução de custos e no cumprimento de prazos.

O avanço tecnológico proporcionou uma evolução no processamento e análise de dados dos mais variados tipos. A engenharia civil foi amplamente beneficiada por esse episódio. Kimura (2007), destaca o desenvolvimento de ferramentas computacionais de elevado desempenho, capazes de analisar e comparar um número de dados cada vez maior em intervalos de tempo cada vez menores. Para o autor, detalhamento dos elementos, checagem de interferências entre componentes construtivos, análise e dimensionamento estrutural, são apenas algumas das diversas aplicabilidades dos novos *softwares* na engenharia civil.

A elaboração de um projeto estrutural é uma atividade que requer conhecimento teórico e prático, proporciona inúmeros desafios, além de envolver grandes responsabilidades. O uso de *softwares* de cálculo estrutural pode dar agilidade ao processo, uma vez que analisam dados e emitem resultados com uma velocidade muito elevada. No entanto, conforme aponta Kimura (2007), cabe ao engenheiro estrutural conceber a estrutura (escolher qual sistema estrutural será utilizado, materiais, ações, critérios de análise, etc.) e analisar os resultados finais, aplicando os conhecimentos técnicos de dimensionamento, análise estrutural, detalhamento, etc.

Além dos aspectos técnicos de segurança e funcionalidade, o critério econômico tem sua devida importância no estudo de um projeto estrutural. Conforme aponta Amorim (2018), uma concepção estrutural bem formulada busca atender estes critérios da forma mais eficiente possível, de tal forma que sejam empregados recursos de maneira racional, proporcionando maior economicidade ao projeto.

Neste contexto, pode-se pensar em análises que antes se tornariam dispendiosas demais para sequer serem propostas. Uma destas propostas é tema do presente trabalho, que consiste em analisar comparativamente os custos de três sistemas estruturais em concreto armado, nos quais serão variados os tipos de laje para um edifício comercial de 15 pavimentos idealizado para a cidade de Palmas/TO. Os sistemas estruturais são: sistema estrutural 1 – sistema

estrutural convencional com lajes maciças; sistema estrutural 2 - sistema estrutural convencional com lajes treliçadas; e sistema estrutural 3 – sistema estrutural com lajes lisas nervuradas.

1.2. Problema

A relevância da adoção de um modelo de sistema estrutural de concreto armado na diminuição do custo global da estrutura de edifícios de múltiplos pavimentos.

1.3. Justificativas

Em termos gerais, o custo de uma estrutura de concreto armado pode variar de 20% a 25% do custo total de uma obra convencional. A variação existente para esse custo, justifica-se na particularidade de cada solução adotada (arquitetura, sistema estrutural, soluções distintas para as fundações, obras de contenção, etc.) para cada caso específico de utilização da edificação (GIONGO, 2007).

A racionalização no uso dos materiais, a adoção de boas práticas de execução das etapas construtivas (evitar desperdícios na confecção das fôrmas, no processo de armação e lançamento do concreto), assim como a escolha da alternativa estrutural que apresente maior redução no consumo desses materiais, são medidas que proporcionam economias significativas no custo da estrutura e, conseqüentemente, no custo total da obra.

Cabe ao engenheiro estrutural a decisão da adoção de um sistema estrutural em relação a outro, levando em consideração os aspectos técnicos, os aspectos econômicos, de funcionalidade e a demanda existente.

Assim, a análise proposta neste estudo sobre o custo total para três sistemas estruturais distintos (sistema estrutural convencional com lajes maciças, sistema estrutural convencional com lajes treliçadas e sistema estrutural com lajes lisas nervuradas), pode servir como subsídio inicial para a escolha de um modelo que apresente melhor relação custo/benefício. Será também observado o coeficiente de estabilidade global (γ_z) para cada sistema.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo geral

Realizar uma análise comparativa de consumo de materiais (aço, concreto e fôrmas) e seus custos para execução, entre três sistemas estruturais de concreto armado para edifícios de múltiplos pavimentos: sistema estrutural convencional com lajes maciças, sistema estrutural convencional com lajes treliçadas e sistema estrutural com lajes lisas nervuradas.

1.4.2. Objetivos específicos

- Abordar sobre as principais características de cada sistema, assim como as vantagens e desvantagens acerca de sua utilização;
- Dimensionar e realizar o levantamento quantitativo de materiais nos três modelos propostos, com o auxílio dos *softwares* Eberick da AltoQi e Cypecad da Cype Ingenieros, para posterior comparação de custos;
- Realizar o levantamento de custos unitários dos materiais a serem analisados (aço, concreto e fôrmas);
- Proceder com a comparação de custos e, após análise dos resultados, apontar, dentre os modelos propostos, qual apresenta melhor relação custo/benefício em relação aos critérios de análise;
- Analisar e comparar a estabilidade global utilizando o coeficiente de estabilidade Gama Z (γ_z).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são apresentados conceitos e definições sobre concepção estrutural, ações atuantes em estruturas de concreto armado bem como suas combinações, análise não linear e estabilidade global. Além disso, são abordados os conceitos e recomendações normativas sobre os tipos de lajes que serão utilizados no projeto (laje maciça, laje nervurada com treliça pré-moldada e laje nervurada moldada *in loco*), assim como as vantagens e desvantagens acerca da utilização de cada tipo de laje em seus respectivos sistemas estruturais.

É abordada a importância da composição de custos no processo de orçamentação, apresentando a tabela de composição de custos do Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), referência a ser utilizada no orçamento dos sistemas estruturais abordados nesta pesquisa.

Por último serão apresentados os resultados de três pesquisas relacionadas ao tema deste trabalho.

2.1. Concepção estrutural

A estruturação (ou concepção estrutural), é uma das etapas mais importantes no projeto estrutural, pois para garantir que os esforços provenientes das ações atuantes sejam transmitidos, em sua fase final, ao solo de fundação, o sistema estrutural deve ser o mais eficiente possível, desde o posicionamento dos elementos estruturais, até o atendimento às normas técnicas de durabilidade da estrutura, desempenho em serviço e capacidade resistente (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2007).

É nessa etapa que são definidas as ações que irão atuar sobre a estrutura, bem como o pré-dimensionamento dos elementos estruturais e a definição dos materiais que serão utilizados (KIMURA, 2007).

Conforme apontam Pinheiro, Muzardo e Santos (2007), a base para a elaboração do projeto estrutural é o projeto arquitetônico, a partir do qual poder-se-á partir para o posicionamento dos elementos estruturais. O projeto estrutural deve ainda permitir a coexistência com os demais projetos (hidrossanitário, elétrico, combate a incêndio, etc.) de maneira harmônica.

Para Rebello (2000), a variedade quase que infinita de soluções estruturais possíveis, esbarra no questionamento de qual alternativa apresenta-se de maneira mais adequada para

determinado empreendimento. Segundo o autor, a solução estrutural está ligada a hierarquia de quesitos que tal solução deverá atender. Uma alternativa, por exemplo, deverá ser econômica, de fácil execução e bonita, respectivamente. Ou ainda, poderá ser bonita, econômica e de fácil execução.

Dessa forma, o atendimento aos quesitos impostos (econômico, execução e estético), serão os responsáveis pela escolha de uma solução estrutural em detrimento à outra. No entanto, mesmo que a alternativa de quesitos escolhida priorize o aspecto econômico, por exemplo, os demais aspectos devem ser atendidos com eficiência.

2.2. Ações e combinações

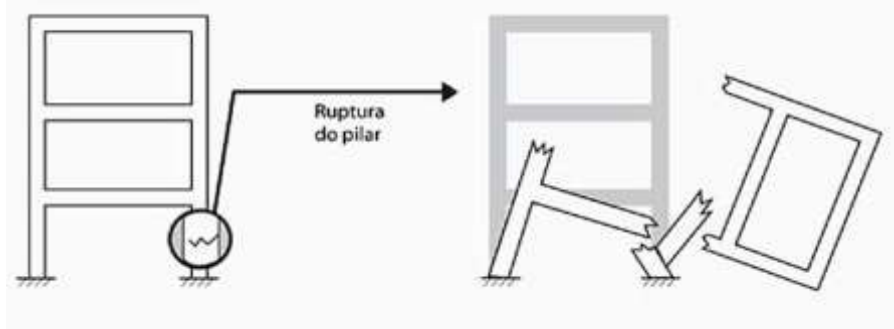
Neste tópico serão apresentadas breves revisões sobre estados limites, coeficientes de ponderação das ações e suas combinações para efeito de cálculo no dimensionamento de estruturas de concreto armado.

2.2.1. Estados-limites

Segundo Kimura (2007), os estados limites podem ser entendidos como situações nas quais a estrutura deixa de desenvolver sua plena funcionalidade. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6118: 2014, aponta que em estruturas de concreto armado, tais situações devem ser sempre verificadas, seja no que tange à segurança estrutural (estados-limites últimos), ou para o conforto e boa utilização das estruturas (estados-limites de serviço).

Conforme aponta Kimura (2007) e de acordo com as definições trazidas na ABNT NBR 6118: 2014, o estado-limite último está relacionado a qualquer tipo de ruína estrutural. Esta situação pode ser caracterizada por um colapso estrutural geral da estrutura ou de um elemento individual (pilar, viga ou laje), como pode ser observado na Figura 1, determinando assim a paralisação do uso de uma edificação.

Figura 1 - Ruptura de elemento estrutural no Estado-Limite Último

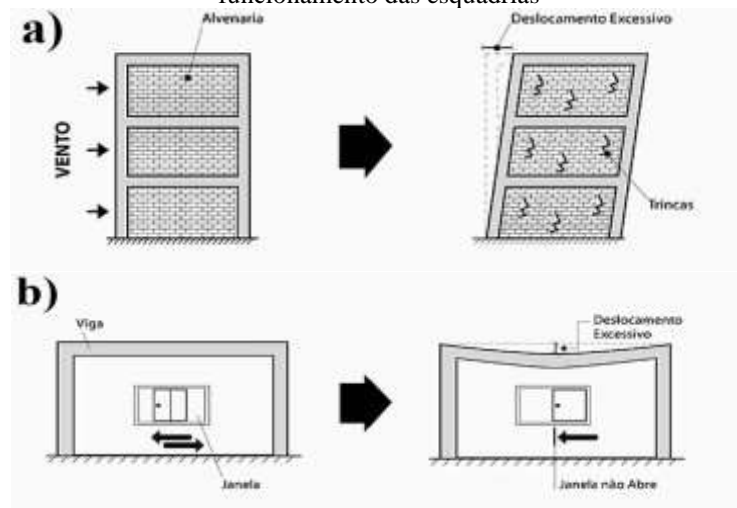


Fonte: Kimura (2007, p. 61)

Dentre os estados-limites últimos que devem ser verificados para garantir a segurança das estruturas de concreto, conforme estabelece a ABNT NBR 6118: 2014, pode-se citar: os referentes ao esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte (neste item estão inclusos os casos dos efeitos de segunda ordem, a exposição ao fogo, conforme a ABNT NBR 15200, e devido às solicitações normais e tangenciais); os provocados por solicitações de natureza dinâmica; e os de colapso progressivo.

Deslocamentos excessivos dos elementos estruturais podem até não gerar riscos à segurança da estrutura (colapso), mas podem causar uma série de problemas relacionados à funcionalidade da edificação (comportamento em serviço). Podem surgir trincas nas alvenarias (Figura 2-a), fissuras visíveis em vigas, mau funcionamento de esquadrias (Figura 2-b), entre tantos outros, conforme exemplifica Kimura (2007).

Figura 2 - Comportamento estrutural no Estado-Limite de Serviço: a) trincas nas alvenarias; b) mau funcionamento das esquadrias



Fonte: Kimura (2007) - modificado

A ABNT NBR 6118: 2014 ressalta, no que tange à garantia do bom desempenho de uma estrutura em serviço, sobre a importância das limitações de flechas, de vibrações, aberturas de fissuras, assim como pensar no conforto térmico ou acústico, na estanqueidade, etc.

2.2.2. Ações

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), as ações podem ser entendidas como quaisquer influências, ou conjunto delas, atuantes nos elementos que compõem a estrutura, capazes de provocar esforços ou deformações na estrutura. Kimura (2007), ressalta a importância do entendimento que “ações não necessariamente são cargas externas aplicadas diretamente ao edifício”, podem ser esforços adicionais provenientes das características dos materiais que constituem o edifício, por exemplo.

A ABNT NBR 6118: 2014 é bastante clara sobre a importância das ações na verificação estrutural: “Na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em exame, levando-se em conta os possíveis estados-limites últimos e os de serviço”.

Para efeitos de combinações, a ABNT NBR 8681: 2003 classifica as ações em três categorias: ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais.

As ações permanentes são aquelas que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida da estrutura, como por exemplo o peso próprio da estrutura, peso das instalações permanentes e peso dos elementos construtivos fixos. As ações variáveis são aquelas compostas pelas cargas acidentais previstas para o uso específico da estrutura, pela ação do vento e da água (normas específicas trazem prescrições que devem ser respeitadas acerca desse assunto). Já as ações excepcionais são consideradas quando seus efeitos não podem ser controlados por outros meios. Os itens 11.2 a 11.5 da ABNT NBR 6118: 2014 abordam sobre esses termos.

2.2.3. Coeficientes de ponderação das ações

Independentemente do tipo da ação, seja ela permanente ou variável, seu valor característico (F_k) deve sofrer uma transformação para o valor de cálculo (F_d). Esse processo é

realizado multiplicando os valores característicos das ações pelos respectivos coeficientes de ponderação (γ_f), também chamados de coeficientes de segurança (KIMURA, 2007).

A ABNT NBR 6118: 2014 define a Equação 1 para determinação dos valores de γ_f :

$$\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f2} * \gamma_{f3} \quad (1)$$

Onde:

γ_{f1} - considera a variabilidade das ações;

γ_{f2} - considera a simultaneidade de atuação das ações ($\gamma_{f2} = \Psi_0, \Psi_1$ ou Ψ_2);

γ_{f3} - considera os possíveis desvios gerados nas construções e as aproximações feitas em projeto do ponto de vista das solicitações.

Para a verificação nos estados-limites últimos, são apresentados os valores dos coeficientes $\gamma_{f1} * \gamma_{f3}$ e γ_{f2} nas Figuras 3 e 4 (tabelas 11.1 e 11.2 da ABNT NBR 6118: 2014).

A ABNT NBR 6118: 2014 aponta ainda a observação dos casos dos “elementos estruturais esbeltos críticos”, pilares e pilares parede com espessura inferior a 19 cm e lajes em balanço com espessura inferior a 19 cm, nos quais os esforços solicitantes devem ser majorados pelo “coeficiente de ajustamento γ_n ”. Os valores desses coeficientes e os limites de redução das espessuras dos elementos estruturais mencionados, podem ser consultados nos itens 13.2.3 e 13.2.4.1 da referida norma.

Figura 3 - Valores do coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f3}$

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

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

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

Fonte: ABNT NBR 6118: 2014

Figura 4 - Valores do coeficiente γ_{f2}

Ações		γ_{f2}		
		Ψ_0	Ψ_1^a	Ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
^a Para os valores de Ψ_1 relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23. ^b Edifícios residenciais. ^c Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.				

Fonte: ABNT NBR 6118: 2014

Segundo a ABNT NBR 6118: 2014, para os estados-limites de serviço, o coeficiente de ponderação das ações pode ser obtido pela Equação 2:

$$\gamma_f = \gamma_{f2} \quad (2)$$

O valor de γ_{f2} varia em função da análise que se deseja realizar, onde:

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

$\gamma_{f2} = \Psi_1$ para combinações frequentes;

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

Os valores dos fatores de redução Ψ_1 e Ψ_2 estão dispostos na Figura 4 (tabela 11.2 da ABNT NBR 6118: 2014).

2.2.4. Combinações de ações

É na etapa de análise estrutural que as ações atuantes nas estruturas são definidas, permitindo assim a verificação dos estados-limites últimos e de serviço. Para uma correta análise estrutural, se faz necessária a combinação das ações atuantes, tendo em vista que elas

não ocorrem de maneira isolada (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014; KIMURA, 2007).

A ABNT NBR 6118: 2014 determina que, para o processo de verificação estrutural, as ações devem ser combinadas de tal forma que possam gerar os efeitos mais desfavoráveis na estrutura. A referida norma aponta que “a verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos e aos estados-limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e de combinações de serviço, respectivamente”.

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2014), para todas as ações consideradas, as parcelas que devem ser tomadas para verificação da segurança, em relação às ações variáveis, são apenas aquelas que produzem efeitos desfavoráveis; as ações permanentes devem ser tomadas em sua totalidade.

A ABNT NBR 8681: 2003 classifica as combinações das ações em dois grupos principais: combinações últimas e combinações de serviço.

As combinações últimas por sua vez, podem ser classificadas em: combinações últimas normais, combinações últimas especiais ou de construção e combinações últimas excepcionais. As expressões utilizadas para determinar as solicitações para cada combinação, estão dispostas na tabela 11.3 da ABNT NBR 6118: 2014.

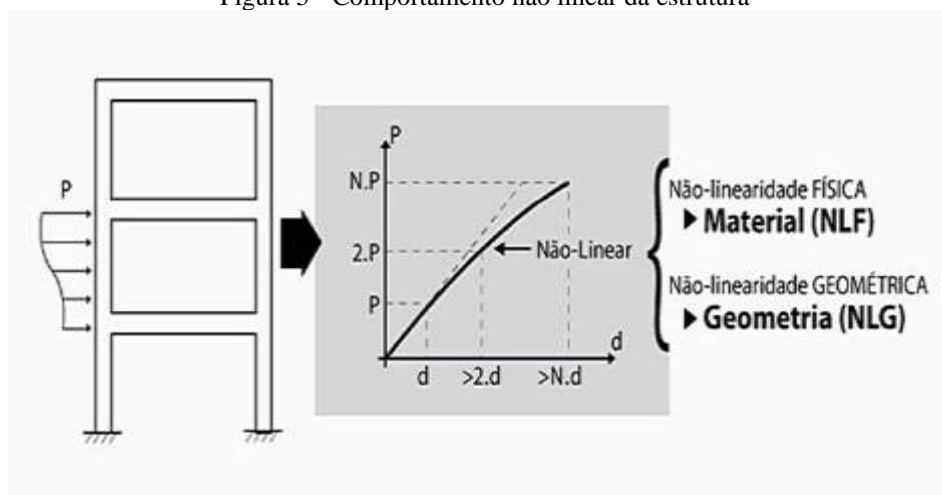
De acordo com sua permanência na estrutura, as combinações em serviço podem ser classificadas em: combinações quase permanentes de serviço (necessária na verificação do estado-limite de deformações excessivas), combinações frequentes de serviço (verificação dos estados-limites de formação de fissuras, de abertura de fissuras, de vibrações excessivas e de deformações excessivas decorrentes de vento ou temperatura) e combinações raras de serviço (verificação do estado-limite de formação de fissuras). A tabela 11.4 da ABNT NBR 6118: 2014 traz as expressões utilizadas para determinar as solicitações para as diferentes combinações.

2.3. Análise não linear

Um comportamento não linear é definido pela resposta desproporcional de uma ação. Kimura (2007) aponta que, no caso das estruturas de concreto armado, “uma análise não linear é um cálculo no qual a resposta da estrutura [...]” (deslocamentos, esforços ou tensões) não apresenta proporcionalidade à ação (aplicação de um carregamento). Esse comportamento não linear das estruturas de concreto armado é gerado basicamente por dois fatores: a não

linearidade física (NLF) e a não linearidade geométrica (NLG). A Figura 5 exemplifica o comportamento não linear da estrutura frente ao acréscimo de carregamento. Passos et al. (2016), aponta que “tal comportamento é inerente de toda estrutura de concreto armado e deve ser sempre levado em consideração durante a análise estrutural”.

Figura 5 - Comportamento não linear da estrutura



Fonte: Kimura (2007, p. 462)

2.3.1. Não linearidade física (NLF)

A não linearidade física das estruturas de concreto armado advém do comportamento deste material. Este comportamento não linear decorre dos efeitos da fissuração, da fluência, do escoamento das armaduras, o que fica bastante evidente quando se observa a variação do seu módulo de elasticidade ao longo da curva do diagrama de tensão-deformação (PINTO, 1997; PASSOS et al., 2016).

A ABNT NBR 6118: 2014 permite a utilização de simplificações na consideração da não linearidade física. Moncayo (2011), explica que essa simplificação é realizada através de coeficientes redutores para a rigidez (EI), de tal maneira que os efeitos da não linearidade física sejam obtidos de forma aproximada para a análise global da estrutura. À vista disso, a ABNT NBR 6118: 2014 assinala que “para análise dos esforços de 2ª ordem, em estruturas reticulares com no mínimo quatro andares, pode ser considerada a não linearidade física de maneira aproximada, tomando-se como rigidez dos elementos estruturais os valores seguintes:”

- Lajes: $EI_{sec} = 0,3 * E_c * I_c$ (3)

- Vigas: $\begin{cases} EI_{sec} = 0,4 * E_c * I_c \rightarrow \text{para } A_s' \neq A_s \\ EI_{sec} = 0,5 * E_c * I_c \rightarrow \text{para } A_s' = A_s \end{cases}$ (4)

- Pilares: $EI_{sec} = 0,8 * E_c * I_c$ (5)

Onde:

I_c : é o momento de inércia da seção bruta de concreto, incluindo, quando for o caso, as mesas colaborantes (seção T);

E_c : é o valor representativo do módulo de deformação do concreto conforme o item 15.5.1 da ABNT NBR 6118: 2014;

A_s' : é a armadura de compressão, no caso de vigas com armadura dupla;

A_s : é a armadura de tração.

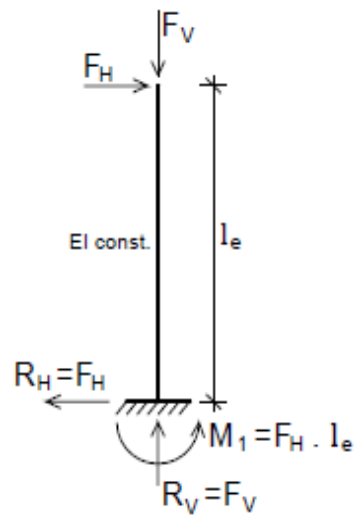
2.3.2. Não linearidade geométrica (NLG)

A não linearidade geométrica caracteriza-se por gerar uma resposta não linear na estrutura, assim como a não linearidade física. Esta resposta ocorre com a mudança da geometria da estrutura (mudança da posição da estrutura no espaço), conforme o carregamento é aplicado sobre ela (KIMURA, 2007; MONCAYO, 2011).

Moncayo (2011), assinala que “os efeitos da não linearidade geométrica são determinados quando se analisa o equilíbrio na posição deformada [...]”, ou seja, quando a estrutura é submetida aos carregamentos e desloca-se. O autor supracitado, ilustra o comportamento estrutural através de barras, para melhor compreensão do tema.

Inicialmente a estrutura encontra-se em equilíbrio na posição indeformada, mesmo sob ação dos carregamentos. Isto ocorre devido ao surgimento de reações na base da barra. O momento fletor de primeira ordem M_1 é uma dessas reações (seu nome vem por ter sido obtido em análise inicial, com a estrutura em equilíbrio na posição indeformada) (MONCAYO, 2011). A Figura 6 a seguir, ilustra a situação:

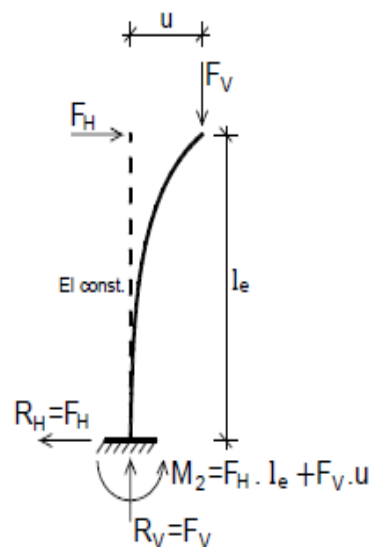
Figura 6 - Reações na barra indeformada



Fonte: Moncayo (2011, p. 29)

Ainda segundo Moncayo (2011), quando o equilíbrio é considerado após o deslocamento devido a ação horizontal (posição deformada), tem-se um acréscimo de momento na base, dado por $\Delta M = F_V \cdot u$, que é o incremento de momento da força vertical pelo deslocamento gerado. Esse incremento faz com que o momento de primeira ordem aumente. Pode-se observar esse comportamento na Figura 7 a seguir:

Figura 7 - Reações na barra deformada



Fonte: Moncayo (2011, p. 29)

2.4. Efeitos de 2ª ordem e o processo P-Delta (P- Δ)

As solicitações adicionais descritas anteriormente são denominadas efeitos de 2ª ordem, que surgem a partir da consideração da configuração deformada da estrutura. Pode-se levar em consideração este efeito na estrutura através da utilização do método iterativo P-Delta (P- Δ). “O método iterativo P-Delta é utilizado na análise de 2ª ordem das estruturas, o qual transforma os deslocamentos laterais em forças horizontais equivalentes”, explica Passos et al. (2016).

Após a realização da análise dos efeitos de 1ª ordem (considerando a configuração inicial indeformada da estrutura), são obtidos os deslocamentos, que são a base para a definição das cargas horizontais fictícias (que são equivalentes ao carregamento de 2ª ordem). A partir daí, são realizadas as iterações, obtendo-se novas cargas laterais fictícias até a estrutura atingir uma posição de equilíbrio.

2.5. Estabilidade global e o Coeficiente γ_z

Entende-se por estabilidade global, a sensibilidade da estrutura em relação aos efeitos de 2ª ordem. Esta relação existente comporta-se de maneira inversamente proporcional, ou seja, quanto menores forem os efeitos de 2ª ordem, mais estável será a estrutura (KIMURA, 2007; MONCAYO, 2011). Dessa forma, observa-se a importância da determinação dos efeitos de 2ª ordem para a caracterização da estabilidade global da estrutura.

A ABNT NBR 6118: 2014 classifica as estruturas em dois tipos segundo os efeitos de segunda ordem: estruturas de nós fixos e estruturas de nós móveis. A estrutura é de nós fixos quando os efeitos globais de 2ª ordem são desprezíveis (inferiores a 10% dos esforços de 1ª ordem). Por outro lado, a estrutura é considerada de nós móveis quando os efeitos globais de 2ª ordem são importantes (superiores a 10% dos esforços de 1ª ordem), ou seja, são levados em consideração nos cálculos da estrutura.

Para avaliar a importância dos efeitos globais de 2ª ordem, a referida norma prevê o parâmetro de instabilidade α e o coeficiente γ_z . Conforme aponta Moncayo (2011), o parâmetro α avalia a estabilidade global, no entanto não é capaz de estimar os efeitos de 2ª ordem na estrutura. Este parâmetro não será avaliado no presente trabalho.

Segundo a ABNT NBR 6118: 2014, o coeficiente γ_z é utilizado para avaliar a importância dos esforços globais de 2ª ordem, sendo válido para estruturas reticulares de no mínimo quatro andares. Kimura (2007), enfatiza que este parâmetro realiza a avaliação da

estabilidade global de uma estrutura de concreto armado de maneira simples, rápida e deveras eficiente. A Tabela 1 expressa em termos práticos o significado dos valores de γ_Z em relação aos efeitos de 2ª ordem.

Tabela 1 - Valores de γ_Z e significado

γ_Z	Significado
$\approx 1,00$	Efeitos de segunda ordem praticamente inexistentes
1,10	Efeitos de 2ª ordem em torno de 10% dos efeitos de 1ª ordem
1,15	Efeitos de 2ª ordem em torno de 15% dos efeitos de 1ª ordem
1,20	Efeitos de 2ª ordem em torno de 20% dos efeitos de 1ª ordem
...	Assim por diante

Fonte: Kimura (2007, p. 561)

A norma supracitada estabelece a Equação 6 para determinar o valor de γ_Z para cada combinação de carregamento:

$$\gamma_Z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (6)$$

Onde:

$M_{1,tot,d}$: é o momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura;

$\Delta M_{tot,d}$: é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus respectivos valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seis respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem.

A estrutura é considerada de nós fixos se for obedecida a condição $\gamma_Z \leq 1,10$, e de nós móveis se $1,10 < \gamma_Z \leq 1,30$.

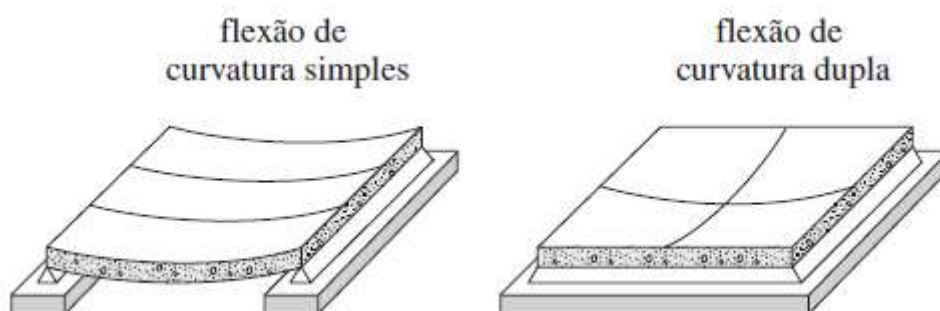
Kimura (2007), destaca a importância da interpretação dos valores do coeficiente γ_Z : valores comuns e coerentes de γ_Z são números um pouco maiores do que 1,00; valores de γ_Z superiores a 1,50 denotam que a estrutura é instável ou impraticável; se o γ_Z apresentar valores inferiores a 1,00, ou até mesmo valores negativos, significa que estes são incoerentes e sinalizam que a estrutura é completamente instável ou que houve algum erro de cálculo. O autor enfatiza ainda que o valor de γ_Z seja inferior a 1,20 ao se projetar estruturas de concreto armado,

e que valores superiores a 1,30 para o coeficiente γ_Z , denota um elevado grau de instabilidade da estrutura.

2.6. Lajes de concreto armado

Usadas normalmente como pisos em prédios e pontes ou como paredes de tanques de armazenamento, as lajes caracterizam-se por serem elementos planares com espessuras pequenas se comparadas às outras dimensões. Seu comportamento depende de como estão dispostos os apoios das bordas (Figura 8), podendo ser apoiadas em bordas opostas (flexão de curvatura simples) ou apoiadas em torno das bordas (flexão de curvatura dupla) (LEET; UANG; GILBERT, 2010).

Figura 8 - Influência das bordas na curvatura

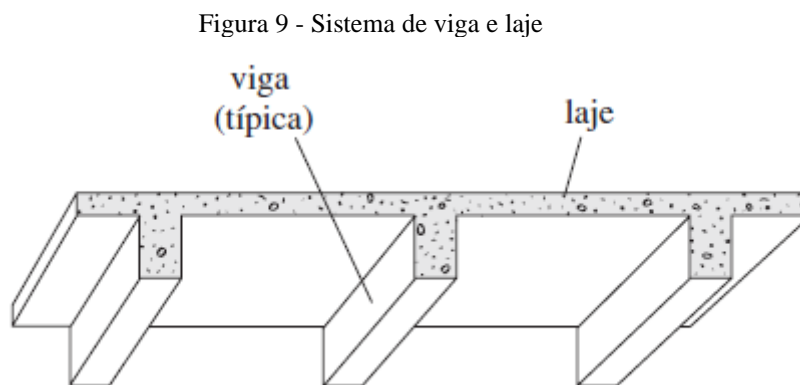


Fonte: Leet, Uang e Gilbert (2010, p. 19)

As lajes são responsáveis por receber a maior parte das ações aplicadas numa edificação, provenientes dos mais variados tipos como por exemplo, de pessoas, revestimentos (pisos), paredes, móveis, variando com a finalidade de uso definido pelo tipo arquitetônico. Geralmente as cargas atuam perpendicularmente às lajes, de forma distribuídas na área (peso próprio, revestimento, etc.), distribuídas linearmente (paredes) ou ainda de forma concentrada (pilares apoiados sobre a laje). De maneira geral, as ações são transmitidas para as vigas de apoio nas bordas das lajes, mas também podem ser transmitidas diretamente para os pilares, no caso das lajes lisas (BASTOS, 2015).

Leet, Uang e Gilbert (2010), apontam que, por causa da pequena espessura das chapas, a distância que as lajes podem vencer sem se deformar excessivamente é relativamente pequena

(para lajes de concreto armado algo em torno de 3,6 a 4,8 metros), sendo necessário, para o caso de vãos maiores, o uso de artifícios, como apoiar as lajes em vigas ou reforçá-las pela adição nervuras (Figura 9).



Fonte: Leet, Uang e Gilbert (2010, p. 19)

2.6.1. Lajes maciças

Bastos (2015), comenta que a laje maciça é assim denominada pelo fato de toda sua espessura ser composta por concreto, contendo também armadura longitudinal disposta e dimensionada adequadamente e eventual armadura transversal. Geralmente contém vigas como elementos de apoio e de definição de abrangência, sendo este o sistema convencional laje-viga (Figura 9).

Tradicionalmente, as lajes maciças são constituídas de concreto armado, mas para sua concepção pode-se empregar técnicas como o sistema de protensão. A escolha tem que ser baseada em análises técnicas, adequando-se à realidade do local onde o empreendimento será realizado.

As lajes lisas e lajes-cogumelo podem ter toda sua espessura composta por concreto, podendo assim ser classificadas como lajes maciças. Esses dois tipos de laje maciça apresentam outra tipologia quanto à interação e à distribuição dos esforços na estrutura, se comparada à laje maciça convencional. A ABNT NBR 6118: 2014 traz as seguintes definições: “Lajes-cogumelo são lajes apoiadas diretamente em pilares com capitéis, enquanto lajes lisas são apoiadas nos pilares sem capitéis.”

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), destacam que a distribuição das ações em todas as vigas de contorno, é uma das principais características das lajes maciças (sistema convencional laje-viga). Como consequência desta, há melhor aproveitamento das vigas do pavimento, de modo que todas elas apresentam, em última análise, cargas de mesma ordem de grandeza, gerando assim maior uniformidade destes elementos estruturais. Outra vantagem notória pode ser observada na facilidade de serem colocadas as tubulações elétricas e outros tipos de instalações antes da concretagem.

A concretagem de lajes maciças é comumente realizada em conjunto com as vigas, de tal forma que fique definido um único elemento laje-viga. Para efeito de cálculo, desconsidera-se essa ligação monolítica, admitindo que as lajes estejam apoiadas nas vigas (BARBIERI, 2016).

O custo das fôrmas em lajes maciças representa uma parcela considerável do custo final da estrutura; entretanto, a adoção de pavimentos tipo com lajes maciças pode reduzir consideravelmente esse custo, uma vez que se pode utilizar o mesmo jogo de fôrmas e sistema de escoramento repetidas vezes.

De modo geral, as lajes maciças podem ser classificadas em relação à forma geométrica, aos tipos de vínculos nos apoios, quanto à direção, etc.

Nesta pesquisa será utilizado o sistema convencional laje-viga.

A seguir serão apresentados alguns tópicos de interesse para o estudo das lajes maciças como: forma geométrica, direção da armadura principal e vinculação nas bordas.

- Forma geométrica:

As lajes maciças geralmente apresentam forma retangular, porém estas podem assumir as mais variadas formas. Com o avanço dos modelos computacionais utilizados para cálculo estrutural, pode-se dimensionar lajes com quaisquer formatos, atendendo assim diversas exigências arquitetônicas.

- Direção da armadura principal

Uma classificação importante das lajes é no que diz respeito à direção ou direções da armadura principal. Dessa forma, pode-se classificar as lajes maciças em duas categorias: laje armada em uma direção e laje armada em duas direções.

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), apontam que quando a relação entre o maior vão e o menor for menor ou igual a dois, a laje será armada em duas direções, pois ela “trabalha em duas direções”. A Equação 7 e a Figura 10 demonstram essa colocação:

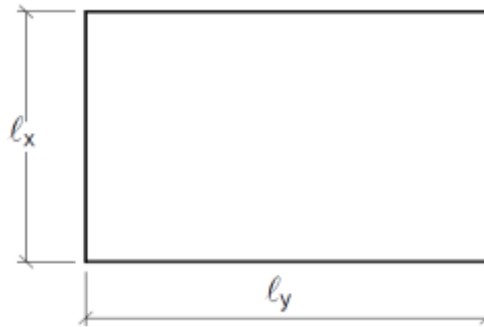
$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \leq 2 \quad (7)$$

Onde:

l_y = maior vão;

l_x = menor vão.

Figura 10 - Vão da laje armada em duas direções



Fonte: Bastos (2015, p. 2)

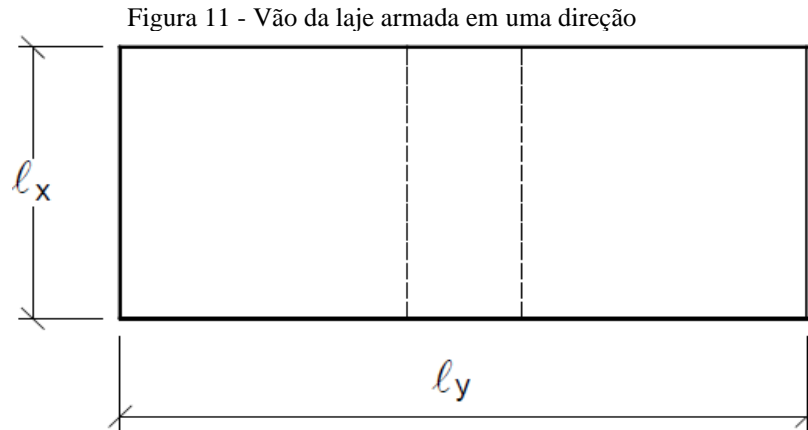
Carvalho e Figueiredo Filho (2014), apontam ainda que quando essa relação for maior que dois, a laje será armada em uma direção (a do menor vão), sem levar em conta as armaduras construtivas ou mínimas exigidas. A Equação 8 e a Figura 11 demonstram essa colocação:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} > 2 \quad (8)$$

Onde:

l_y = maior vão;

l_x = menor vão.



Fonte: Bastos (2015, p. 2)

- Vinculação nas bordas

Segundo Bastos (2015), o apoio simples, o engaste perfeito e o engaste elástico são os tipos de vínculos mais comuns em lajes. O apoio simples surge quando não existe ou não se admite a continuidade da laje com as lajes adjacentes (caso considerado quando a laje está apoiada em vigas com pequena rigidez à torção, por exemplo); o engaste perfeito é observado no caso de lajes em balanço (marquises, varandas, etc.), sendo considerado também nas bordas onde há continuidade entre lajes adjacentes (lajes vizinhas com diferença de espessura muito elevadas, onde a de menor espessura pode ser considerada engastada na de maior espessura); o engaste elástico é utilizado em casos de lajes contínuas, nas quais surgem momentos fletores negativos (com valores muito diferentes) nos apoios intermediários (lajes inicialmente consideradas engastadas para verificação dos momentos fletores).

A ABNT NBR 6118: 2014 especifica em seu item 13.2.4.1, os limites mínimos de espessura para lajes maciças, conforme pode ser observado a seguir:

- 7 cm para cobertura não em balanço;
- 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- 10 cm para lajes em balanço;
- 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com no mínimo de $\frac{l}{42}$ para lajes de piso biapoiadas e $\frac{l}{50}$ para lajes de piso contínuas;

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

Onde l refere-se a distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.

A referida norma salienta a importância da adoção de um coeficiente adicional (γ_n) aos esforços solicitantes para o dimensionamento das lajes maciças em balanço, de acordo com a variação da espessura (tabela 13.2 da ABNT NBR 6118: 2014).

De acordo com Botelho e Marchetti (2015) e Vizotto e Sartorti (2010), pode-se observar algumas vantagens e algumas desvantagens acerca da utilização dessa tipologia de laje:

Vantagens:

- Atende tecnicamente bem aos casos de vão e cargas, em que a solução implique em lajes com alturas menores ou iguais a 15 cm de altura acabada;
- Oferece funções de placa e membrana;
- Pode ser considerada uni ou bidirecional;
- Bom desempenho em relação à capacidade de redistribuição dos esforços;
- Adequada a situações de singularidade estrutural (ex: um, dois ou três bordos livres).

Desvantagens:

- Elevado consumo de fôrmas, escoras, concreto e aço;
- Possui peso próprio bastante elevado, acarretando em maiores solicitações dos elementos estruturais (vigas, pilares e fundações);
- Estrutura moldada *in loco*, e isso onera significativamente os custos de mão de obra;
- Limitação quanto a sua aplicação a grandes vãos, devido a demanda de espessuras muito grandes de concreto exigida para esta situação;
- Custo relativamente elevado, se comparado a outros sistemas.

2.6.2. Lajes nervuradas treliçadas

Segundo a ABNT NBR 6118: 2014, as lajes nervuradas podem ser moldadas no local ou compostas de **nervuras pré-moldadas**. A zona de tração, região abaixo da linha neutra, é

constituída de nervuras, entre as quais pode-se adicionar material inerte ou não. No caso das lajes com nervuras treliçadas pré-moldadas, os elementos de enchimento mais utilizados são o EPS (isopor), lajota cerâmica e bloco de concreto leve.

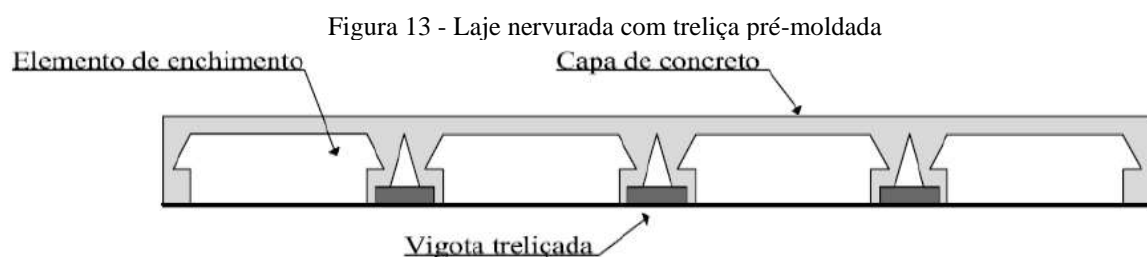
A armadura das nervuras tem a forma de uma treliça espacial (Figura 12). Nas treliças, o banzo inferior é composto por duas barras e o banzo superior é composto por uma barra. Estes são unidos por barras diagonais inclinadas soldadas por eletrofusão, responsáveis por dar rigidez ao conjunto e aumentar a resistência aos esforços cortantes, além de melhorar o transporte e manuseio das peças acabadas (BASTOS, 2015).

Figura 12 - Treliça espacial



Fonte: Botelho e Marchetti (2015, p. 101)

As lajes nervuradas com treliças pré-moldadas (Figura 13) são compostas basicamente por: vigota treliçada (nervuras), elemento de enchimento (diminui o uso de concreto e serve como fôrma para o sistema), capa de concreto (responsável por resistir aos esforços de compressão), armadura de distribuição (malha) e eventual armadura de reforço (armadura positiva adicional ou eventual armadura negativa).



Fonte: Barbieri (2016, p. 17)

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2014), os elementos pré-moldados (vigotas treliçadas) são considerados os elementos resistentes do sistema na fase de montagem e concretagem das lajes, sendo responsáveis por resistir ao seu peso próprio, ação do concreto da capa, do material de enchimento (EPS, lajota, etc.) e de locomoção dos trabalhadores (pequena carga accidental), para um vão normalmente de até 1,5 m. Isso evidencia a necessidade de poucos elementos de escoramento, se comparado ao sistema de laje maciça. Outro ponto importante é a dispensa do uso de fôrmas, pois o elemento de enchimento faz esse papel.

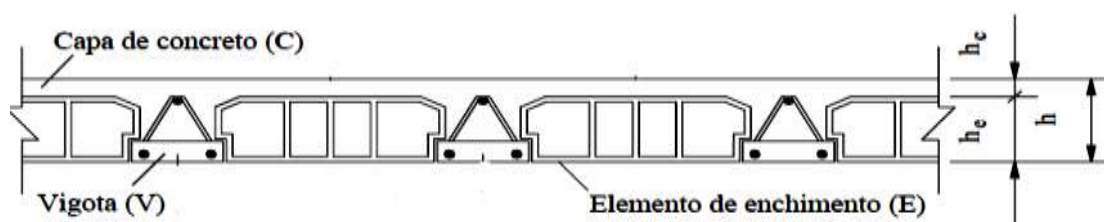
Em painéis de geometria predominantemente retangular (Figura 11), as vigotas são dispostas em uma única direção, normalmente a do menor vão. Dessa forma, essas lajes podem ser consideradas armadas em uma direção (lajes unidirecionais - podendo ser utilizadas algumas nervuras transversais perpendiculares à nervura principal, atuando no travamento lateral das treliças). Se a geometria dos painéis for aproximadamente quadrada (Figura 10), tem-se a disposição das vigotas treliçadas em uma direção e nervuras transversais perpendiculares, “armando em cruz” a laje, configurando uma laje armada em duas direções (lajes bidirecionais) (SILVA, 2005).

Silva (2005), destaca a versatilidade das lajes nervuradas com vigotas pré-fabricadas, estas apresentando ampla aplicação, desde edifícios residenciais e comerciais de múltiplos pavimentos, até residências térreas, sobrados, galpões, núcleos residenciais, etc., sendo capaz de proporcionar grande agilidade no processo construtivo.

Nesta pesquisa será utilizado o sistema estrutural convencional com lajes nervuradas com treliçadas pré-moldadas e EPS como material de enchimento.

Segundo Silva (2005), as limitações de deslocamentos impostas pelas normas e os esforços solicitantes, são os fatores responsáveis pela determinação da altura total das lajes. Usualmente é escolhida uma altura total para a laje, em função das imposições supracitadas, avaliando-se durante o dimensionamento a necessidade ou não de aumentar a referida altura.

Figura 14 - Parâmetros geométricos de lajes treliçadas



Fonte: Silva (2005) - modificado

A altura da vigota treliçada depende principalmente da necessidade de combater esforços cortantes (armadura de cisalhamento), papel desempenhado pelas diagonais da treliça.

A espessura da mesa (capa de concreto) deve ser maior ou igual a 1/15 da distância entre as faces das nervuras e não pode ser inferior a 4 cm, para o caso de não existirem tubulações horizontais embutidas, caso contrário esse valor aumenta para 5 cm (ABNT NBR 6118: 2014).

Conforme aponta Silva (2005), a altura total da laje treliçada corresponde a soma da altura do material de enchimento (padronizado pela ABNT NBR 14859-1: 2002) e a altura da capa de concreto. Este valor (altura total da laje) pode variar de acordo com o fabricante dos materiais e com as condições estruturais (vão a vencer, cargas, etc.), estando entre 11 cm e 35 cm.

Pode-se observar a seguir algumas vantagens e desvantagens acerca da utilização de lajes do tipo treliçada (BOTELHO; MARCHETTI, 2015; VIZOTTO; SARTORTI, 2010):

Vantagens:

- Possibilita a redução da quantidade de colunas e vigas do sistema estrutural de uma edificação;
- Reduz a quantidade de fôrma e escoramento;
- Bom desempenho em relação à capacidade de redistribuição dos esforços solicitantes;
- Há várias alternativas de elementos de enchimento (fôrmas), como: lajota cerâmica, bloco de concreto leve e bloco de EPS (isopor);
- Reduz a mão-de-obra em geral;
- Reduz custo final.

Desvantagens:

- Necessidade de uso de aditivo para chapisco do EPS;
- Montagem da armadura de distribuição e lançamento do concreto requerem maior atenção devido a fragilidade do material de enchimento (principalmente se este for o EPS);
- Maiores deslocamentos transversais, se comparado aos sistemas de lajes maciças e lajes nervuradas moldadas no local;
- Dificuldade na execução das instalações prediais.

2.6.3. Lajes nervuradas moldadas *in loco*

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

As lajes nervuradas moldadas *in loco* são aquelas em que toda sua constituição é concebida na obra (nervuras e mesas). As nervuras podem ser posicionadas em uma direção (laje nervurada unidirecional) ou em duas direções (laje nervurada bidirecional). Esse tipo de laje é constituído basicamente por concreto, aço para concreto armado e fôrmas (madeira, metálicas ou de polipropileno) (SILVA, 2005).

As lajes nervuradas executadas por intermédio de cubetas plásticas (Figura 15) têm sido amplamente utilizadas atualmente, pois se apresentam como uma alternativa eficiente e econômica em determinados casos. A principal vantagem em relação às demais fôrmas é a possibilidade de reaproveitamento em outros pavimentos, além de serem leves e de fácil manuseio.

Figura 15 - Montagem de laje nervurada com cubetas plásticas



Fonte: Vizotto e Sartorti (2010, p. 24)

O acabamento resultante da utilização de formas plásticas é bastante satisfatório, dispensando, a depender do caso, qualquer tipo de revestimento. Quando necessário, pode-se revestir as nervuras com placas de gesso fixadas diretamente nas nervuras, proporcionando acabamento mais refinado. O processo de desforma é manual e de fácil execução (SILVA, 2005).

Segundo Botelho e Marchetti (2015), em situações em que os vãos a vencer forem superiores a 6 m, as lajes nervuradas apresentam-se como alternativa viável em relação às lajes maciças. Lajes nervuradas são também recomendadas nos casos em que a problemática exigir espessura superior a 15 cm para lajes maciças (verificar critério econômico). O conjunto mesa-nervura proporciona elevada resistência à flexão, garantindo sua utilização em grandes vãos.

As características das lajes nervuradas, proporcionam significativas reduções no consumo de material (apesar de apresentar maior altura total que a laje maciça), mão-de-obra e de fôrmas, tornando o sistema bastante competitivo. A simplificação no processo produtivo proporciona a racionalização da construção, com aumento de produtividade e redução de perdas, características fortes da industrialização na construção (PINHEIRO; REZENTE, 2007).

Além de serem concebidas no sistema estrutural convencional (viga-laje), as lajes nervuradas podem ser apoiadas diretamente nos pilares, utilizando-se maciços de concreto na região dos apoios (Figura 16), sistema comumente conhecido como lajes lisas nervuradas (SPOHR, 2008). Nesse caso, é necessário combater a punção na região do apoio da laje no pilar.

Figura 16 - Laje lisa nervurada apoiada diretamente sobre pilar



Fonte: Spohr (2008, p. 36)

A aplicabilidade em uma enorme gama de empreendimentos, desde prédios residenciais e comerciais, a escolas, indústrias, pisos de garagens, hospitais, bibliotecas, etc., e a maior difusão dos seus métodos construtivos, são motivos pelos quais as lajes nervuradas têm sido amplamente utilizadas atualmente.

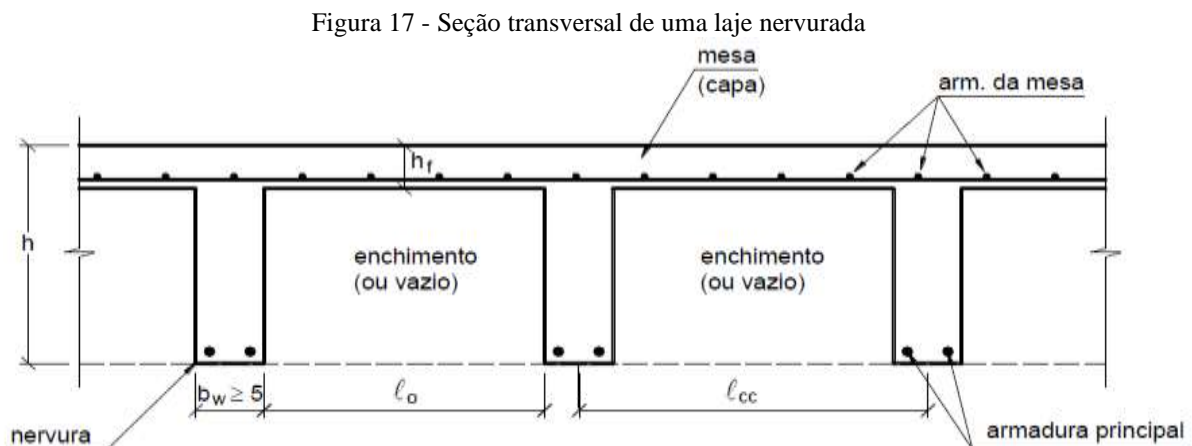
Nesta pesquisa será utilizado o sistema de lajes lisas nervuradas moldadas *in loco*.

A ABNT NBR 6118: 2014, determina em seu item 13.2.4.2 as dimensões limites mínimas para as lajes nervuradas. O objetivo principal destas é “evitar um desempenho inaceitável para os elementos estruturais e proporcionar condições de execução adequadas”.

A referida norma determina que a espessura da mesa deve ser maior ou igual a 1/15 da distância entre as faces das nervuras e não deve ser menor que 4 cm, para o caso de não existirem tubulações horizontais embutidas.

Na ocorrência de tubulações horizontais embutidas, cujo diâmetro não ultrapasse 10mm, o valor mínimo para a espessura da mesa passa a ser 5 cm. Caso a tubulação possuir diâmetro superior a 10 mm, a espessura mínima da mesa será de 4 cm acrescidos de uma vez o diâmetro, ou 4 cm acrescidos de duas vezes o diâmetro caso haja cruzamento destas tubulações em algum ponto.

As nervuras não podem possuir espessura inferior a 5 cm. Cabe ainda ressaltar que não podem conter armadura de compressão, nervuras cuja espessura seja menor que 8 cm.



Fonte: Bastos (2015, p. 68)

Ainda segundo a ABNT NBR 6118: 2014, devem ser obedecidas as seguintes condições para o projeto de lajes nervuradas:

- a) Pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa para as lajes que apresentarem espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm. Em lajes com esta configuração, considera-se o critério de laje para verificação do cisalhamento na região das nervuras;

- b) Deve ser realizada a verificação da flexão da mesa para as lajes que apresentarem espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm. Neste caso, as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; pode-se considerar o critério de laje para verificação do cisalhamento na região das nervuras, se a largura média das nervuras for maior que 12 cm e o espaçamento entre eixos das nervuras for de até 90 cm;
- c) A mesa de uma laje nervurada será projetada como laje maciça (respeitando os limites mínimos de espessura para esta tipologia de laje), apoiadas na grelha de vigas, no caso em que as nervuras apresentarem espaçamento entre eixos maior que 110 cm.

Pode-se observar a seguir algumas características (vantagens e desvantagens) do sistema de lajes nervuradas com cubetas plásticas (BOTELHO; MARCHETTI, 2015; VIZOTTO; SARTORTI, 2010; TENÓRIO et al, 2009; SPOHR, 2008):

Vantagens:

- Menor consumo de concreto e aço;
- Menor índice de fôrmas, devido ao uso de fôrmas industrializadas (cubetas);
- Maior inércia em relação às lajes convencionais, possibilitando o aumento dos vãos entre pilares;
- Maior facilidade na execução, agilizando-se os serviços de montagem das fôrmas e evitando-se recortes;
- Melhor atendimento ao projeto arquitetônico, pois possibilita que os pilares sejam dispostos sem a necessidade de alinhamento;

Desvantagens:

- Opções de altura limitadas pela produção padronizada das cubetas;
- Geralmente necessita de acabamento da face inferior com forro falso.

2.7. Composição de custos

O processo de estabelecimento dos custos de um determinado serviço ou atividade é de grande importância na engenharia civil. Este processo é conhecido como composição de custos, no qual cada atividade ou serviço são individualizados em insumos que compõem sua execução.

A composição tem o papel de listar todos os insumos envolvidos na execução do serviço, assim como suas respectivas quantidades, seus custos unitários e seus custos totais (MATTOS, 2006).

Ainda segundo Mattos (2006), três categorias são tipicamente envolvidas no custo de um serviço: mão-de-obra, material e equipamento. Segundo o autor, determinar a contribuição de cada uma das categorias supracitadas é a “essência do processo de estabelecimento de qualquer composição de custos.”

A depender do grau de complexidade e do número de etapas, um serviço pode envolver uma quantidade significativa de insumos. Cabe ao engenheiro orçamentista a expertise em avaliar cada um deles e seus impactos na composição de custo, podendo assim tomar decisões importantes no processo de orçamentação, como por exemplo na negociação com fornecedores.

2.7.1. Composição de custos unitários

Com a finalidade de organizar e facilitar o processo de orçamentação, é montada uma composição de custos com os insumos referentes à execução de uma unidade do serviço (custo de 1 m² de alvenaria de tijolo cerâmico de 9x19x19 cm, custo de 1 m³ de escavação manual, etc.). A esta composição assim determinada, dá-se o nome de composição de custos unitários.

A composição de custos unitários apresenta-se na forma de uma tabela, onde são relacionados todos os insumos envolvidos diretamente na execução de uma unidade do serviço, com seus respectivos custos unitários e totais (MATTOS, 2006). Ela é tipicamente composta por cinco colunas, conforme o exemplo a seguir:

Tabela 2 – Composição de custo unitário: armação estrutural aço CA-50

Insumo	Unidade	Índice	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Armador	h	0,08	13,76	1,10
Ajudante	h	0,08	9,47	0,76
Aço CA-50 ϕ 8mm	kg	1,10	5,78	6,36
Arame recozido nº 18	kg	0,03	12,00	0,36
Total				8,58

Fonte: Autoria Própria

Onde:

- Insumo: é cada um dos itens de material, mão de obra e equipamento que entram na execução direta do serviço;
- Unidade: é uma unidade de medida do insumo;
- Índice: é a incidência de cada insumo na execução de uma unidade do serviço;
- Custo unitário: é o custo de aquisição ou emprego de uma unidade do insumo;
- Custo total: é o custo total do insumo na composição de custos unitários. Obtém-se esse valor através da multiplicação do índice pelo custo unitário. O custo total unitário do serviço é obtido através da somatória dessa coluna.

Existem várias tabelas de custos unitários que são disponibilizadas para consulta, servindo como base para a elaboração de orçamentos. As mais conhecidas são a do Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) disponibilizada pela Caixa Econômica Federal; a tabela da Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE); a Tabela de Composições de Preços para Orçamento (TCPO) da Editora PINI; e a tabela do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) disponibilizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Cada uma com suas áreas de aplicabilidade.

Neste trabalho serão utilizados os dados do SINAPI, uma das referências mais utilizadas para orçamentação.

2.7.2. Sistema Nacional de Pesquisas e Índices da Construção Civil – SINAPI

O Sistema Nacional de Pesquisas e Índices da Construção Civil (SINAPI) foi implementado em 1969, pelo Banco Nacional de Habitação (BNH) em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Posteriormente, em 1986, o SINAPI foi adotado pela CAIXA, em sucessão ao BNH. Em sua concepção inicial, o SINAPI fornecia informações sobre custos e índices para obras habitacionais (CAIXA ECONOMICA FEDERAL, 2019).

Ao longo dos anos o SINAPI sofreu uma série de modificações, ampliando sua área de aplicação para os mais variados serviços em edificação, saneamento, pavimentação urbana, entre outros. Ao longo desse processo foram incorporados bancos de dados de referências de custos oriundo de outras instituições públicas, conforme aponta Sousa (2018).

A partir de 2003 tornou-se obrigatório o uso do SINAPI como referência para obras que utilizam recursos públicos federais. Essa medida foi implementada visando a boa aplicação dos recursos públicos, uma vez que o gestor público tem uma referência sólida para o estabelecimento do custo de uma obra (CAIXA ECONOMICA FEDERAL, 2019).

As referências são periodicamente revisadas, buscando atender de forma mais eficiente as exigências do mercado. A atualização dos custos é publicada mensalmente (site da Caixa) para todas as capitais.

2.8. Softwares utilizados no estudo

2.8.1. Eberick

O Eberick é um *software* desenvolvido pela empresa brasileira AltoQi, destinado ao projeto de edifícios de concreto armado, capaz de realizar análises da estrutura em pórtico espacial, além de dimensionar e detalhar os elementos estruturais. É amplamente utilizado no mercado nacional pela sua versatilidade e interface gráfica de manuseio intuitivo. Suas análises, dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais atendem às principais normas brasileiras, como a ABNT NBR 6118: 2014, NBR 6120: 2019, NBR 6123: 1988, entre outras.

A ferramenta permite a geração de forma automatizada de listas de materiais e seus respectivos quantitativos, memória de cálculo com os critérios de projeto, relatório referente aos esforços nas fundações e análise de estabilidade global.

As principais características da ferramenta podem ser encontradas de maneira simplificada no guia de ajuda do *software* no site da empresa, conforme exposto a seguir:

- Entrada gráfica de dados em ambiente CAD integrado (possibilidade de importação da arquitetura em DXF);
- Visualização tridimensional da estrutura;
- Análise da estrutura em modelo de pórtico espacial, com verificação da estabilidade global;
- Possibilidade de modelar as ligações entre os elementos (rótulas, engastes, ligações semirrígidas);

- Possibilidade de analisar os painéis de lajes em um modelo de grelha plana, com discretização semiautomática;
- Dimensionamento dos elementos de acordo com a NBR 6118: 2014;
- Geração de quantitativos;
- Geração de diagramas dos esforços;
- Geração de pranchas de detalhamento.

Conforme apontam Junges, La Rovere e Loriggio (2012), o *software* oferece a opção de análise para o cálculo no dimensionamento através de pórtico espacial, que analisa a deformação do pórtico, os deslocamentos horizontais na cobertura e a estabilidade global.

Ainda segundo os referidos autores, o *software* dispõe somente do coeficiente γ_z como parâmetro de estabilidade global. O programa não possui o parâmetro α , necessário para edifícios com menos de 4 pavimentos. No programa, os efeitos de segunda ordem são calculados através do processo P-Delta.

2.8.2. Cypecad

Desenvolvido pela empresa espanhola Cype Ingenieros, o Cypecad é um *software* utilizado para projeto estrutural de concreto armado, pré-moldado, protendido e estruturas mistas de aço e concreto. O programa engloba as etapas de lançamento dos elementos estruturais, cálculo e análise estrutural, dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais. Estes recursos estão alinhados com as principais normas brasileiras no que tange ao dimensionamento e análise das estruturas (concreto armado, fundações, carregamentos, ventos, barras, ações e combinações).

O Cypecad tem como uma das principais características o lançamento automático de pilares através da leitura de arquivos DWG/DXF. Este lançamento automático se dá pela leitura de *layers* inseridos na arquitetura utilizada. Há também a possibilidade de importação e exportação da estrutura por meio de modelo BIM, uma tendência dos novos *softwares* empregados na engenharia civil.

No *software* a análise das solicitações é realizada através de um pórtico espacial, por métodos matriciais de rigidez, sendo considerados todos os elementos que definem a estrutura:

pilares, vigas, lajes, muros e paredes. Em cada nó, são considerados seis graus de liberdade, criando a hipótese de indeformabilidade no plano (simula o comportamento rígido da laje).

Para análise dos efeitos globais de segunda ordem, o *software* emprega o método P- Δ . A verificação da estabilidade global é realizada através do coeficiente γ_z .

2.9. Pesquisas relacionadas ao tema

Amorim (2018) realizou um estudo comparativo de custos de insumos e custos totais para uma estrutura de concreto armado. Seu trabalho propôs três novas alternativas de lajes para um edifício de cinco pavimentos já construído. Originalmente o edifício objeto de estudo foi concebido com lajes pré-fabricadas treliçadas com blocos de enchimento cerâmico, o qual foi denominado modelo 1.

Uma das proposições seria constituída de lajes do mesmo tipo do modelo original, alterando o material de enchimento, desta vez sendo utilizado o poliestireno expandido (EPS), denominado modelo 2. O outro modelo proposto (modelo 3), trata-se de um sistema convencional de laje maciça. E por fim o modelo com lajes nervuradas moldadas no local com cubetas (modelo 4) (AMORIM, 2018).

Após análise dos resultados, Amorim (2018) constatou que o modelo concebido com laje pré-fabricada com blocos de EPS (modelo 2) apresentou menor custo total (redução de 0,23% se comparado com o modelo original). Os modelos com laje maciça e laje nervurada com cubetas apresentaram maior custo que o modelo original, conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - 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
--------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

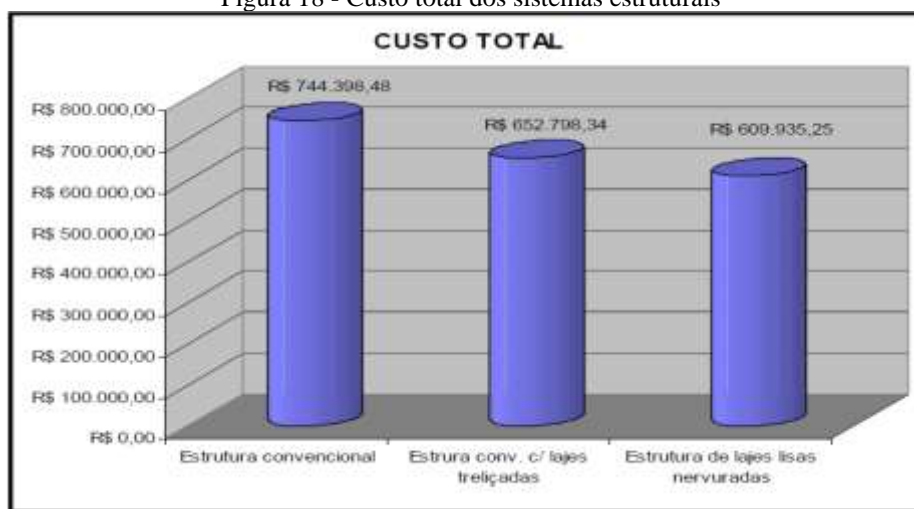
Fonte: Amorim (2018, p. 58)

Em seu trabalho, Spohr (2008) realizou uma análise comparativa de custos entre os sistemas estruturais convencionais e os sistemas estruturais de lajes nervuradas em concreto armado. Seu estudo abordou um edifício de escritórios de 10 pavimentos. Sua análise envolveu o custo dos materiais, mão de obra e equipamentos necessários, a partir de seus custos unitários.

Os sistemas definidos pelo autor são: estrutura convencional com lajes, vigas e pilares (Sistema 1); estrutura convencional com lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas, vigas e pilares (Sistema 2); e estrutura com lajes lisas nervuradas apoiadas em pilares (Sistema 3).

Spohr (2008), constatou em suas análises que o Sistema 1 (estrutura convencional com lajes, vigas e pilares), apresentou-se como o de maior custo total; o Sistema 2 (estrutura convencional com lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas, vigas e pilares) apresentou uma redução de 12,3% no custo total da estrutura, se comparado com o primeiro Sistema; já o Sistema 3 (estrutura com lajes lisas nervuradas apoiadas em pilares) foi o que mostrou-se mais econômico dentro dos critérios analisados pelo autor, com redução de 18,1% no custo total se comparado ao Sistema 1. A Figura 18 mostra a relação dos sistemas estruturais estudados e seus respectivos custos totais.

Figura 18 - Custo total dos sistemas estruturais



Fonte: Spohr (2008, p. 81)

Nervo (2012) propôs em seu trabalho uma análise comparativa de custos entre sistemas estruturais de concreto armado. Para proceder com a análise, foi utilizada uma edificação residencial de múltiplos pavimentos como edifício modelo.

Os sistemas estruturais utilizados por Nervo (2012) foram: estrutura convencional com lajes, vigas e pilares (Sistema estrutural 1); estrutura convencional com lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas, vigas e pilares (Sistema estrutural 2); e estrutura com lajes lisas nervuradas apoiadas em pilares (Sistemas estrutural 3).

Nervo (2012) comparou em seu estudo o custo total de cada sistema, levando em consideração todos os insumos necessários para sua composição. Após proceder com a análise, o autor verificou que o Sistema estrutural 3 (estrutura com lajes lisas nervuradas apoiadas em pilares) apresentou maior custo total. Houve uma redução de 13,80% no custo para a estrutura convencional com lajes pré-moldadas treliçadas, se comparada à estrutura de lajes lisas nervuradas. A maior redução e, portanto, o menor custo total foi o do sistema convencional com lajes maciças, que apresentou redução de 16,92% do custo em relação ao Sistema estrutural 3. Tais comparações podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo total de custos

Sistemas Estruturais	Estrutura Convencional	Estrutura conv. c/ lajes treliçadas	Estrutura de lajes lisas nervuradas
Custo total	R\$ 741.951,75	R\$ 769.877,44	R\$ 893.088,39
Custo Diferencial	-R\$ 151.136,64	-R\$ 123.210,95	R\$ 0,00
Variação %	16,92%	13,80%	100,00%

Fonte: Nervo (2012, p. 67)

3. METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise comparativa de custos entre sistemas estruturais de concreto armado, nos quais será variado o tipo de laje para um mesmo edifício de múltiplos pavimentos. Para proceder com a análise foi definido um edifício modelo, de autoria própria, que será a base para o lançamento estrutural dos três sistemas propostos.

A modelagem e o dimensionamento estrutural foram realizados com o auxílio dos *softwares* Eberick e Cypecad, ferramentas bastante úteis para realização de cálculo estrutural e detalhamento, além de fornecerem quantitativos dos materiais (que serão utilizados na orçamentação) e o coeficiente para análise da estabilidade global (coeficiente γ_Z). O orçamento foi desenvolvido com o auxílio das tabelas de composição de custos do SINAPI.

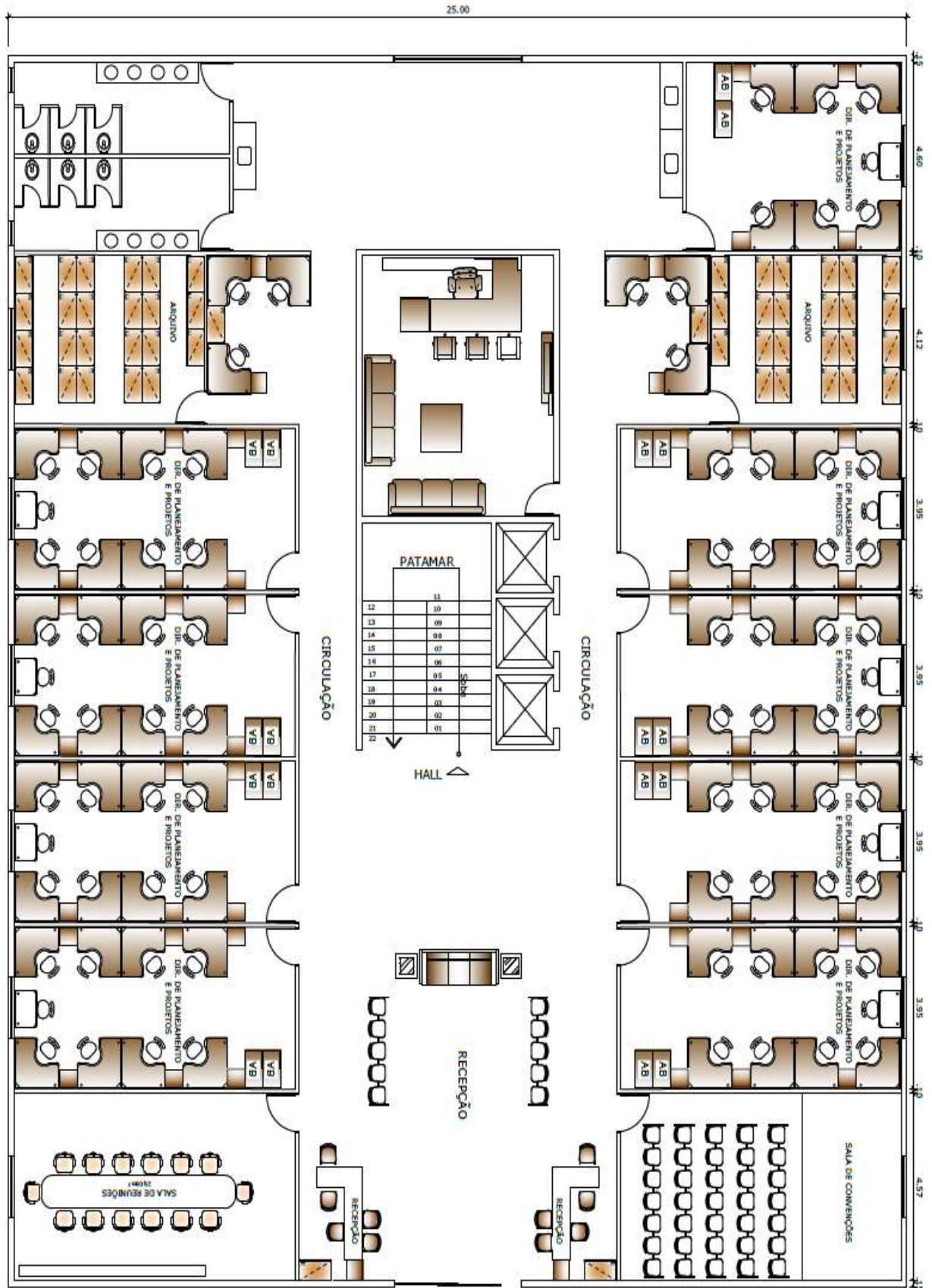
3.1. Caracterização do edifício de estudo

A edificação foi idealizada para ser concebida na cidade de Palmas/TO. Trata-se de um edifício em concreto armado, contendo 15 pavimentos, considerando o térreo mais 14 pavimentos tipo. Para facilitar a elaboração das plantas baixas dos pavimentos, a arquitetura do edifício foi definida baseando-se na sua utilização comercial/administrativa.

A disposição dos fechamentos internos em edifícios comerciais/administrativos permite alterações significativas sem afetar a funcionalidade do empreendimento. Estes fechamentos, em sua grande maioria, são constituídos de divisórias em *drywall*, em PVC, em Eucatex, dentre outras tecnologias. São caracterizados como elementos de fácil montagem e desmontagem, o que facilita a estruturação e flexibilidade do *layout* das áreas, atendendo as exigências de utilização dos espaços.

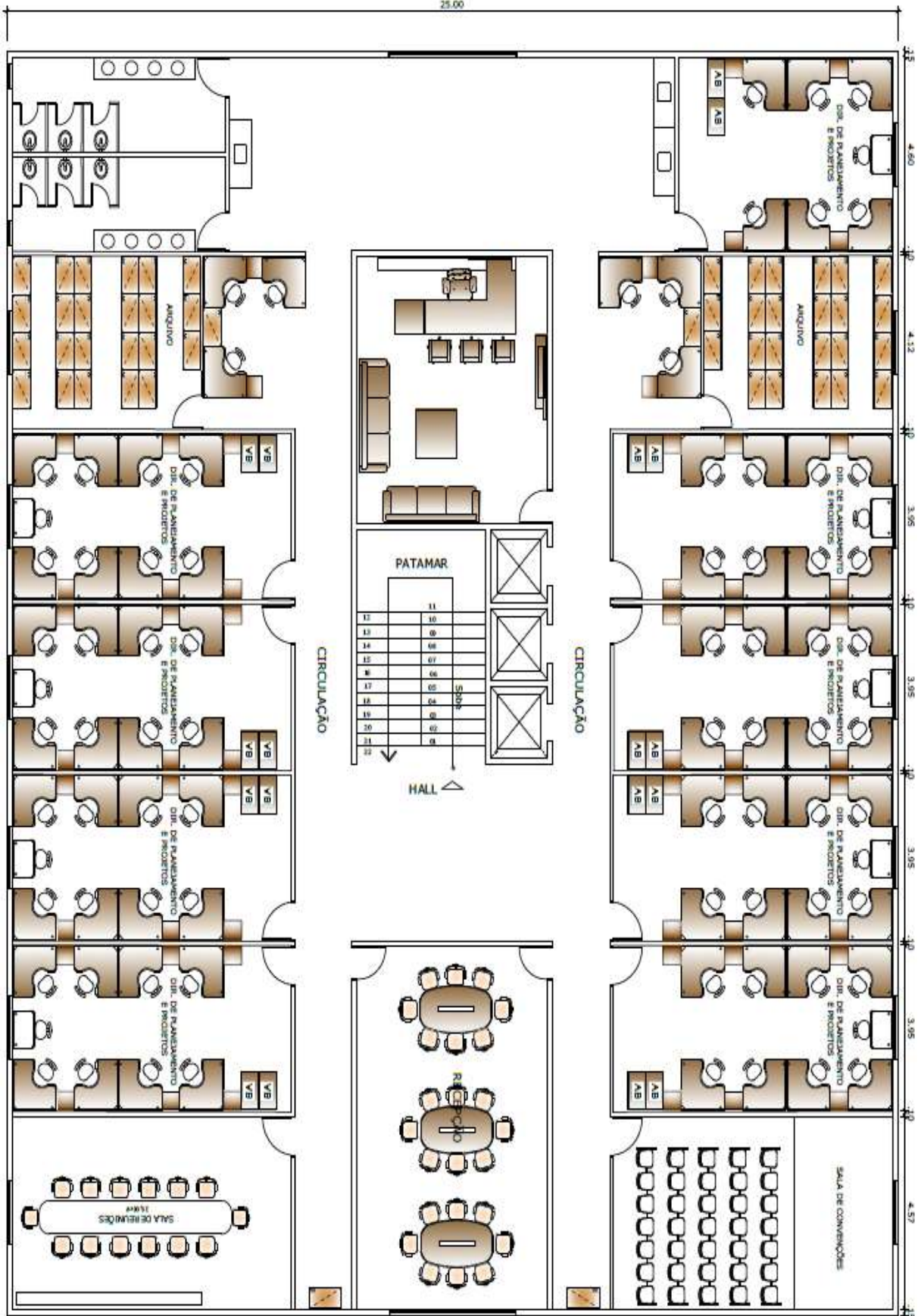
A seguir pode-se observar o *layout* do pavimento térreo (Figura 19) e do pavimento tipo (Figura 20) do edifício de estudo.

Figura 19 - Layout do pavimento térreo



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 - Layout do pavimento tipo



Fonte: Autoria Própria

3.2. Sistemas estruturais adotados

Foram definidos três sistemas estruturais para realização da pesquisa. São eles:

- Sistema estrutural convencional com lajes maciças (sistema estrutural 1);
- Sistema estrutural convencional com lajes treliçadas (sistema estrutural 2);
- Sistema estrutural com lajes lisas nervuradas (sistema estrutural 3).

Entende-se por sistema estrutural convencional aquele composto por lajes, vigas e pilares; e por sistema estrutural com lajes lisas aquele composto por lajes apoiadas diretamente sobre pilares, sem utilização de vigas.

Nos sistemas estruturais 1 e 2 foram mantidas as prumadas dos pilares, sendo realizadas modificações nas dimensões das vigas e pilares, quando necessário. Para justificar a utilização do sistema estrutural 3, foram realizadas mudanças na quantidade e posicionamento dos pilares, com finalidade de obter vãos adequados, conforme recomenda a literatura para esse tipo de laje.

No sistema estrutural 3, adotou-se a utilização de vigas de bordo para delimitação do contorno das lajes nervuradas. Esta medida, não descaracteriza o sistema estrutural (lajes lisas nervuradas).

3.3. Ferramentas de cálculo e análise estrutural

O estudo foi desenvolvido com o auxílio de dois dos mais difundidos e utilizados *softwares* de análise e dimensionamento de estruturas de concreto armado no país, o Eberick e o Cypecad. O Eberick foi utilizado para os sistemas estruturais 1 e 2 (sistema estrutural convencional com lajes maciças e sistema estrutural convencional com lajes nervuradas com treliçadas pré-moldadas, respectivamente); o Cypecad foi utilizado para o sistema estrutural 3 (sistema estrutural com lajes lisas nervuradas). A escolha do Cypecad para dimensionamento do sistema estrutural 3 foi pela agilidade no lançamento automático dos maciços nas regiões de apoio das lajes sobre os pilares e pela facilidade de ajuste da disposição dos elementos de enchimento, de tal forma que se encontrasse a melhor disposição dos mesmos. Deve-se ressaltar que o objetivo deste trabalho não é realizar uma análise comparativa entre os *softwares*, mas sim entre os sistemas estruturais adotados.

3.4. Parâmetros e critérios de comparação

Na formação dos custos foram considerados apenas os serviços e materiais relacionados à estrutura de concreto armado propriamente dita, não sendo contemplados serviços que antecedem esta etapa, como limpeza do terreno, instalações provisórias, etc. No quesito custo, além dos materiais propriamente ditos (concreto, aço e fôrmas), estão englobados todos os serviços pertinentes à execução da estrutura de concreto armado (armação do aço, montagem dos pilares, concretagem, confecção, montagem e desmontagem de fôrmas e escoramentos).

Os orçamentos de cada sistema foram realizados a partir do relatório de insumos e composições do SINAPI, disponibilizado mensalmente pela Caixa Econômica Federal. Seguindo o cronograma de projeto, o mês de referência utilizado foi o mês de fevereiro de 2020, publicado em março de 2020. Porém, houve a necessidade de modificar algumas composições para que estas pudessem atender prontamente as características de projeto. Contudo, foram utilizados índices de insumos e serviços de composições similares que compõem o SINAPI.

Além da comparação de custos, Spohr (2008) e Nervo (2012), apontam alguns parâmetros (índices) importantes para este tipo de análise e que foram utilizados neste trabalho para realizar a devida comparação entre os sistemas estruturais. Os índices são:

- a) Índice de concreto (i_c): é dado pela razão entre o consumo total de concreto (m^3) e a área total da edificação (m^2).

$$i_c = V (m^3) / A (m^2) \quad (9)$$

- b) Índice de aço (i_a): é a razão entre o consumo total de aço (kg) e a área total da edificação (m^2).

$$i_a = P (kg) / A (m^2) \quad (10)$$

- c) Índice de fôrma (i_f): é a razão entre a área de fôrmas do projeto da estrutura (m^2) e a área total da edificação (m^2).

$$i_f = A_f (m^2) / A (m^2) \quad (11)$$

3.5. Dados de entrada para o dimensionamento estrutural

Para realizar a análise e o dimensionamento estrutural dos sistemas propostos, foram adotados alguns parâmetros de entrada. É importante salientar que esses dados de entrada devem atender prontamente os critérios normativos quanto ao grau de agressividade ambiental, classe de resistência do concreto, abatimento do concreto (*slump*), aço para concreto armado (CA), carregamentos, dimensões mínimas dos elementos estruturais, além dos critérios de análise da estrutura.

Para efeito de estudo, foi escolhida a fundação direta do tipo sapatas isoladas. A tensão admissível do solo foi considerada de 4,5 kgf/cm² para o dimensionamento das fundações.

Dessa forma, seguindo as recomendações normativas, foram definidos os seguintes parâmetros:

- Classe de agressividade ambiental II;
- Cobrimento de 3 cm para as lajes, vigas e pilares;
- Concreto com $f_{ck} = 30$ MPa para as lajes, vigas e pilares;
- Armaduras com aço CA-50 e CA-60;
- Agregado graúdo tipo granito com diâmetro de 19 mm;
- Peso específico do concreto 2500 kgf/m³;
- Cargas acidentais de 300 kgf/m²;
- Carga de revestimento de 150 kgf/m²;
- Velocidade básica do vento $V_0 = 33$ m/s;
- Análise da estrutura: pórtico espacial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir dos critérios estabelecidos na metodologia descrita no capítulo anterior, referentes à: obtenção dos quantitativos para análise comparativa de consumo de materiais (volume de concreto, peso de aço e área de fôrmas) e seus respectivos custos (orçamento), assim como a verificação da estabilidade global através do coeficiente Gama-Z, para os sistemas estruturais adotados.

Em relação às espessuras das lajes (objeto principal de estudo deste trabalho), estas foram finalmente determinadas após dimensionamento estrutural levando em consideração às ações atuantes e critérios normativos quanto à capacidade resistente e quanto ao seu comportamento em serviço (deslocamentos).

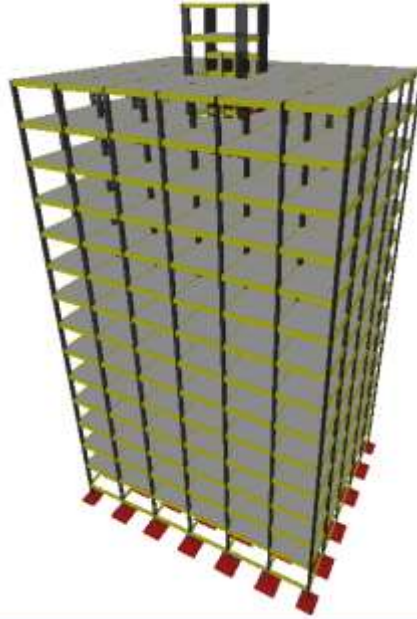
Pode-se observar que, para os três modelos, os dados referentes às escadas, reservatórios e casa de máquinas não estão listados nos quantitativos e orçamentos, tal medida justifica-se pelo fato dos mesmos terem apresentado variação inferior a 1% (dados obtidos após o dimensionamento estrutural). Dessa forma, a não utilização destes dados não trazem prejuízos à análise comparativa.

Encontram-se nos Apêndices as plantas de forma dos pavimentos térreo e tipo dos três sistemas estruturais. Por apresentarem muitos elementos estruturais e tendo em vista que o objetivo deste trabalho não é explicitar todos os detalhamentos, foram incorporados também nos Apêndices o detalhamento de alguns elementos estruturais dos três sistemas estudados. Nas plantas de forma pode-se verificar o posicionamento e seção dos elementos estruturais. Nos detalhamentos dos elementos estruturais, são observadas as disposições e bitolas das armaduras, seus comprimentos e dobras, detalhes de suma importância para uma correta execução.

4.1. Sistema estrutural convencional com lajes maciças (sistema estrutural 1)

A seguir estão dispostos os resultados obtidos após dimensionamento do sistema estrutural 1 (sistema estrutural convencional com lajes maciças) realizado no *software* Eberick. A Figura 21 apresenta o modelo tridimensional do sistema estrutural 1 (modelo similar ao do sistema estrutural 2, só muda a tipologia de laje empregada).

Figura 21 - Modelo 3D do sistema estrutural 1



Fonte: Autoria Própria

A estrutura é composta por pilares, vigas e lajes de concreto armado. A laje é do tipo maciça, com espessura de 10 cm, armada nas duas direções.

Foi utilizado concreto com $f_{ck} = 30$ MPa para pilares, lajes, vigas e fundações. A tipologia de fôrmas utilizadas para todos os elementos estruturais foi em chapa de madeira compensada plastificada. O escoramento adotado foi do tipo metálico para vigas e lajes.

A Tabela 5 apresenta os resultados do consumo de materiais do sistema estrutural 1. Os quantitativos estão separados por material e elemento estrutural. A estrutura teve um consumo total de 178.343,90 kg de aço, 1988,20 m³ de concreto e 19.437,00 m² de área de fôrma.

Tabela 5 - Consumo de materiais do sistema estrutural 1

	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrma (m²)
Pilares	37.480,60	387,30	3.964,30
Vigas	43.631,70	503,50	6.149,20
Lajes	78.648,50	917,00	9.174,20
Fundações	18.583,10	180,40	149,30
TOTAL	178.343,90	1.988,20	19.437,00

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 6 estão dispostos os índices de aço, concreto e fôrma do sistema estrutural 1. Estes índices representam as taxas de consumo de material, como disposto no item 3.4 do capítulo anterior.

Tabela 6 - Índices do sistema estrutural 1

Índice de aço -ia (kg/m²)	Índice de concreto – ic (m³/m²)	Índice de fôrma – if (m²/m²)
15,85	0,18	1,73

Fonte: Autoria Própria

No estudo realizado por Nervo (2012), conforme descrito no item 2.8 deste trabalho, o autor encontrou, para um modelo estrutural semelhante ao abordado aqui, os seguintes índices de consumo: índice de aço – 18,50; índice de concreto – 0,23; e índice de fôrma – 2,31. Estes resultados mostram-se um pouco superiores aos obtidos para o modelo aqui estudado para os três índices, o que evidencia um menor consumo por área para o edifício objeto de estudo da presente pesquisa. Spohr (2008), chegou aos seguintes resultados também para um modelo semelhante: índice de aço – 15,07; índice de concreto – 0,212; e índice de fôrma – 1,66. A partir destes resultados, pode-se constatar que apesar dos resultados do referido autor terem sido mais eficientes em dois dos três itens analisados, estes não encontram-se muito discrepantes em relação aos índices da corrente pesquisa.

Na tabela 7 estão apresentados os valores do coeficiente de estabilidade global γ_z para as direções X e Y. O valor do γ_z é um parâmetro utilizado para medir a sensibilidade da estrutura em relação aos efeitos globais de segunda ordem, permitindo assim verificar sua estabilidade frente aos esforços. De posse dos resultados, pode-se observar que a estrutura apresenta um coeficiente $\gamma_z = 1,21$ na direção X e $\gamma_z = 1,17$ na direção Y, o que a classifica, segundo a ABNT NBR 6118: 2014, como uma estrutura de nós móveis ($1,10 < \gamma_z \leq 1,30$), o que implica por sua vez na consideração dos efeitos globais de segunda ordem no cálculo da estrutura.

Tabela 7 - Coeficiente de estabilidade global γ_z

Direção X	Direção Y
1,21	1,17

Fonte: Autoria Própria

No quesito custos, os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 8, separados por elemento estrutural e por material. Como foi explicado, os custos de aço, concreto e fôrma, englobam todos os serviços relacionados a cada insumo, respectivamente.

Tabela 8 - Custos do sistema estrutural 1

	Aço	Concreto	Fôrma	TOTAL POR ELEMENTO
Pilares	R\$ 268.353,44	R\$ 169.048,70	R\$ 129.275,82	R\$ 566.677,97
Vigas	R\$ 307.712,71	R\$ 218.906,70	R\$ 330.365,70	R\$ 856.985,11
Lajes	R\$ 569.831,34	R\$ 398.684,09	R\$ 152.750,43	R\$ 1.121.265,86
Fundações	R\$ 124.056,93	R\$ 75.154,64	R\$ 28.443,14	R\$ 227.654,71
TOTAL POR INSUMO	R\$ 1.269.954,42	R\$ 861.794,13	R\$ 640.835,10	
TOTAL GERAL				R\$ 2.772.583,64

Fonte: Autoria Própria

O insumo de custo mais elevado para o sistema estrutural 1 é o aço, representando a quantia de R\$ 1.296.954,42, seguido pelo concreto com custo de R\$ 861.794,13, e pelas fôrmas com custo de R\$ 640.835,10, de um total de R\$ 2.772.583,64 que é o custo total da estrutura. Isso representa, respectivamente, 45,80%, 31,08%, e 23,11%, do custo total da estrutura, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 22.

Figura 22 - Custo percentual por material do sistema estrutural 1



Fonte: Autoria Própria

O elemento estrutural com maior representatividade no custo total da estrutura foi a laje, com custo de R\$ 1.121.265,86, seguido pelas vigas com custo de R\$ 856.985,11, pelos pilares com custo de R\$ 566.677,97, e pelas fundações com custo de R\$ 227.654,71. Esses valores representam, 40,44%, 30,91%, 20,44% e 8,21%, respectivamente, do custo total da estrutura, conforme pode ser observado na Figura 23.

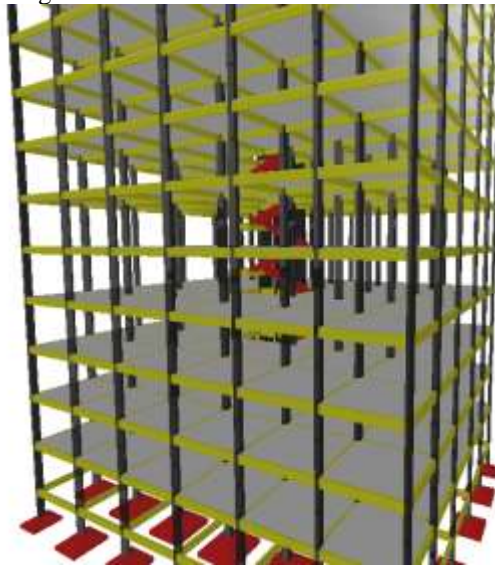


Fonte: Autoria Própria

4.2. Sistema estrutural convencional com lajes treliçadas (sistema estrutural 2)

A seguir estão dispostos os resultados obtidos após dimensionamento do sistema estrutural 2 (sistema estrutural convencional com lajes treliçadas) realizado no *software* Eberick. A Figura 24 ilustra a disposição dos elementos estruturais do sistema estrutural 2 (modelo semelhante ao do sistema estrutural 1, variando a tipologia de laje empregada).

Figura 24 – Modelo 3D do sistema estrutural 2



Fonte: Autoria Própria

A estrutura é composta por pilares, vigas e lajes com treliças pré-moldadas e enchimento de EPS (Poliestireno Expandido). A laje é do tipo treliçada unidirecional, com espessura total de 16 cm (definida pela altura do bloco de enchimento mais a capa de concreto). A treliça utilizada foi a TR 10646 e o bloco de EPS é o B12/30/125.

Foi utilizado concreto com $f_{ck} = 30$ MPa para todos os elementos estruturais. A tipologia de fôrmas utilizadas para as vigas e pilares foi em chapa de madeira compensada plastificada. Para efeito de estudo, foram considerados como fôrmas das lajes as treliças pré-moldadas em conjunto com os blocos de enchimento. O escoramento adotado foi do tipo metálico para vigas e lajes.

A Tabela 9 apresenta os resultados do consumo de materiais do sistema estrutural 2. Os quantitativos estão separados por material e elemento estrutural. A estrutura teve um consumo total de 85.703,30 kg de aço, 1.575,50 m³ de concreto e 19.255,60 m² de área de fôrma.

Tabela 9 - Consumo de materiais do sistema estrutural 2

	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrma (m²)
Pilares	27.332,90	371,00	3.902,20
Vigas	35.575,80	512,30	6.244,20
Lajes	11.784,80	574,00	8.999,20
Fundações	11.009,80	118,20	110,00
TOTAL	85.703,30	1.575,50	19.255,60

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 10 mostra-se os índices de aço, concreto e fôrma do sistema estrutural 1. Estes índices representam as taxas de consumo de material, como apresentado no item 3.4 do capítulo anterior.

Tabela 10 - Índices do sistema estrutural 2

Índice de aço - ia (kg/m²)	Índice de concreto – ic (m³/m²)	Índice de fôrma – if (m²/m²)
7,62	0,14	1,71

Fonte: Autoria Própria

Nervo (2012), obteve em sua pesquisa, conforme descrito no item 2.8 deste trabalho, para um modelo estrutural semelhante ao abordado aqui, os seguintes índices de consumo: índice de aço – 12,66; índice de concreto – 0,18; e índice de fôrma – 1,51. Estes resultados, com exceção do índice de fôrma, mostram-se superiores aos obtidos para o modelo aqui estudado. Isso pode ser explicado pelo fato de o autor ter quantificado as armaduras das treliças como aço para as lajes e por ter empregado lajes treliçadas diferentes da utilizada aqui, o que elevou o índice de aço e concreto, respectivamente. Spohr (2008), chegou aos seguintes resultados também para um modelo semelhante: índice de aço – 13,72; índice de concreto – 0,156; e índice de fôrma – 1,52. Os resultados encontrados por este autor se assemelham aos encontrados por Nervo (2012), isso pelo fato dos dois terem usado a mesma estratégia de quantificação do aço da treliça e utilização de outros tipos de lajes treliçadas.

A Tabela 11 apresenta os valores do coeficiente de estabilidade global γ_z para as direções X e Y. O valor do γ_z é um parâmetro utilizado para medir a sensibilidade da estrutura em relação aos efeitos globais de segunda ordem, permitindo assim verificar sua estabilidade frente aos esforços. De posse dos resultados, pode-se observar que a estrutura apresenta um coeficiente $\gamma_z = 1,15$ na direção X e $\gamma_z = 1,13$ na direção Y, de tal forma que ela classifica-se, segundo a ABNT NBR 6118: 2014, como uma estrutura de nós móveis ($1,10 < \gamma_z \leq 1,30$), o que implica por sua vez na consideração dos efeitos globais de segunda ordem no cálculo estrutural.

Tabela 11 - Coeficiente de estabilidade global γ_z

Direção X	Direção Y
1,15	1,13

Fonte: Autoria Própria

Os resultados obtidos para os custos estão dispostos na Tabela 12, separados por elemento estrutural e por material. Como foi explicado, os custos de aço, concreto e fôrma, englobam todos os serviços relacionados a cada insumo, respectivamente.

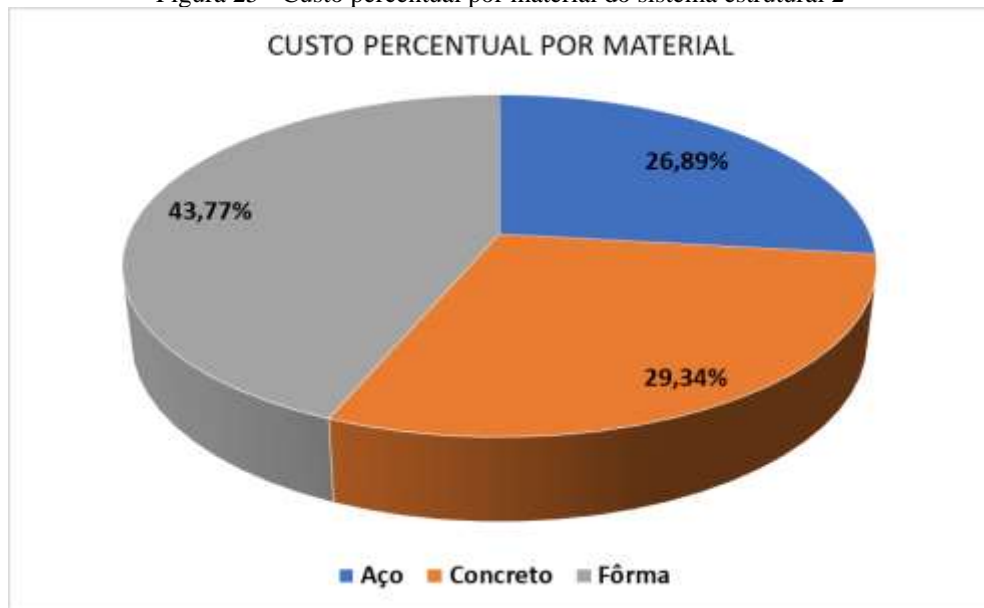
Tabela 12 - Custos do sistema estrutural 2

	Aço	Concreto	Fôrma	TOTAL POR ELEMENTO
Pilares	R\$ 203.887,91	R\$ 161.934,08	R\$ 127.250,74	R\$ 493.072,73
Vigas	R\$ 261.274,26	R\$ 224.325,92	R\$ 335.473,10	R\$ 821.073,28
Lajes	R\$ 91.043,18	R\$ 251.343,12	R\$ 541.031,90	R\$ 883.418,21
Fundações	R\$ 73.154,72	R\$ 49.242,12	R\$ 20.956,10	R\$ 143.352,94
TOTAL POR INSUMO	R\$ 629.360,07	R\$ 686.845,24	R\$ 1.024.711,84	
TOTAL GERAL				R\$ 2.340.917,16

Fonte: Autoria Própria

O insumo de custo mais elevado para o sistema estrutural 2 foi a fôrma, representando a quantia de R\$ 1.024.711,84, seguido pelo concreto com custo de R\$ 686.845,24, e seguido pelo aço com custo de R\$ 629.360,07 (estes dois últimos apresentados valores bem próximos), de um total de R\$ 2.340.917,16 que é o custo total da estrutura. Isso representa, respectivamente, 43,77%, 29,34%, e 26,89%, do custo total da estrutura, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 25. O que onerou as fôrmas foi o fato de terem sido considerados nos sistemas de fôrmas das lajes as treliças pré-moldadas e os blocos de enchimento.

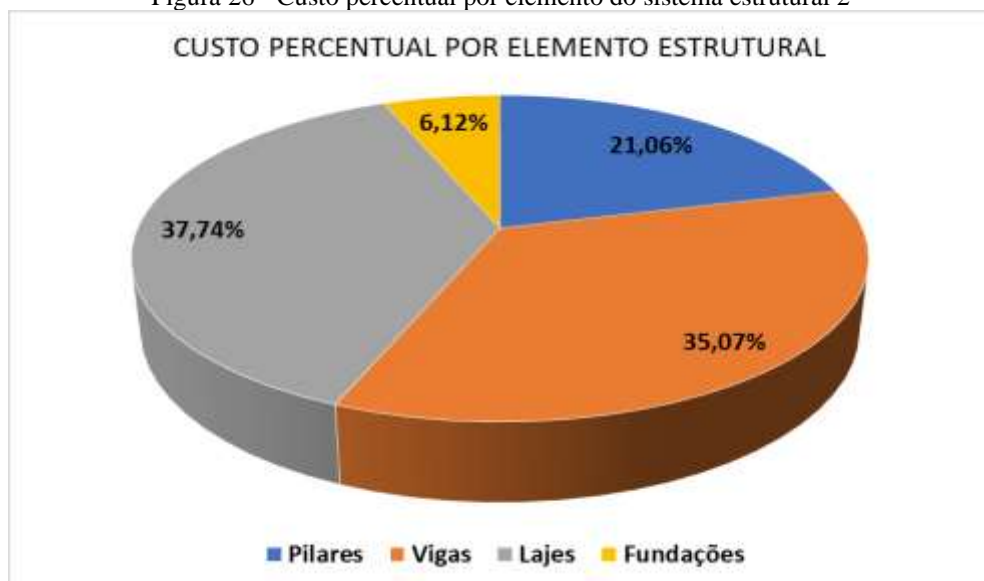
Figura 25 - Custo percentual por material do sistema estrutural 2



Fonte: Autoria Própria

O elemento estrutural mais expressivo no custo total da estrutura foi a laje, com custo de R\$ 883.418,21, seguido pelas vigas com custo de R\$ 821.073,28, pelos pilares com custo de R\$ 493.072,73, e pelas fundações com custo de R\$ 143.352,94. Esses valores representam, 40,44%, 30,91%, 20,44% e 8,21%, respectivamente, do custo total da estrutura, conforme pode ser observado na Figura 23.

Figura 26 - Custo percentual por elemento do sistema estrutural 2



Fonte: Autoria Própria

4.3. Sistema estrutural com lajes lisas nervuradas (sistema estrutural 3)

A seguir estão apresentados os resultados obtidos após dimensionamento do sistema estrutural 3 (Sistema estrutural com lajes lisas nervuradas) realizado no *software* Cypecad. A Figura 27 apresenta o modelo tridimensional do sistema estrutural 3. Nele pode-se observar a região dos maciços (apoios das lajes sobre os pilares).

Figura 27 - Modelo 3D do sistema estrutural 3



Fonte: Autoria Própria

A estrutura é composta por pilares, lajes, e vigas de bordo de concreto armado. A laje foi do tipo nervurada moldada *in loco*, com espessura de total de 23 cm, armada nas duas direções.

Foi utilizado concreto com $f_{ck} = 30$ MPa para pilares, lajes, vigas e fundações. A tipologia de fôrmas utilizadas para as vigas e pilares foi em chapa de madeira compensada plastificada. Para as lajes nervuradas foram utilizadas fôrmas plásticas do tipo cubeta (60x60cm e altura de 18cm). O escoramento adotado foi do tipo metálico para vigas e lajes.

A Tabela 13 apresenta os resultados do consumo de materiais do sistema estrutural 3. Os quantitativos estão separados por material e elemento estrutural. A estrutura teve um consumo total de 164.832,00 kg de aço, 2.160,50 m³ de concreto e 15.226,72 m² de área de fôrma.

Tabela 13 - Consumo de materiais do sistema estrutural 3

	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrma (m²)
Pilares	43.518,00	424,70	3.817,70
Vigas	23.156,00	227,40	1.438,70
Lajes	85.598,00	1.303,40	9.660,12
Fundações	12.560,00	205,00	310,20
TOTAL	164.832,00	2.160,50	15.226,72

Fonte: Autoria Própria

Estão dispostos na Tabela 14 os índices de aço, concreto e fôrma do Sistema estrutural 1. Estes índices representam as taxas de consumo de material, como foi comentando no item 3.4 do capítulo anterior.

Tabela 14 - Índices do sistema estrutural 3

Índice de aço – ia (kg/m²)	Índice de concreto – ic (m³/m²)	Índice de fôrma – if (m²/m²)
14,65	0,19	1,35

Fonte: Autoria Própria

No estudo realizado por Nervo (2012), conforme descrito no item 2.8 deste trabalho, o autor encontrou, para um modelo estrutural semelhante ao abordado aqui, os seguintes índices de consumo: índice de aço – 23,55; índice de concreto – 0,26; e índice de fôrma – 1,38. Estes resultados mostram-se um pouco superiores aos obtidos para o modelo aqui estudado para os três índices, o que evidencia um menor consumo por área para o edifício objeto de estudo da presente pesquisa. Spohr (2008), chegou aos seguintes resultados também para um modelo semelhante: índice de aço – 12,34; índice de concreto – 0,187; e índice de fôrma – 1,36. A partir destes resultados, pode-se constatar que apesar dos resultados do referido autor terem sido mais eficientes em dois dos três itens analisados, estes não encontram-se muitos discrepantes em relação aos índices da corrente pesquisa.

Na Tabela 15 estão apresentados os valores do coeficiente de estabilidade global γ_z para as direções X e Y. O valor do γ_z é um parâmetro utilizado para medir a sensibilidade da estrutura em relação aos efeitos globais de segunda ordem, permitindo assim verificar sua estabilidade frente aos esforços. De posse dos resultados, pode-se observar que a estrutura apresenta um coeficiente $\gamma_z = 1,13$ na direção X e $\gamma_z = 1,11$ na direção Y, sendo classificada, segundo a ABNT

NBR 6118: 2014, como uma estrutura de nós móveis ($1,10 < \gamma_z \leq 1,30$), o que implica por sua vez na consideração dos efeitos globais de segunda ordem no cálculo da estrutura.

Tabela 15 - Coeficiente de estabilidade global γ_z

Direção X	Direção Y
1,13	1,11

Fonte: Autoria Própria

Já em relação aos custos, os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 16, separados por elemento estrutural e por material. Como foi explicado, os custos de aço, concreto e fôrma, englobam todos os serviços relacionados a cada insumo, respectivamente.

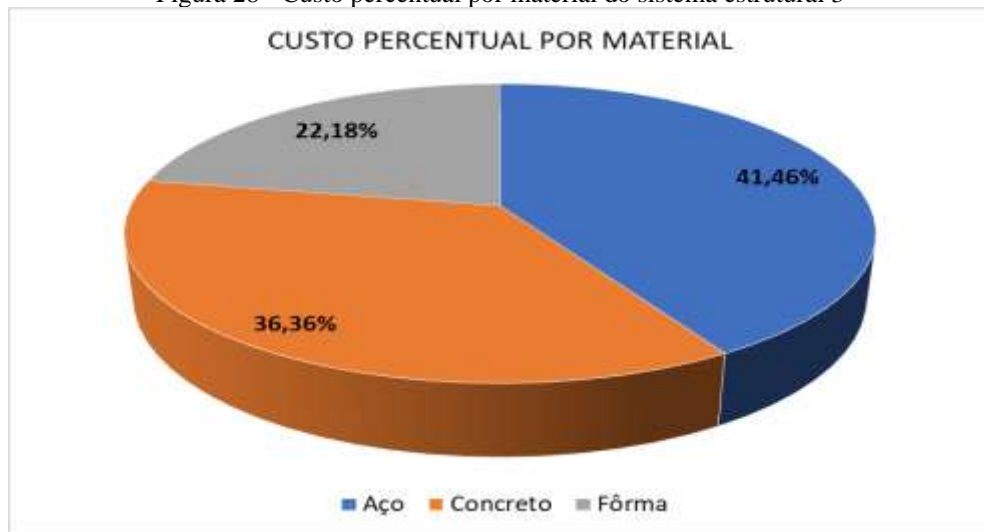
Tabela 16 - Custos do sistema estrutural 3

	Aço	Concreto	Fôrma	TOTAL POR ELEMENTO
Pilares	R\$ 309.551,02	R\$ 185.373,06	R\$ 124.495,20	R\$ 619.419,27
Vigas	R\$ 158.142,71	R\$ 98.866,70	R\$ 77.241,34	R\$ 334.250,75
Lajes	R\$ 515.485,83	R\$ 566.679,22	R\$ 310.283,05	R\$ 1.392.448,10
Fundações	R\$ 84.450,88	R\$ 85.403,00	R\$ 59.096,20	R\$ 228.950,08
TOTAL POR INSUMO	R\$ 1.067.630,44	R\$ 936.321,97	R\$ 571.115,79	
TOTAL GERAL				R\$ 2.575.068,21

Fonte: Autoria Própria

O insumo de custo mais elevado para o sistema estrutural 3 foi o aço, representando a quantia de R\$ 1.067.630,44, seguido pelo concreto com custo de R\$ 936.321,97, e pelo aço com custo de R\$ 571.115,79, de um total de R\$ 2.575.068,21 que é o custo total da estrutura. Isso representa, respectivamente, 41,46%, 36,36%, e 22,18%, do custo total da estrutura, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 28.

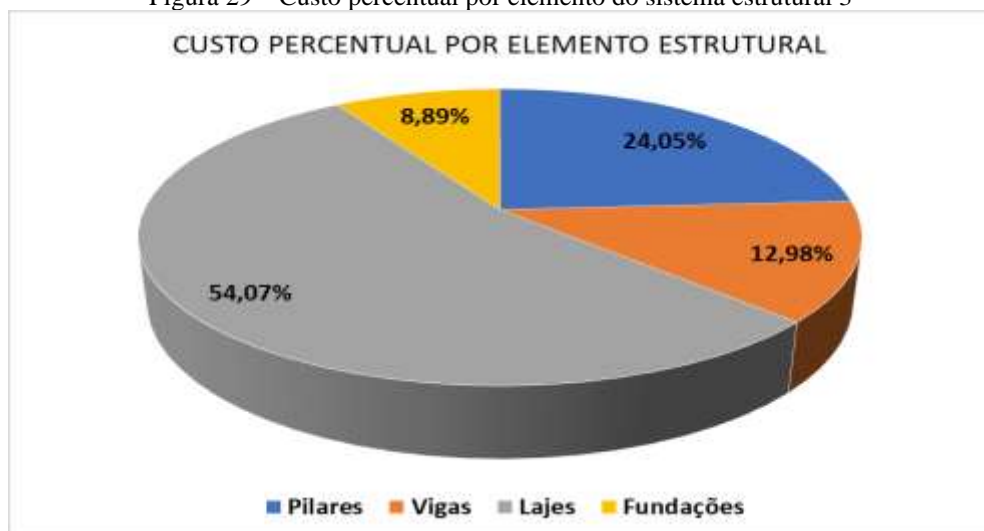
Figura 28 - Custo percentual por material do sistema estrutural 3



Fonte: Autoria Própria

O elemento estrutural com maior representatividade no custo total da estrutura foi a laje, com custo de R\$ 1.392.448,10, seguido pelos pilares com custo de R\$ 619.419,27, pelas vigas com custo de R\$ 334.250,75, e pelas fundações com custo de R\$ 228.950,08. Esses valores representam, 54,07%, 24,05%, 12,98% e 8,89%, respectivamente, do custo total da estrutura, como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Custo percentual por elemento do sistema estrutural 3

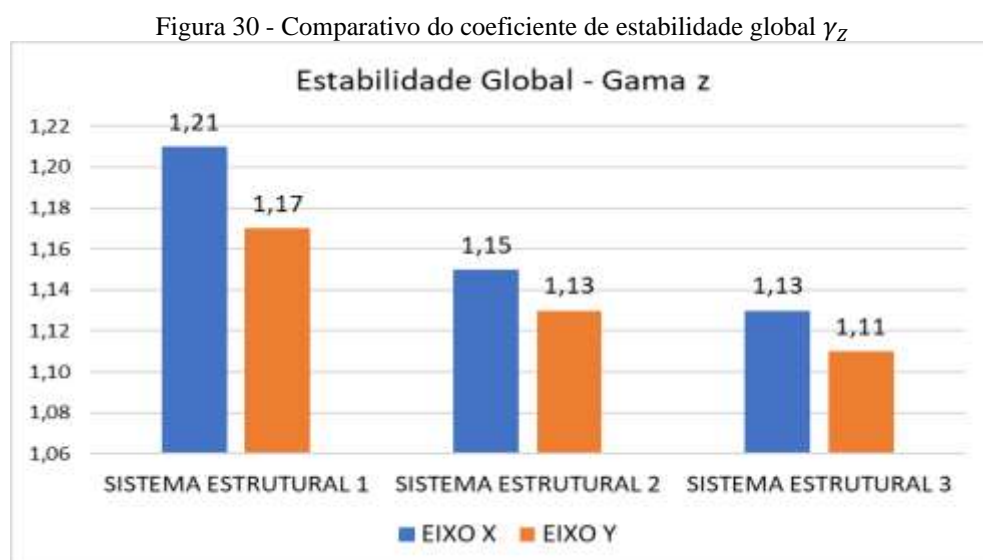


Fonte: Autoria Própria

4.4. Análises comparativas entre os três sistemas estruturais

A Figura 30 apresenta o gráfico dos valores do coeficiente de estabilidade global dos três sistemas estruturais estudados. Lembrando que o sistema estrutural 1 corresponde aquele com laje maciça, o sistema estrutural 2 corresponde ao de laje treliçada e por fim o sistema estrutural 3 é o que foi utilizado laje lisa nervurada. Apesar de todos os sistemas estruturais serem considerados de nós móveis ($1,10 < \gamma_z \leq 1,30$), pode-se observar que o sistema estrutural 3 apresentou menor coeficiente de estabilidade global, conseqüentemente é a estrutura mais rígida (menos suscetível aos deslocamentos). Em seqüência, o sistema estrutural 2 e o sistema estrutural 1 (este último sendo o mais sensível aos efeitos globais de segunda ordem).

Os sistemas estruturais 1 e 2 apresentaram estrutura convencional, composta por pilares, vigas e lajes. Nestes modelos, a estabilidade global é garantida pela formação de pórticos (conjuntos de pilares e vigas), tendo as lajes a função de compatibilizar os deslocamentos horizontais ao longo de todo o seu plano (“diafragma rígido”), conforme apontam Freitas, Luchi e Ferreira (2016). Os referidos autores citam ainda a influência direta da rigidez destes elementos na estabilidade global. Quanto maior a rigidez dos elementos estruturais, menores serão os valores de γ_z e, conseqüentemente, menos deslocável será a estrutura.



Fonte: Autoria Própria

O sistema estrutural 3 foi composto por lajes nervuradas apoiadas diretamente sobre os pilares, utilizando-se ainda vigas de borda (vigas de fechamento, nas extremidades da

estrutura). Segundo Passos et al. (2016), para esse tipo de sistema estrutural, os pilares, em primeira análise, ficam encarregados de garantir a estabilidade global da estrutura. Para estes casos, a utilização de pilares-parede com seções “U” ou “L” posicionados de forma estratégica, conferem rigidez adequada em ambas direções da edificação. Ainda segundo Passos et al. (2016), os maciços de elevada espessura formados nas regiões de ligação das lajes nervuradas com os pilares, formam pontos “suficientemente rígidos para estabilizar a edificação”.

Diante do exposto, e de posse das plantas de forma dos edifícios (Apêndices A, B e C), pode-se buscar entender as causas dos valores do coeficiente de estabilidade global em cada caso. Os sistemas estruturais 1 e 2 apresentam disposição de elementos estruturais bastante semelhantes, com pilares de seções não tão robustas (com exceção dos pilares-parede do fosso do elevador, que formam o núcleo rígido do edifício), se comparados aos pilares do sistema estrutural 3 (pilares-parede em “L” nos cantos da edificação e no núcleo rígido e demais pilares de grandes dimensões). Neste estudo, pôde-se observar que o arranjo dos pilares-parede do sistema estrutural de lajes lisas apresentou-se mais eficiente quanto à estabilidade global, se comparado ao arranjo dos pórticos dos sistemas convencionais de lajes maciça e treliçadas.

Ainda sobre os sistemas estruturais 1 e 2, a variação do coeficiente de estabilidade global para estes, mesmo com arranjo estrutural muito semelhante, deve-se ao fato de que as cargas verticais produzidas pelo peso próprio das lajes maciças serem superiores às cargas verticais de peso próprio das lajes treliçadas. Passos et al. (2016), comentam sobre a relevância do carregamento vertical na formulação do coeficiente γ_Z : para um mesmo carregamento horizontal, verifica-se um aumento no valor do γ_Z com o aumento do carregamento vertical; “já o aumento do carregamento horizontal não gera um aumento no valor do coeficiente γ_Z , pois os esforços de 1ª ordem e 2ª ordem aumentam na mesma proporção, ou seja, $\Delta M_d/\Delta M_{1d}$ permanece constante”.

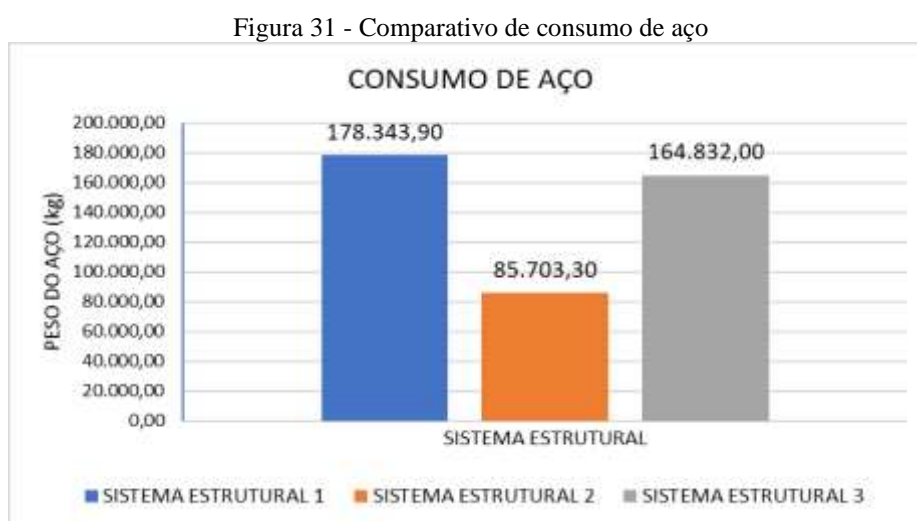
Os índices de consumo de materiais indicam quanto foi usado de cada material em relação a área da edificação para os sistemas estruturais abordados no estudo, sendo utilizados como ferramenta de comparação. Quanto maior o índice, mais material foi utilizado por área. Estes valores podem ser consultados a seguir na Tabela 17.

Tabela 17 – Índices de consumo

	Aço (kg/m²)	Concreto (m³/m²)	Fôrma (m²/m²)
SISTEMA ESTRUTURAL 1	15,85	0,18	1,73
SISTEMA ESTRUTURAL 2	7,62	0,14	1,71
SISTEMA ESTRUTURAL 3	14,65	0,19	1,35

Fonte: Autoria Própria

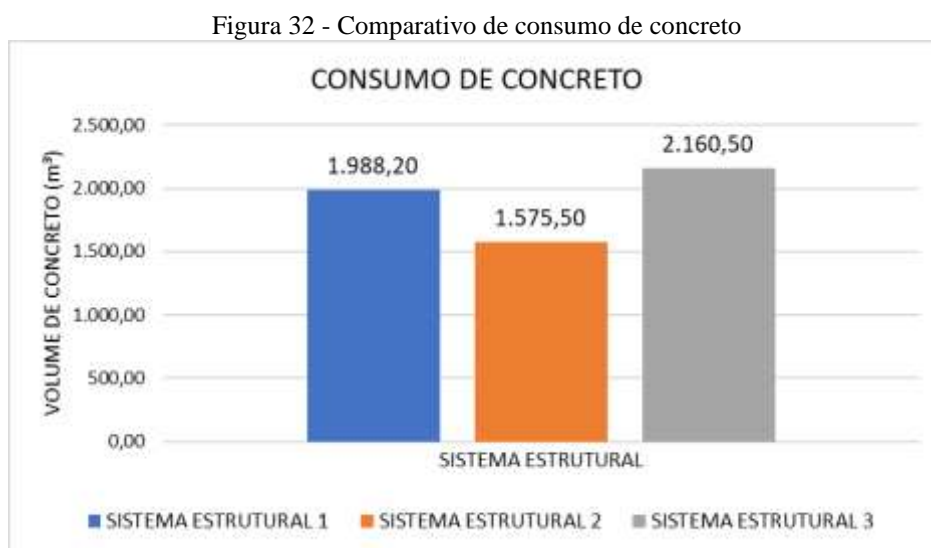
A figura 31 apresenta o comparativo em quantidades totais para o consumo de aço. O sistema estrutural 1 apresentou maior consumo deste insumo, com um total de 178.343,90 kg, dos quais, cerca de 78.648,50 kg foram utilizados nas lajes (Tabela 5). As lajes maciças tiveram suas armaduras principais dispostas em duas direções, diferente das lajes treliçadas unidirecionais, o que implicou em maior demanda de aço frente aos esforços solicitantes. As lajes nervuradas também tiveram suas armaduras dispostas em duas direções, mas com espaçamentos maiores (ditados pelos espaçamentos das nervuras), o que acarretou numa menor taxa de aço se comparadas às lajes maciças. No tocante às lajes treliçadas, o aço quantificado na análise, referiu-se apenas ao aço das armaduras de reforço, armaduras negativas (em regiões de engaste entre lajes adjacentes) e na armadura de distribuição. O elemento pré-moldado, composto por concreto e treliça, foi quantificado como fôrma perdida devido sua disposição na composição de custos unitários utilizada na pesquisa. Essa consideração foi determinante para o menor quantitativo de aço nesses elementos (lajes treliçadas) e, conseqüentemente, no sistema estrutural 2.



Fonte: Autoria Própria

Na figura 32 estão dispostos os volumes totais de concreto utilizado em cada sistema estrutural. Pode-se observar que o sistema estrutural 3 obteve maior consumo de concreto, com um total de 2.160,50 m³, dos quais 1.303,40 foram empregados nas lajes nervuradas (cerca de 60,33% do total). A laje nervurada utilizada possui altura total de 23 cm (18 cm altura da forma e 5 cm de capa de concreto), com nervuras espaçadas ortogonalmente a cada 60cm. De acordo

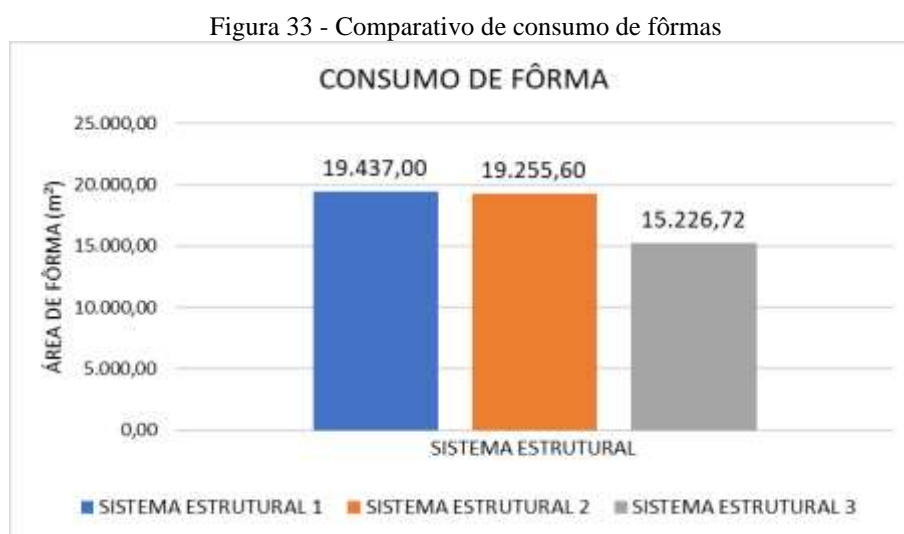
com o catálogo da Atex, uma das maiores fabricantes de moldes para lajes nervuradas (cubetas), essa laje (denominada Atex 600) possui consumo de $0,106 \text{ m}^3$ de concreto por m^2 de área de laje. Para se ter uma ideia comparativa, a laje maciça utilizada no sistema estrutural 1 (com altura de 10 cm) teve consumo de $0,10 \text{ m}^3$ de concreto por m^2 de laje e a laje treliçada do sistema estrutural 2 (16 cm de altura total, sendo 12 cm da altura do bloco de enchimento e 4 cm da capa de concreto) possui consumo de concreto de $0,055 \text{ m}^3/\text{m}^2$. O consumo unitário descrito no catálogo ($0,106 \text{ m}^3/\text{m}^2$) não inclui possíveis maciços. Dessa forma, outro fator determinante no maior consumo de concreto das lajes nervuradas deste projeto foram os maciços, estes com espessura total de 23 cm (altura total da laje) dispostos nas regiões de apoio da laje sobre os pilares, contribuindo com o combate ao puncionamento.



Fonte: Autoria Própria

Estão apresentados na Figura 33 os quantitativos de fôrmas dos três sistemas estruturais analisados. A área de fôrma obtida para os sistemas estruturais 1 e 2 foi bem próxima (com os maiores consumos na análise comparativa), apresentando pequena variação. Estes dois sistemas estruturais possuem arranjo estrutural bastante similares, inclusive possuem a mesma quantidade pilares. A variação na área de fôrma, deu-se principalmente pela variação da seção dos elementos da superestrutura (vigas e pilares) e pela redução das dimensões dos elementos de fundação do sistema estrutural 2, acarretando assim numa menor área total de fôrmas para este último sistema. As treliças pré-moldas em conjunto com os blocos de enchimento das lajes do sistema estrutural 2 foram considerados como fôrmas perdidas, para efeito de quantificação.

O sistema estrutural 3 apresentou menor consumo deste insumo, principalmente pela sua concepção estrutural. Desprovido de vigamentos internos, apresentando estes elementos apenas no baldrame e na delimitação das bordas do edifício, o sistema estrutural 3 apresentou significativa redução no consumo de fôrmas, principalmente pela eliminação de tais elementos estruturais.

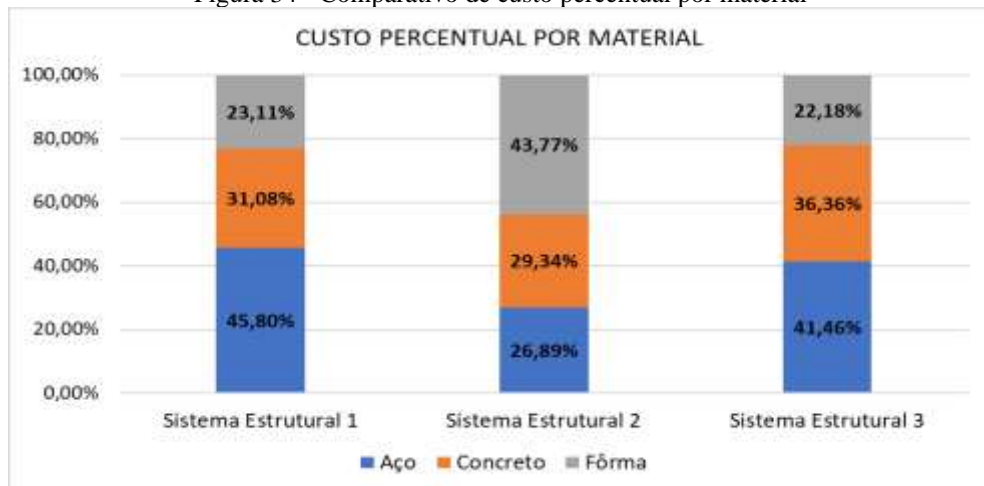


Fonte: Autoria Própria

Para avaliar a importância de cada insumo e de cada elemento estrutural na formação do preço final dos modelos estruturais abordados neste estudo, apresenta-se as Figuras 34 e 35, contendo o custo percentual de cada material (aço, concreto e fôrma) e de cada elemento estrutural (pilares, vigas, lajes e fundações), incidentes sobre seus respectivos sistemas estruturais.

O aço foi mais representativo nos custos dos sistemas estruturais 1 e 3, principalmente pela alta demanda deste insumo nas lajes bidirecionais empregadas nos dois sistemas. O concreto também apresentou grande relevância no custo destes, ocasionado pelo elevado consumo de concreto das lajes maciças e das lajes nervuradas, se comparado ao consumo das lajes treliçadas no sistema estrutural 2. A fôrma foi o insumo de maior impacto no custo total do sistema estrutural 2. Isso pode ser explicado pela adoção das treliças pré-moldadas terem sido consideradas como fôrma perdida para as lajes.

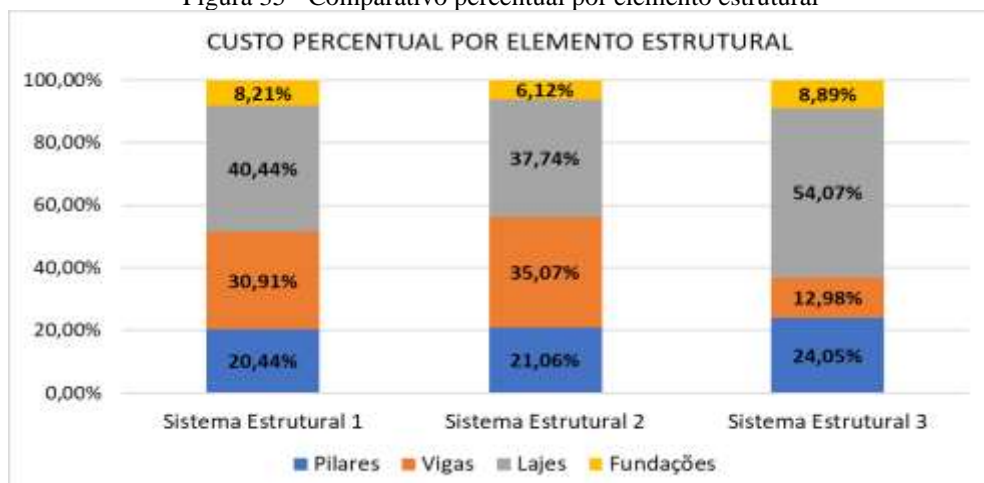
Figura 34 - Comparativo de custo percentual por material



Fonte: Autoria Própria

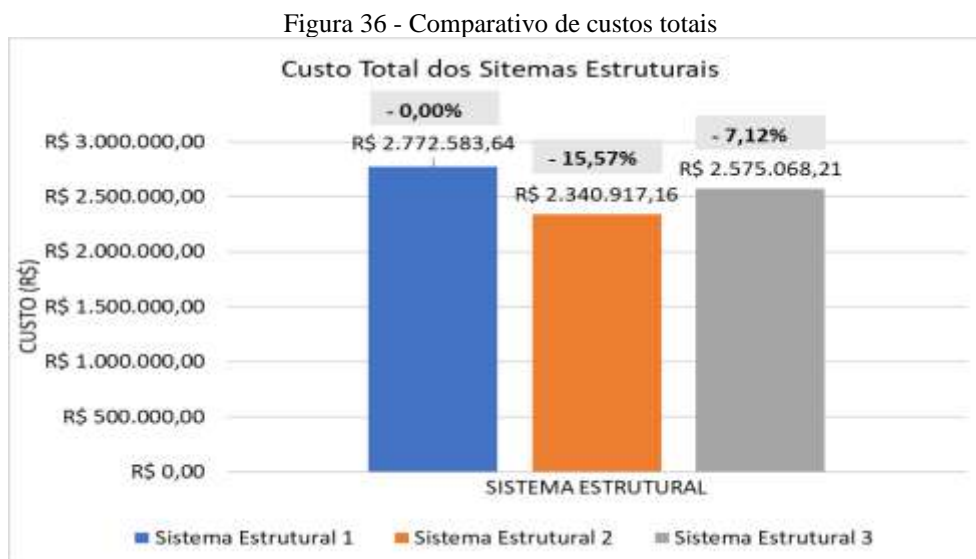
Como pode-se observar na Figura 35, as lajes foram responsáveis pela maior parcela do custo total para os três sistemas estruturais. Destaque deve ser dado às lajes do sistema estrutural 3, composto por lajes lisas nervuradas. Estas necessitaram vencer grandes vãos em decorrência do arranjo estrutural adotado (lajes apoiadas diretamente sobre os pilares, com ausência de vigas), o que acarretou na utilização de lajes com inércia mais elevada que as lajes dos outros sistemas estruturais e, conseqüentemente, maior altura total da lajes, o que culminou numa maior demanda de concreto e aço. Com exceção das vigas, que representam pequena parcela dos custos no sistema estrutural 3, os demais elementos estruturais tiveram importância bastante semelhantes na formação dos custos totais de seus respectivos sistemas estruturais, apresentando pequenas variações entre um sistema e outro.

Figura 35 - Comparativo percentual por elemento estrutural



Fonte: Autoria Própria

A Figura 36 apresenta o gráfico com os custos totais de cada sistema estrutural e a diferença percentual de custo. Na Tabela 18 estão dispostos os custos totais, a diferença de custo total e a diferença percentual de custo entre os sistemas estruturais estudados.



Fonte: Autoria Própria

Tabela 18 - Comparativo de custos totais

	Sistema estrutural 1	Sistema estrutural 2	Sistema estrutural 3
Custo Total (R\$)	R\$ 2.772.583,64	R\$ 2.340.917,16	R\$ 2.575.068,21
Diferença de Custo (R\$)	R\$ 0,00	-R\$ 431.666,48	-R\$ 197.515,44
Diferença de Custo (%)	0,00%	-15,57%	-7,12%

Fonte: Autoria Própria

De posse dos dados apresentados anteriormente, pode-se concluir que o sistema estrutural convencional com lajes treliçadas (sistema estrutural 2) foi o que apresentou menor custo total, com uma redução de 15,57% se comparado ao sistema estrutural convencional com lajes maciças (sistema estrutural 1), este último sendo o de maior custo total entre os três modelos analisados. Ainda sobre as análises de custo, o sistema estrutural com lajes lisas nervuradas (sistema estrutural 3) apresentou 7,12% de redução no custo total se comparado ao sistema estrutural 1.

5. CONCLUSÃO

Após análise dos resultados, pôde-se constatar que o sistema estrutural que apresentou melhor custo-benefício foi o sistema estrutural convencional com lajes treliçadas, apresentando um custo 15,57% menor que o sistema estrutural convencional com lajes maciças (uma economia de R\$ 431.666,48), que obteve custo mais elevado entre os modelos analisados. O sistema estrutural com lajes lisas nervuradas obteve um custo 7,12% menor que o sistema estrutural 1 (o equivalente a R\$ 197.515,44). O menor custo do sistema estrutural 2, deu-se principalmente pela significativa redução de consumo de concreto e aço nas lajes treliçadas unidirecionais.

Ainda em face dos resultados, pode-se constatar que o elemento estrutural mais significativo na formação dos custos totais de cada edificação, foram as lajes. Estas contribuíram com 40,44% do custo no sistema estrutural 1, 37,74% do custo no sistema estrutural 2 e vultosos 54,07% na formação do custo total do sistema estrutural 3. Por serem elementos estruturais que abrangem área significativa da edificação, as lajes demandam significativamente por insumos, sendo responsáveis por grande parte dos custos de uma estrutura, assim como foi comprovado neste trabalho. Dessa forma, deve-se buscar otimizar a utilização deste elemento, adotando soluções tecnológicas viáveis para aplicação de alternativas já disponíveis no mercado. Esta conclusão reforça a importância da necessidade de realizar um estudo detalhado preliminar na hora de escolher o tipo de laje, sobretudo em edifícios de múltiplos pavimentos.

No tocante aos materiais (aço, concreto e fôrmas), o aço apresentou-se como de maior importância na formação do preço do sistema estrutural 1 (45,80% do total) e no sistema estrutural 3 (41,46% do total), principalmente pelo elevado consumo de aço nas lajes bidirecionais (nos dois casos). A fôrma foi o material mais significativo em termos de custo no sistema estrutural 2 (43,77%), devido a consideração das treliças pré-moldadas e blocos de enchimento como fôrma perdida para as lajes.

Em relação à estabilidade global, o sistema estrutural 3 apresentou os menores valores para o coeficiente γ_Z (1,11 na direção X e 1,13 na direção Y). Apesar deste sistema ser de lajes lisas nervuradas (não apresenta vigamento entre todos os pilares para a formação de pórticos), o mesmo apresentou melhor resposta aos efeitos globais de segunda ordem. Este fato pode ser justificado pelo uso de pilares com dimensões maiores (e seções especiais, como pilares em L) que os utilizados nos outros sistemas estruturais, vigas de bordo no contorno da edificação,

além da própria laje nervurada que contribui para o travamento da estrutura devido sua grande inércia e espessura.

Este trabalho abordou uma problemática específica (um tipo de edificação), o que não significa que os resultados aqui encontrados sirvam como via de regra para adoção de um modelo estrutural genérico. Porém, vale ressaltar a importância desta pesquisa para casos semelhantes ao objeto de estudo deste trabalho, que pode ser utilizado como referência inicial para tomada de decisões.

Por fim, ficam algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Substituir os tipos de lajes utilizadas nesse trabalho: *bubbledeck*, *steel deck*, lajes protendidas e lajes alveolares, e aplicabilidade destas no cenário regional;
- Variar o número de pavimentos e verificar qual sistema estrutural mais adequado economicamente para as faixas de pavimentos;
- Analisar o custo e o tempo de execução para sistemas estruturais diferentes para a região de Palmas/TO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTOQI. **Guia de ajuda do AltoQi Eberick.** Disponível em: <http://help.altoqi.com.br/Eberick/default.aspx#pageid=altoqi_eberick>. Acesso em: 14 nov. 2019.

AMORIM, Diego da Silva. **ESTUDO COMPARATIVO DE QUANTITATIVOS DE INSUMOS E CUSTOS TOTAIS ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS DE LAJE PARA UM DETERMINADO PROJETO ARQUITETÔNICO.** 2018. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13595>>. Acesso em: 10 out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859 - 1:** Lajes pré-fabricadas de concreto: Vigotas, minipainéis e painéis – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681:** Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ATEX BRASIL. **Catálogo Técnico.** 2020. Disponível em: <https://www.atex.com.br/upload/PDFCalculista/Catalogorevjan19_636867676630505412.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2020.

BARBIERI, Paola. **ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE LAJES TRELIÇADAS.** Orientador: M. Sc. Christian Donim. 2016. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11624/1748>>. Acesso em: 18 out. 2019.

BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do concreto armado.** UNESP. Bauru/SP: Apostila (Notas de aula), 2006. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/FUNDAMENTOS.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

BASTOS, P. S. S. **Lajes de concreto.** UNESP. Bauru/SP: Apostila (Notas de aula), 2015. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Lajes.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **CONCRETO ARMADO EU TE AMO.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 339 p. v. 2. ISBN 978-85-212-0894-5.

CAIXA ECONOMICA FEDERAL. **SINAPI:** Metodologias e Conceitos – Sistema Nacional de Pesquisa de Índices da Construção Civil. 7. ed. Brasília: CAIXA, 2019. 178 p.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EduFSCar, 2014. 415 p.

CYPECAD. **CYPE Ingenieros: Software para Arquitetura, Engenharia e Construção**. Disponível em: <<http://Cypecad.cype.pt/>>. Acesso em: 12 abr. 2020.

FREITAS, F. C.; LUCHI, L. A. R.; FERREIRA, W. G. Análise da estabilidade global das estruturas e ações de controle dos seus efeitos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.I.], v. 9, n. 2, p. 192-213, abr. 2016. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000200003>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

GIONGO, José Samuel. **CONCRETO ARMADO**: Projeto estrutural de edifícios. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2007. 176 p.

JUNGES, Elisabeth; LAROVERE, Henriette Lebre; LORIGGIO, Daniel Domingues. ANÁLISE DE SEGUNDA ORDEM GLOBAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DE DIMENSIONAMENTO. In: IBRACON, 2012, Maceió. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto**. Maceió: IBRACON, 2012. p. 1 - 17.

KIMURA, Alio. **INFORMÁTICA APLICADA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**: Cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais. 2007. 624 p. 1 ed. São Paulo: Pini, 2007.

LEET, Kenneth M.; UANG, Chia-Ming; GILBERT, Anne M. **Fundamentos da análise estrutural**. 3. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2010. 790 p. ISBN 987-85-7726-059-1.

MATTOS, A. D. **Como Preparar Orçamentos de Obras**. São Paulo: Pini, 2006. 281 p.

MONCAYO, Winston Junior Zumaeta. **ANÁLISE DE SEGUNDA ORDEM GLOBAL EM EDIFÍCIOS COM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO**. 2011. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

NERVO, Ricardo. **ANÁLISE COMPARATIVA DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS DE LAJES CONVENCIONAIS E LAJES NERVURADAS**. 2012. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2012.

PASSOS, V. M. et al. Análise da instabilidade de edifícios altos com lajes protendidas e lajes nervuradas. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.I.], v. 9, n. 2, p. 244-262, abr. 2016. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000200006>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

PINHEIRO, Libânio Miranda; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. Estruturas de Concreto. In: PINHEIRO, Libânio Miranda. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS**. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2007. Cap. 4. p. 29-35.

PINHEIRO, Libânio Miranda; REZENTE, Julio A. Estruturas de Concreto. In: PINHEIRO, Libânio Miranda. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS**. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2007. Cap. 17. p. 251-268.

PINTO, R. S. **Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado**. 1997. 108f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

POTT, Adriano Adilson; BELLEI, Poliana; BARBISAN, Ailson Oldair. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJES TRELIÇADAS DE EPS, NERVURADAS COM FORMA PLÁSTICA TIPO CUBETA E LAJES DE FORMAS COLABORANTES NERVURADAS (MISTAS NERVURADAS). **Anais da Engenharia Civil / 2595-1823**, [S.I.], v. 3, n. 1, p. 57 - 74, 2019. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/ENGCIVIL/article/view/256>>. Acesso em: 18 out. 2019.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **A CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E A ARQUITETURA**. São Paulo: Ziguarte Editora, 2000.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO**. 2005. 239 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4711>>. Acesso em: 29 mar. 2019.

SOUSA, Rafaela Miranda. **PROJETO E ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO ENTRE OS MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE CONCRETO ARMADO E ALVENARIA ESTRUTURAL EM EDIFÍCIO PARA FAMÍLIAS DE BAIXA RENDA NO ESTADO DO TOCANTINS**. 2018. 70 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2018.

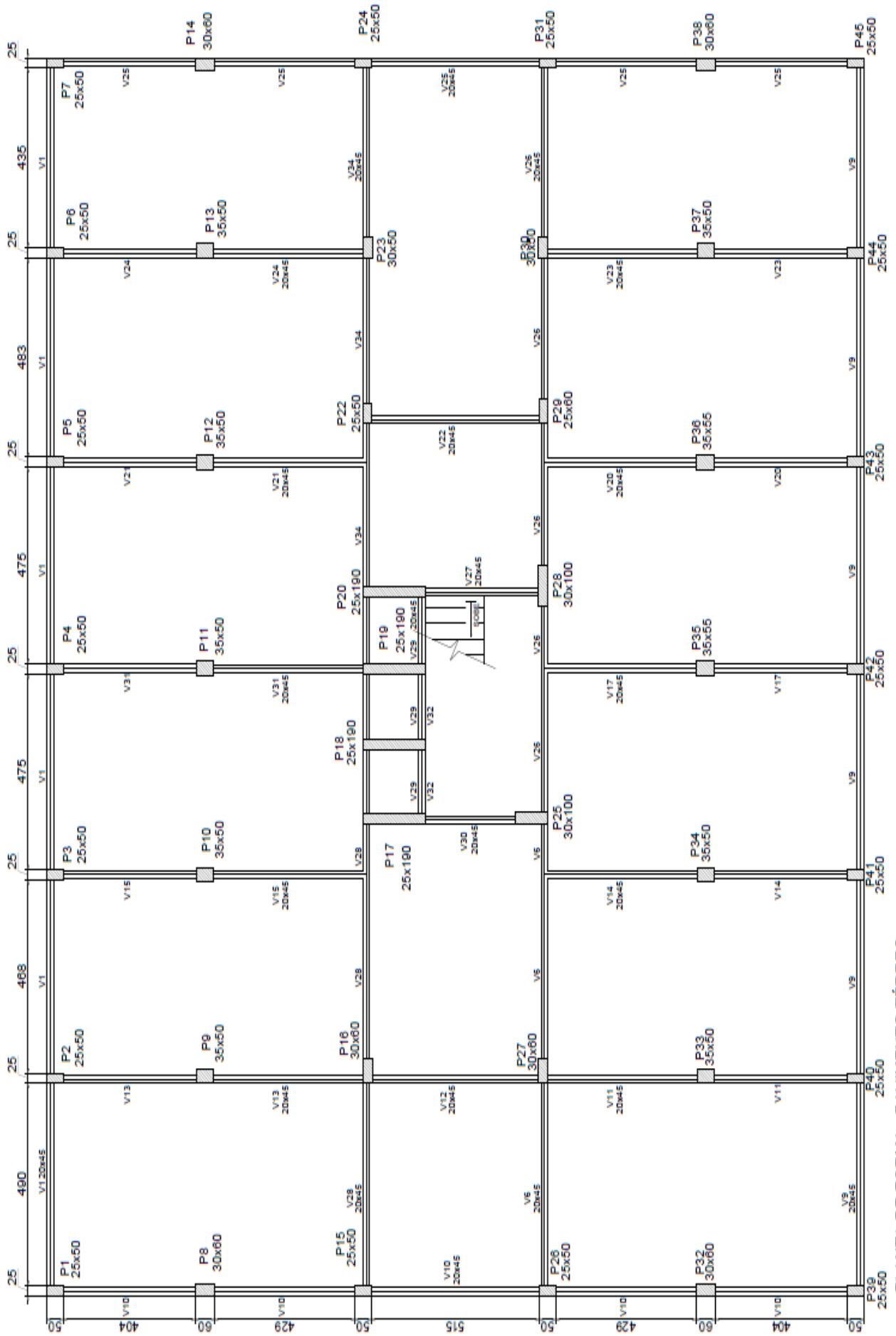
SPOHR, Valdir Henrique. **ANÁLISE COMPARATIVA: SISTEMAS ESTRUTURAIS CONVENCIONAIS E ESTRUTURAS DE LAJES NERVURADAS**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TENÓRIO, Daniel Almeida et al. ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DE LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS E BIDIRECIONAIS. In: IBRACON, 2009, Curitiba. **Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto**. Curitiba: IBRACON, 2009. p. 1 - 16.

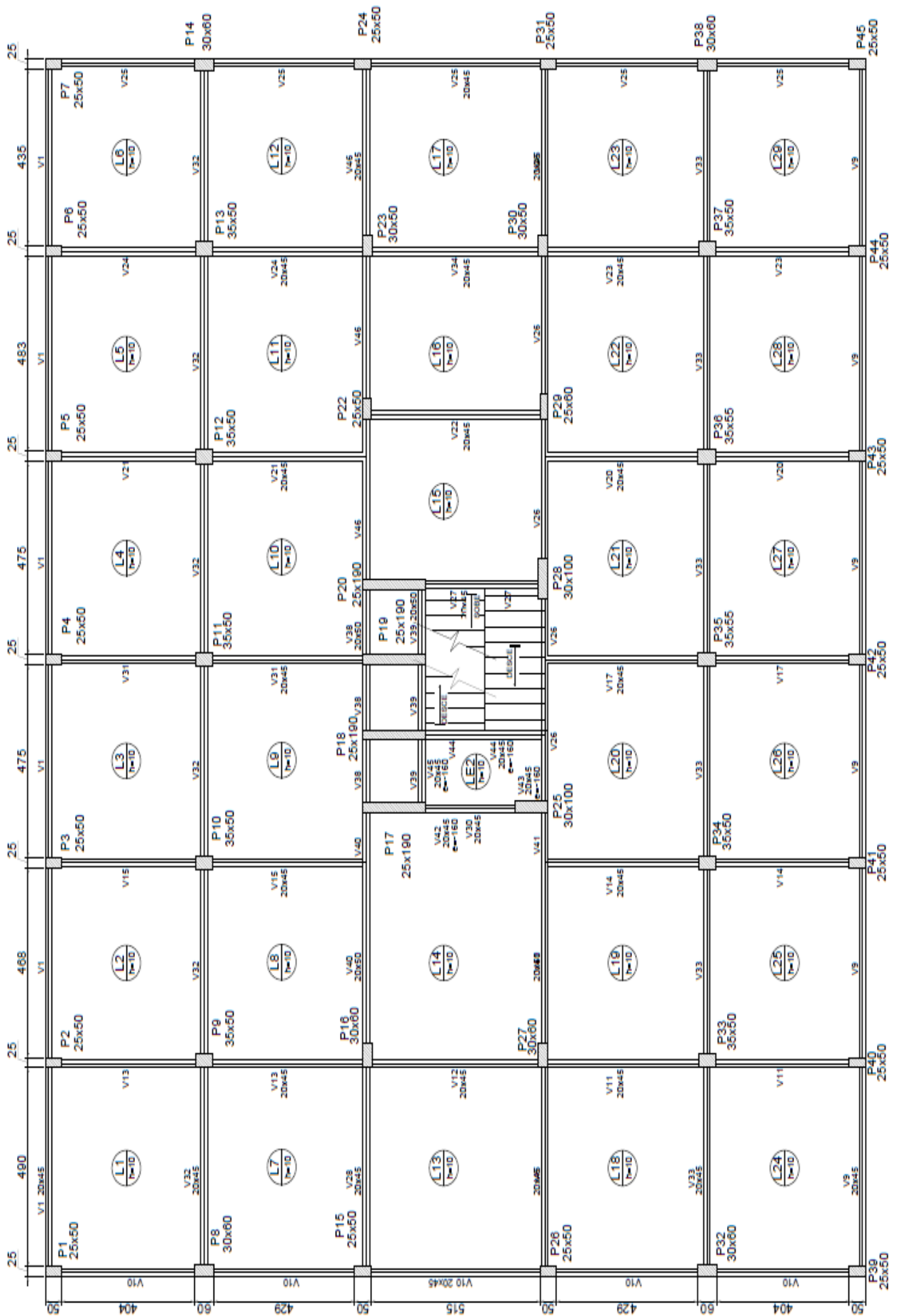
VIANA, Saulo Augusto de Oliveira; ALVES, Élcio Cassimiro. Análise de Custo e Viabilidade Dentre os Sistemas de Vedação de Bloco Cerâmico e Drywall Associado ao Painel Monolite EPS. **Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE**, [S. I.], v. 13, n. 1, p.3-11, jan./jun. 2013. Semestral. Disponível em: <http://www.revistaep.com/imagens/volume13_01/cap01.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

VIZOTTO, Itamar; SARTORTI, Artur Lenz. Soluções de lajes maciças, nervuradas com cuba plástica e nervuradas com vigotas pré-moldadas: análise comparativa. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 10, n. 15, p.19-28, abr. 2010. Disponível em: <http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art3_N15.pdf>. Acesso em: 26 set. 2019.

**APÊNDICE A - PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TÉRREO E TIPO –
SISTEMA ESTRUTURAL 1**



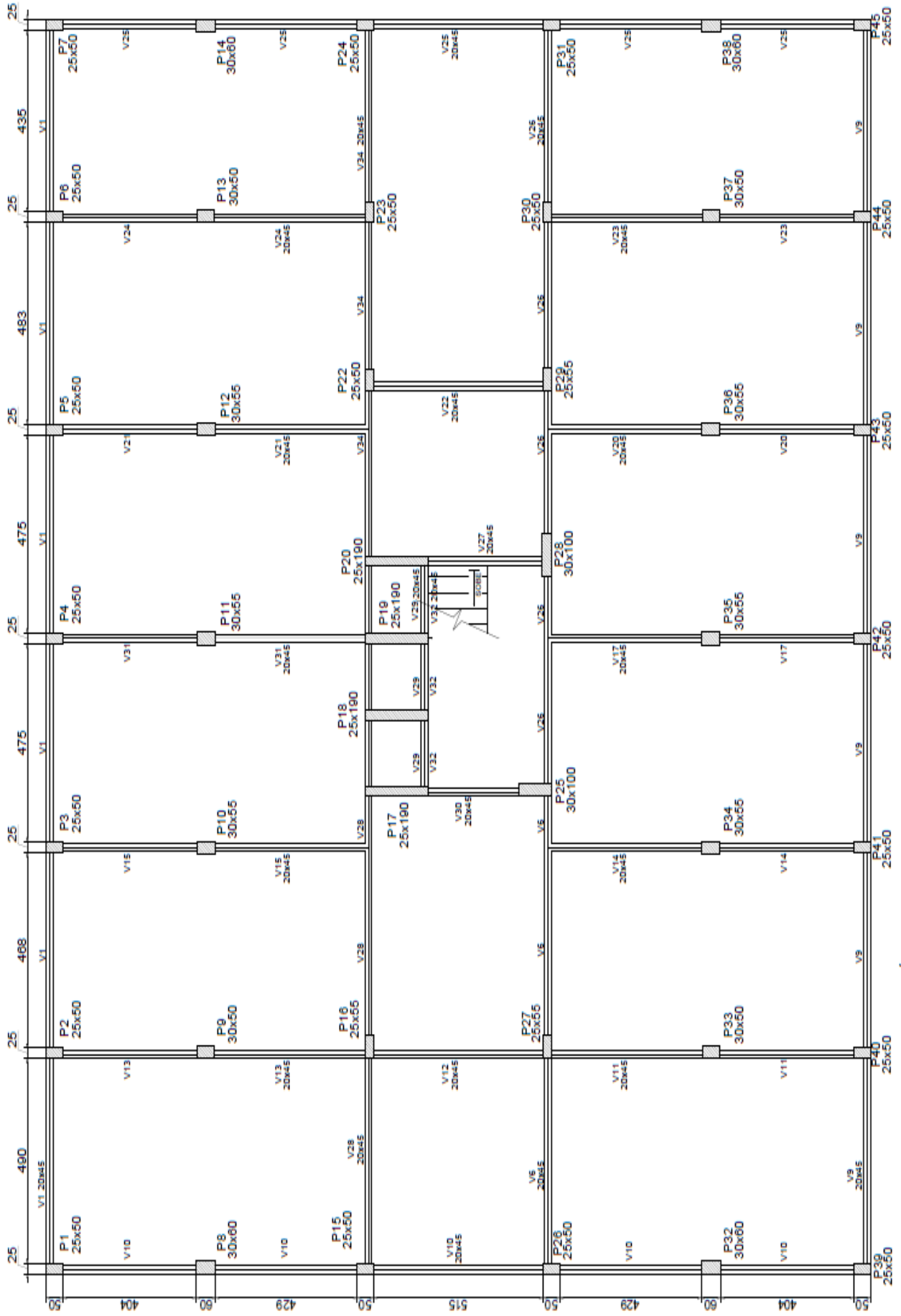
PLANTA DE FORMA - PAVIMENTO TÉRREO
1: SEM ESCALA



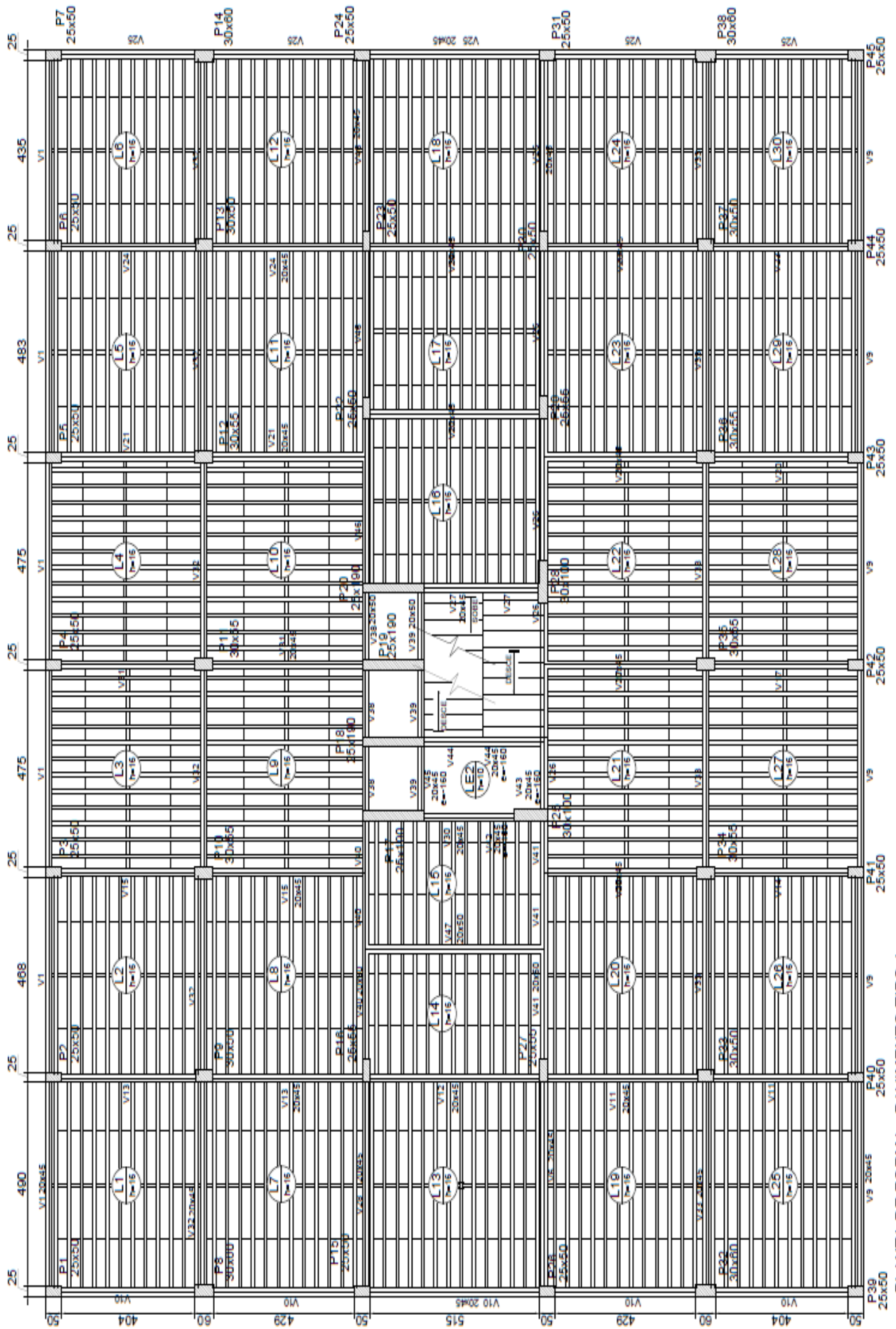
PLANTA DE FORMA - PAVIMENTO TIPO 1

SEM ESCALA

**APÊNDICE B - PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TÉRREO E TIPO –
SISTEMA ESTRUTURAL 2**

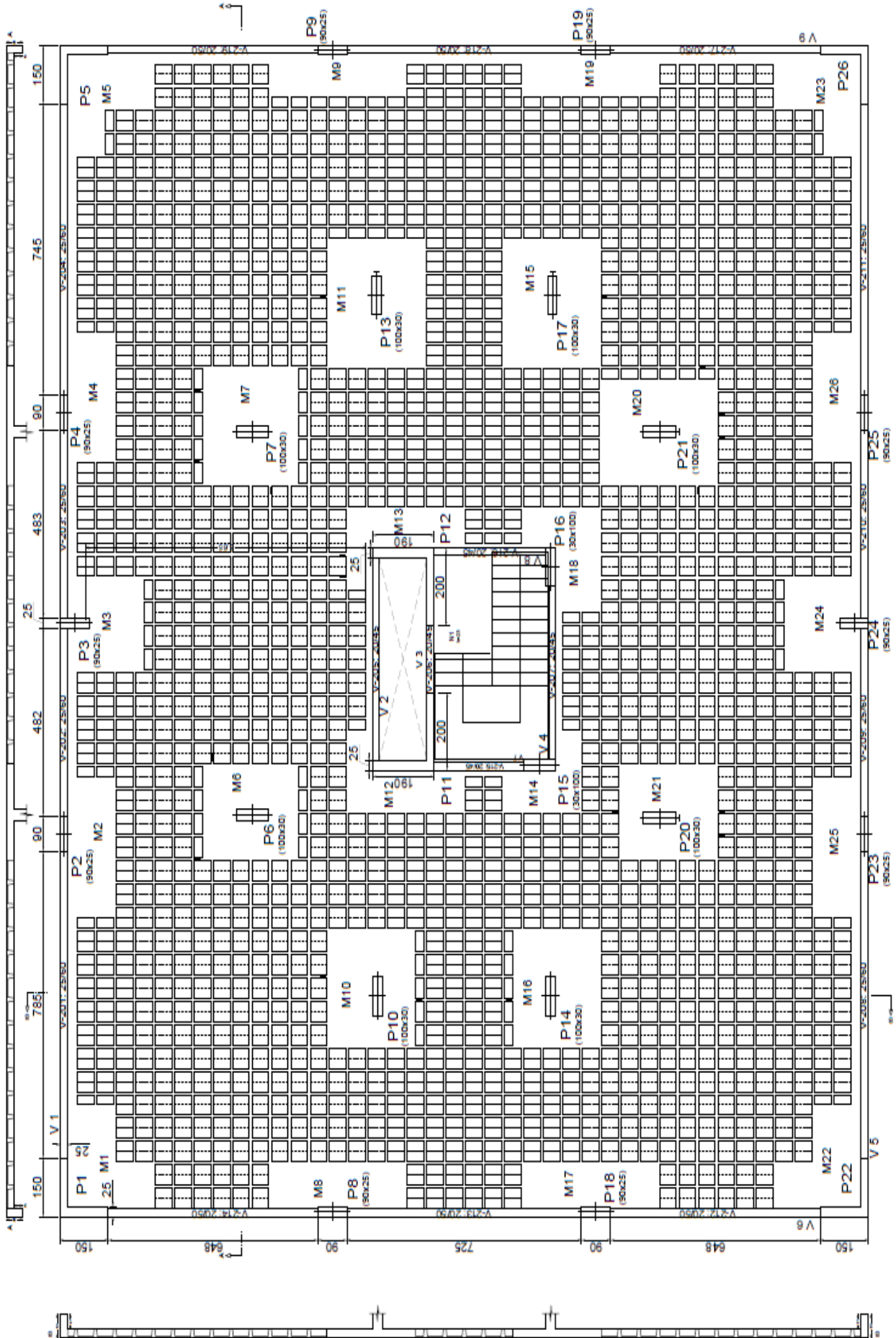


PLANTA DE FORMA - PAVIMENTO TÉRREO
SEM ESCALA



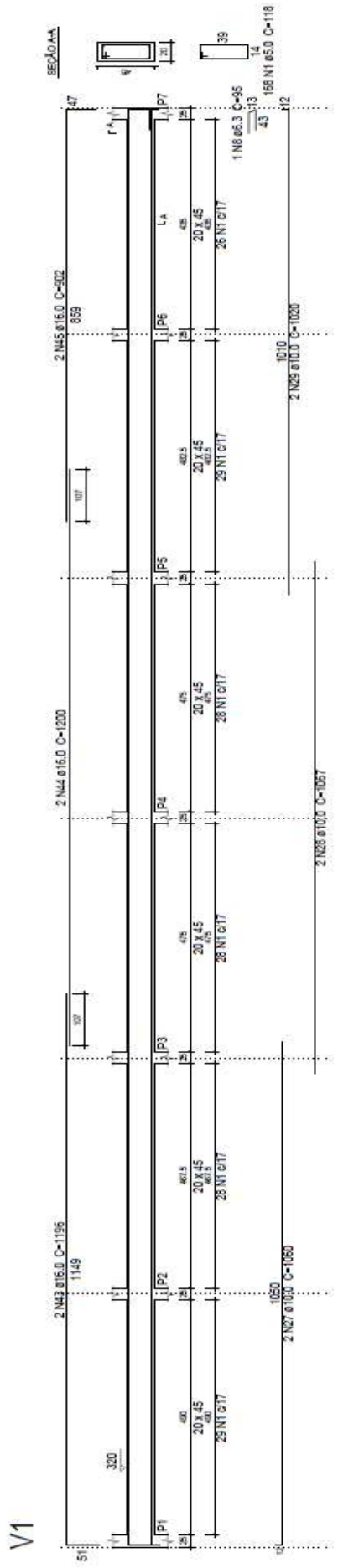
PLANTA DE FORMA - PAVIMENTO TIPO 1
1/1000 ESCALA

**APÊNDICE C - PLANTAS DE FORMA DO PAVIMENTO TÉRREO E TIPO –
SISTEMA ESTRUTURAL 3**



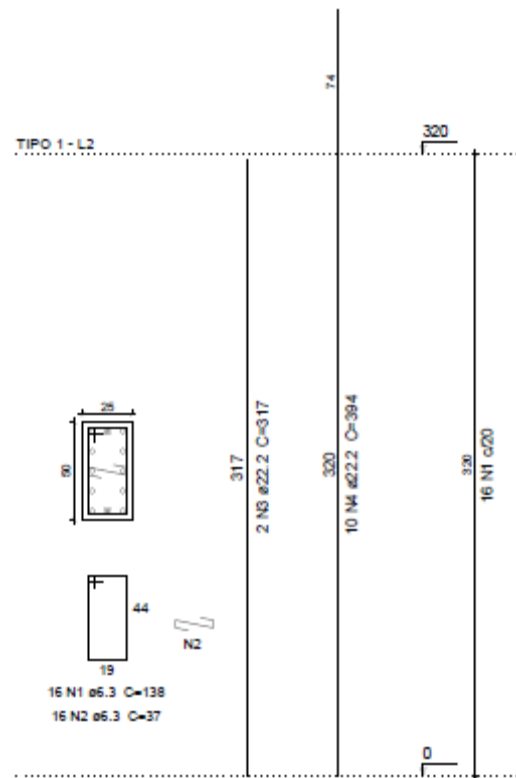
PLANTA DE FORMA - PAVIMENTO TIPO 1
SEM ESCALA

**APÊNDICE D – DETALHAMENTO DE VIGA E PILAR EXEMPLO – SISTEMA
ESTRUTURAL 1**



DETALHAMENTO DA VIGA 1 - PAVIMENTO TIPO 1
SEM ESCALA

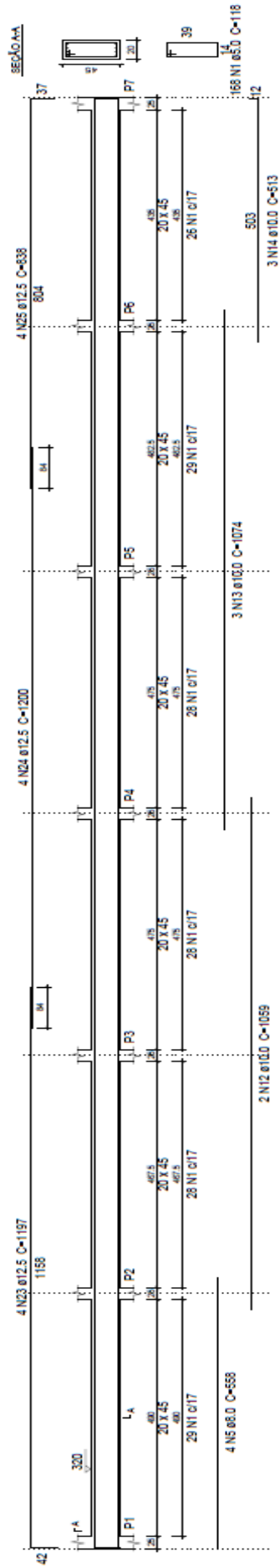
P22



DETALHAMENTO DO PILAR 22 - PAVIMENTO TIPO 1
SEM ESCALA

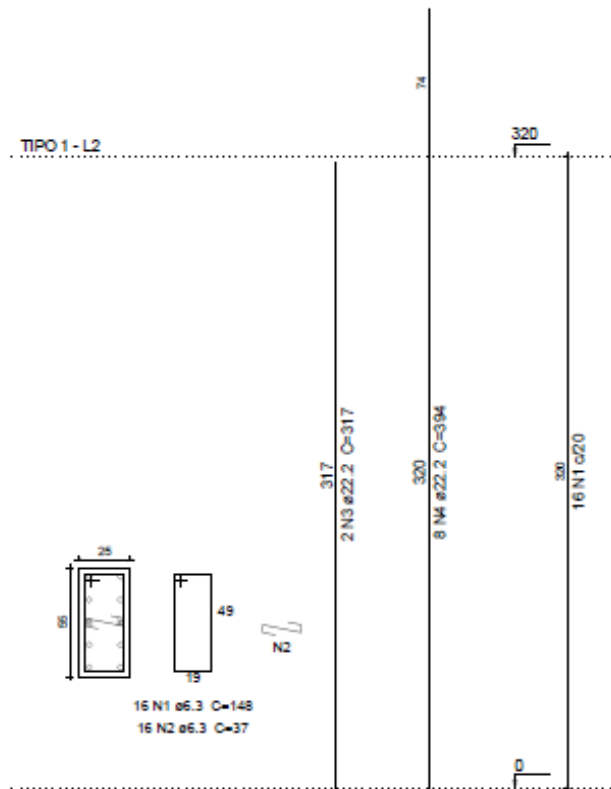
**APÊNDICE E – DETALHAMENTO DE VIGA E PILAR EXEMPLO – SISTEMA
ESTRUTURAL 2**

V1



DETALHAMENTO DA VIGA 1 - PAVIMENTO TIPO 1
SEMI-ESCALA

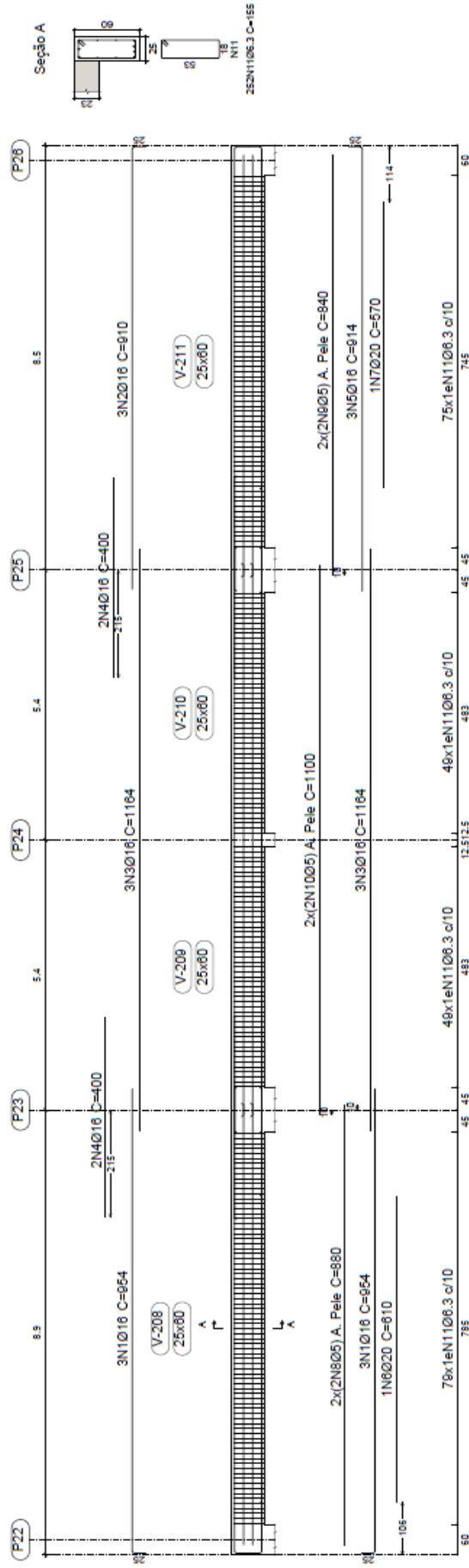
P16



DETALHAMENTO DO PILAR 16 - PAVIMENTO TIPO 1
SEM ESCALA

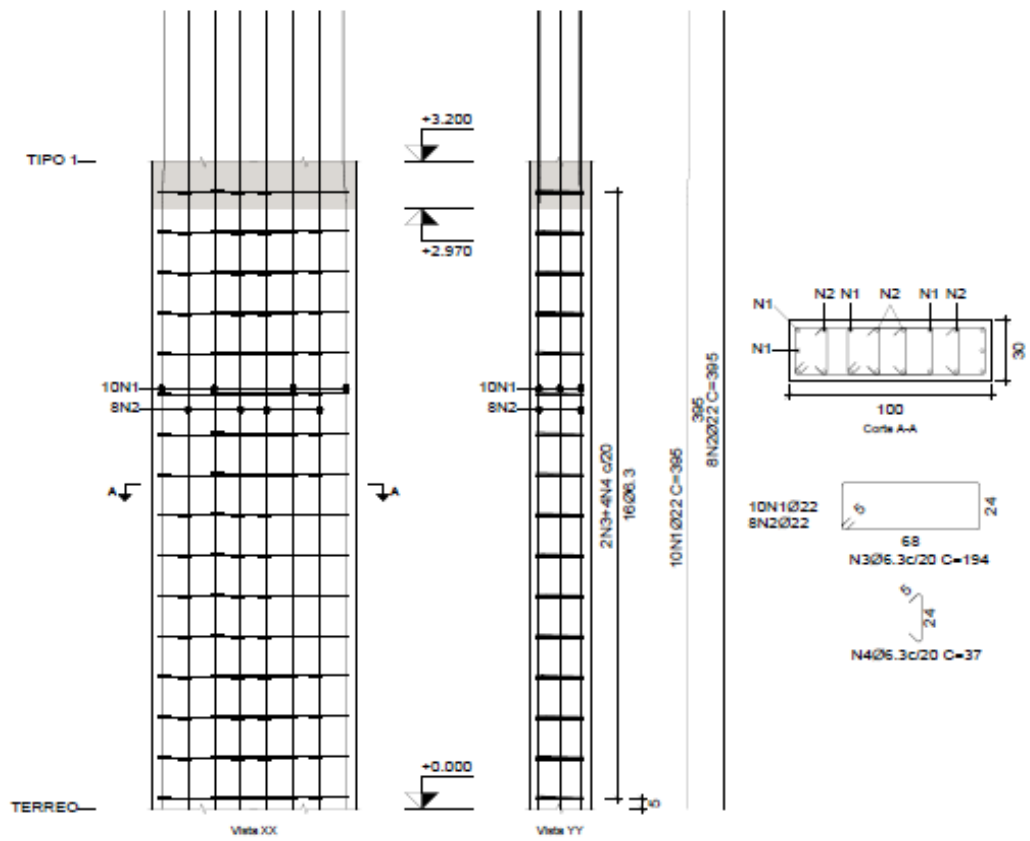
**APÊNDICE F – DETALHAMENTO DE VIGA E PILAR EXEMPLO – SISTEMA
ESTRUTURAL 3**

V 1



DETALHAMENTO DA VIGA 1 - PAVIMENTO TIPO 1
SEM ESCALA

P10



DETALHAMENTO DO PILAR 10 - PAVIMENTO TIPO 1
SEM ESCALA