

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

HENRIQUE SOMBRIO SILVA

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO EM
CONCRETO ARMADO COM VARIAÇÃO NA TIPOLOGIA DAS LAJES**

FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

HENRIQUE SOMBRIO SILVA

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO EM
CONCRETO ARMADO COM VARIAÇÃO NA TIPOLOGIA DAS LAJES**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador:
Andre Puel, doutor.

FLORIANÓPOLIS, 2024.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Silva, Henrique Sombrio

Análise da estabilidade global de um edifício em concreto armado com variação na tipologia das lajes / Henrique Sombrio Silva; orientação de Andre Puel. - Florianópolis, SC, 2024.

95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.
Inclui Referências.

1. Estabilidade global. 2. Lajes. 3. Concreto armado. 4. Eberick. 5. Modelo integrado. I. Puel, Andre. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Análise da estabilidade global de um edifício em concreto armado com variação na tipologia das lajes.

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO EM CONCRETO
ARMADO COM VARIAÇÃO NA TIPOLOGIA DAS LAJES
HENRIQUE SOMBRIO SILVA**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 22 de agosto, 2024.

Banca Examinadora:

Andre Puel, Doutor
Instituto Federal de Santa Catarina

Márcia Maria Machado Steil, Mestre
Instituto Federal de Santa Catarina

Fernando Toppan Rabello, Doutor
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, Liz Kelli, que me inspirou na vida acadêmica e serve de referência para enfrentar obstáculos de cabeça erguida nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Alexandre e Liz Kelli, pelo apoio, motivação, conselhos e por servirem como minha base.

Aos meus irmãos, pelo companheirismo e pelos momentos de distração.

Ao meu orientador, Andre Puel, pelo direcionamento e pelos conselhos durante a jornada de desenvolvimento deste trabalho.

Aos companheiros da Sollevo Engenharia, pelos ensinamentos, apoio e compreensão que foram necessários durante a faculdade e, principalmente, o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que passaram pela minha jornada e, de alguma forma, foram essenciais, partes fundamentais no meu crescimento como ser humano.

RESUMO

Os avanços tecnológicos que aconteceram nas últimas décadas permitiram que estruturas esbeltas, arrojadas e com distintos métodos construtivos estivessem cada vez mais em evidência nas grandes cidades. Neste sentido, um dos maiores desafios da engenharia é garantir a estabilidade global destas edificações, que é afetada diretamente por efeitos da não linearidade geométrica (NLG) e da não linearidade física (NLF), presente no concreto armado. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a estabilidade global de uma edificação com múltiplos pavimentos considerando três tipos de laje: maciças, treliçadas e nervuradas. O edifício será modelado no *software* AltoQi Eberick, programa que segue as normativas da ABNT NBR 6118:2023. Inicialmente será realizada a concepção estrutural e o pré-dimensionamento dos elementos estruturais. Cada estrutura será analisada pelo método integrado e pelo método pórtico + grelhas. O método integrado analisa o modelo considerando a rigidez à flexão das lajes na estrutura, enquanto o método pórtico com grelhas representa a laje como diafragma rígido, ou seja, com rigidez transversal à flexão nula. Ao final da análise, as estruturas que adotaram lajes maciças apresentaram maior eficiência nos parâmetros de estabilidade global em comparação com as lajes nervuradas, especialmente nos casos com edificações de maior esbeltez, como nos modelos de 20 e 30 pavimentos. Já as lajes treliçadas apresentaram os maiores deslocamentos horizontais no topo da edificação e seu uso deve ser analisado com cautela em edificações altas.

Palavras-chave: Estabilidade global. Lajes. Concreto armado. Eberick. Modelo integrado.

ABSTRACT

The technological advances that have taken place in recent decades have allowed slender, bold structures with different construction methods to be increasingly in evidence in large cities. In this sense, one of the biggest engineering challenges is to guarantee the global stability of these buildings, which is directly affected by the effects of geometric non-linearity and physical non-linearity present in reinforced concrete. The objective of this study is to evaluate the global stability of a multi-storey building considering three types of slab: solid, trussed and ribbed. The building will be modeled in the AltoQi Eberick software, a program that follows the ABNT NBR 6118:2023 standards. Initially, the structural design and pre-dimensioning of the structure will be carried out. Each structure will be analyzed using the integrated method and the frame + grids method. The integrated method analyzes the model considering the bending stiffness of the slabs in the structure, while the frame method with grids represents the slab as a rigid diaphragm, with zero transverse bending stiffness. At the end of the analysis, the structures that used solid slabs were more efficient in terms of global stability parameters compared to ribbed slabs, especially in the case of buildings with greater slenderness, such as the 20- and 30-storey models. Trussed slabs, on the other hand, showed the highest horizontal displacements at the top of the building and their use should be analyzed with caution in tall buildings.

Keywords: Global stability. Slabs. Reinforced concrete. AltoQi Eberick. Integrated model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Análise em primeira ordem	22
Figura 2 - Análise em segunda ordem	22
Figura 3 - Esquema estrutural de prédio alto: 1) perspectiva esquemática; 2) estrutura indeformada; 3) edificação sujeita a instabilidade global; e 4) instabilidade local de pilares centrais inferiores.....	23
Figura 4 - Isopletras da velocidade básica V_0 (m/s).....	24
Figura 5 - Fator topográfico S1: a) Taludes; b) Morros	25
Figura 6 - Diagrama tensão-deformação do concreto: (a) linear; (b) não-linear.....	31
Figura 7 - Diagrama momento-curvatura	31
Figura 8 - Diagrama normal-momento-curvatura	32
Figura 9 - Estrutura de nós móveis e fixos	34
Figura 10 - Efeito P- Δ	35
Figura 11 - Processo P-Delta	36
Figura 12 - Representação do modelo de grelha separada do pórtico.....	38
Figura 13 - Representação do modelo integrado	39
Figura 14 - Área de influência dos pilares	41
Figura 15 - Planta baixa do pavimento tipo do edifício.....	44
Figura 16 - Planta de formas simplificada (5 pavimentos).....	46
Figura 17 - Corte XX (5 pavimentos).....	47
Figura 18 - Corte YY (5 Pavimentos)	48
Figura 19 - Vista isométrica da edificação com 5 pavimentos.....	49
Figura 20 - Planta de formas simplificada (9 pavimentos).....	50
Figura 21 - Corte XX (9 pavimentos).....	51
Figura 22 - Corte YY (9 pavimentos).....	51
Figura 23 - Vista isométrica da edificação com 9 pavimentos.....	52
Figura 24 - Planta de formas simplificada (15 pavimentos).....	53
Figura 25 - Cortes XX e YY, à esquerda e à direita, respectivamente (15 pavimentos)	54
Figura 26 - Vista isométrica da edificação com 15 pavimentos.....	55
Figura 27 - Planta de formas simplificada (20 pavimentos).....	56
Figura 28 - Cortes XX e YY, à esquerda e à direita, respectivamente (20 pavimentos)	57
Figura 29 - Vista isométrica da edificação com 20 pavimentos.....	58
Figura 30 - Planta de formas simplificada (30 pavimentos).....	59

Figura 31 - Cortes XX e YY, à esquerda e à direita, respectivamente (30 pavimentos)	60
Figura 32 - Vista isométrica da edificação com 30 pavimentos.....	61
Figura 33 - Relatórios gerados pelo Eberick	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores de estabilidade global (Gama-Z)	63
Gráfico 2 - Deslocamento da estrutura no eixo X (ELS - Carga de vento)	64
Gráfico 3 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (ELS - Carga de vento)	65
Gráfico 4 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas acidentais – 1ª ordem) ...	67
Gráfico 5 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas acidentais – 1ª + 2ª ordem).....	67
Gráfico 6 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas acidentais – 1ª ordem) ...	69
Gráfico 7 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas acidentais – 1ª + 2ª ordem).....	69
Gráfico 8 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de vento em X - 1ª ordem).....	70
Gráfico 9 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de vento em X - 1ª + 2ª ordem).....	71
Gráfico 10 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de vento em Y - 1ª ordem).....	72
Gráfico 11 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de vento em Y - 1ª + 2ª ordem)	72
Gráfico 12 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de desaprumo em X - 1ª ordem)	74
Gráfico 13 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de desaprumo em X - 1ª + 2ª ordem)	74
Gráfico 14 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de desaprumo em Y - 1ª ordem)	75
Gráfico 15 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de desaprumo em Y - 1ª + 2ª ordem)	76
Gráfico 16 - Valores de estabilidade global (Gama-Z)	77
Gráfico 17 - Deslocamento da estrutura no eixo X (ELS - Carga de vento)	78
Gráfico 18 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (ELS - Carga de vento)	78
Gráfico 19 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas acidentais – 1ª ordem)	79
Gráfico 20 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas acidentais – 1ª + 2ª ordem).....	80
Gráfico 21 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas acidentais – 1ª ordem)	81
Gráfico 22 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas acidentais – 1ª + 2ª ordem).....	81

Gráfico 23 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de vento em X - 1ª ordem).....	82
Gráfico 24 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de vento em X - 1ª + 2ª ordem)	83
Gráfico 25 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de vento em Y - 1ª ordem).....	84
Gráfico 26 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de vento em Y - 1ª + 2ª ordem)	84
Gráfico 27 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de desaprumo em X - 1ª ordem)	86
Gráfico 28 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de desaprumo em X - 1ª + 2ª ordem).....	86
Gráfico 29 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de desaprumo em Y - 1ª ordem)	87
Gráfico 30 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de desaprumo em Y - 1ª + 2ª ordem).....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos do fator S2	28
Tabela 2 - Valores mínimos de S3	29
Tabela 3 - Valores de γz de acordo com o tipo de laje.....	37
Tabela 4 - Características dos modelos base	42
Tabela 5 - Tabela exemplo para analisar parâmetros de estabilidade global	43
Tabela 6 - Resultados sintetizados	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ELS	Estado limite de serviço
NLF	Não-linearidade física
NLF	Não-linearidade geométrica
P- Δ	P-Delta
γ Z	Gama-Z

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa e Definição do Problema	18
1.2	Objetivo geral	19
1.3	Objetivos específicos	19
1.4	Estrutura do Trabalho	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Estabilidade global de edificações	21
2.2	Efeitos de segunda ordem e não linearidade geométrica (NLG)	21
2.3	Ações horizontais	23
2.3.1	Velocidade do vento.....	23
2.3.1.1	<i>Fator S1</i>	25
2.3.1.2	<i>Fator S2</i>	26
2.3.1.3	<i>Fator S3</i>	28
2.3.2	Coeficiente de arrasto	29
2.4	Não linearidade física (NLF)	30
2.5	Coeficiente Gama Z (γ_z)	32
2.6	Estruturas de nós fixos e nós móveis	33
2.7	Processo P-Delta ($P-\Delta$)	34
2.7.1	Método da carga lateral fictícia	35
2.8	Influência dos tipos de laje na estabilidade global	36
2.8.1	Método de análise do AltoQi Eberick	37
3	METODOLOGIA	40
3.1	Modelagem e análise da estrutura	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Características gerais da edificação	44
4.1.1	Caracterização dos modelos de 5 pavimentos (1.1, 2.1 e 3.1)	45
4.1.2	Caracterização dos modelos de 9 pavimentos (1.2, 2.2 e 3.2)	49
4.1.3	Caracterização dos modelos de 15 pavimentos (1.3, 2.3 e 3.3)	52
4.1.4	Caracterização dos modelos de 20 pavimentos (1.4, 2.4 e 3.4)	56
4.1.5	Caracterização dos modelos de 30 pavimentos (1.5, 2.5 e 3.5)	59
4.2	Resultados obtidos	62
4.2.1	Resultados do Modelo Integrado	62
4.2.2	Resultados do Modelo de Pórticos + Grelhas	77
4.3	Síntese dos resultados e discussão	89
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92

1 INTRODUÇÃO

Com as evoluções tecnológicas que aconteceram nos últimos anos a engenharia civil vivenciou mudanças importantes e significativas. Em estruturas, Kimura (2007) relata que todas as etapas presentes no projeto de um edifício, de alguma forma, são influenciadas pela rapidez e precisão que a informática proporciona, o que melhora aspectos como qualidade e segurança no projeto.

A ABNT NBR 6118:2023, em seu item 6.1, determina que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente a sua vida útil.

Neste sentido, é importante garantir a que a edificação não seja instável. Para avaliar a estabilidade global da estrutura utiliza-se o coeficiente Gama-Z (γ_z). A ABNT NBR 6118:2023, em seu item 15.7.2, limita o valor de γ_z em 1,30. Apesar disso, Pinto (1997) afirma que valores maiores que 1,20 devem ser evitados. Para todo γ_z com valor menor que 1,10 a estrutura tem classificação de nós fixos. Quando γ_z é maior que 1,10, a edificação se classifica como de nós móveis. Tal fato significa que devem ser considerados os efeitos globais de segunda ordem, de acordo com a ABNT NBR 6118:2023, que surgem ao considerar os esforços do edifício em sua configuração deformada.

Além dos efeitos de segunda ordem, outro fator importante presente em uma análise estrutural é a não linearidade física do concreto armado, causada pelos efeitos de fissuração, fluência e do escoamento da armadura (MONCAYO, 2011).

O P-Delta é um processo de análise não linear geométrica (CAMICIA, 2017), um método adequado de análise de estruturas que considera os efeitos de segunda ordem. Uma das metodologias deste processo é o Método da carga lateral fictícia, que está presente no *software* AltoQi Eberick (DELALIBERA *et al.*, 2014), programa utilizado neste trabalho.

Antes de lançar a estrutura no programa, visando atingir resultados satisfatórios, é essencial realizar uma concepção estrutural, bem como efetuar o pré-dimensionamento das vigas, pilares e lajes. Definir as posições e as dimensões dos elementos estruturais exige experiência e, sobretudo, bom senso e raciocínio (KIMURA, 2007).

As análises do AltoQi Eberick são baseadas na escolha de processamento adotada. No modelo de grelha separado do pórtico espacial, a estabilidade global da estrutura é verificada com o pórtico formado pelas vigas e pilares da estrutura, considerando a hipótese de diafragma rígido das lajes, enquanto no modelo integrado, a estabilidade global é verificada considerando as lajes no modelo (ALTOQI, 2023).

Sabe-se que as cargas horizontais são importantes, especialmente em estruturas esbeltas. Neste sentido, é fundamental pesquisar métodos construtivos que amenizem os efeitos de vento e contribuam com a estabilidade em edifícios altos. Portanto, neste trabalho será avaliada a estabilidade global de um edifício em concreto armado com múltiplos pavimentos considerando três tipos de laje: maciça, treliçada e nervurada. A estrutura será modelada no *software* AltoQi Eberick, utilizando o processamento grelha + pórtico (hipótese lajes como diafragma rígido) e o modelo integrado (considerando a rigidez à flexão das lajes).

1.1 Justificativa e Definição do Problema

Com o aumento da densidade demográfica nos grandes centros urbanos, a construção de edifícios esbeltos tornou-se corriqueira. É sabido que no Brasil o sistema construtivo mais difundido é o concreto armado. No entanto, mesmo este sistema possui variações, como o tipo de laje. A depender do local da construção, outros aspectos também mudam, como a classe de agressividade do ambiente e a carga horizontal atuante na estrutura.

Para tornar possível grandes obras na engenharia, é necessário analisar diversos fatores que impactam na segurança estrutural e, conseqüentemente, de seus usuários, como uma concepção estrutural eficiente e o dimensionamento correto dos elementos estruturais. Além disso, em estruturas esbeltas, é comum que o engenheiro se depare com problemas de instabilidade na edificação, sejam elas globais ou locais. Para analisar a estabilidade global de uma edificação diversos desafios foram superados há pouco tempo. Kimura (2007) aborda que as transformações tecnológicas ocorridas nas últimas décadas permitiram que análises complexas de edifícios, que levavam dias, levem minutos.

Ao se deparar com problemas de instabilidade estrutural, é comum diversos engenheiros recorrerem a formas distintas de estabilizar a estrutura, como a inclusão de núcleos rígidos, alteração de posicionamento e seção de pilares, a construção de pavimentos *oultiggers* ou a modificação do tipo de laje.

Os métodos de análise presentes no Eberick têm diferenças fundamentais que alteram os parâmetros de estabilidade global das estruturas devido à forma como as lajes são consideradas na estrutura.

Assim, a importância deste trabalho é avaliar como a rigidez à flexão de diferentes tipos de laje contribuem para a melhora da estabilidade global da estrutura, que será submetida aos dois métodos de processamento do Eberick: método integrado e método de pórtico com grelhas.

1.2 Objetivo geral

Analisar a influência de lajes maciças, nervuradas e treliçadas na estabilidade global de um edifício de múltiplos pavimentos, seguindo a norma ABNT NBR 6118:2023.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta monografia são:

- a) Realizar a concepção estrutural da edificação;
- b) Realizar o pré-dimensionamento dos elementos estruturais da edificação;
- c) Analisar a influência das cargas horizontais em estruturas convencionais de concreto armado para três tipologias de lajes;
- d) Comparar a eficiência referente à estabilidade global de lajes maciças, treliçadas e nervuradas por meio do *software* Eberick;
- e) Comparar os modelos de análise disponíveis no Eberick (Grelhas + pórtico espacial e Modelo integrado) em termos de estabilidade global para três tipologias de lajes;

- f) Analisar os deslocamentos provenientes dos efeitos de segunda ordem por meio do Processo P-Delta para lajes maciças, nervuradas e treliçadas.

1.4 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 são apresentadas as solicitações em que edificações esbeltas de concreto armado estão sujeitas e como elas impactam na estabilidade global da estrutura. É explicado como as propriedades físicas do concreto armado, bem como as ações presentes na estrutura em sua configuração deformada, impactam na análise estrutural de um edifício. O processo P-Delta é abordado como uma forma de analisar os efeitos de segunda ordem para estruturas de concreto armado, através do método da carga lateral fictícia. Ao final, a influência dos tipos de laje na estabilidade global da estrutura é apresentada e os métodos de análise do AltoQi Eberick são descritos.

No capítulo 3 a metodologia do trabalho é exposta. É tratado como realizar o pré-dimensionamento de pilares, vigas e lajes. Esta etapa antecede a modelagem da estrutura no *software* Eberick. As principais características do programa, assim como a forma de processamento adequada são descritas. Em seguida, uma tabela descreve as principais características dos modelos que servirão de base para análise, como tipo de laje e pavimentos. Após isso, é descrita como será realizada a análise dos resultados obtidos através dos relatórios gerados pelo Eberick.

No capítulo 4 estão os resultados obtidos e discussões.

Por fim, no capítulo 5, são feitas considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos importantes e necessários para a compreensão da estabilidade global, como a não linearidade física, a não linearidade geométrica e ações horizontais de vento presentes nas estruturas de concreto armado. Além disso, serão abordados o coeficiente Gama-Z e o processo de análise P-Delta. Ao final, é descrita a influência dos tipos de laje em termos de estabilidade global e como funcionam os métodos de análises presente no AltoQi Eberick.

2.1 Estabilidade global de edificações

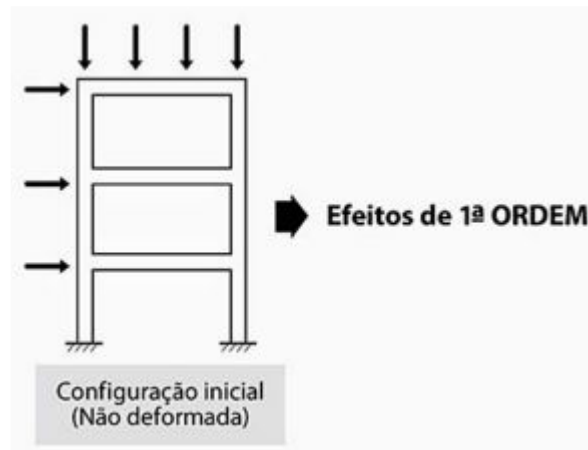
Passos *et al.* (2016) definem a estabilidade global das estruturas como sua sensibilidade aos efeitos de segunda ordem: quanto mais sensível a esses esforços for a estrutura, menos estável ela será. O coeficiente que determina a sensibilidade da edificação aos efeitos de segunda ordem foi criado por Franco e Vasconcelos (1991) e é chamado de Gama Z (γ_z), abordado no item 2.5 do presente trabalho.

2.2 Efeitos de segunda ordem e não linearidade geométrica (NLG)

De acordo com Kimura (2007), a NLG gera uma resposta não linear de uma estrutura, isto é, desproporcional à medida que um carregamento é aplicado. Além disso, Kimura (2007) afirma que esse comportamento ocorre em razão de mudanças na geometria dos elementos estruturais à medida que um carregamento é aplicado ao edifício. Para que a NLG seja plenamente compreendida, é necessário entender o que são efeitos de segunda ordem.

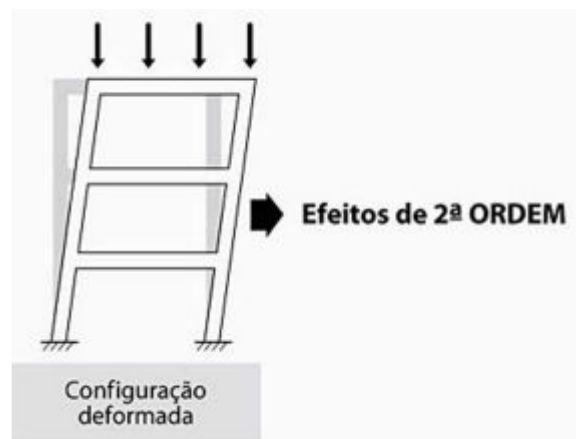
Estes efeitos podem ser classificados como aqueles que se somam aos obtidos em uma análise de primeira ordem. Os momentos de primeira ordem ocorrem sem considerar a deformidade que acontece nas estruturas, ou seja, em sua forma inicial (Figura 1). Em contraste com os esforços de segunda ordem, que acontecem ao considerar as imperfeições na estrutura provenientes das cargas verticais e horizontais (Figura 2).

Figura 1 - Análise em primeira ordem



Fonte: Kimura (2007).

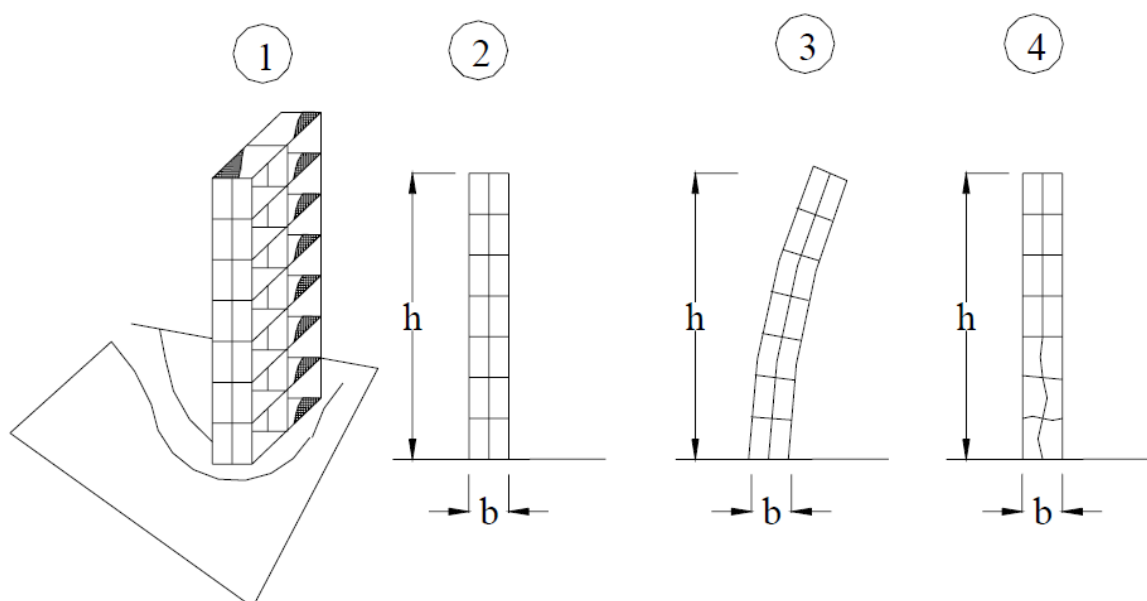
Figura 2 - Análise em segunda ordem



Fonte: Kimura (2007).

A ABNT NBR 6118:2023 diferencia os efeitos de segunda ordem em três: globais, locais e localizados. A primeira situação ocorre quando os nós da estrutura se deslocam horizontalmente em decorrência das ações do vento, gerando os esforços de segunda ordem. Em outras palavras, Kimura (2007) define que os efeitos globais estão relacionados ao edifício como um todo, isto é, ao conjunto completo formado pelos pilares, vigas e lajes. Por outro lado, Miranda (2008) afirma que os efeitos locais ocorrem por conta da falta de retilinidade de um lance de pilar que, submetido a esforços verticais, deforma-se por flambagem. Ainda de acordo com Miranda (2008), os efeitos localizados são avindos da falta de retilinidade maior em relação à do eixo do pilar como um todo, sendo usual em pilares-paredes (simples ou composto), por exemplo.

Figura 3 - Esquema estrutural de prédio alto: 1) perspectiva esquemática; 2) estrutura indeformada; 3) edificação sujeita a instabilidade global; e 4) instabilidade local de pilares centrais inferiores



Fonte: Miranda (2008).

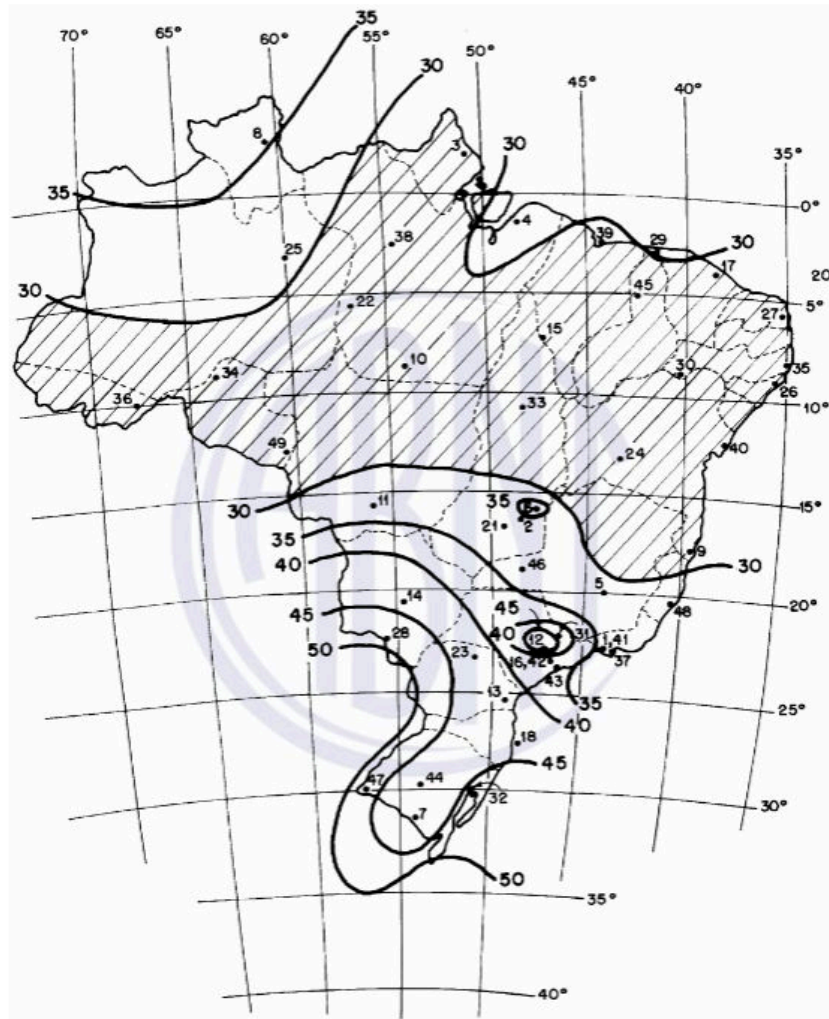
2.3 Ações horizontais

Pinto (1997) expõe que a ação de vento é uma das principais ações horizontais a ser considerada num projeto estrutural de edificações altas. Neste sentido, é importante se atentar para os principais efeitos da ação do vento na estrutura, como sua velocidade e a força de arrasto. A norma que rege as forças devidas ao vento é a ABNT NBR 6123, publicada em dezembro de 2023. No entanto, o presente trabalho teve início em julho de 2023 e, portanto, seguiu a norma vigente naquele momento (ABNT NBR 6123:1988).

2.3.1 Velocidade do vento

Para cada região do globo, a velocidade do vento varia. Por isso, em seu item 5.1 a ABNT NBR 6123:1988 estabelece a velocidade básica do vento (V_0), em m/s, para cada cidade em função de sua localização no Brasil.

Figura 4 - Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s)



Fonte: ABNT NBR 6123:1988.

A partir da velocidade básica, é possível estabelecer a velocidade que o vento atingirá uma estrutura, por meio da velocidade característica (V_k), que pode ser obtida pela Equação 1:

$$V_k = V_0 * S1 * S2 * S3 \quad (1)$$

Onde:

V_0 é a velocidade básica do vento (m/s), obtida por meio da Figura 4;

$S1$ é um fator topográfico;

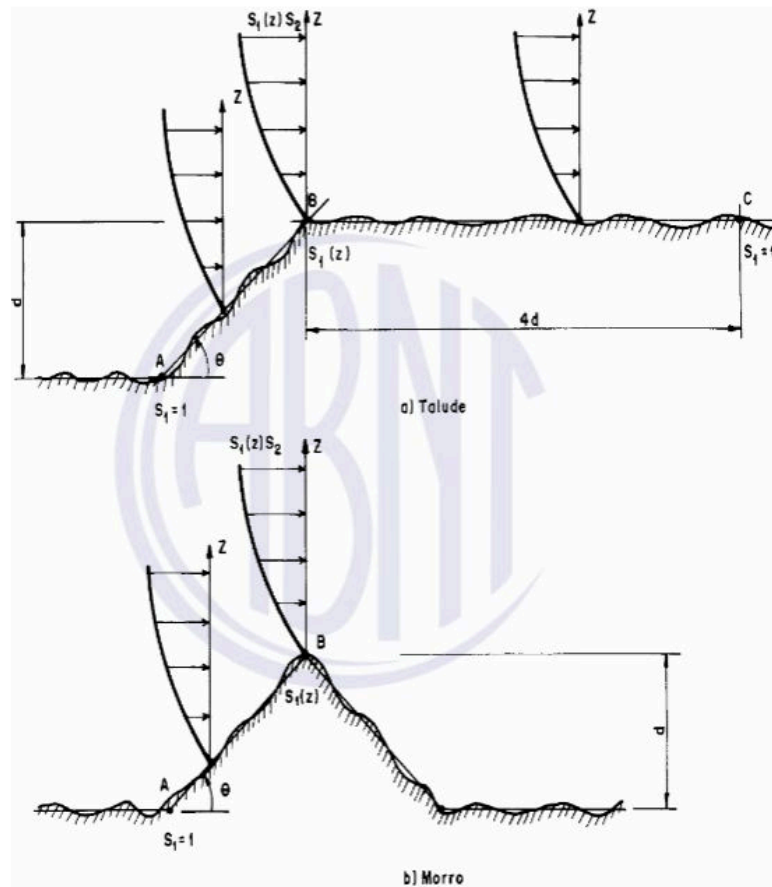
$S2$ é um fator que leva em conta a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;

$S3$ é um fator estatístico.

2.3.1.1 Fator S_1

O fator topográfico S_1 leva em conta as variações do relevo do terreno. Para terrenos planos ou fracamente acidentados a ABNT NBR 6123:1988 determina que $S_1 = 1,0$. De maneira oposta para taludes e morros, onde, ao observar a Figura 5, no ponto A (em morros) e nos pontos A e C (taludes) $S_1 = 1,0$.

Figura 5 - Fator topográfico S_1 : a) Taludes; b) Morros



Fonte: ABNT NBR 6123:1988.

No ponto B, para taludes e morros, a ABNT NBR 6123:1988 determina que S_1 é uma função $S_1(z)$, descrita abaixo.

$$\text{Para } \theta \leq 3^\circ: S1(z) = 1,0; \quad (2)$$

$$\text{Para } 6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ: S1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) * \text{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1,0;$$

$$\text{Para } \theta \geq 45^\circ: S1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) * 0,31 \geq 1,0.$$

Onde:

z é a altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

d é a diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

θ é a inclinação média do talude ou encosta de morro.

A ABNT NBR 6123:1988 ainda define que, para $3^\circ < \theta < 6^\circ < 17^\circ < \theta < 45^\circ$, deve-se interpolar linearmente e, ainda, que $S1 = 0,9$ se a edificação estiver localizada em vales profundos e protegidos de ventos de qualquer direção.

2.3.1.2 Fator S2

O fator topográfico S2 leva em conta a rugosidade do terreno, as dimensões da edificação e altura sobre o terreno. A rugosidade do terreno está relacionada à presença de obstáculos no terreno e/ou nas redondezas do mesmo. Os obstáculos podem ser naturais, como árvores, ou artificiais, como os prédios do centro de uma grande cidade. A ABNT NBR 6123:1988 classifica e exemplifica a rugosidade do terreno em 5 categorias:

Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Exemplos: mar calmo, lagos, rios e pântanos sem vegetação.

Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Exemplos: zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, entre outros. Nesta categoria a cota média do topo dos obstáculos é inferior ou igual a 1,0 m.

Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, pouco quebra-ventos de árvores, edificações baixas ou esparsas. Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos, fazendas

com sebes e/ou muros e subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é de 3,0 m.

Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores, cidades pequenas e áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas. A cota média do topo dos obstáculos é de 10 m.

Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos: florestas com árvores altas, centros de grandes cidades e complexos industriais bem desenvolvidos. A cota média do topo dos obstáculos é igual ou superior a 25 m.

Com relação às dimensões da edificação a ABNT NBR 6123:1988, considerando os intervalos de tempo para cálculo da velocidade média de 3, 5 e 10 segundos, respectivamente, define três classes de edificações:

Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão não exceda 20 m.

Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 m.

Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Diante do exposto é possível utilizar a Equação 3 abaixo para determinar o fator S2:

$$S2 = b * Fr \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (3)$$

Onde:

z é a altura acima do nível do terreno;

Fr é o fator de rajada, sempre o correspondente à categoria II;

b é o parâmetro de correção da classe da edificação;

p é o parâmetro meteorológico.

Os valores dos parâmetros que permitem determinar S2 estão expostos na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos do fator S2

Categoria	Zg (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		Fr	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123:1988.

2.3.1.3 Fator S3

De acordo com a ABNT NBR 6123:1988, o fator estatístico S3 é baseado em conceitos estatísticos que consideram o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Para determinar os valores mínimos de S3 em cada caso, considera-se que a probabilidade de a velocidade básica V_0 do vento ser igualada ou excedida, num período de 50 anos, é de 63%. A partir disso, é possível apontar valores adequados para S3 conforme a Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Valores mínimos de S3

Grupo	Descrição	S3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123:1988.

2.3.2 Coeficiente de arrasto

A força de arrasto pode ser compreendida como a componente global de força do vento atuante sobre uma edificação. Gonçalves *et al.* (2007) argumentam que a consideração de vento em edificações altas recebe um tratamento, dentro de uma análise global, em que a superposição de efeitos externos (forma) com efeitos internos (aberturas) é obtida por meio de um comportamento global da edificação, e representada por um único coeficiente, denominado coeficiente de arrasto (C_a). Conforme a ABNT NBR 6123:1988 a força de arrasto pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$F_a = C_a * q * A_e \quad (4)$$

Onde:

F_a é a força de arrasto;

C_a é o coeficiente de arrasto;

q é a pressão dinâmica ou pressão de obstrução;

A_e é a área efetiva, que é a área da projeção ortogonal da edificação sobre um plano perpendicular à direção do vento.

Em seu item 4.2.c, a ABNT NBR 6123:1988 descreve a equação que determina a pressão dinâmica:

$$q = 0,613 * V_k^2 \quad (5)$$

Onde:

q é a pressão dinâmica, em N/m²;

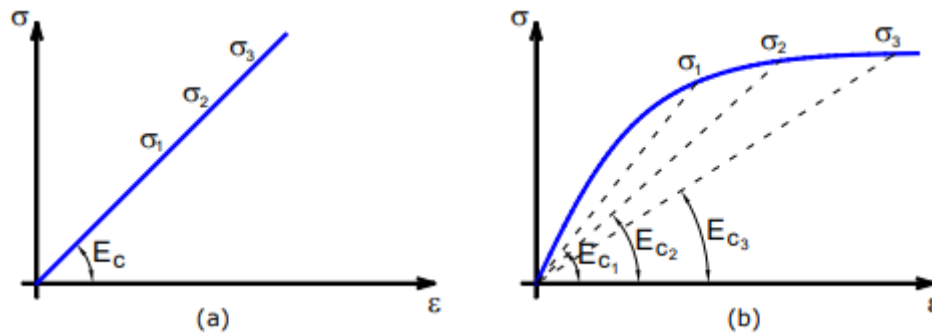
V_k é a velocidade característica, em m/s (Equação 1).

2.4 Não linearidade física (NLF)

A não linearidade física (NLF) advém das diferentes propriedades físicas dos distintos materiais presentes no concreto armado. Passos *et al.* (2016) afirmam que o concreto armado é constituído de materiais com propriedades físicas variadas, formando um elemento anisotrópico, heterogêneo, com módulo de elasticidade que varia em cada ponto da curva do diagrama de tensão-deformação e, por isso, não respeita a Lei de Hooke. Nesse sentido, para analisar a estabilidade das estruturas em relação aos momentos de segunda ordem, a ABNT NBR 6118:2023 define como obrigatório a análise da não linearidade física do concreto armado.

Moncayo (2011) expõe que, na prática, a diferença entre ser considerada ou não a NLF está relacionada ao módulo de elasticidade do concreto.

Figura 6 - Diagrama tensão-deformação do concreto: (a) linear; (b) não-linear

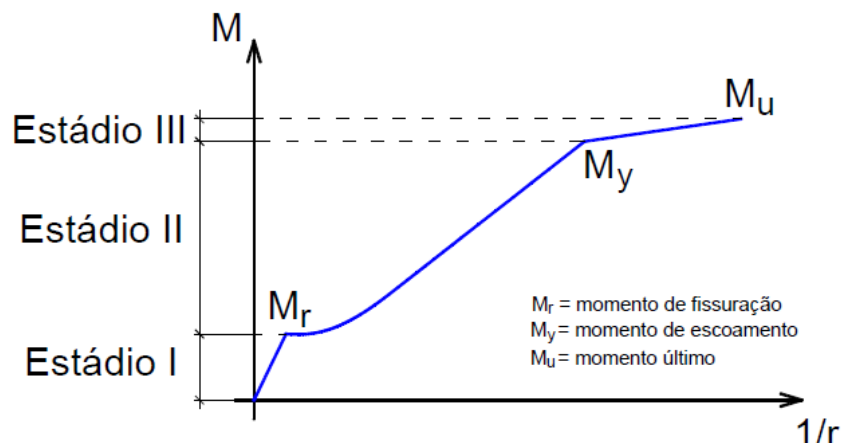


Fonte: Moncayo (2011).

É possível observar, na Figura 6 (b), que para valores distintos de tensões (σ), o concreto armado tem diferentes valores de módulos de elasticidade como resposta. De maneira inversa para a Figura 6 (a), onde tensões distintas geram o mesmo valor de módulo de elasticidade.

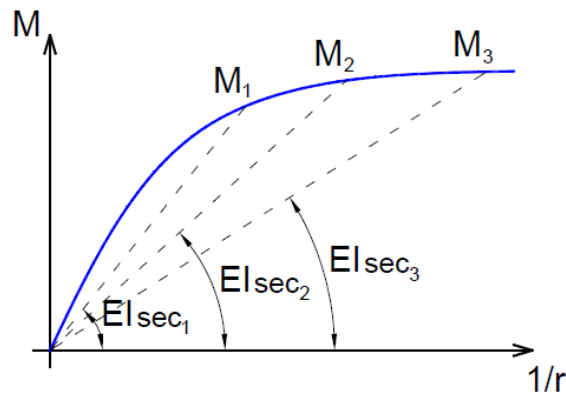
Moncayo (2011) afirma, no entanto, que, no dia-a-dia, usualmente o projetista analisa sua estrutura baseando-se em momentos fletores, e não em tensões. Por isso, utiliza-se o diagrama momento-curvatura (Figura 7) e o diagrama normal-momento-curvatura (Figura 8) para análise não-linear para cálculo de elementos de concreto armado.

Figura 7 - Diagrama momento-curvatura



Fonte: Moncayo (2011).

Figura 8 - Diagrama normal-momento-curvatura



Fonte: Moncayo (2011).

Pinto (1997) declara que a consideração da NLF pode se tornar uma tarefa trabalhosa e difícil de ser implementada em estruturas de concreto armado de grande porte. Portanto, a ABNT NBR 6118:2023 traz, em seu item 15.7.3, aproximações a serem consideradas em projeto, tendo como rigidez dos elementos estruturais os seguintes valores:

$$Lajes(EI)_{sec} = 0,3EcIc \quad (6)$$

$$Vigas(EI)_{sec} = 0,4EcIc; \text{ para } As' \neq As \quad (7)$$

$$(EI)_{sec} = 0,5EcIc; \text{ para } As' = As$$

$$Pilares(EI)_{sec} = 0,8EcIc \quad (8)$$

Onde:

Ic é o momento de inércia da seção bruta de concreto, incluindo, quando for o caso, as mesas colaborantes;

Ec é o valor representativo do módulo de deformação do concreto.

2.5 Coeficiente Gama Z (γ_z)

A ABNT NBR 6118:2023 define, em seu item 15.1, o parâmetro γ_z como um coeficiente de majoração dos esforços globais de 1ª ordem devidos aos carregamentos horizontais para obtenção dos esforços finais de 2ª ordem, isto é, um parâmetro para avaliar a sensibilidade da estrutura aos efeitos de segunda ordem. Este parâmetro foi proposto por Franco e Vasconcelos (1991).

Em seu item 15.5.3, a ABNT NBR 6118:2023 descreve a expressão, limitada a estruturas reticuladas de no mínimo quatro andares, que caracteriza o valor de γ_z para cada combinação de carregamento:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (9)$$

Onde:

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

$M_{1,tot,d}$ 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.

A ABNT NBR 6118:2023 limita, em seu item 15.7.2, o valor de γ_z em até 1,30. Em contrapartida, Franco e Vasconcelos (1991) e, em momento posterior, Pinto (1997) expõem que valores coerentes para γ_z estão entre 1,00 e 1,20. De acordo com Pinto (1997), valores maiores que 1,20 devem ser evitados levando-se em conta o fato de que nas faixas intermediárias, onde os valores dos esforços devidos à ação horizontal são maiores, a estimativa se mostra contra a segurança.

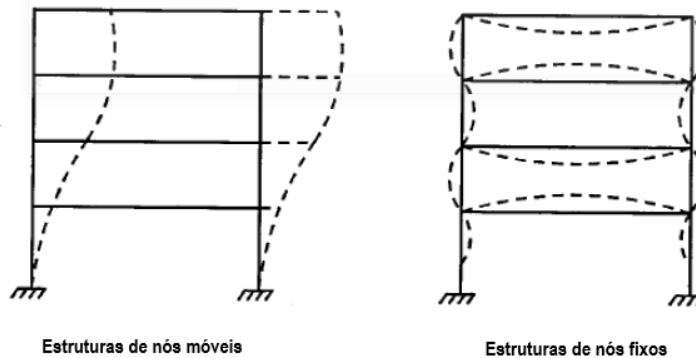
2.6 Estruturas de nós fixos e nós móveis

A partir dos efeitos de segunda ordem, surgem duas classificações possíveis para as edificações: elas podem ser estruturas de nós fixos ou nós móveis. Nesse sentido, a ABNT NBR 6118:2023 define, em seu item 15.4.2, que quando os esforços de 2ª ordem de uma estrutura forem até 10% do valor das solicitações de 1ª ordem pode-se considerar que o deslocamento horizontal é pequeno e, portanto, os efeitos globais podem ser desprezados e deve-se examinar somente os efeitos locais e localizados, neste caso a estrutura é classificada como sendo de nós fixos. Em contraste com as estruturas nós móveis, que são classificadas desta forma quando os momentos de 2ª ordem são superiores a 10% dos esforços de 1ª ordem. Neste caso

o deslocamento horizontal da estrutura não pode ser desconsiderado e todos os efeitos devem ser levados em consideração: globais, locais e localizados.

Em outros termos, uma estrutura será de nós fixos se seu γ_2 apresentar valores menores que 1,10. Em contrapartida, uma estrutura será de nós móveis se apresentar valores de γ_2 entre 1,10 e 1,30.

Figura 9 - Estrutura de nós móveis e fixos



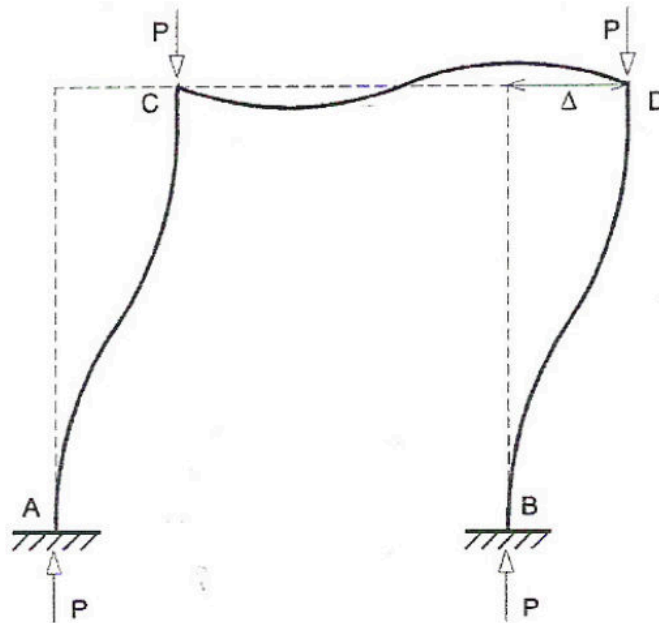
Fonte: Adaptado de Terra (2008).

Moncayo (2011) afirma que, por mais que estruturas de nós fixos sejam classificadas desta forma, a edificação sofre deslocamentos horizontais pequenos, que podem ser desprezados. Além disso, apesar da necessidade de considerar os deslocamentos presentes em estruturas de nós móveis nos cálculos estruturais, elas não se movimentam com elevada ordem de grandeza.

2.7 Processo P-Delta ($P-\Delta$)

O processo P-Delta ($P-\Delta$) é um método de cálculo refinado dos efeitos de segunda ordem. Pode ser compreendido como um processo onde os deslocamentos adicionais (Δ) gerados pelos momentos de segunda ordem alteram o ponto de aplicação da carga (P) vertical (TEIXEIRA, 2008).

Figura 10 - Efeito P- Δ



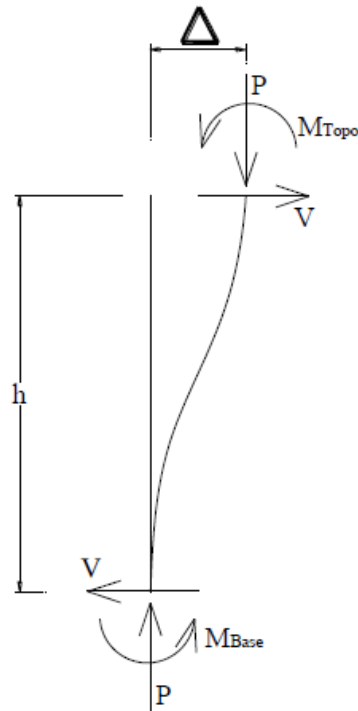
Fonte: Teixeira (2008).

Na literatura existem diversos métodos que se baseiam nesse processo, são eles: método de dois ciclos iterativos, método da carga lateral fictícia, método da rigidez negativa e método da carga de gravidade. No presente trabalho somente será abordado o método da carga lateral fictícia, haja vista que o programa a ser utilizado (AltoQi Eberick) utiliza este método.

2.7.1 Método da carga lateral fictícia

Este processo de cálculo também pode chamar-se de P- Δ iterativo, pois a análise dos deslocamentos e forças atuantes na estrutura se repete até que uma posição de equilíbrio seja alcançada. Em outras palavras, uma carga vertical que atua, por exemplo, em um pilar, gera um acréscimo de momento por conta do deslocamento horizontal (causado inicialmente por efeitos de NLG e momentos de segunda ordem) desse pilar. Esse processo é chamado de iteração.

Figura 11 - Processo P-Delta



Fonte: Delalibera *et al.* (2014).

A cada iteração obtém-se uma nova força lateral fictícia e, com essa nova força, volta-se a realizar a mesma análise, até atingir a posição de equilíbrio (CAMICIA, 2017). Entende-se como posição de equilíbrio o ponto em que os deslocamentos apresentam um valor praticamente igual aos da iteração anterior, com diferença arbitrada entre uma iteração e outra de 1%.

2.8 Influência dos tipos de laje na estabilidade global

De acordo com Moncayo (2011), a alteração da rigidez de uma estrutura tem influência direta na estabilidade global do edifício. Nesse sentido, a escolha do tipo de laje é fundamental ao projetar uma edificação de múltiplos pavimentos.

Camicia (2017) aborda que um sistema estrutural com lajes maciças se mostra mais eficaz se tratando de estabilidade global em comparação com lajes treliçadas e nervuradas. Posteriormente, Goldani (2021) consolida que o sistema de laje maciça em concreto armado é uma opção adequada para se utilizar em edifícios altos, pois as lajes podem contribuir com as vigas na estabilidade global do sistema estrutural.

Em seu estudo, Camicia (2017) atinge valores de γ_z até, aproximadamente, 5% menores ao utilizar sistemas com laje maciça em vez de treliçadas e nervuradas em edifícios de múltiplos pavimentos.

Tabela 3 - Valores de γ_z de acordo com o tipo de laje

TIPO DE LAJE	DIREÇÃO	γ_z
MACIÇA	0 – 180°	1,198
	90 – 270°	1,132
TRELIÇADA	0 – 180°	1,26
	90 – 270°	1,152
NERVURADA	0 – 180°	1,263
	90 – 270°	1,145

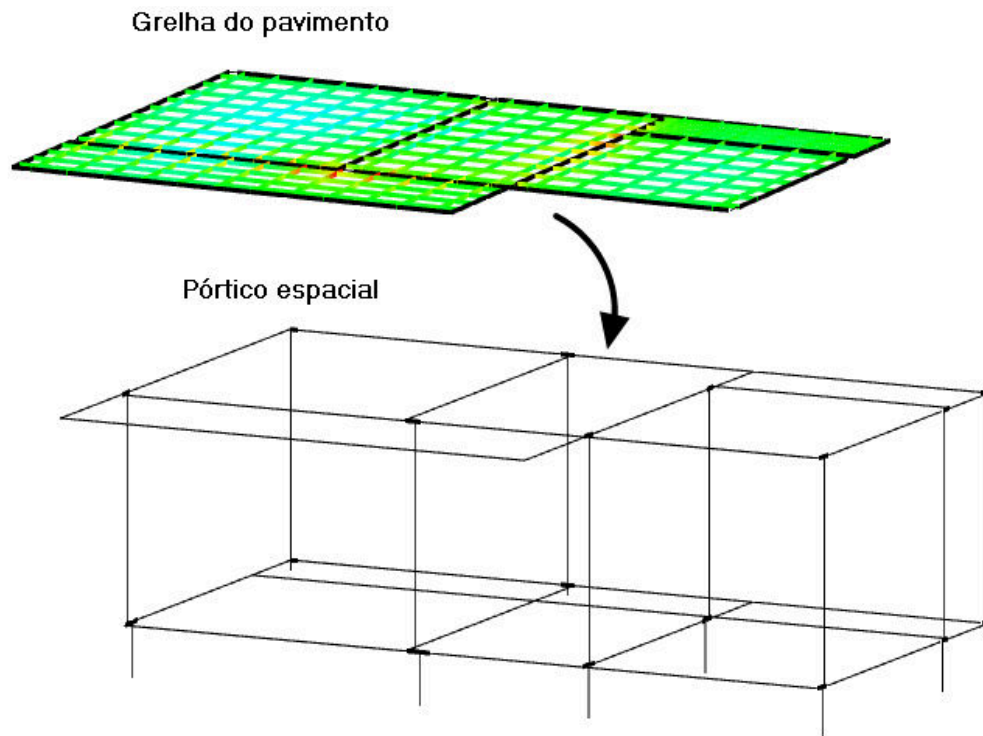
Fonte: Adaptado de Camicia (2017).

Observa-se, na Tabela 3, reduções importantes nos valores de γ_z . As estruturas com lajes treliçadas e nervuradas apresentaram, na direção 0 – 180°, valores de γ_z na ordem de 1,26 e 1,263, respectivamente. Esses valores são maiores que 1,20 e devem ser evitados, pois se mostram contra segurança (PINTO, 1997). Em contrapartida, a edificação com laje maciça se mostrou a mais eficiente em termos de estabilidade global, já que foi a que apresentou menores valores de γ_z nas duas direções, corroborando sua contribuição na rigidez da estrutura e, por consequência, no combate à instabilidade global.

2.8.1 Método de análise do AltoQi Eberick

Para analisar a influência das lajes na estabilidade global no AltoQi Eberick, é necessário analisar a estrutura da forma correta. No programa, há duas formas de processamento: Grelhas + Pórtico espacial e Modelo integrado. No primeiro, a redução da rigidez das lajes não influenciará no comportamento global da edificação como pórtico espacial, pois considera-se a laje como diafragma rígido, com rigidez à flexão nula (SOUTO, 1993). Ou seja, no modelo de grelhas separadas do pórtico, os painéis de lajes são analisados primeiro, com um modelo bidimensional de grelha, e as reações das lajes nas vigas são adicionadas a um modelo separado de pórtico espacial, no qual são representados apenas os pilares e vigas (ALTOQI, 2023). Em outras palavras, nesta forma de análise da estrutura a rigidez das lajes não terão influência no valor de γ_z .

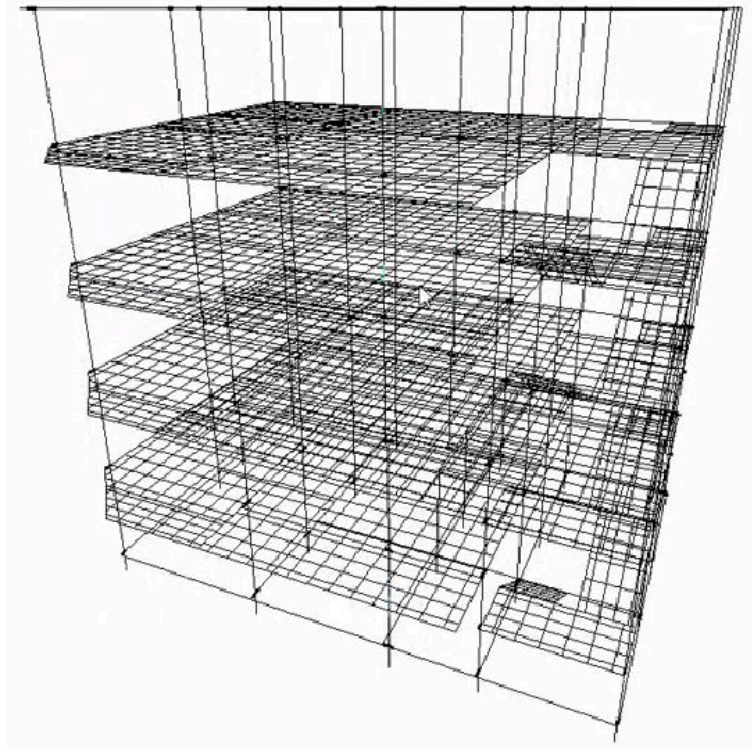
Figura 12 - Representação do modelo de grelha separada do pórtico



Fonte: AltoQi (2023).

Já no modelo integrado, AltoQi (2023) afirma que a rigidez à flexão das lajes influencia diretamente no contraventamento da estrutura e, portanto, na estabilidade global. As lajes são representadas juntamente com vigas e pilares no pórtico (Figura 13).

Figura 13 - Representação do modelo integrado



Fonte: AltoQi (2023).

Se o valor de γ_z for maior que 1,10, ou seja, se os esforços de segunda ordem forem 10% maior do que os de primeira, o programa utilizará o processo P-Delta, abordado no Capítulo 2.7, onde duas hipóteses são possíveis: ou os deslocamentos são cada vez menores, obtendo-se o equilíbrio da estrutura, ou os deslocamentos jamais se anulam, provocando a flambagem da estrutura como um todo (ALTOQI, 2023).

3 METODOLOGIA

Para analisar a estabilidade global de um edifício de múltiplos pavimentos, primeiramente serão realizadas as etapas de pré-dimensionamento e concepção da estrutura.

No pré-dimensionamento das lajes é esperado que se determine suas respectivas espessuras. Alva (2008) determina a espessura mínima de lajes maciças (Equação (10)), nervuradas (Equação (11)) e treliçadas (Equação (12)):

$$h = \frac{L}{40} \quad (10)$$

$$h = \frac{L}{30} \quad (11)$$

$$h = \frac{L}{35} \quad (12)$$

Onde:

L é o maior dos menores vãos (em outras palavras, para cada laje haverá um menor vão, dentre os menores vãos de cada laje, será adotado o maior).

Para vigas, será utilizado o método proposto por Lança (2006), onde a altura h da viga se dá em função de seus apoios e vãos efetivos. Para vigas entre pilares utiliza-se a Equação 13. Para vigas em balanço utiliza-se a Equação 14.

$$h = \frac{Lef}{Z1} \quad (13)$$

$$h = \frac{Lef}{Z2} \quad (14)$$

Onde:

h é altura da viga;

Lef é o vão efetivo da viga;

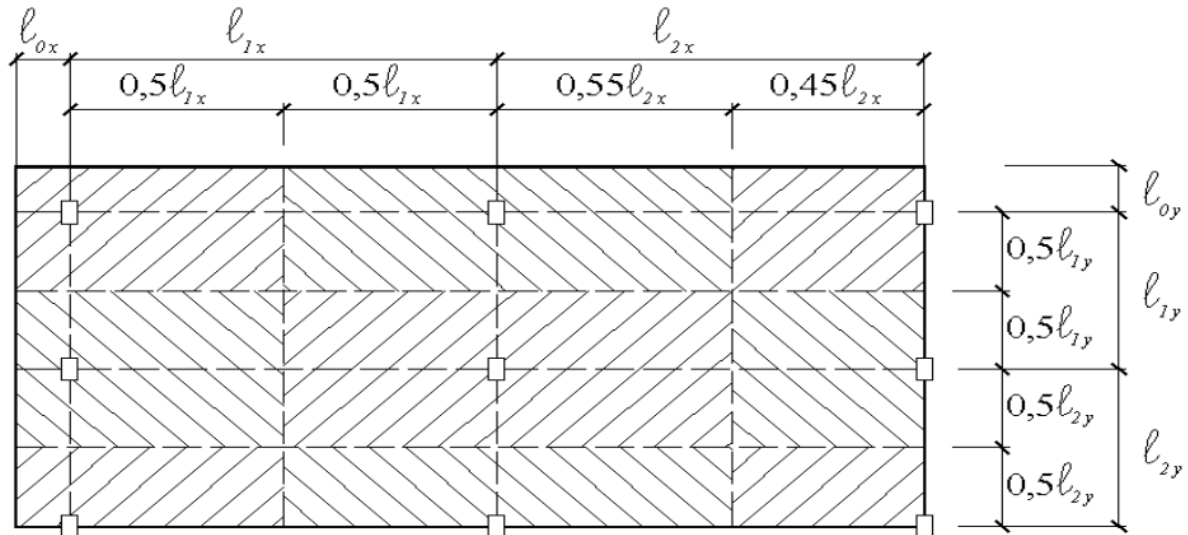
$Z1$ varia de 10 a 12 – 10 para vigas isostáticas e 12 para vigas hiperestáticas;

$Z2$ varia de 6 a 12.

Para pilares, o pré-dimensionamento utilizado será o método proposto por Alva (2008), que consiste em estimar a carga cujos pilares estarão submetidos através de suas áreas de influência. A área de influência de cada pilar pode ser obtida

dividindo-se as distâncias entre seus eixos em intervalos que variam entre $0,45l$ e $0,55l$, dependendo da posição do pilar na estrutura (PINHEIRO, 2007).

Figura 14 - Área de influência dos pilares



Fonte: Pinheiro (2007).

A equação que descreve a área de concreto da seção transversal do pilar está exposta abaixo.

$$A_c = \frac{Nsd}{(0,85 * fcd + 0,84)} \quad (15)$$

A_c é a área de concreto, em cm^2 ;

Nsd é o N_k (força normal) do pilar multiplicado por um coeficiente de segurança: 1,3 para pilares intermediários; 1,5 para pilares de extremidade e 1,8 para pilares de canto;

fcd resistência de cálculo do concreto, em kN/cm^2 .

3.1 Modelagem e análise da estrutura

A modelagem e a análise da estrutura serão realizadas por meio de um *software*, o AltoQi Eberick, que segue as normas brasileiras de dimensionamento de estruturas vigentes. Ademais, conta com a verificação da estabilidade global da estrutura através do coeficiente Gama-Z, processo P-Delta para a consideração dos

efeitos de 2ª ordem, além de relatórios que possibilitam uma avaliação de todos os resultados apresentados (ALTOQI, 2023).

Será modelado, no software AltoQi Eberick, um edifício de múltiplos pavimentos para fins didáticos. Para possibilitar a análise dos parâmetros de estabilidade global das respectivas estruturas, será utilizada a mesma planta baixa para alterar a tipologia da laje e o número de pavimentos.

A Tabela 4 mostra as características de cada modelo estudado.

Tabela 4 - Características dos modelos base

MODELO	TIPO DE LAJE	NÚMERO DE PAVIMENTOS
1.1	MACIÇA	5
1.2		9
1.3		15
1.4		20
1.5		30
2.1	NERVURADA	5
2.2		9
2.3		15
2.4		20
2.5		30
3.1	TRELIÇADA	5
3.2		9
3.3		15
3.4		20
3.5		30

Fonte: Autor (2023).

O *software* utilizado possui duas formas de análise estrutural: Modelo grelha + pórtico e Modelo integrado. No modelo de grelha separado do pórtico espacial, a estabilidade global da estrutura é verificada com o pórtico formado pelas vigas e pilares da estrutura, enquanto no modelo integrado a estabilidade global é verificada considerando as lajes na estrutura (ALTOQI, 2023). Os casos descritos serão processados das duas formas para comparar os parâmetros de estabilidade global. Dessa forma será possível verificar o impacto da rigidez da laje em ambas as análises.

Os parâmetros a serem analisados são:

- Coeficiente γ_z , onde será possível classificar a estrutura como sendo de nós fixos e nós móveis, além de analisar o valor do coeficiente;

- Análise de NLG pelo Processo $P-\Delta$, onde serão analisados os deslocamentos horizontais médios da estrutura provenientes de cargas acidentais, esforços de vento e desaprumo, os três nas direções X e Y e em ambos os sentidos (positivos e negativos). Para fins de simplificação, será exposto somente o sentido que apresentar o pior resultado;

- Deslocamentos horizontais devido à ação de vento, onde serão feitas verificações referentes ao atendimento da Tabela 13.3 (Limites para deslocamentos) da norma ABNT NBR 6118:2023.

Ao final da análise dos relatórios gerados pelo Eberick, será elaborada uma tabela onde os parâmetros de estabilidade global descritos acima serão expostos.

Tabela 5 - Tabela exemplo para analisar parâmetros de estabilidade global

MODELOS DE XX PAVIMENTOS		MODELO X.X (LAJE XXX)	
PROCESSAMENTO		MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS
γ_z		0,00	0,00
CLASSIFICAÇÃO		Nós Fixos ou Nós Móveis	Nós Fixos ou Nós Móveis
DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS	EIXO X (cm)	0,00	0,00
	EIXO Y (cm)	0,00	0,00
P- Δ (ACIDENTAL)	EIXO X (cm)	0,00 >> 0,00 (0,00%)	0,00 >> 0,00 (0,00%)
	EIXO Y (cm)	0,00	0,00
P- Δ (VENTO)	EIXO X (cm)	0,00 >> 0,00 (0,00%)	0,00 >> 0,00 (0,00%)
	EIXO Y (cm)	0,00 >> 0,00 (0,00%)	0,00 >> 0,00 (0,00%)
P- Δ (DESA-PRUMO)	EIXO X (cm)	0,00 >> 0,00 (0,00%)	0,00 >> 0,00 (0,00%)
	EIXO Y (cm)	0,00 >> 0,00 (0,00%)	0,00 >> 0,00 (0,00%)

Fonte: Autor (2023).

A partir da Tabela 5 será possível sintetizar os resultados obtidos e chegar a conclusões acerca da importância das lajes na estabilidade global da estrutura, da influência das cargas horizontais e verticais em estruturas convencionais de concreto armado e verificar a forma mais eficiente para a análise de estabilidade global de estruturas.

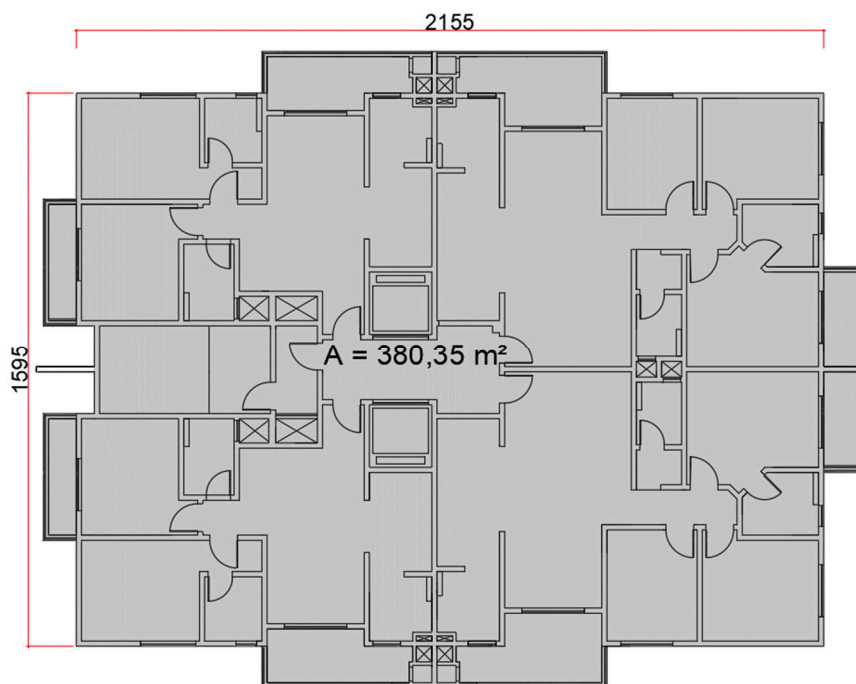
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as características dos modelos e os resultados obtidos. No capítulo 4.1, serão apresentadas as características da edificação, importantes para uma completa compreensão das análises e resultados realizados. No capítulo 4.2, serão apresentados os resultados obtidos, na forma de gráficos, separando os dois métodos de processamento do Eberick (Modelo Integrado e Modelo de Pórticos + Grelhas). Por fim, no capítulo 4.3, serão apresentados os resultados de forma conjunta e sintetizada entre os modelos estudados, para desenvolver discussões pertinentes acerca do trabalho, além de possibilitar uma ampla visão comparativa entre as lajes maciça, treliçada e nervurada.

4.1 Características gerais da edificação

Para realizar a análise de um edifício de múltiplos pavimentos foi escolhida uma planta arquitetônica com fins didáticos. Originalmente, a edificação possui 9 pavimentos, distribuídos da seguinte forma: 1 pavimento de garagem; 7 pavimentos tipo, sendo um deles de transição; e 1 pavimento de cobertura.

Figura 15 - Planta baixa do pavimento tipo do edifício.



Fonte: Autor (2024).

A partir disso, o número de pavimentos tipo da edificação, que possui 380,35 m² de área, variou para atingir o número de pavimentos propostos (ver Tabela 4). Para cada modelo foi realizado seu respectivo pré-dimensionamento. Desta forma, a seção dos pilares e das vigas de transição também diferiram de acordo com a altura da estrutura.

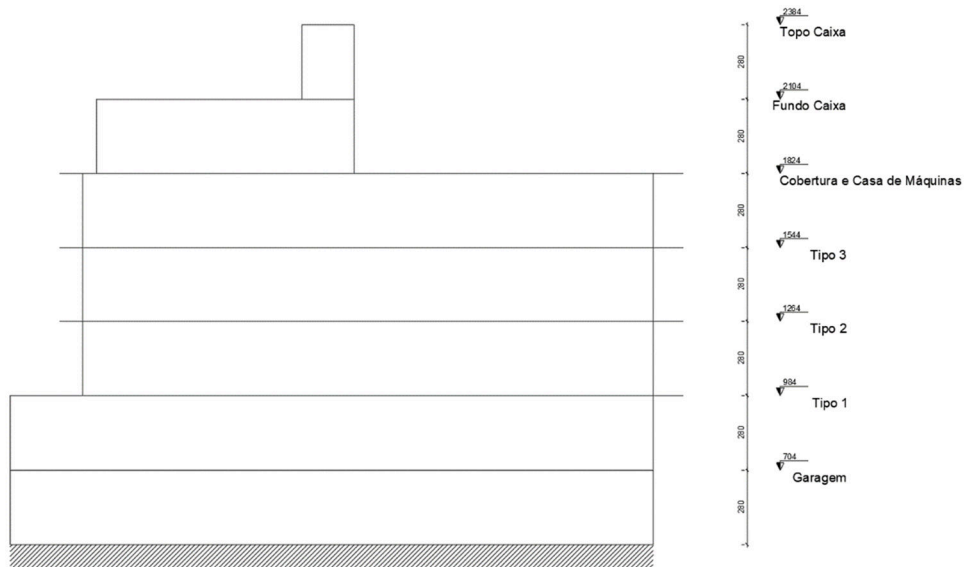
Para demonstrar a influência das lajes e das cargas horizontais na estabilidade global das edificações, todos os modelos (conforme Tabela 4) foram analisados de duas formas: Modelo Integrado e de Pórticos + Grelhas do *software* AltoQi Eberick. A partir do processamento feito pelo programa, foi possível extrair relatórios detalhados que possibilitaram a realização de gráficos para comparação e análise dos resultados obtidos.

4.1.1 Caracterização dos modelos de 5 pavimentos (1.1, 2.1 e 3.1)

A planta de formas simplificada do pavimento tipo e do modelo de 5 (cinco) pavimentos, está representada na Figura 16. Nela, estão representados os pilares, vigas e lajes. As lajes alternaram entre maciça, nervurada e treliçada.

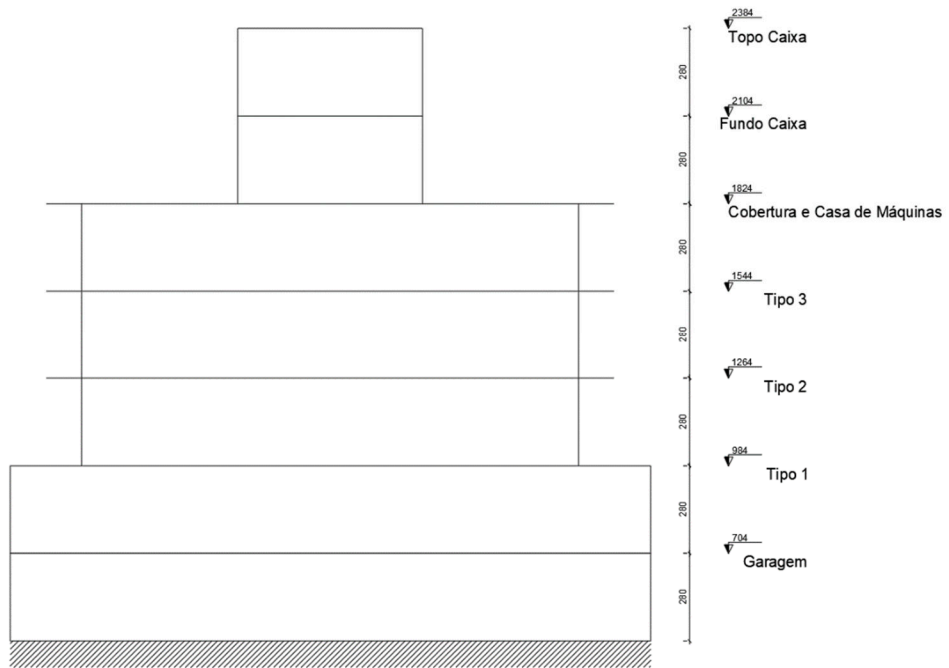
Além disso, os cortes esquemáticos, que representam a volumetria da edificação, estão retratados na Figura 17 e Figura 18. A altura para fins de cálculo, utilizada pelo programa nos parâmetros de estabilidade global, segue o descrito no item 15.5.2 da ABNT NBR 6118:2023. A norma define que a altura total da estrutura deve ser medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo. Portanto, conforme a Figura 17 e Figura 18, a altura total da edificação é de 16,80 m. Ademais, é possível visualizar a vista isométrica na Figura 19.

Figura 17 - Corte XX (5 pavimentos)



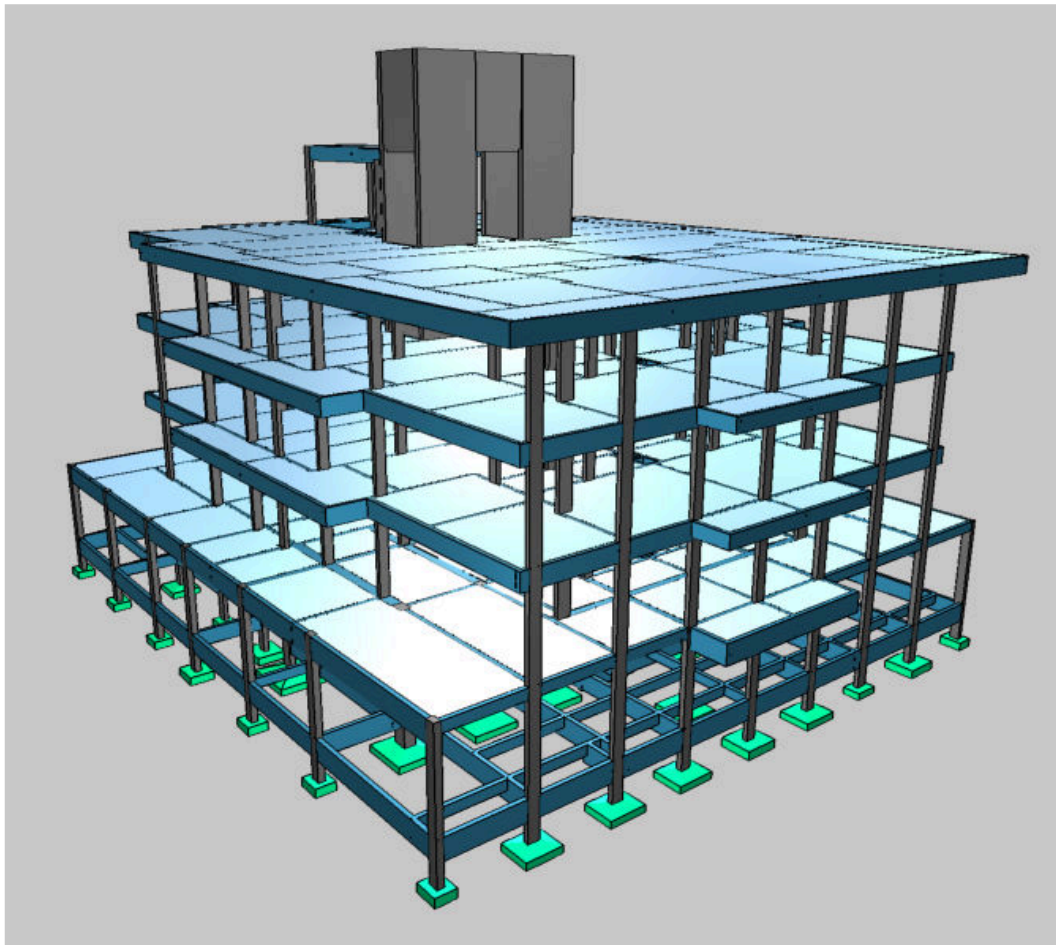
Fonte: Autor (2024).

Figura 18 - Corte YY (5 Pavimentos)



Fonte: Autor (2024).

Figura 19 - Vista isométrica da edificação com 5 pavimentos

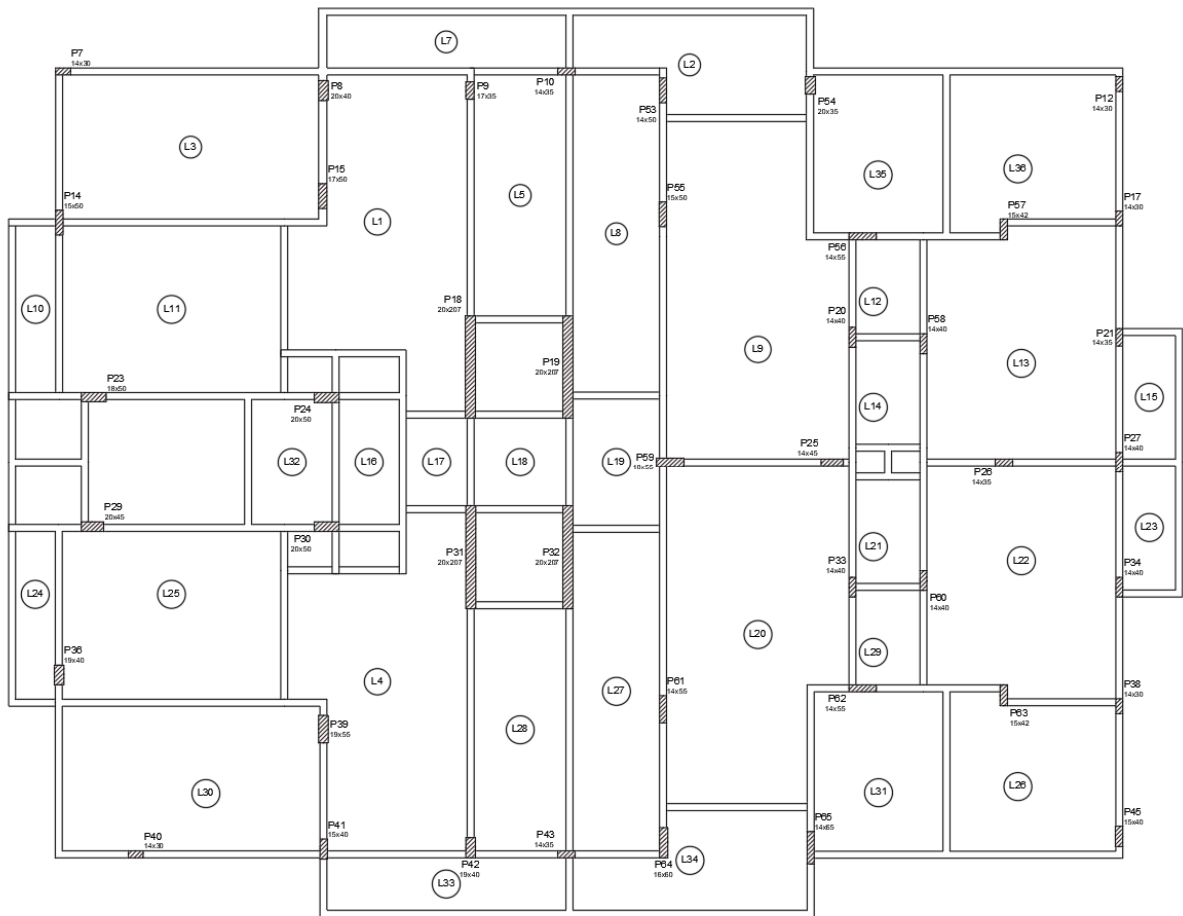


Fonte: Autor (2024).

4.1.2 Caracterização dos modelos de 9 pavimentos (1.2, 2.2 e 3.2)

A planta de formas simplificada do pavimento tipo, do modelo de 9 (nove) pavimentos, está representada na Figura 20. As lajes alternaram entre maciça, nervurada e treliçada. A espessura segue o que foi exposto no Capítulo 4.1.1.

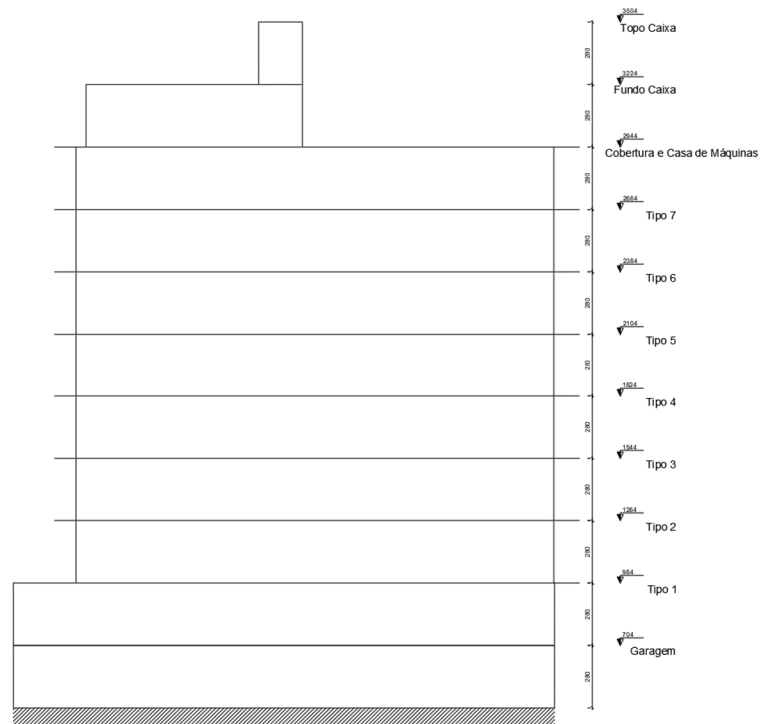
Figura 20 - Planta de formas simplificada (9 pavimentos)



Fonte: Autor (2024).

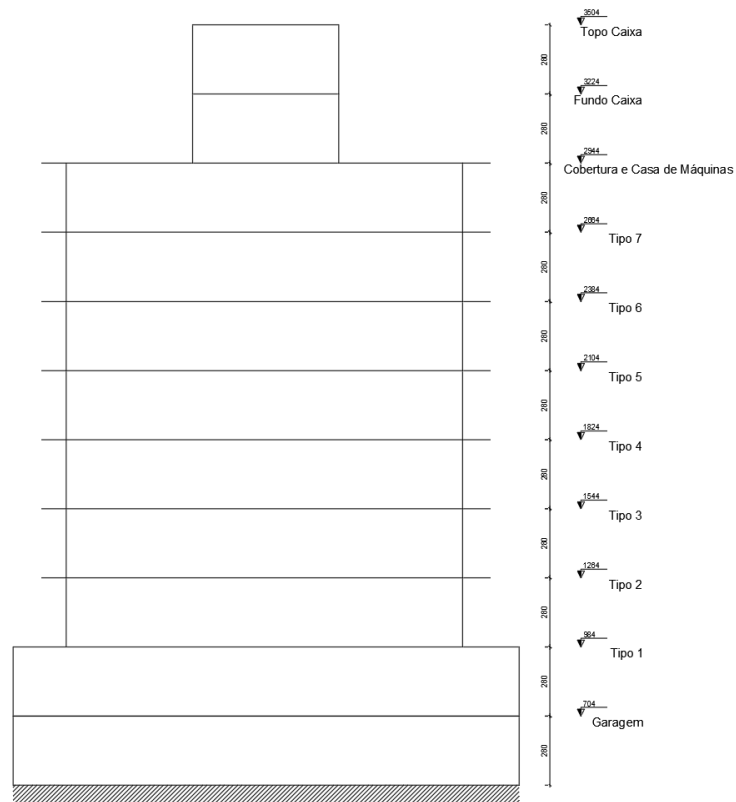
Os cortes esquemáticos estão retratados na Figura 21 e Figura 22. Nelas, é possível observar que a edificação possui 30,80 m de altura. Ademais, é possível visualizar a vista isométrica na Figura 23.

Figura 21 - Corte XX (9 pavimentos)



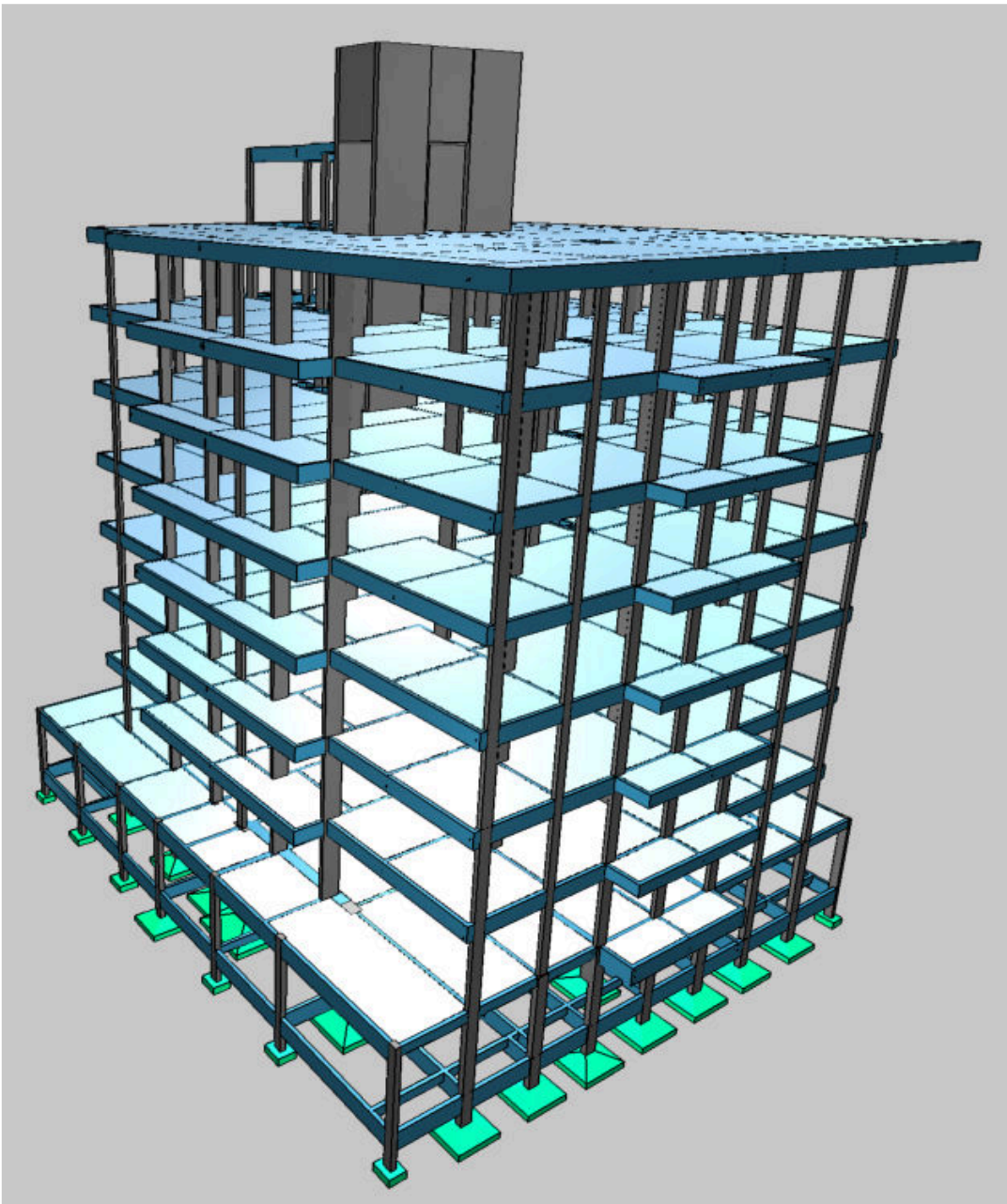
Fonte: Autor (2024).

Figura 22 - Corte YY (9 pavimentos)



Fonte: Autor (2024).

Figura 23 - Vista isométrica da edificação com 9 pavimentos

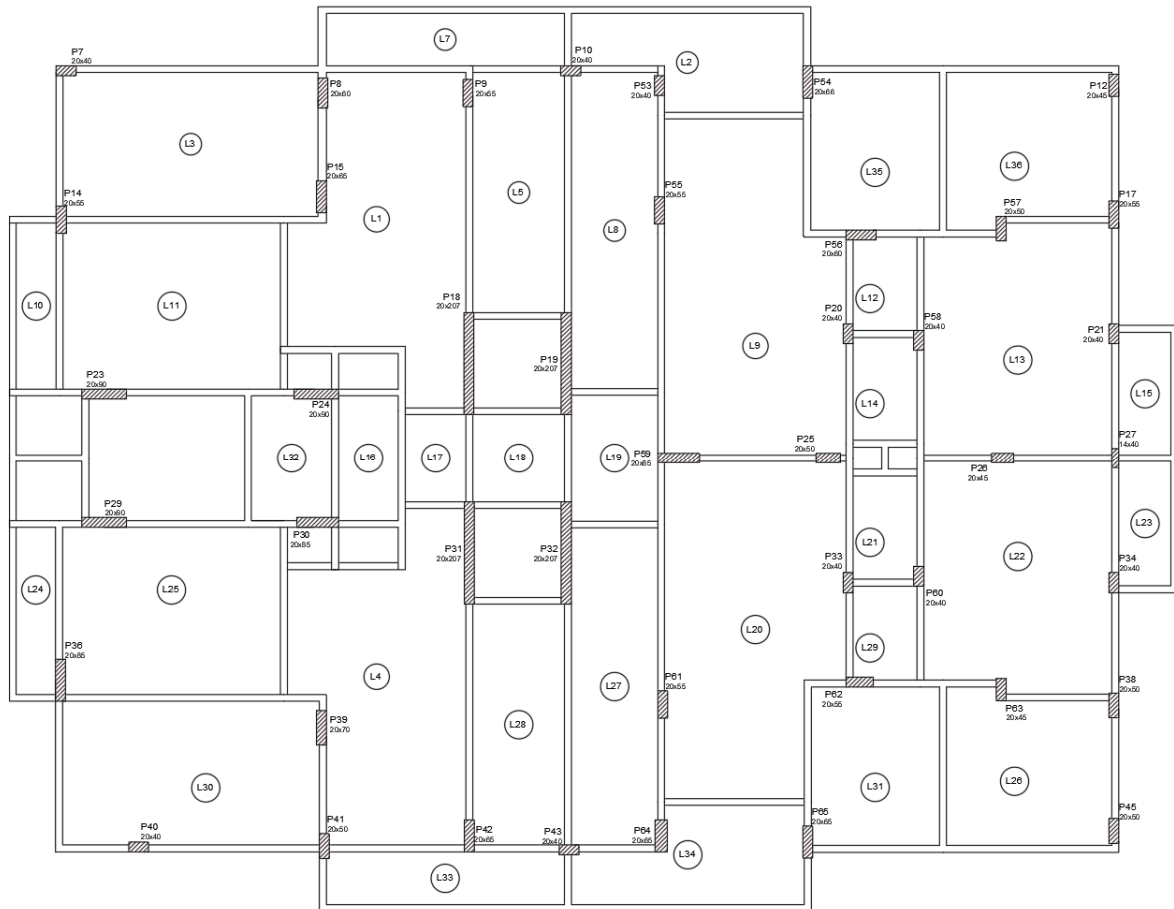


Fonte: Autor (2024).

4.1.3 Caracterização dos modelos de 15 pavimentos (1.3, 2.3 e 3.3)

A planta de formas simplificada do pavimento tipo, do modelo de 15 (quinze) pavimentos, está representada na Figura 24. As lajes alternaram entre maciça, nervurada e treliçada. A espessura segue o que foi exposto no Capítulo 4.1.1.

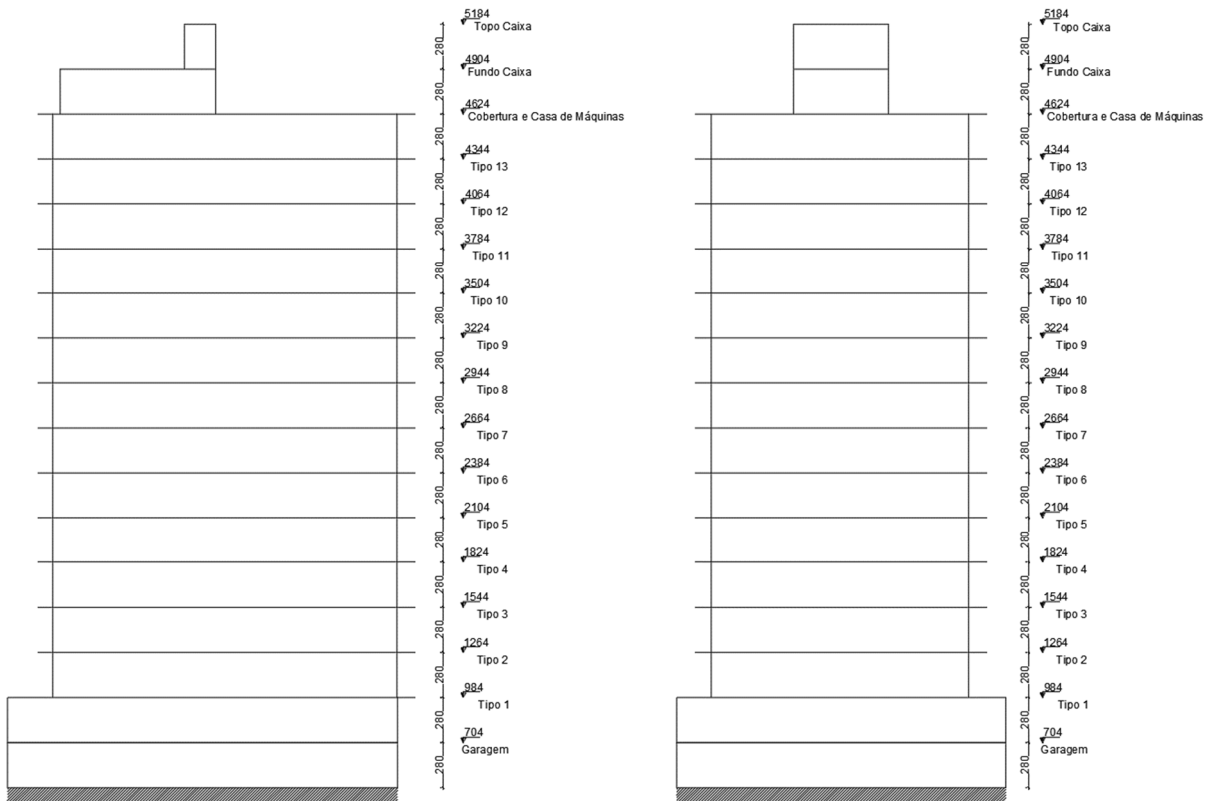
Figura 24 - Planta de formas simplificada (15 pavimentos)



Fonte: Autor (2024).

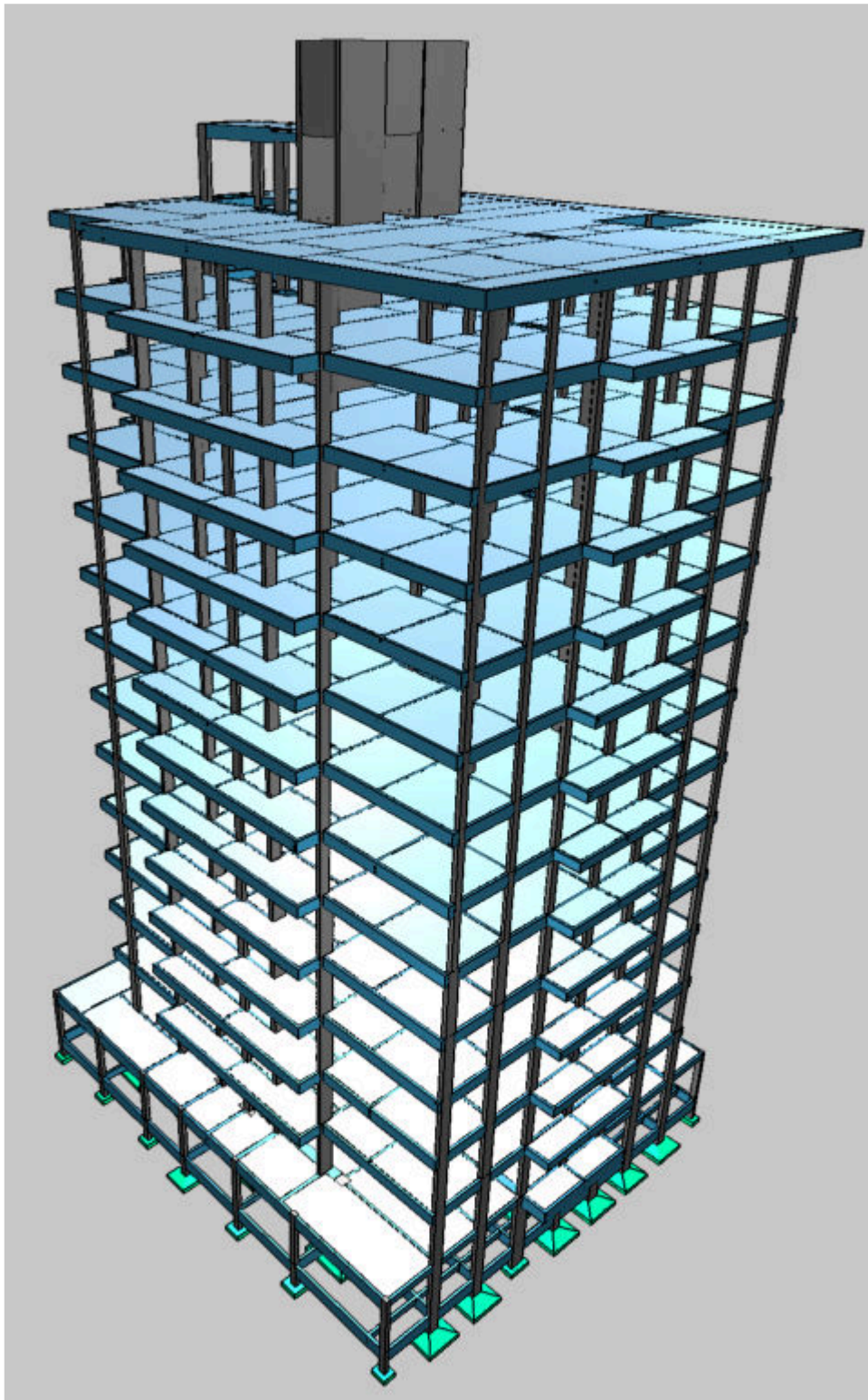
Além disso, os cortes esquemáticos estão retratados na Figura 25. Nela, é possível notar que a edificação possui 47,60 m de altura. A vista isométrica está retratada na Figura 26.

Figura 25 - Cortes XX e YY, à esquerda e à direita, respectivamente (15 pavimentos)



Fonte: Autor (2024).

Figura 26 - Vista isométrica da edificação com 15 pavimentos

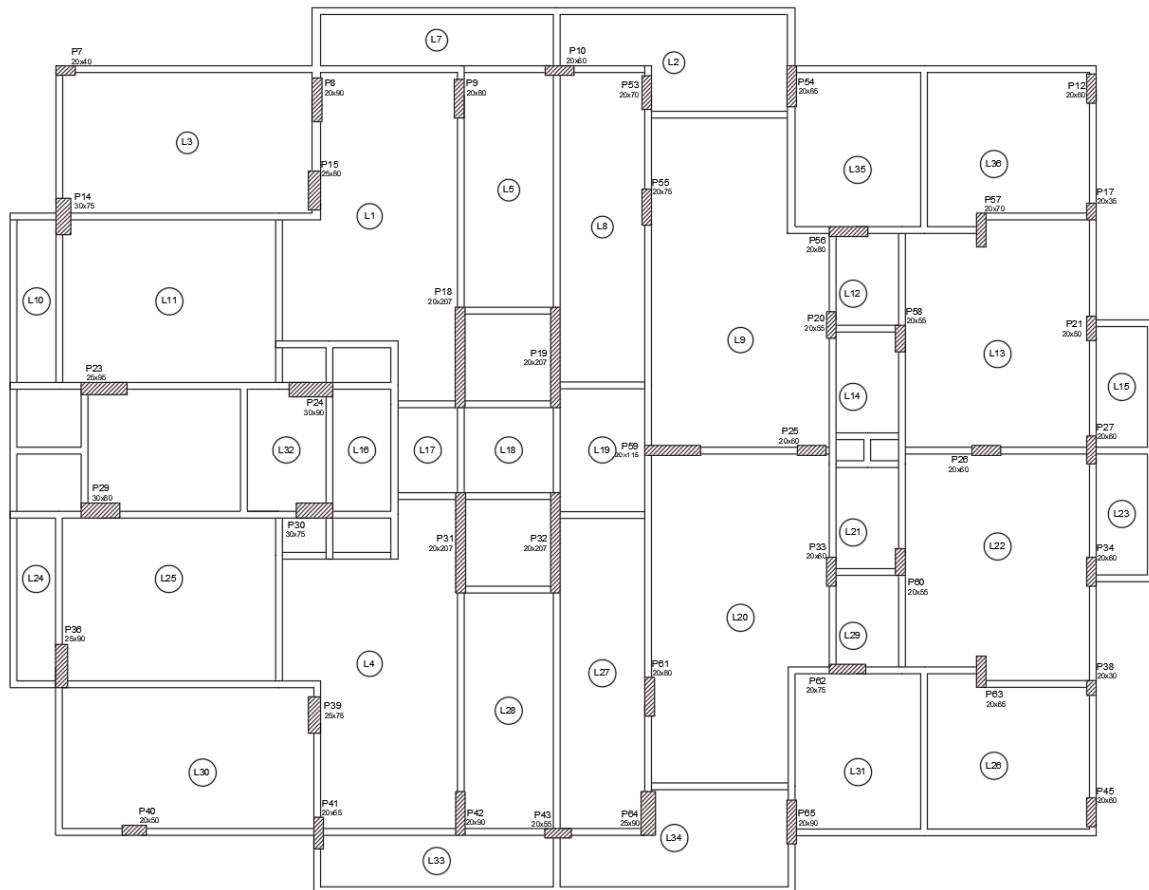


Fonte: Autor (2024).

4.1.4 Caracterização dos modelos de 20 pavimentos (1.4, 2.4 e 3.4)

A planta de formas simplificada do pavimento tipo, do modelo de 20 (vinte) pavimentos, está representada na Figura 27. As lajes alternaram entre maciça, nervurada e treliçada. A espessura segue o que foi exposto no Capítulo 4.1.1.

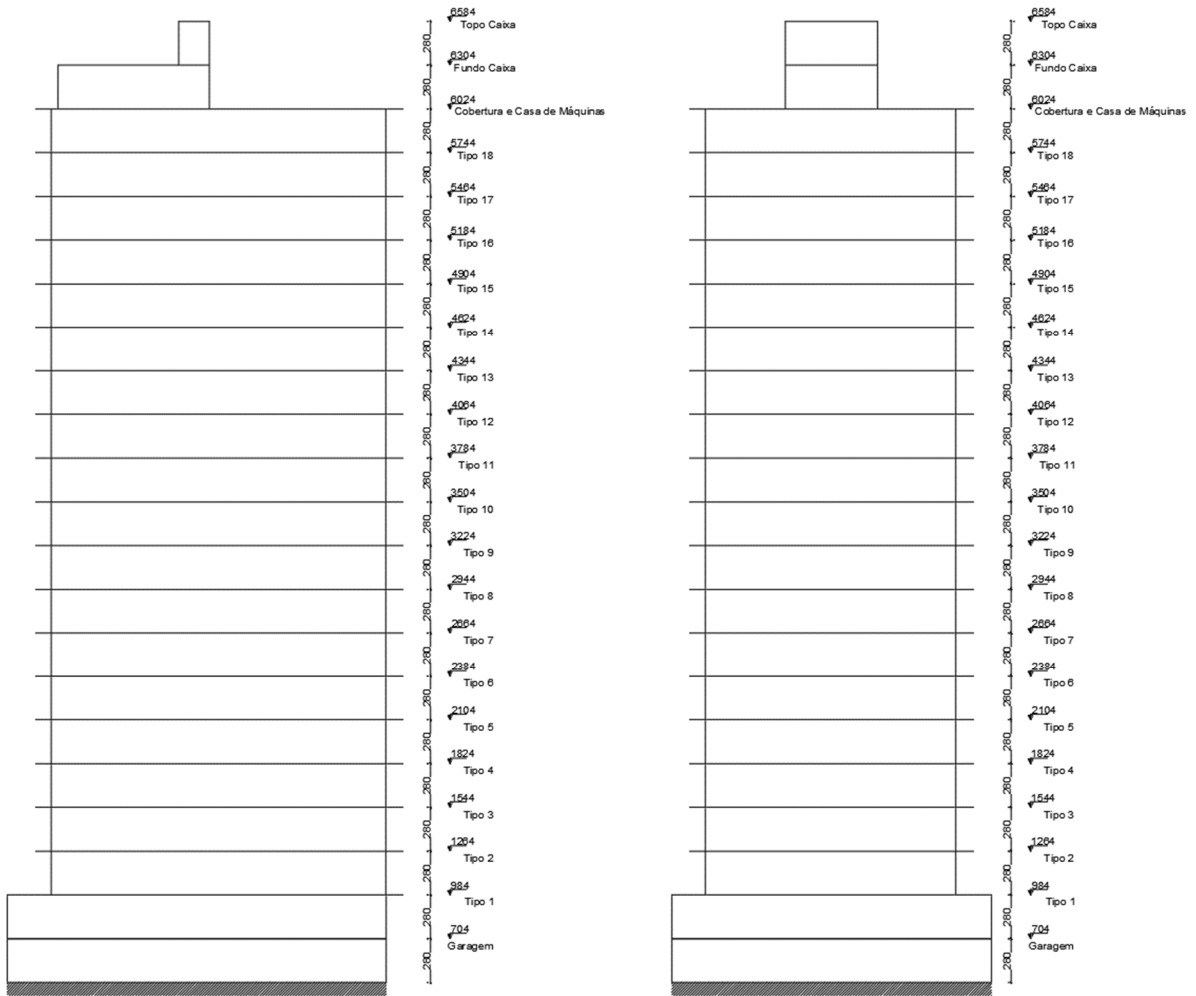
Figura 27 - Planta de formas simplificada (20 pavimentos)



Fonte: Autor (2024).

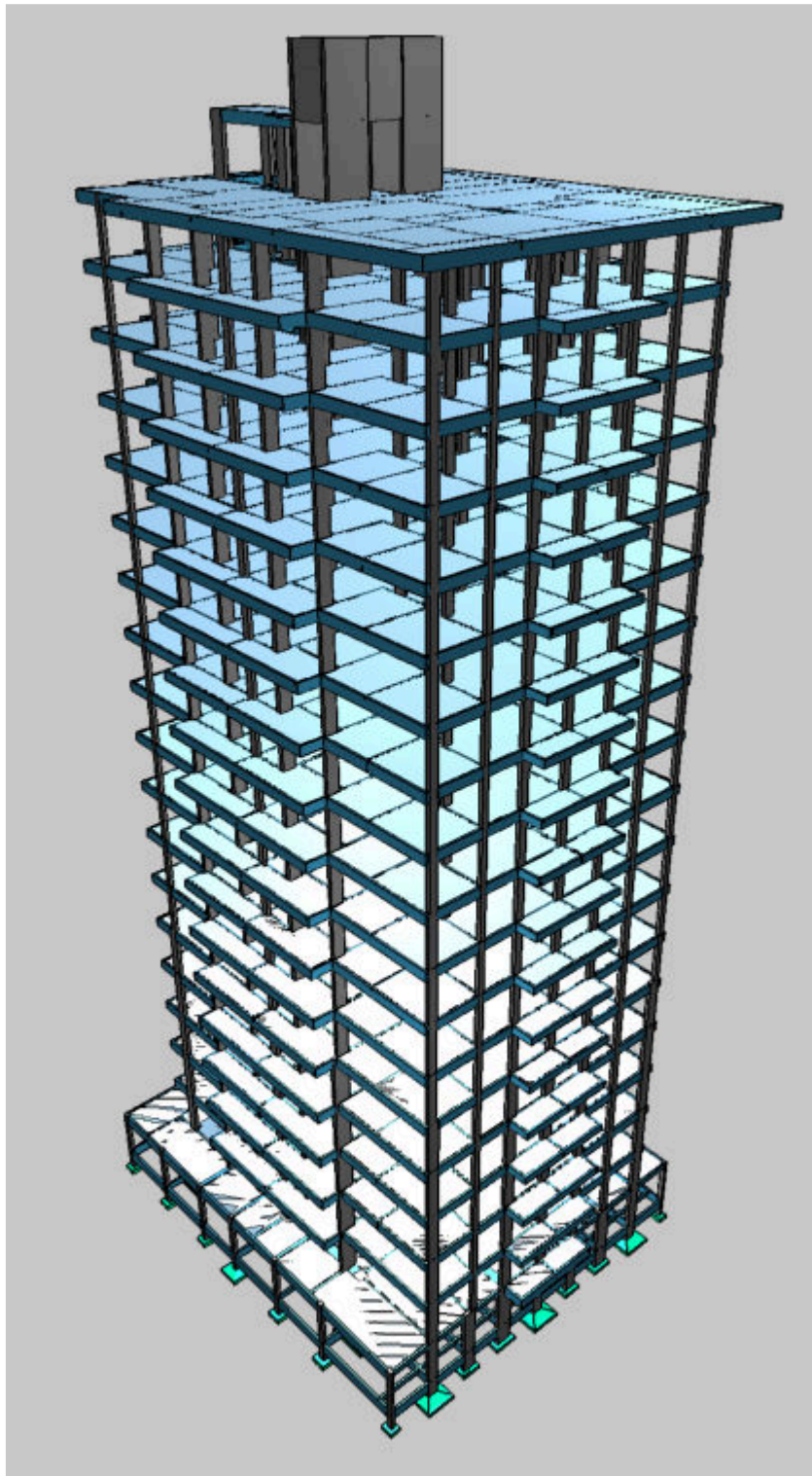
A Figura 28 representa os cortes esquemáticos. Nota-se que a edificação possui 61,60 m de altura. Além disso, a vista isométrica é apresentada na Figura 29.

Figura 28 - Cortes XX e YY, à esquerda e à direita, respectivamente (20 pavimentos)



Fonte: Autor (2024).

Figura 29 - Vista isométrica da edificação com 20 pavimentos

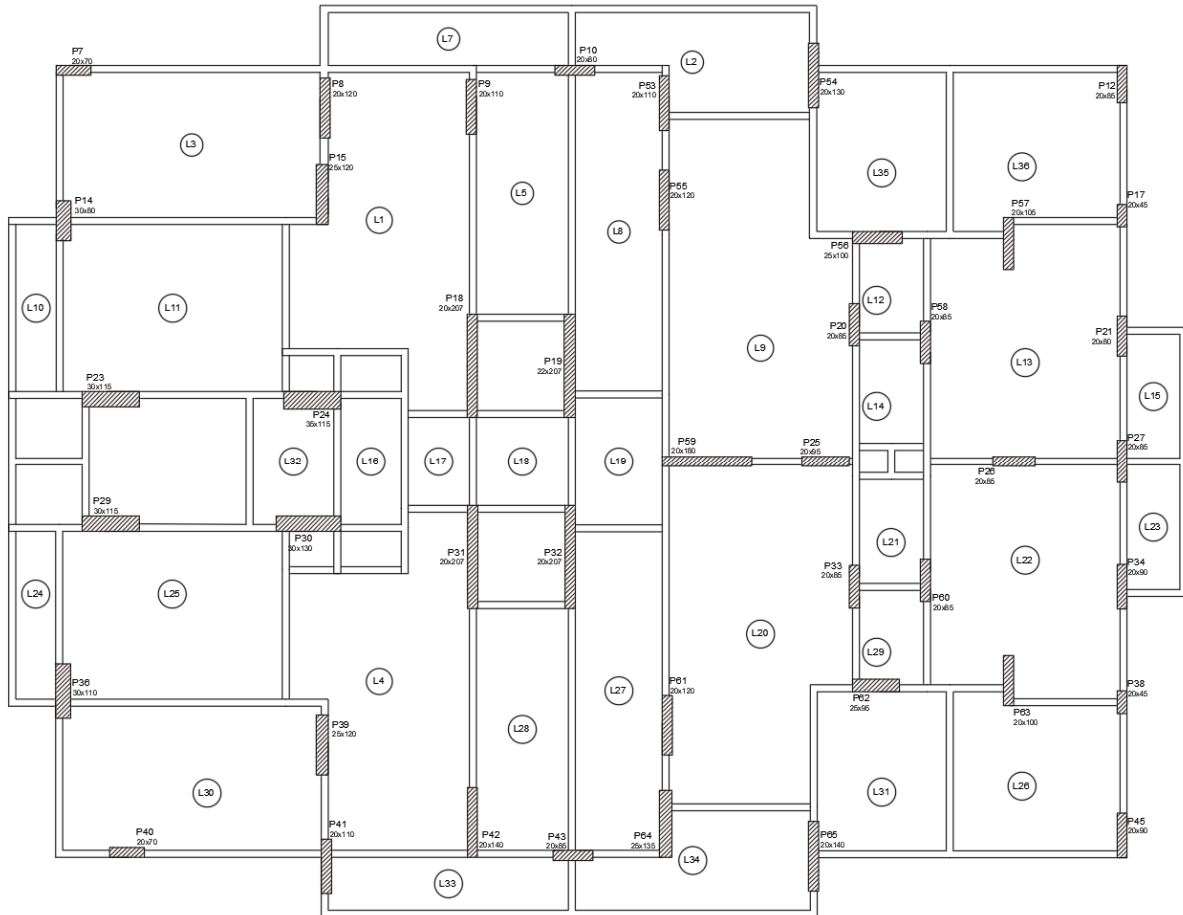


Fonte: Autor (2024).

4.1.5 Caracterização dos modelos de 30 pavimentos (1.5, 2.5 e 3.5)

A planta de formas simplificada do pavimento tipo destes modelos está representada na Figura 30. As lajes variaram entre maciça, nervurada e treliçada. A espessura segue o que foi exposto no Capítulo 4.1.1.

Figura 30 - Planta de formas simplificada (30 pavimentos)



Fonte: Autor (2024).

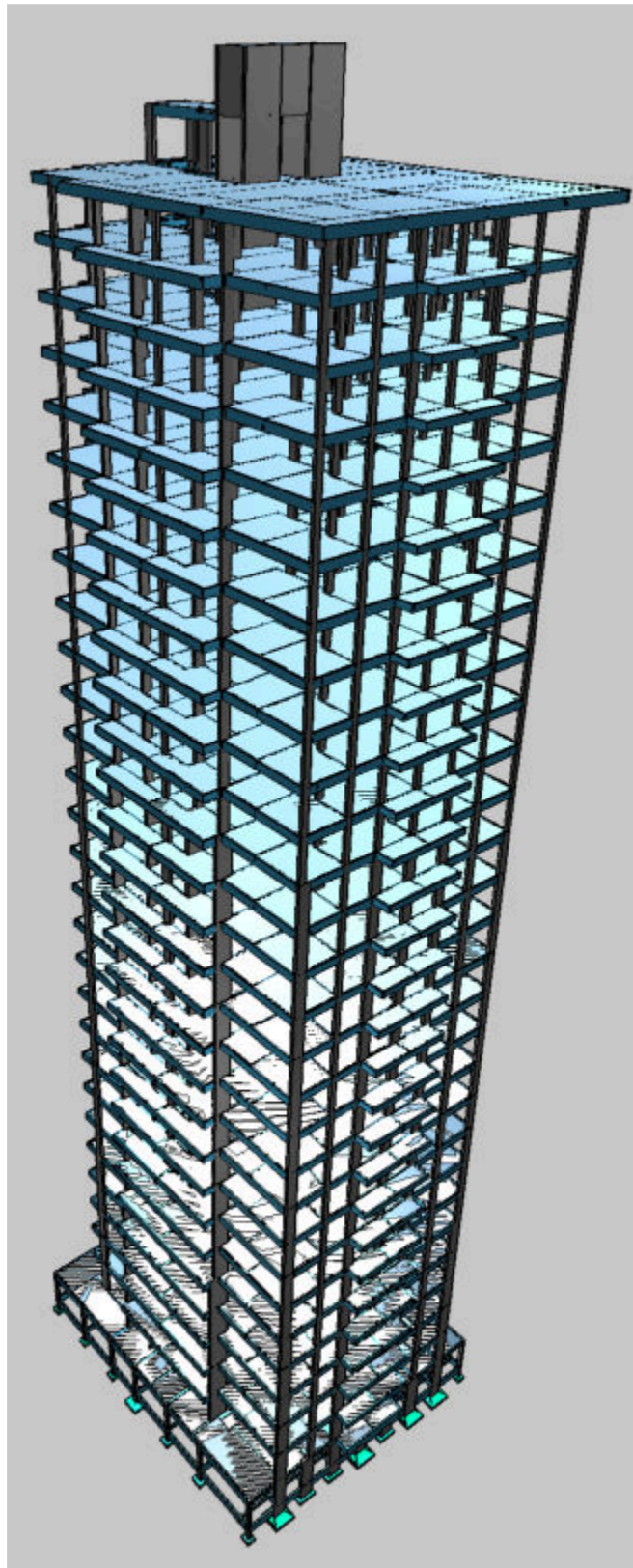
A Figura 31 apresenta os cortes esquemáticos das estruturas de 30 pavimentos. É possível observar que a edificação possui 89,60 m de altura. Além disso, é possível visualizar a vista isométrica na Figura 32.

Figura 31 - Cortes XX e YY, à esquerda e à direita, respectivamente (30 pavimentos)



Fonte: Autor (2024).

Figura 32 - Vista isométrica da edificação com 30 pavimentos



Fonte: Autor (2024).

4.2 Resultados obtidos

Inicialmente foram gerados os relatórios disponíveis no programa após analisar as duas formas de processamento: Modelo Integrado e Pórticos + Grelhas. Os relatórios estudados foram os seguintes:

- Verificação de estabilidade (Gama-Z)
- Deslocamentos horizontais (Vento)
- Análise P-Delta

Figura 33 - Relatórios gerados pelo Eberick

Análise P-Delta
 Combinações adotadas
 Deslocamentos horizontais (Vento)
 Deslocamentos horizontais (Sismo)
 Verificação de estabilidade (Gama-Z)
 Imperfeições globais
 Mensagens da análise

Cargas nas fundações
 Esforços nas fundações...

Análise dinâmica
 Forças devido ao vento
 Forças devido ao sismo

Fonte: Autor (2024).

4.2.1 Resultados do Modelo Integrado

Neste capítulo, serão apresentados os gráficos obtidos a partir do processamento Modelo Integrado, que considera a rigidez transversal à flexão das lajes na análise.

Em todos os modelos, a situação mais crítica em se tratando do coeficiente Gama-Z foi a combinação recomendada pela ABNT NBR 6118:2023: $1,3G1 + 1,4G2 + 1,4Q + 0,84V1 + (1,4 \cdot \Theta1 / \Theta1_{\text{mín}} \cdot \Psi0) \cdot D1$. Onde G1 é o peso próprio dos elementos estruturais; G2 é a carga adicional da edificação; Q é a carga acidental; V1 é a carga de vento na direção X+ e D1 é a carga de desaprumo na direção X+.

Existem as combinações que consideram as cargas horizontais na direção Y da estrutura. No entanto, estas apresentaram coeficiente Gama-Z inferior em relação à direção X e, portanto, não foram realizados gráficos para as respectivas situações. O Gráfico 1 apresenta o caso mais crítico de estabilidade global.

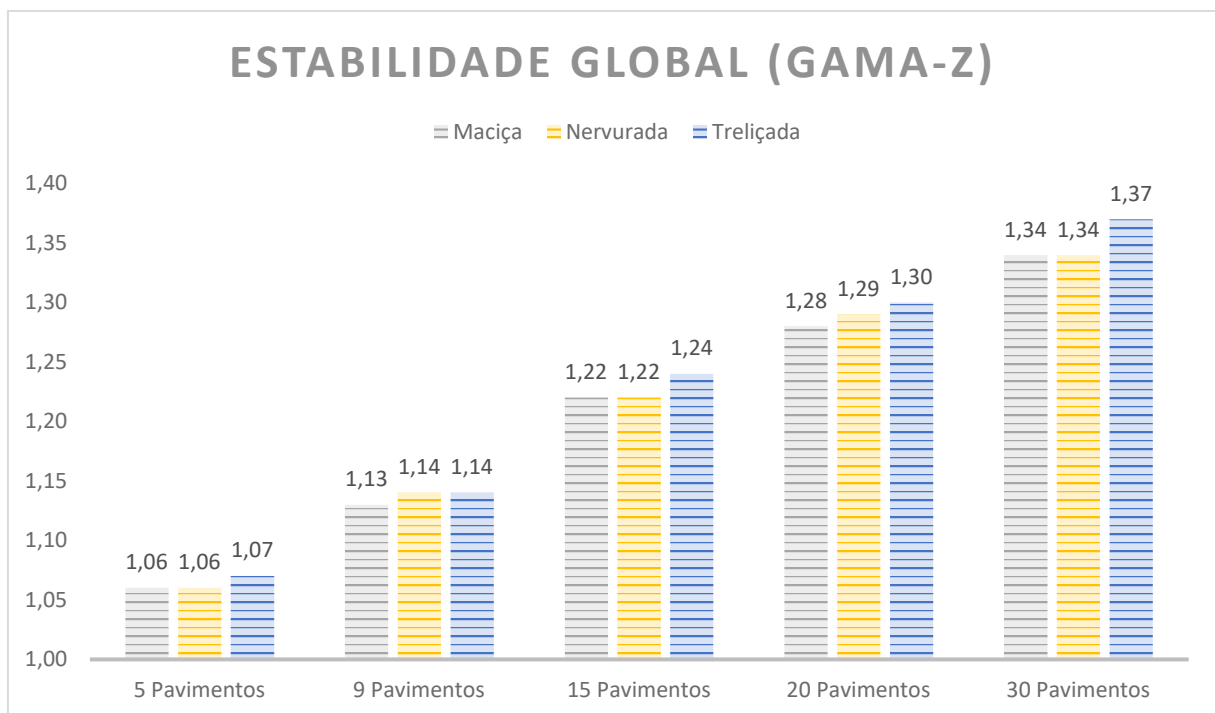
O coeficiente D1 varia de acordo com a quantidade de pavimentos da edificação. Ele é calculado de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2023, onde:

$$\theta_1 = \frac{1}{100\sqrt{H}} \quad (16)$$

$$\theta_{1, \text{mín}} = \frac{1}{300} \quad (17)$$

H corresponde à altura total da edificação. Ψ_0 corresponde a um valor para o coeficiente γ_f2 (Tabela 11.2 da ABNT NBR 6118:2023). Portanto para os modelos de 5, 9, 15, 20 e 30 pavimentos, o coeficiente de desaprumo será, respectivamente, 0,57; 0,45; 0,37; 0,32 e 0,27.

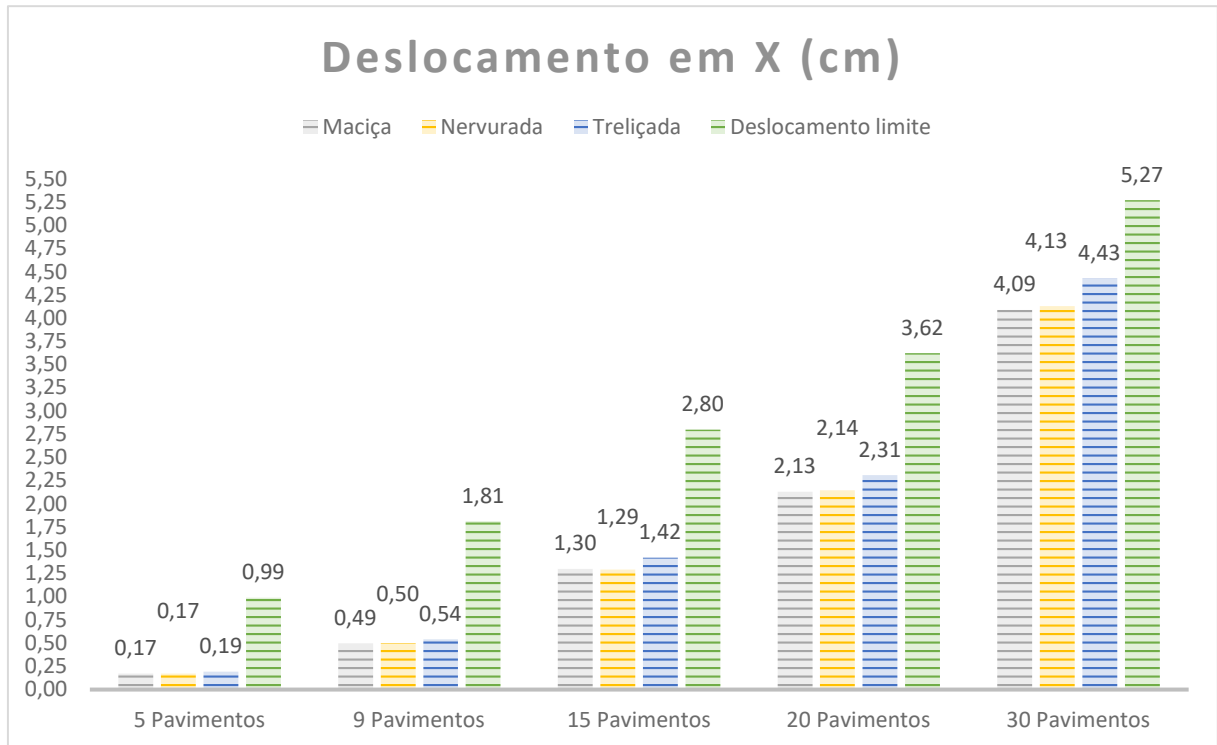
Gráfico 1 - Valores de estabilidade global (Gama-Z)



Fonte: Autor (2024).

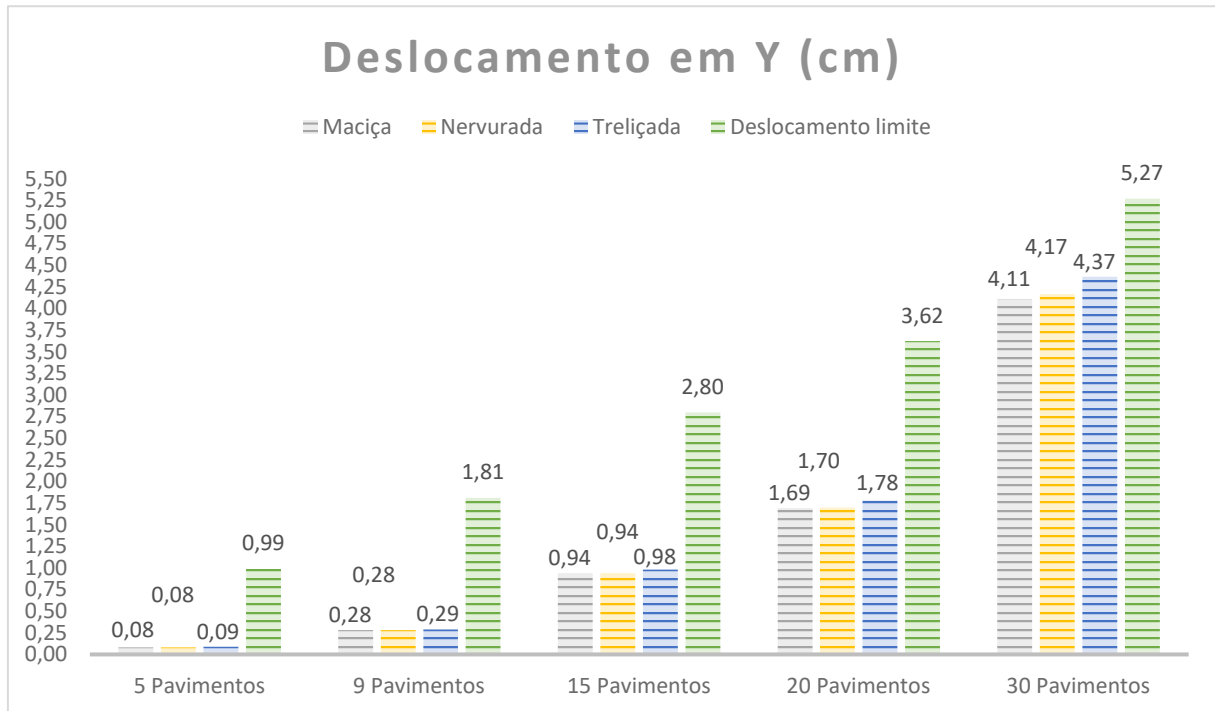
Outro relatório analisado é o deslocamento horizontal da edificação devido à ação de vento, no qual o Eberick utiliza o estado-limite de serviço para determinar o quanto a edificação se desloca em ambas as direções (X e Y). Ao final, para atender ao item 11.7.2 da norma ABNT NBR 6118:2023, o deslocamento característico é multiplicado pelo coeficiente Ψ_1 (combinações frequentes), que tem valor igual a 0,3.

Gráfico 2 - Deslocamento da estrutura no eixo X (ELS - Carga de vento)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 3 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (ELS - Carga de vento)



Fonte: Autor (2024).

A ABNT NBR 6118:2023 define, no item 15.7.1, que na análise estrutural de estruturas de nós móveis, devem ser obrigatoriamente considerados os efeitos da NLG e NLF, e no dimensionamento devem ser obrigatoriamente considerados os efeitos globais e locais de 2ª ordem. Nesse sentido, em todas as estruturas, com exceção dos modelos 1.1, 2.1 e 3.1, é necessária uma análise em 2ª ordem. Apesar de não ser obrigatório este tipo de análise nos modelos de 5 pavimentos, também foram efetuadas as análises em 2ª ordem nestas edificações.

A análise em segunda ordem do programa utilizado (AltoQi Eberick) é feita por meio do processo P-Delta. O procedimento se baseia no estudo do equilíbrio da estrutura deformada após a análise de primeira ordem. Com os deslocamentos obtidos, são aplicadas cargas horizontais adicionais H em cada pilar do pórtico, em função do deslocamento horizontal relativo e da carga axial (MUÑOZ, 2018):

$$H = \frac{N \times \Delta}{L} \quad (18)$$

Onde:

H é a carga adicional aplicada em cada pilar do pórtico;

N é a carga vertical;

Δ é o deslocamento horizontal;

L é a altura do andar.

A princípio, a aplicação do processo P-Delta deveria ser feita separadamente para cada combinação de carregamentos. Como isso aumentaria muito o número total de iterações necessárias no processamento da estrutura e, conseqüentemente, o tempo de processamento, o Eberick adota uma simplificação, a favor da segurança (ALTOQI, 2023).

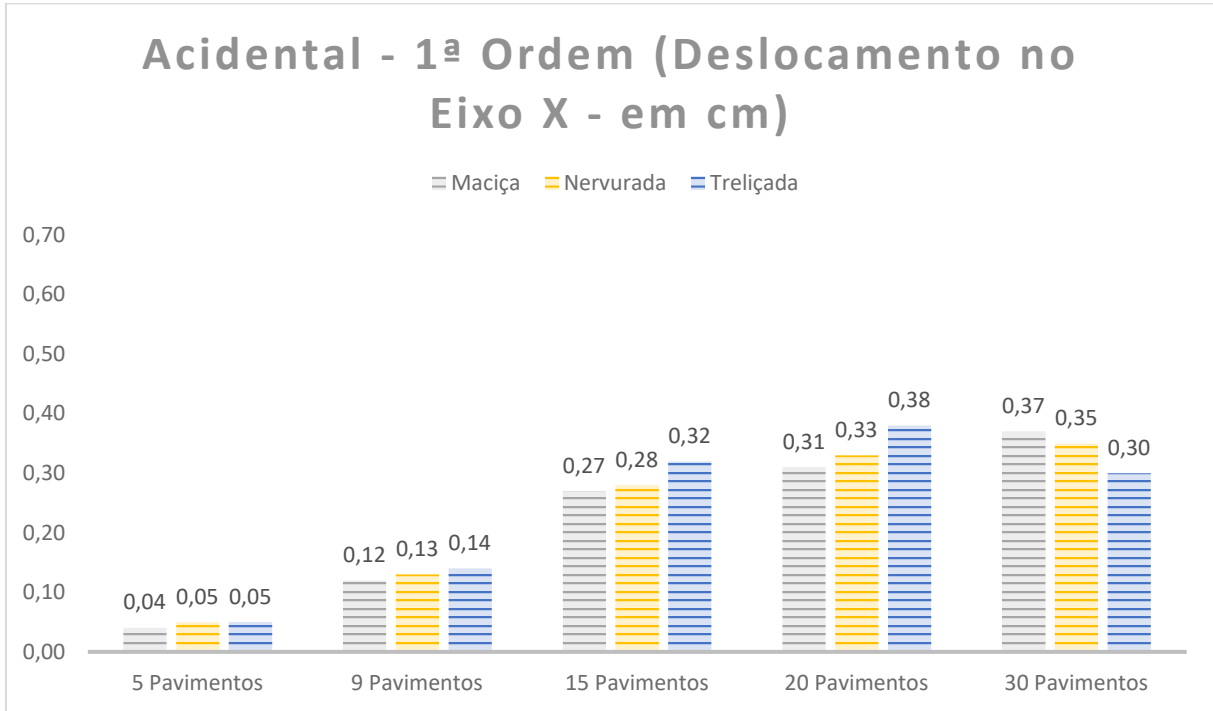
Além disso, AltoQi (2023) afirma que ao invés de combinar as ações e calcular os efeitos de 2ª ordem sobre as combinações, o programa executa a seguinte seqüência: é efetuada uma análise estática linear de 1ª ordem da estrutura; Em seguida, para cada barra vertical (pilar) do pórtico, são aplicadas cargas fictícias adicionais, conforme a Equação (18).

Após a última iteração, caso haja convergência, obtêm-se os deslocamentos finais. Com base nestes deslocamentos serão calculados os esforços internos para o dimensionamento (MUÑOZ, 2018). Após o processamento de todos os modelos estudados, as estruturas convergiram e foi possível gerar os relatórios de análise P-Delta. Como já dito, o Eberick faz uma simplificação a favor da segurança e, desta forma, a análise P-Delta é feita considerando separadamente 3 grupos de carga: Acidental, Vento e Desaprumo.

O Gráfico 4 e o Gráfico 5 apresentam os resultados de deslocamento no topo das edificações para uma análise em segunda ordem considerando as cargas acidentais da edificação, que apresentou maiores deslocamentos e variações (de uma análise em 1ª ordem para 1ª + 2ª ordem) no eixo X. O Gráfico 4 apresenta os resultados levando em conta os esforços de 1ª ordem, quando a estrutura está indeformada. O Gráfico 5 inclui também os esforços de 2ª ordem (ALTOQI, 2024). Os deslocamentos no eixo Y estão representados no Gráfico 6 e no Gráfico 7. Em

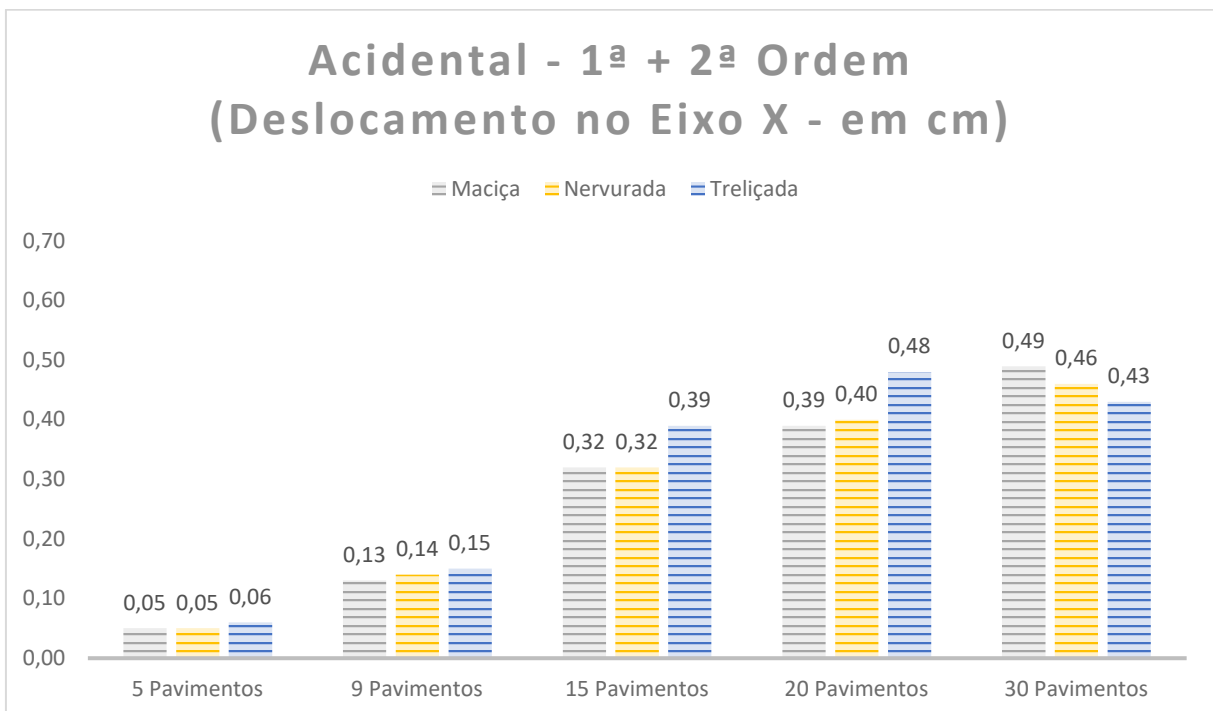
conformidade com a ABNT NBR 6120:2019, a carga acidental utilizada foi de 1,5 kN/m², que é o recomendado para ambientes residenciais.

Gráfico 4 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas acidentais – 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 5 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas acidentais – 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 5,31%, 5,24% e 5,88% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

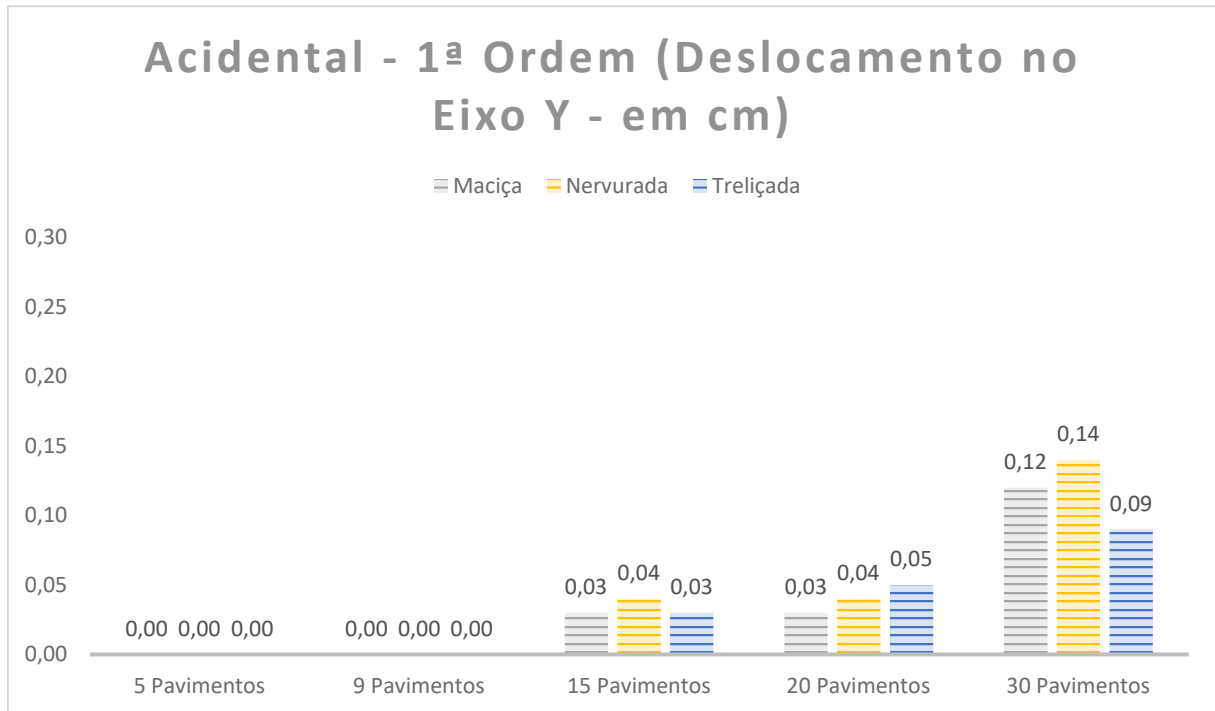
Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 10,58%, 10,57% e 11,97% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 17,15%, 16,78% e 19,63% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 23,20%, 22,74% e 26,18% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

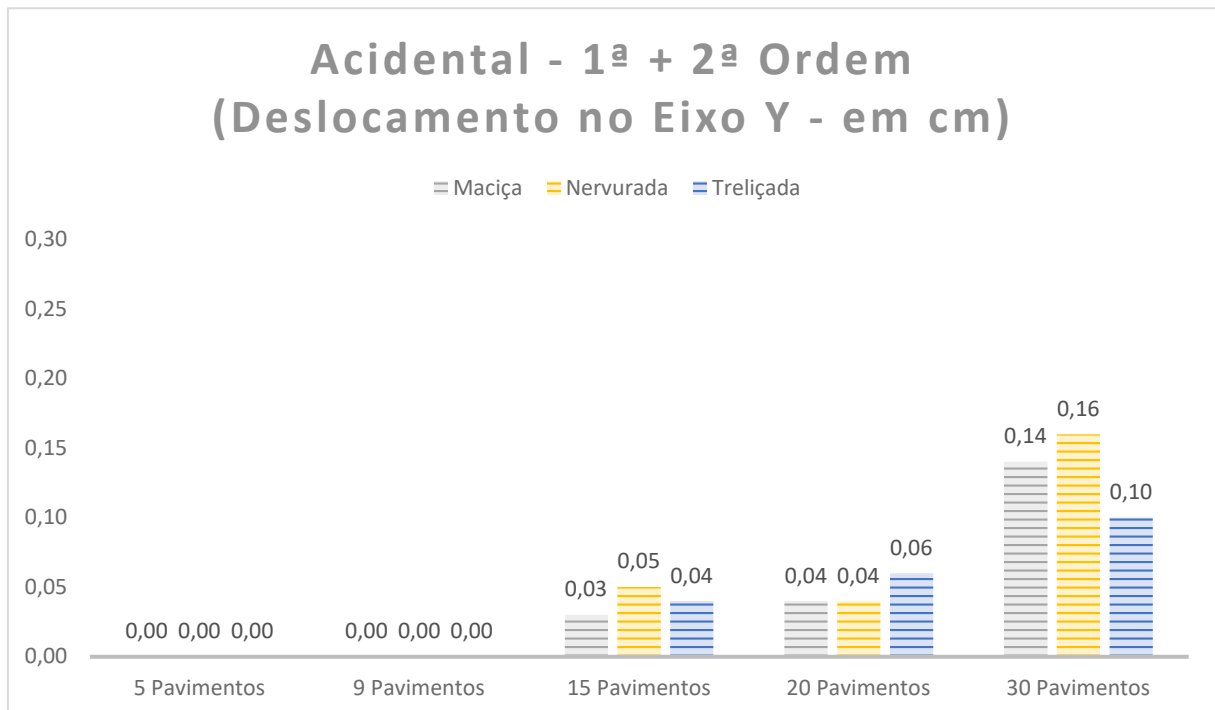
Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 30,18%, 29,62% e 39,45% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Gráfico 6 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas acidentais – 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 7 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas acidentais – 1ª + 2ª ordem)



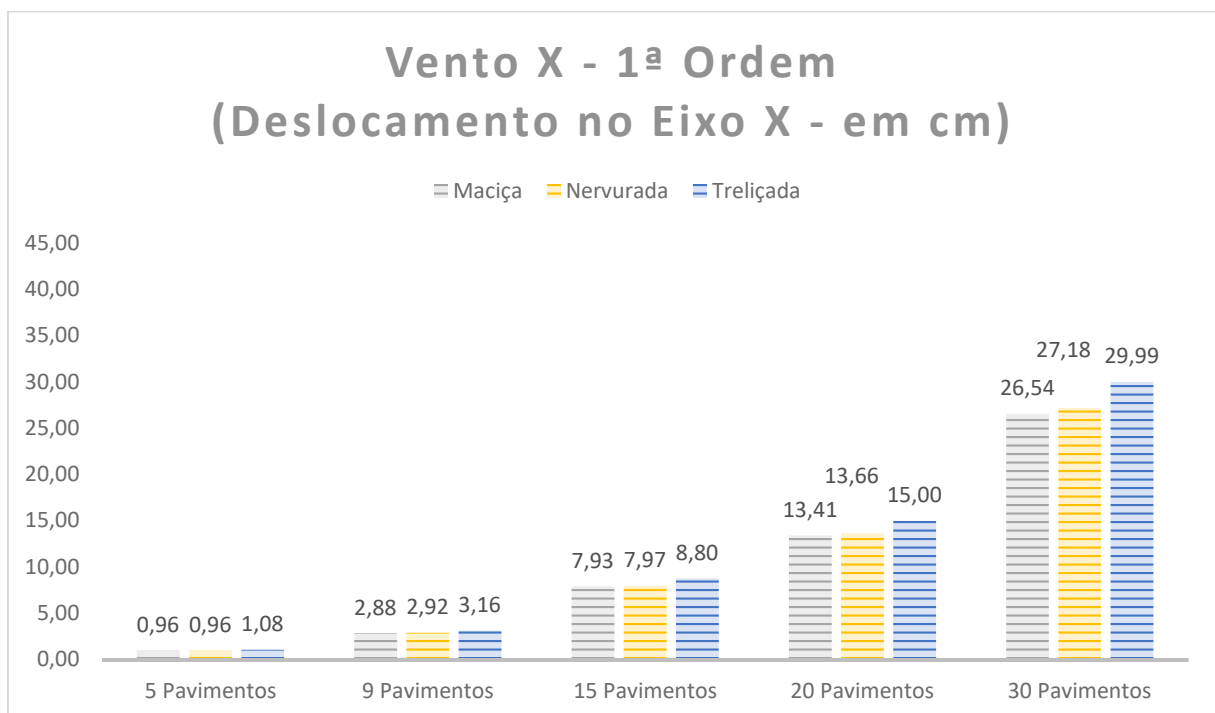
Fonte: Autor (2024).

A estrutura de 5 e 9 pavimentos apresentaram deslocamentos nulos nas análises. Tal fato tem razão nos baixos valores de γ_z da edificação no sentido Y das

combinações. Nos dois casos e para todas as lajes estudadas os valores foram inferiores a 1,05. Nas demais situações, as variações apresentadas pelos modelos foram pequenas ao comparar o Gráfico 6 e o Gráfico 7. As edificações não apresentam variações maiores que 0,02 cm e, portanto, não são significativas para a estrutura.

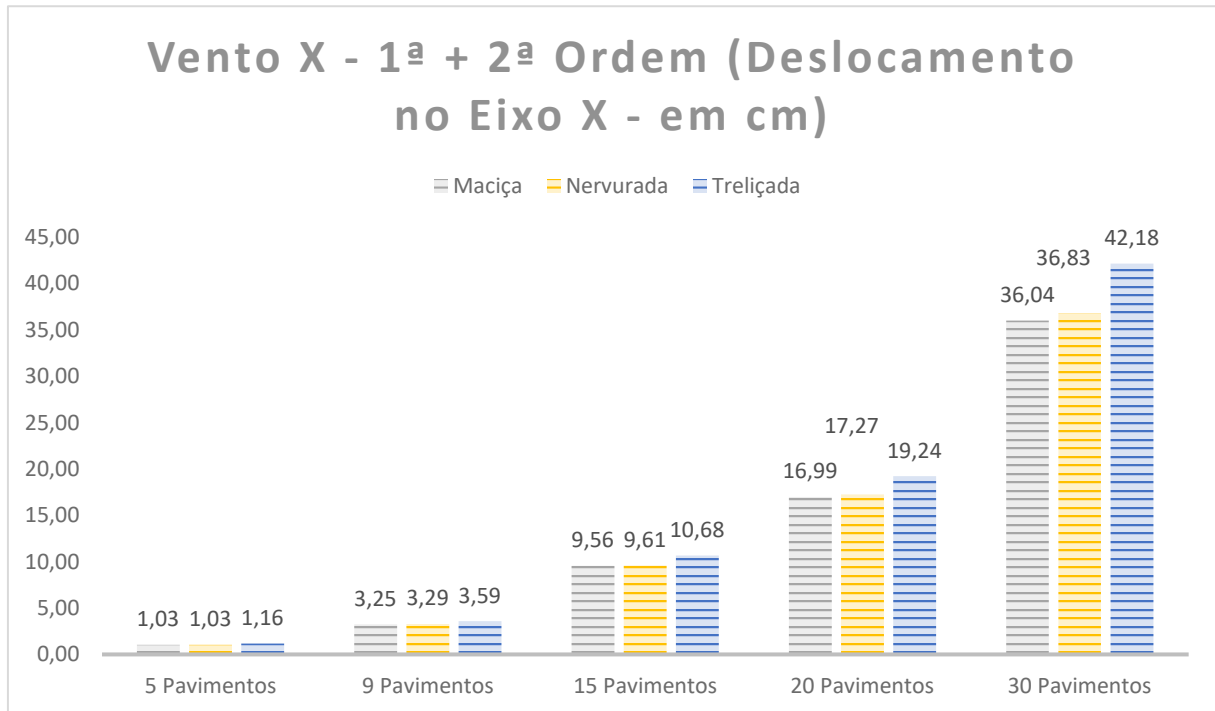
Do mesmo modo que nos gráficos anteriores, o Gráfico 8, Gráfico 9, Gráfico 10 e Gráfico 11 evidenciam as edificações somente com os efeitos de 1ª ordem atuando e, posteriormente, os efeitos de 1ª e 2ª ordem em conjunto. O Gráfico 8 e o Gráfico 9 apresentam os resultados da análise P-Delta considerando as cargas de vento no eixo X; o Gráfico 10 e o Gráfico 11 representam os deslocamentos no topo da edificação no eixo Y considerando as cargas de vento.

Gráfico 8 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de vento em X - 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 9 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de vento em X - 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 6,99%, 6,97% e 7,65% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

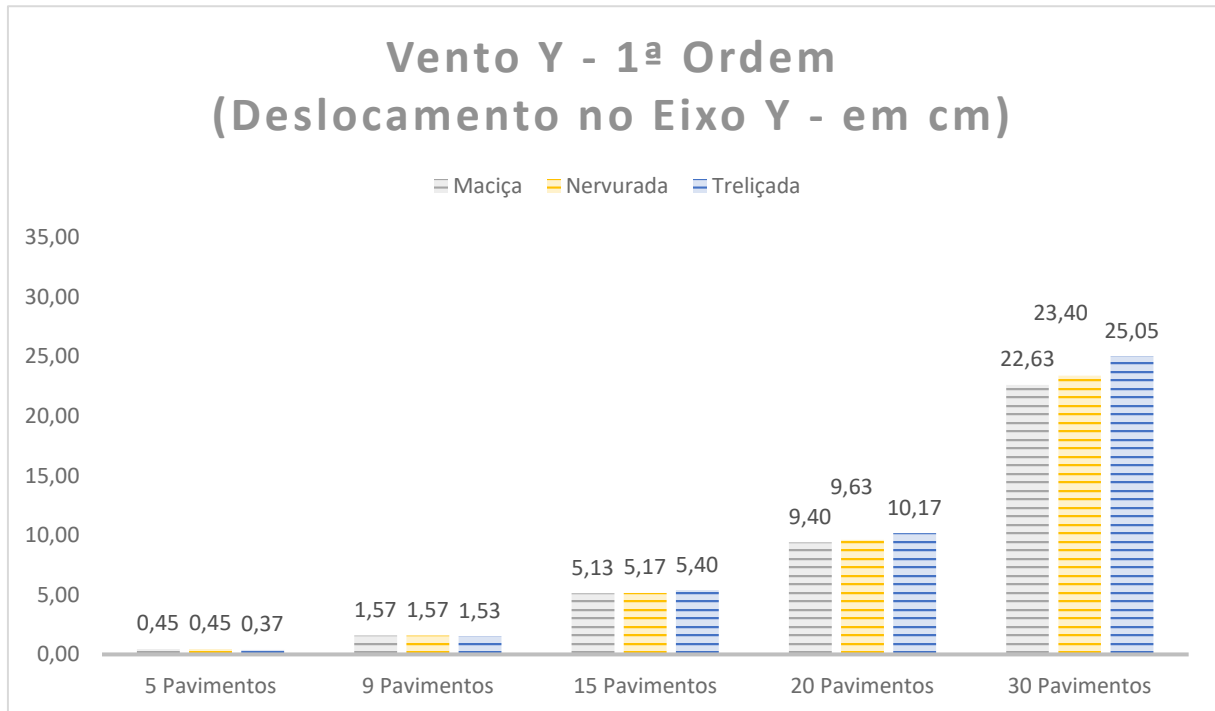
Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 12,79%, 12,94% e 13,52% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 20,62%, 20,54% e 21,46% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 26,78%, 26,43% e 28,27% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

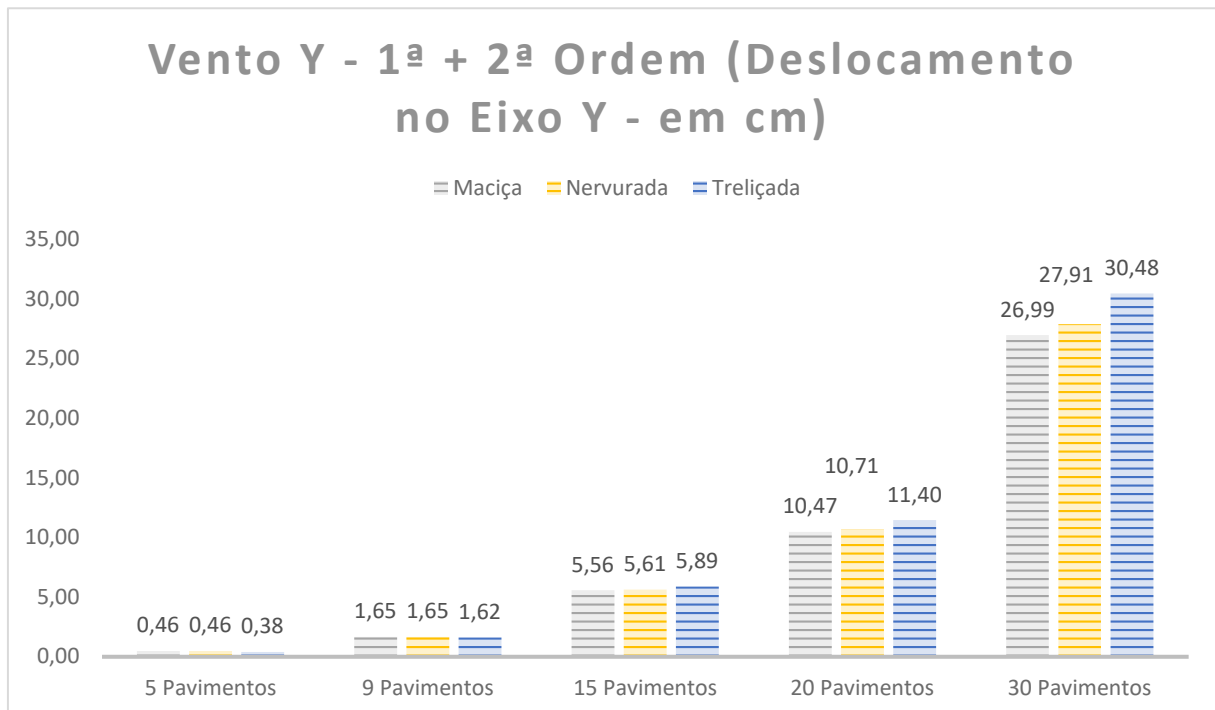
Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 35,82%, 35,59% e 40,70% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Gráfico 10 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de vento em Y - 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 11 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de vento em Y - 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 2,81%, 2,81% e 3,42% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 4,93%, 4,89% e 5,68% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

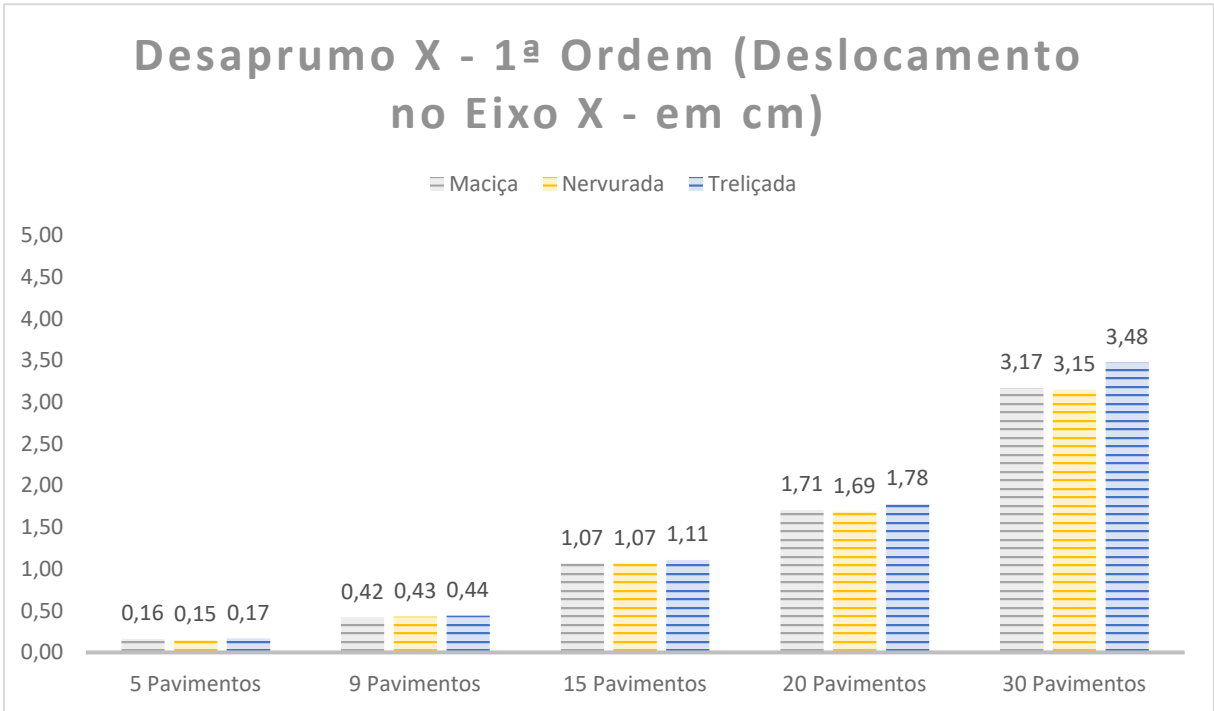
Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 8,51%, 8,44% e 9,02% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 11,40%, 11,27% e 12,15% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 19,27%, 19,30% e 21,70% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

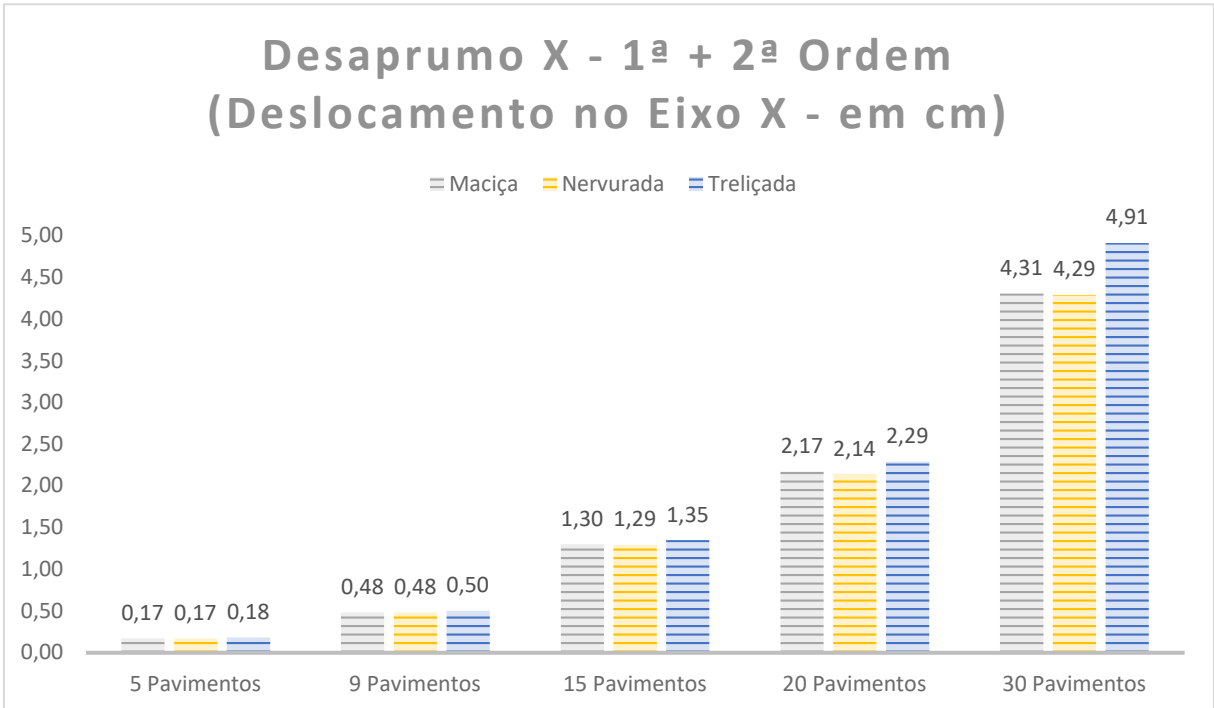
Outra carga horizontal importante é o desaprumo, representado pelo Gráfico 12 e pelo Gráfico 13, no eixo X. Por outro lado, o Gráfico 14 e o Gráfico 15 apresentam os resultados da análise P-Delta considerando as cargas de desaprumo atuando no eixo Y da edificação.

Gráfico 12 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de desaprumo em X - 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 13 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de desaprumo em X - 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 7,52%, 7,51% e 8,44% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

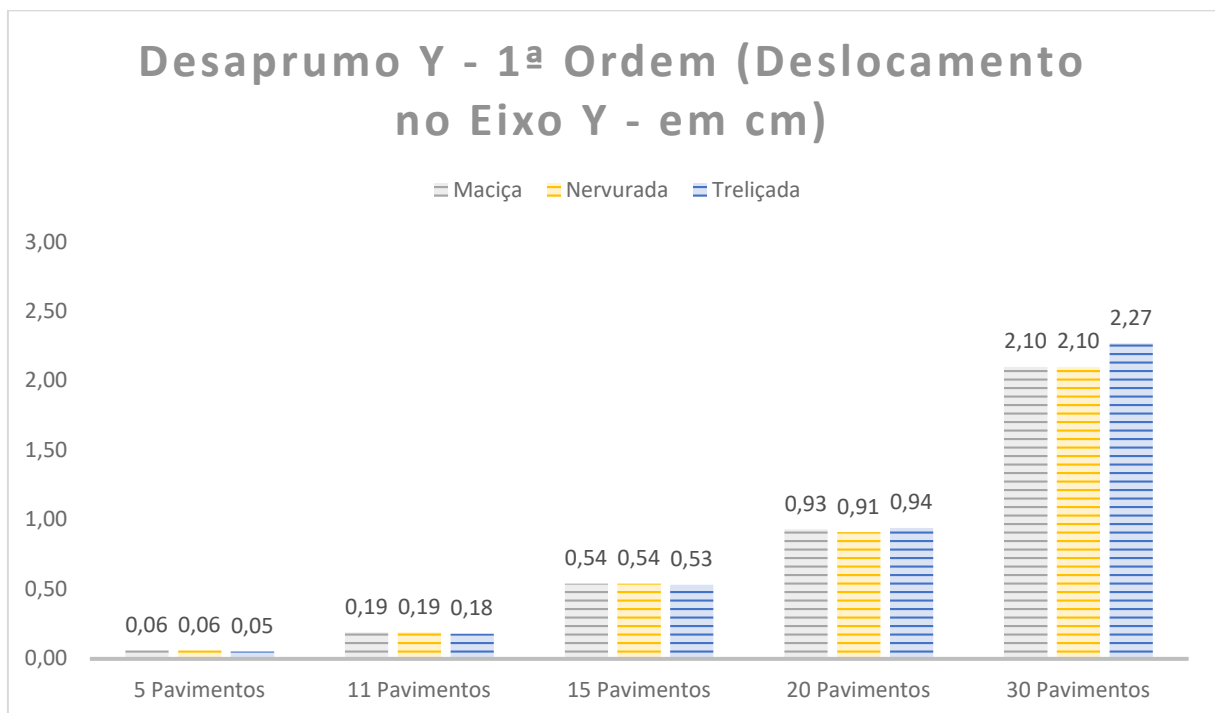
Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 13,37%, 13,51% e 14,27% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 21,06%, 20,97% e 21,99% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 27,26%, 26,90% e 28,81% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

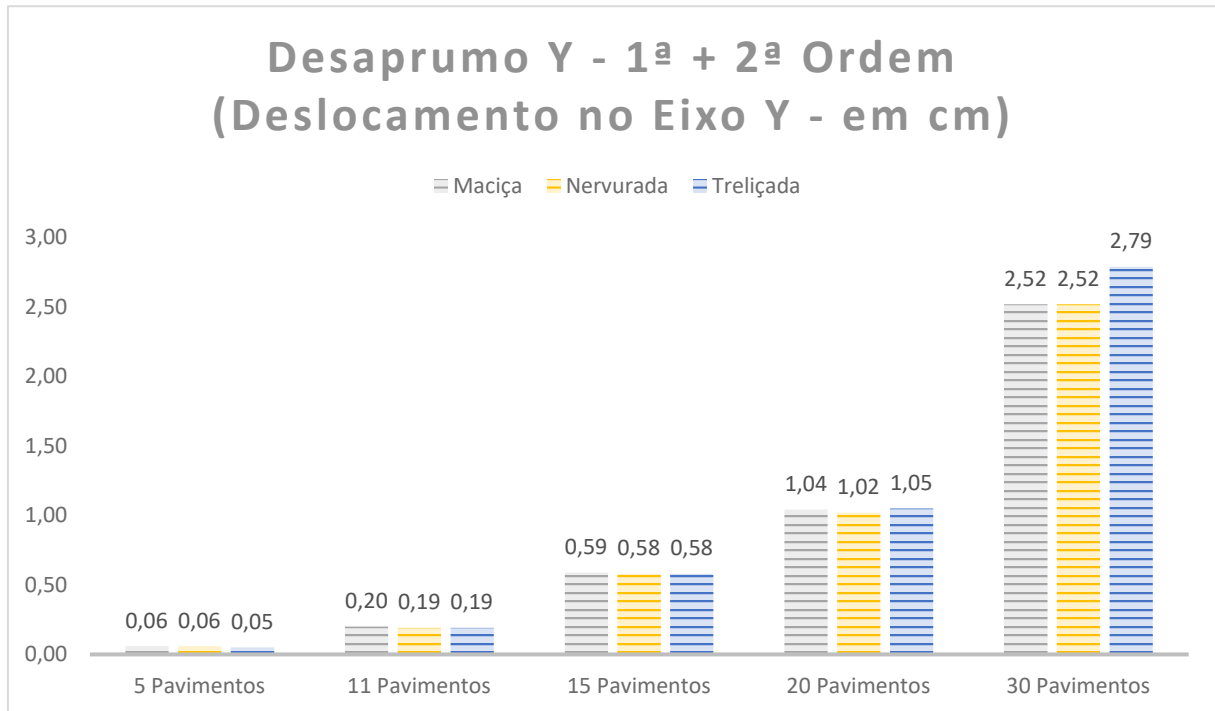
Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 36,24%, 36,00% e 41,22% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Gráfico 14 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de desaprumo em Y - 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 15 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de desaprumo em Y - 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 2,90%, 2,90% e 3,42% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 5,19%, 5,12% e 5,82% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 8,95%, 8,81% e 9,34% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 12,02%, 11,78% e 12,63% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

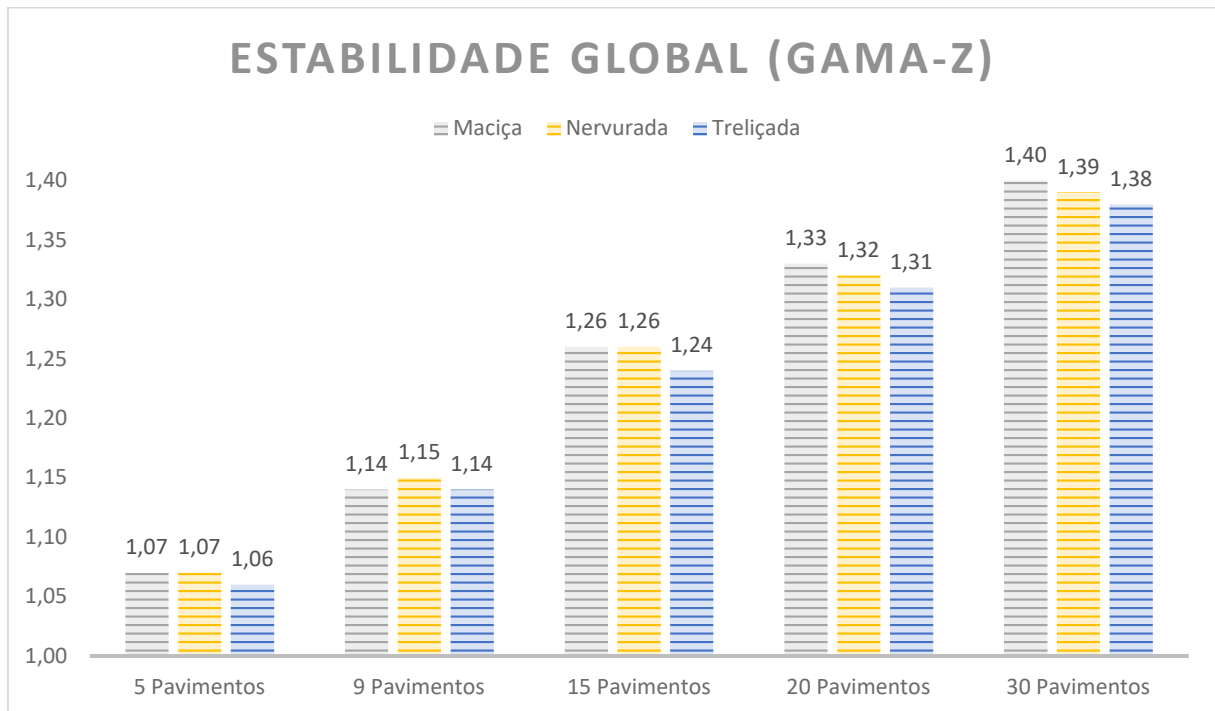
Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 20,24%, 20,09% e 22,82% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

4.2.2 Resultados do Modelo de Pórticos + Grelhas

Neste capítulo serão apresentados os gráficos obtidos a partir dos relatórios do programa para o processamento de Pórticos + Grelhas, que considera as lajes como um diafragma rígido.

Semelhante à situação anterior de processamento, o caso crítico do coeficiente Gama-Z foi com a combinação $1,3G1 + 1,4G2 + 1,4Q + 0,84V1 + (1,4 \cdot \theta1 / \theta1\text{mín} \cdot \Psi0) \cdot D1$. Onde G1 é o peso próprio dos elementos estruturais; G2 é a carga adicional da edificação; Q é a carga acidental; V1 é a carga de vento na direção X+ e D1 é a carga de desaprumo na direção X+.

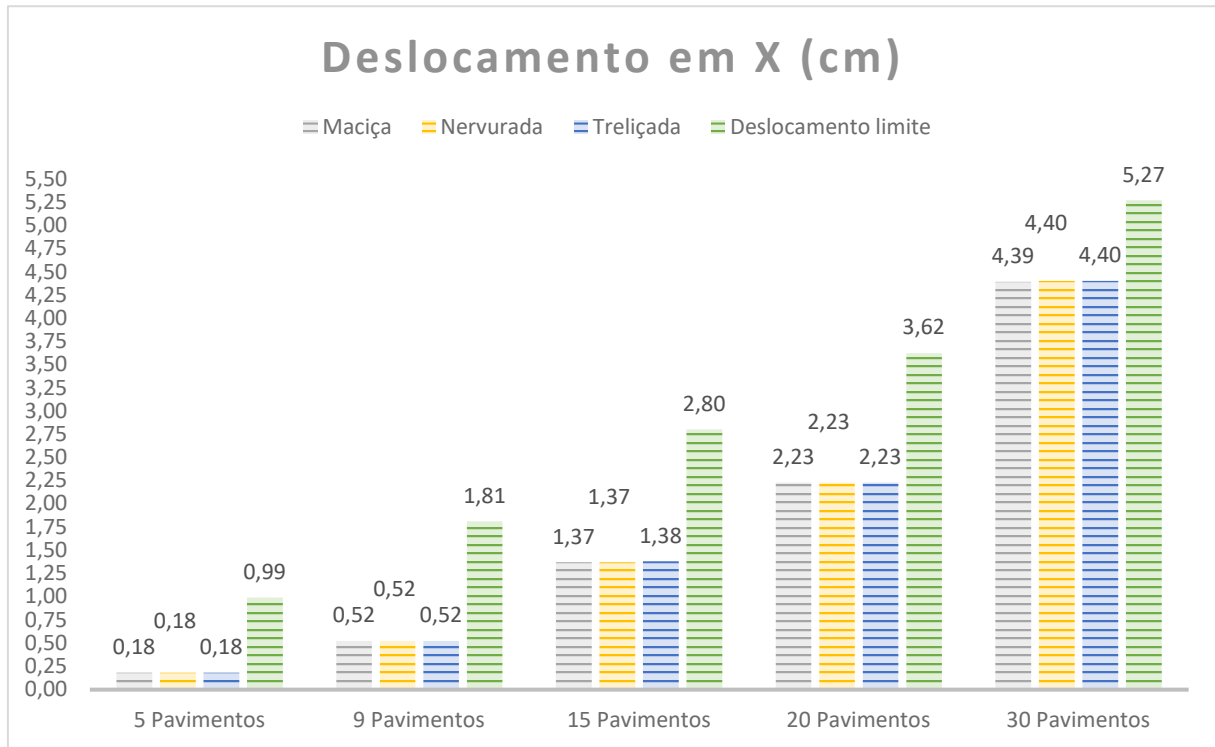
Gráfico 16 - Valores de estabilidade global (Gama-Z)



Fonte: Autor (2024).

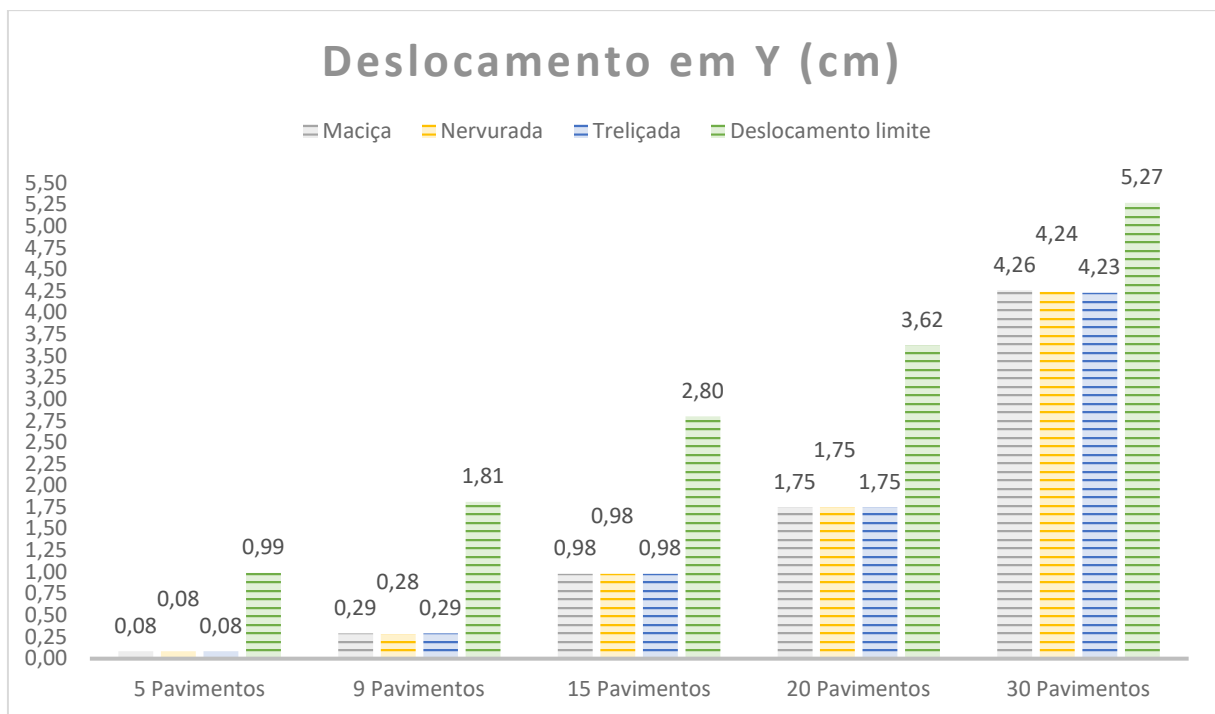
Outro relatório analisado é o deslocamento horizontal da edificação devido à ação de vento, no qual o Eberick utiliza o estado-limite de serviço para determinar o quanto a edificação se desloca em ambas as direções (X e Y).

Gráfico 17 - Deslocamento da estrutura no eixo X (ELS - Carga de vento)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 18 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (ELS - Carga de vento)

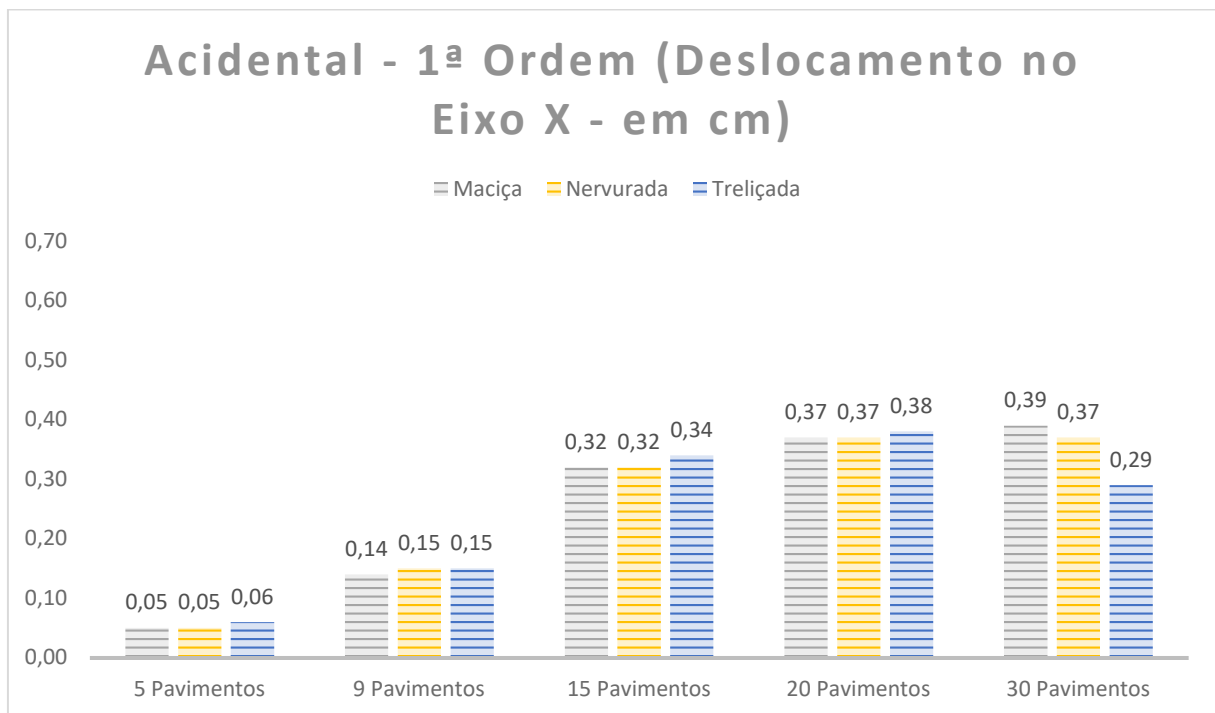


Fonte: Autor (2024).

Como exposto no Capítulo 4.2.1, a análise em segunda ordem do Eberick é feita pelo processo P-Delta, considerando separadamente 3 grupos de carga: Acidental, Vento e Desaprumo.

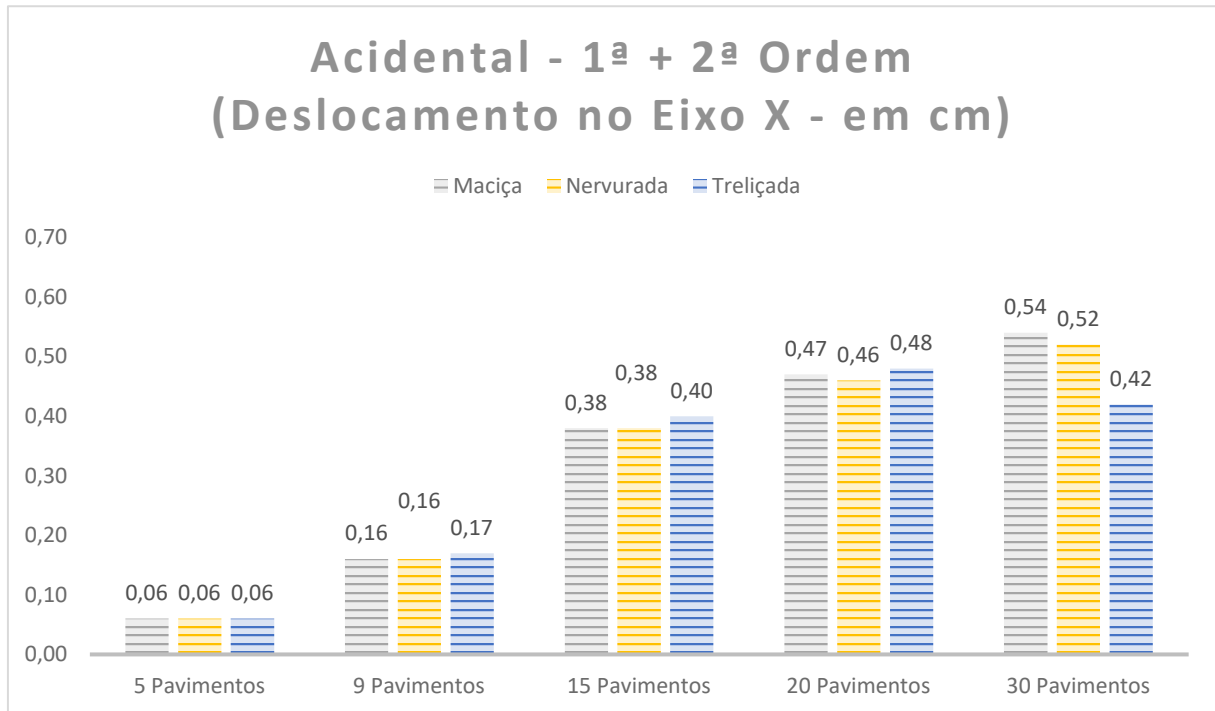
O Gráfico 19 e o Gráfico 20 apresentam os resultados de deslocamento no topo das edificações para uma análise em segunda ordem considerando as cargas acidentais da edificação, que teve a pior situação no sentido do eixo X. O Gráfico 19 apresenta os resultados levando em conta os esforços de 1ª ordem, quando a estrutura está indeformada. O Gráfico 20 inclui também os esforços de 2ª ordem (ALTOQI, 2024). Os deslocamentos no eixo Y estão representados no Gráfico 21 e no Gráfico 22. Em conformidade com a ABNT NBR 6120:2019, a carga acidental utilizada foi de 1,5 kN/m², que é o recomendado para ambientes residenciais.

Gráfico 19 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas acidentais – 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 20 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas acidentais – 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 5,68%, 5,62% e 5,33% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

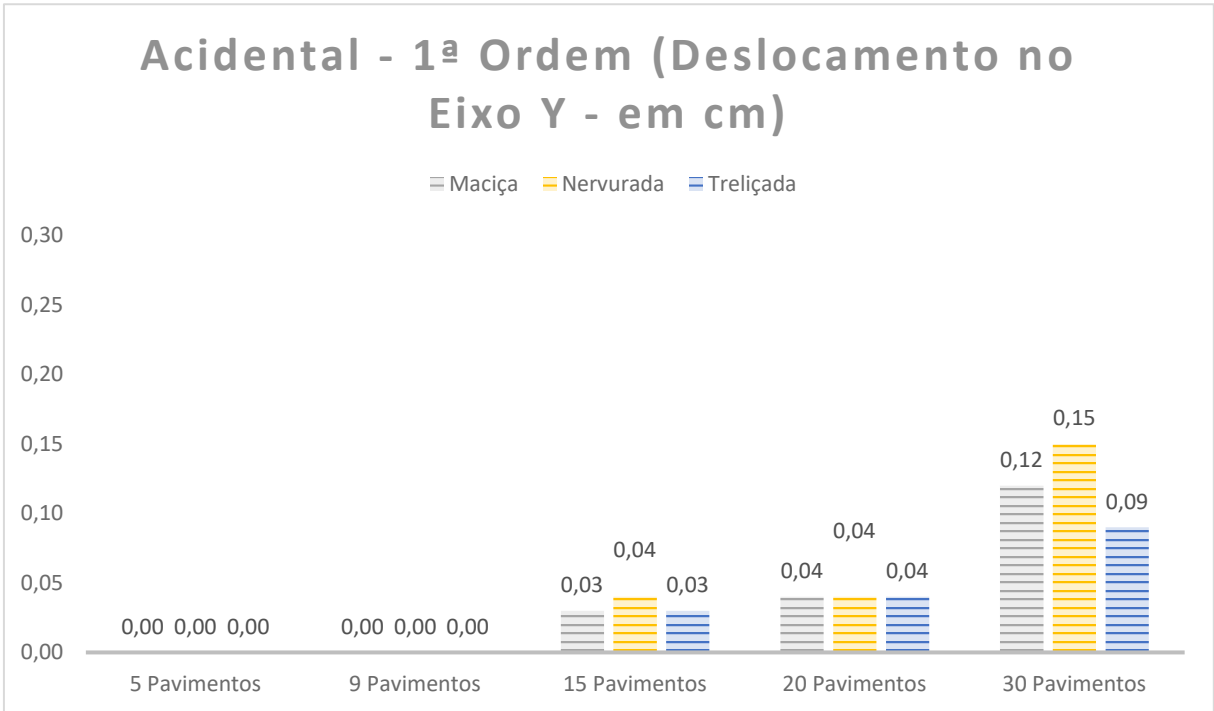
Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 11,63%, 11,65% e 10,93% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 19,71%, 19,28% e 18,26% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 26,90%, 25,82% e 25,67% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

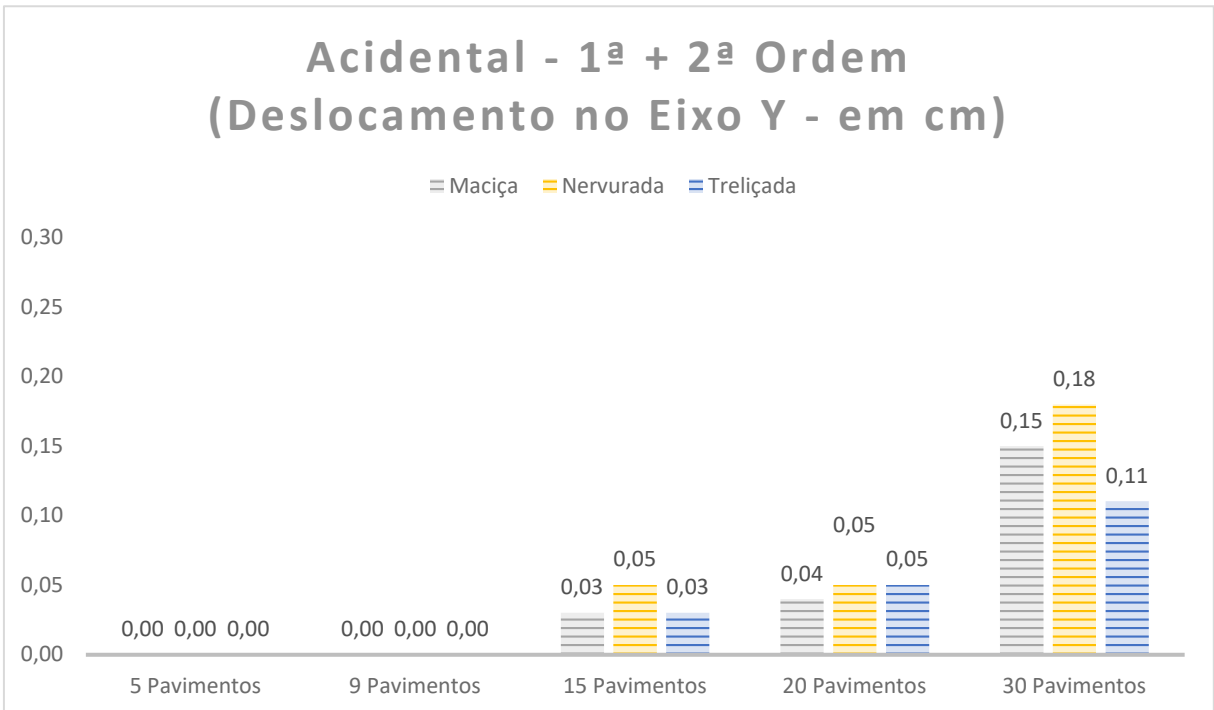
Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 37,49%, 35,22% e 39,03% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Gráfico 21 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas acidentais – 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 22 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas acidentais – 1ª + 2ª ordem)

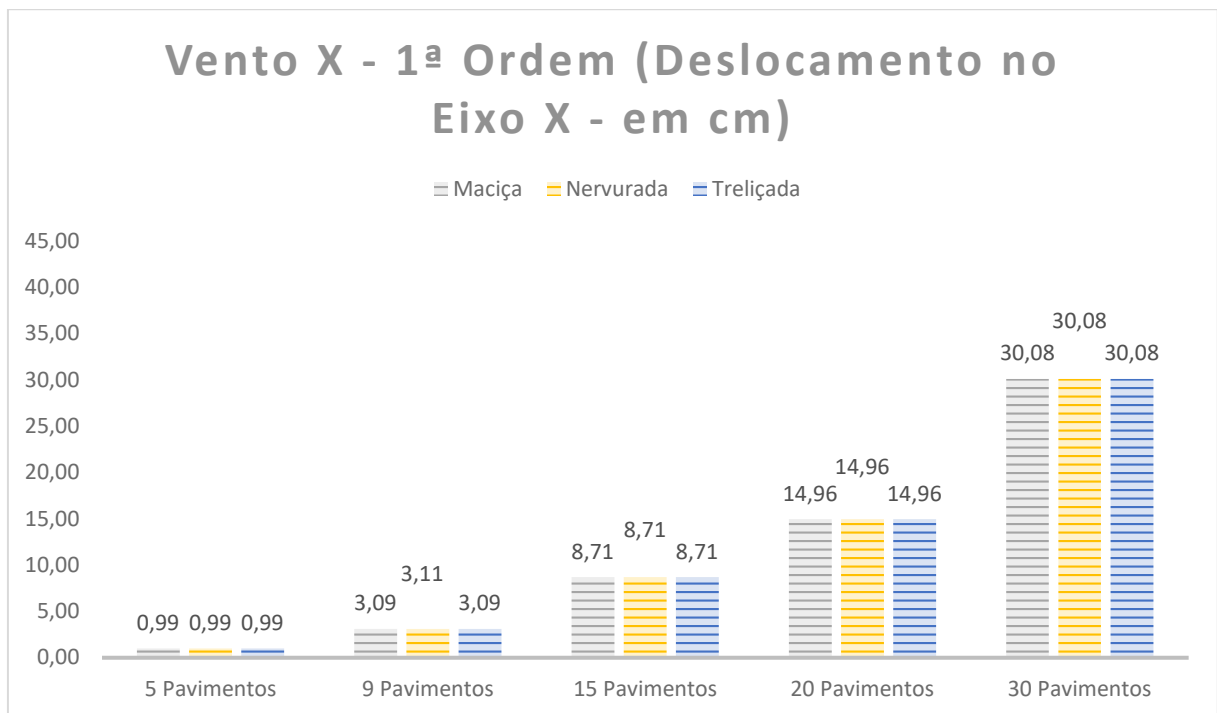


Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 e 9 pavimentos, os deslocamentos foram nulos. Nas demais situações, as variações apresentadas pelos modelos foram pequenas, inferiores à 0,03 cm e, portanto, não são significativas para a estrutura.

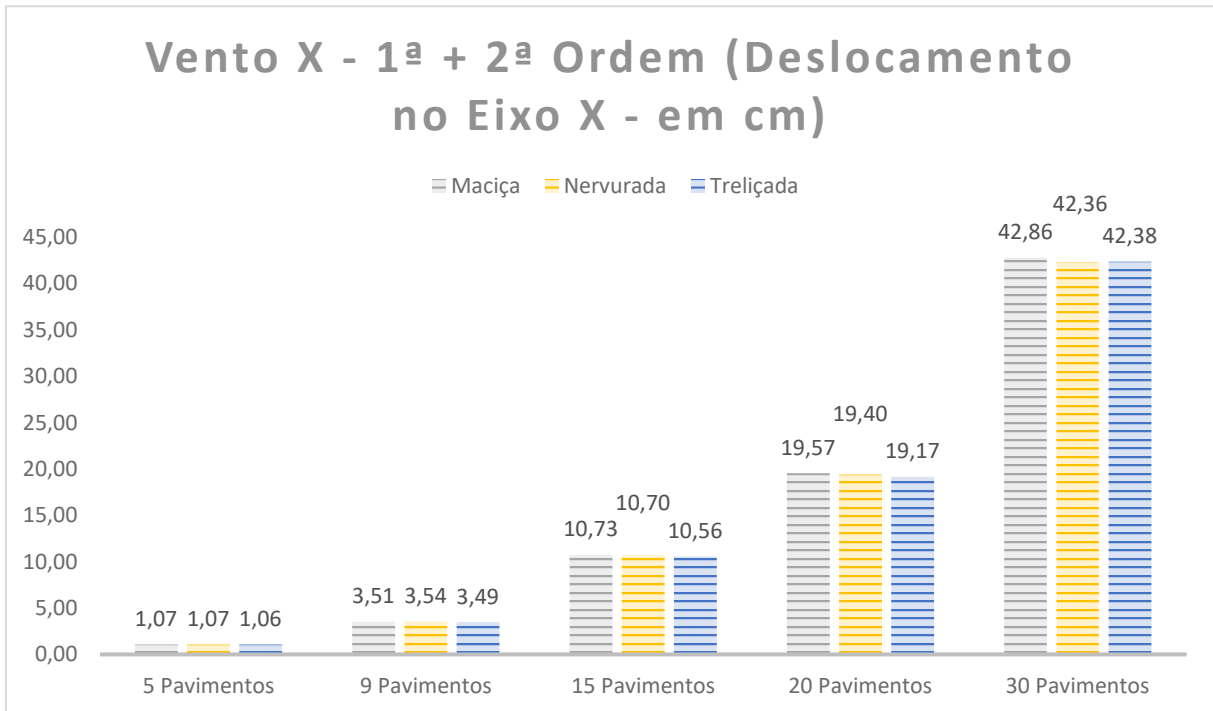
Já o Gráfico 23 e o Gráfico 24 apresentam os resultados da análise P-Delta considerando as cargas de vento no eixo X; o Gráfico 25 e o Gráfico 26 representam os deslocamentos no topo da edificação no eixo Y.

Gráfico 23 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de vento em X - 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 24 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de vento em X - 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 7,24%, 7,23% e 6,89% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

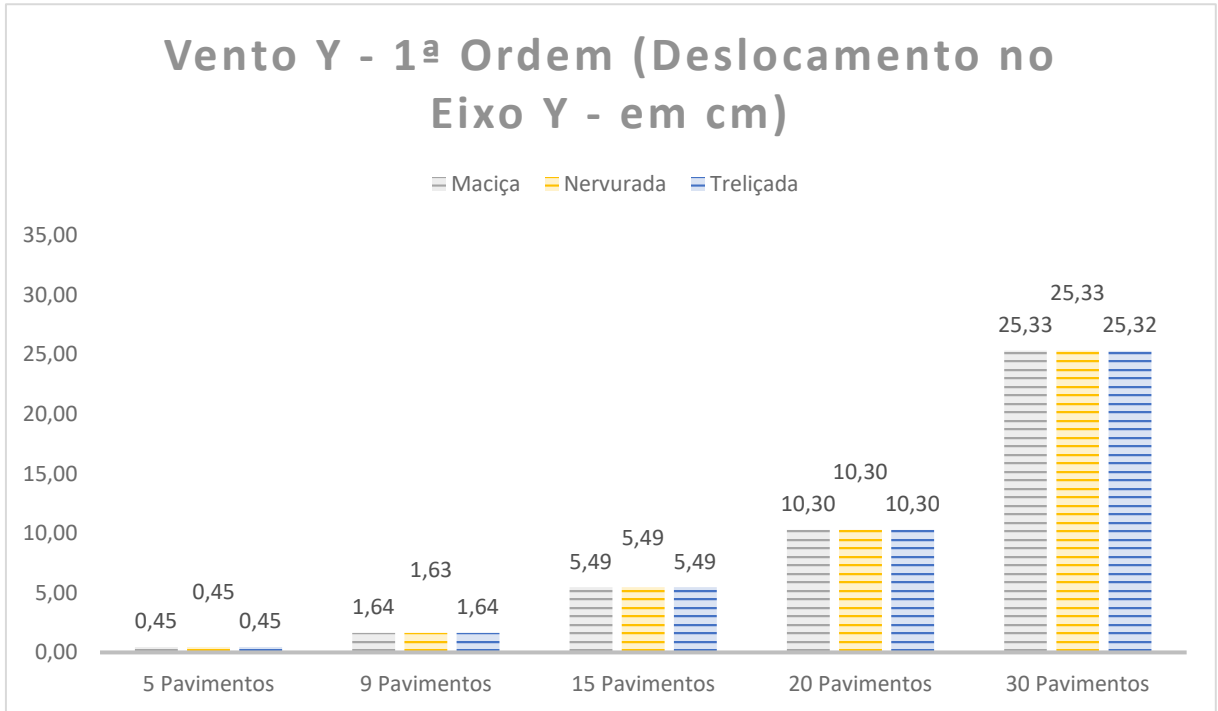
Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 13,81%, 13,91% e 13,10% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 23,17%, 22,86% e 21,24% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 30,89%, 29,74% e 28,22% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

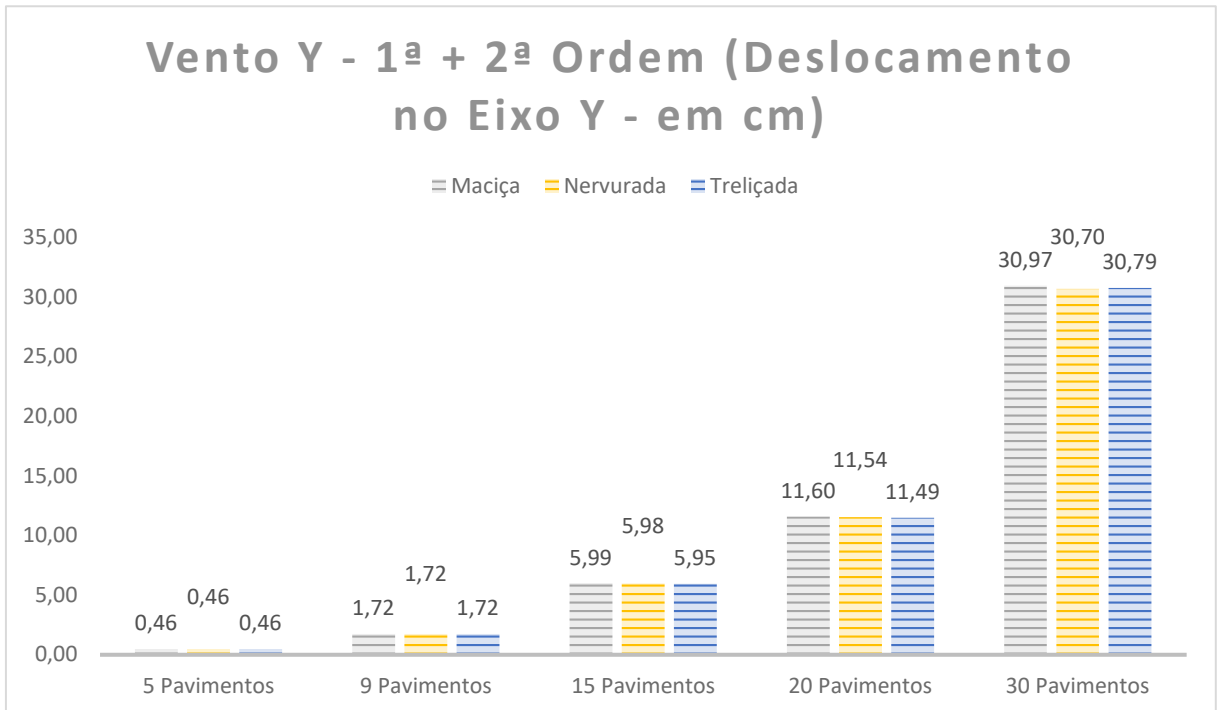
Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 42,58%, 40,92% e 40,99% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Gráfico 25 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de vento em Y - 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 26 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de vento em Y - 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 2,84%, 2,84% e 2,72% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 5,14%, 5,09% e 4,91% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

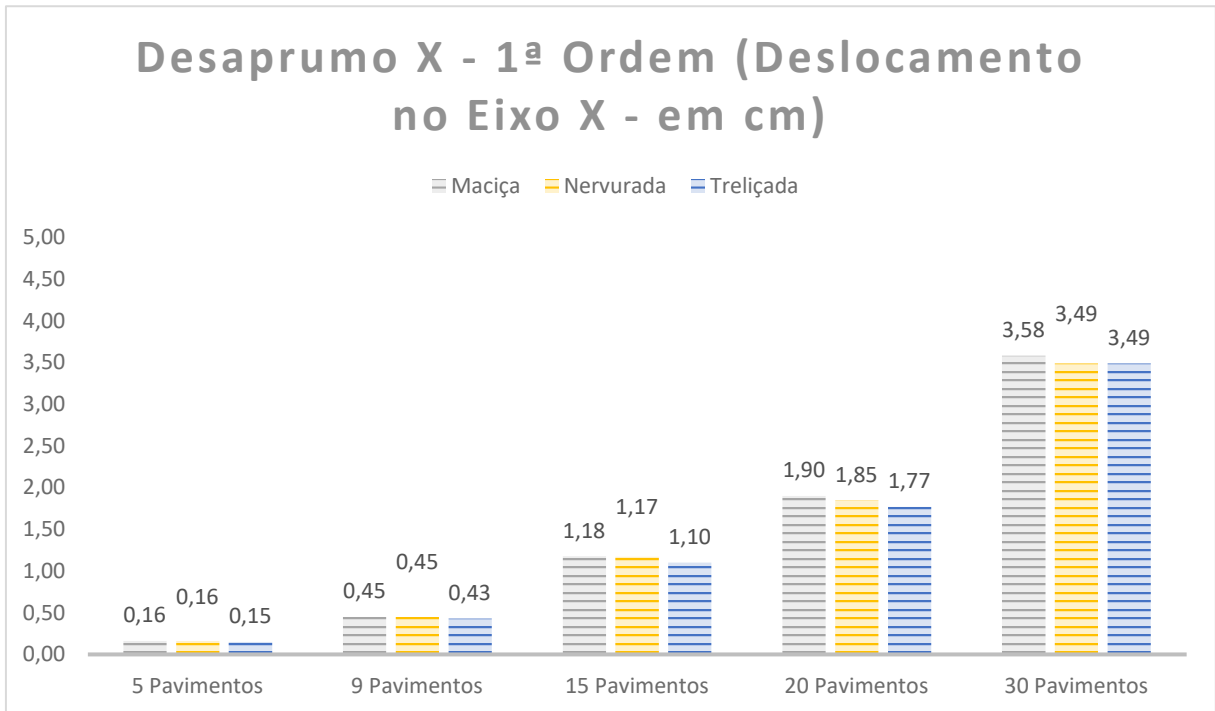
Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 9,19%, 9,00% e 8,45% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 12,67%, 12,12% e 11,61% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 22,32%, 21,22% e 21,59% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

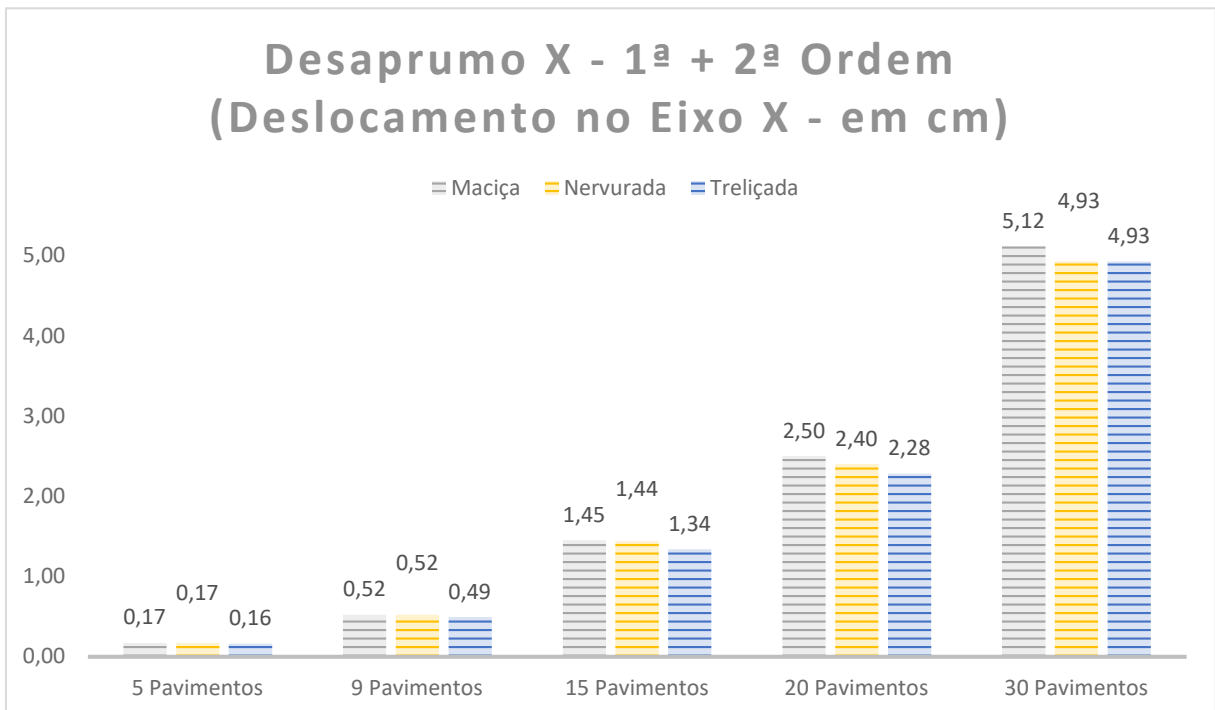
Outra carga horizontal analisada foi o desaprumo, representada pelo Gráfico 27 e pelo Gráfico 28, no eixo X. O Gráfico 29 e o Gráfico 30 apresentam os resultados da análise P-Delta considerando as cargas de desaprumo atuando no eixo Y da edificação.

Gráfico 27 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de desaprumo em X - 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 28 - Deslocamento da estrutura no eixo X (Cargas de desaprumo em X - 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 7,76%, 7,75% e 7,40% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

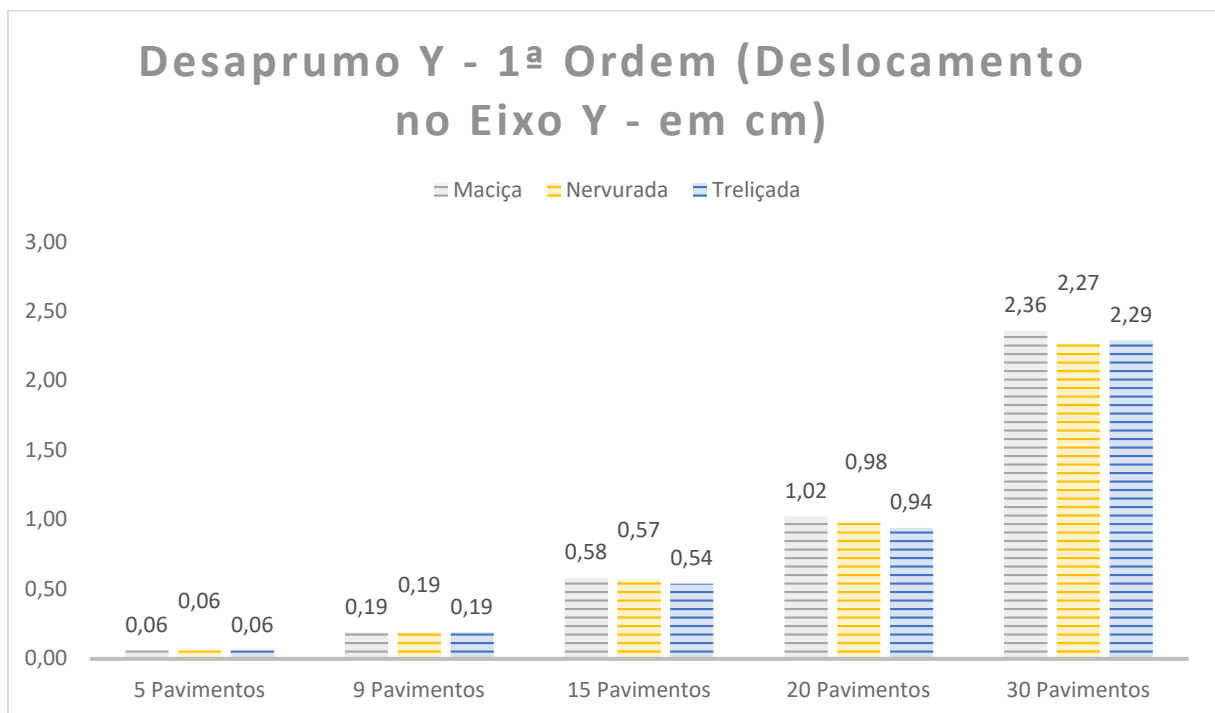
Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 14,40%, 14,49% e 13,69% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 23,63%, 23,32% e 21,66% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 31,41%, 30,25% e 28,70% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

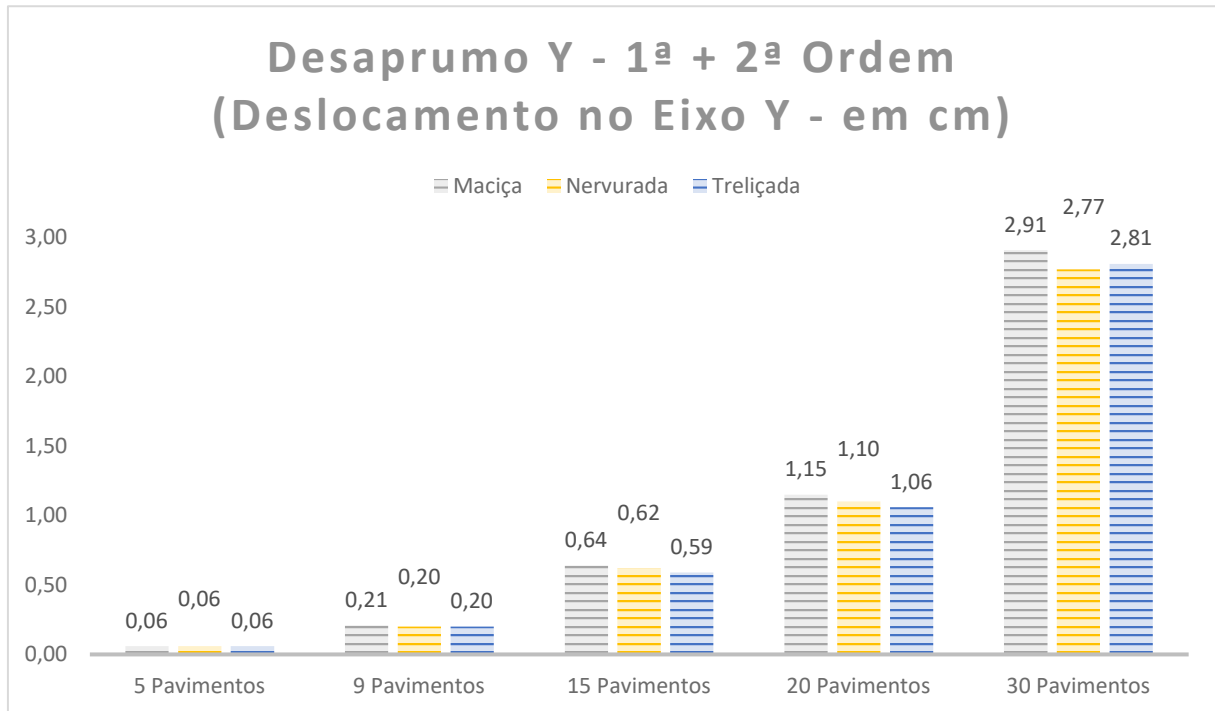
Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 43,05%, 41,38% e 41,46% para as lajes maciças, nervuradas e treliçadas, respectivamente.

Gráfico 29 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de desaprumo em Y - 1ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 30 - Deslocamento da estrutura no eixo Y (Cargas de desaprumo em Y - 1ª + 2ª ordem)



Fonte: Autor (2024).

Para a estrutura de 5 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 2,93%, 2,93% e 2,81% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 9 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 5,41%, 5,33% e 5,17% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 15 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 9,70%, 9,41% e 8,85% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 20 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 13,41%, 12,69% e 12,17% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

Para a estrutura de 30 pavimentos, observa-se um acréscimo nos deslocamentos, ao considerar os efeitos de 2ª ordem, de 23,51%, 22,14% e 22,74% para as lajes maciças, nervuradas e trelaçadas, respectivamente.

4.3 Síntese dos resultados e discussão

Neste capítulo, os resultados obtidos serão apresentados de forma conjunta e sintetizada na Tabela 6, para possibilitar melhores comparações e análises.

Tabela 6 - Resultados sintetizados

MODELOS DE 5 PAVIMENTOS		MODELO 1.1 (LAJE MACIÇA)		MODELO 2.1 (LAJE NERVURADA)		MODELO 3.1 (LAJE TRELIÇADA)	
PROCESSAMENTO		MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS
yz		1,06	1,07	1,06	1,07	1,07	1,06
CLASSIFICAÇÃO		Nós Fixos	Nós Fixos	Nós Fixos	Nós Fixos	Nós Fixos	Nós Fixos
DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS	EIXO X (cm)	0,17	0,18	0,17	0,18	0,19	0,18
	EIXO Y (cm)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08
P-Δ (ACIDENTAL)	EIXO X (cm)	0,04 >> 0,05 (5,31%)	0,05 >> 0,06 (5,68%)	0,05 >> 0,05 (5,24%)	0,05 >> 0,06 (5,62%)	0,05 >> 0,06 (5,88%)	0,06 >> 0,06 (5,33%)
	EIXO Y (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P-Δ (VENTO)	EIXO X (cm)	0,96 >> 1,03 (6,99%)	0,99 >> 1,07 (7,24%)	0,96 >> 1,03 (6,97%)	0,99 >> 1,07 (7,23%)	1,08 >> 1,16 (7,65%)	0,99 >> 1,06 (6,89%)
	EIXO Y (cm)	0,45 >> 0,46 (2,81%)	0,45 >> 0,46 (2,84%)	0,45 >> 0,46 (2,81%)	0,45 >> 0,46 (2,84%)	0,37 >> 0,38 (3,42%)	0,45 >> 0,46 (2,72%)
P-Δ (DESAPRUMO)	EIXO X (cm)	0,16 >> 0,17 (7,52%)	0,16 >> 0,17 (7,76%)	0,15 >> 0,17 (7,51%)	0,16 >> 0,17 (7,75%)	0,17 >> 0,18 (8,44%)	0,15 >> 0,16 (7,40%)
	EIXO Y (cm)	0,06 >> 0,06 (2,90%)	0,06 >> 0,06 (2,93%)	0,06 >> 0,06 (2,90%)	0,06 >> 0,06 (2,93%)	0,05 >> 0,05 (3,42%)	0,06 >> 0,06 (2,81%)
MODELOS DE 9 PAVIMENTOS		MODELO 1.2 (LAJE MACIÇA)		MODELO 2.2 (LAJE NERVURADA)		MODELO 3.2 (LAJE TRELIÇADA)	
PROCESSAMENTO		MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS
yz		1,13	1,14	1,14	1,15	1,14	1,14
CLASSIFICAÇÃO		Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis
DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS	EIXO X (cm)	0,49	0,52	0,50	0,52	0,54	0,52
	EIXO Y (cm)	0,28	0,29	0,28	0,28	0,29	0,29
P-Δ (ACIDENTAL)	EIXO X (cm)	0,12 >> 0,13 (10,58%)	0,14 >> 0,16 (11,63%)	0,13 >> 0,14 (10,57%)	0,15 >> 0,16 (11,65%)	0,14 >> 0,15 (11,97%)	0,15 >> 0,17 (10,93%)
	EIXO Y (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P-Δ (VENTO)	EIXO X (cm)	2,88 >> 3,25 (12,79%)	3,09 >> 3,51 (13,81%)	2,92 >> 3,29 (12,94%)	3,11 >> 3,54 (13,91%)	3,16 >> 3,59 (13,52%)	3,09 >> 3,49 (13,10%)
	EIXO Y (cm)	1,57 >> 1,65 (4,93%)	1,64 >> 1,72 (5,14%)	1,57 >> 1,65 (4,89%)	1,63 >> 1,72 (5,09%)	1,53 >> 1,62 (5,68%)	1,64 >> 1,72 (4,91%)
P-Δ (DESAPRUMO)	EIXO X (cm)	0,42 >> 0,48 (13,37%)	0,45 >> 0,52 (14,40%)	0,43 >> 0,48 (13,51%)	0,45 >> 0,52 (14,49%)	0,44 >> 0,50 (14,27%)	0,43 >> 0,49 (13,69%)
	EIXO Y (cm)	0,19 >> 0,20 (5,19%)	0,19 >> 0,21 (5,41%)	0,19 >> 0,19 (5,12%)	0,19 >> 0,20 (5,33%)	0,18 >> 0,19 (5,82%)	0,19 >> 0,20 (5,17%)
MODELOS DE 15 PAVIMENTOS		MODELO 1.3 (LAJE MACIÇA)		MODELO 2.3 (LAJE NERVURADA)		MODELO 3.3 (LAJE TRELIÇADA)	
PROCESSAMENTO		MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS
yz		1,22	1,26	1,22	1,26	1,24	1,24
CLASSIFICAÇÃO		Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis
DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS	EIXO X (cm)	1,30	1,37	1,29	1,37	1,42	1,38
	EIXO Y (cm)	0,94	0,98	0,94	0,98	0,98	0,98
P-Δ (ACIDENTAL)	EIXO X (cm)	0,27 >> 0,32 (17,15%)	0,32 >> 0,38 (19,71%)	0,28 >> 0,32 (16,78%)	0,32 >> 0,38 (19,28%)	0,32 >> 0,39 (19,63%)	0,34 >> 0,4 (18,26%)
	EIXO Y (cm)	0,03 >> 0,03	0,03 >> 0,03	0,04 >> 0,05	0,04 >> 0,05	0,03 >> 0,04	0,03 >> 0,03
P-Δ (VENTO)	EIXO X (cm)	7,93 >> 9,56 (20,62%)	8,71 >> 10,73 (23,17%)	7,97 >> 9,61 (20,54%)	8,71 >> 10,70 (22,86%)	8,80 >> 10,68 (21,46%)	8,71 >> 10,56 (21,24%)
	EIXO Y (cm)	5,13 >> 5,56 (8,51%)	5,49 >> 5,99 (9,19%)	5,17 >> 5,61 (8,44%)	5,49 >> 5,98 (9,00%)	5,40 >> 5,89 (9,02%)	5,49 >> 5,95 (8,45%)
P-Δ (DESAPRUMO)	EIXO X (cm)	1,07 >> 1,30 (21,06%)	1,18 >> 1,45 (23,63%)	1,07 >> 1,29 (20,97%)	1,17 >> 1,44 (23,32%)	1,11 >> 1,35 (21,99%)	1,10 >> 1,34 (21,66%)
	EIXO Y (cm)	0,54 >> 0,59 (8,95%)	0,58 >> 0,64 (9,70%)	0,54 >> 0,58 (8,81%)	0,57 >> 0,62 (9,41%)	0,53 >> 0,58 (9,34%)	0,54 >> 0,59 (8,85%)
MODELOS DE 20 PAVIMENTOS		MODELO 1.4 (LAJE MACIÇA)		MODELO 2.4 (LAJE NERVURADA)		MODELO 3.4 (LAJE TRELIÇADA)	
PROCESSAMENTO		MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS
yz		1,28	1,33	1,29	1,32	1,30	1,31
CLASSIFICAÇÃO		Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis
DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS	EIXO X (cm)	2,13	2,23	2,14	2,23	2,31	2,23
	EIXO Y (cm)	1,69	1,75	1,70	1,75	1,78	1,75
P-Δ (ACIDENTAL)	EIXO X (cm)	0,31 >> 0,39 (23,20%)	0,37 >> 0,47 (26,90%)	0,33 >> 0,40 (22,74%)	0,37 >> 0,46 (25,82%)	0,38 >> 0,48 (26,18%)	0,38 >> 0,48 (25,67%)
	EIXO Y (cm)	0,03 >> 0,04	0,04 >> 0,04	0,04 >> 0,04	0,04 >> 0,05	0,05 >> 0,06	0,04 >> 0,05
P-Δ (VENTO)	EIXO X (cm)	13,41 >> 16,99 (26,78%)	14,96 >> 19,57 (30,89%)	13,66 >> 17,27 (26,43%)	14,96 >> 19,40 (29,74%)	15,00 >> 19,24 (28,27%)	14,96 >> 19,17 (28,22%)
	EIXO Y (cm)	9,40 >> 10,47 (11,40%)	10,30 >> 11,60 (12,67%)	9,63 >> 10,71 (11,27%)	10,30 >> 11,54 (12,12%)	10,17 >> 11,40 (12,15%)	10,30 >> 11,49 (11,61%)
P-Δ (DESAPRUMO)	EIXO X (cm)	1,71 >> 2,17 (27,26%)	1,90 >> 2,50 (31,41%)	1,69 >> 2,14 (26,90%)	1,85 >> 2,40 (30,25%)	1,78 >> 2,29 (28,81%)	1,77 >> 2,28 (28,70%)
	EIXO Y (cm)	0,93 >> 1,04 (12,02%)	1,02 >> 1,15 (13,41%)	0,91 >> 1,02 (11,78%)	0,98 >> 1,10 (12,69%)	0,94 >> 1,05 (12,63%)	0,94 >> 1,06 (12,17%)
MODELOS DE 30 PAVIMENTOS		MODELO 1.5 (LAJE MACIÇA)		MODELO 2.5 (LAJE NERVURADA)		MODELO 3.5 (LAJE TRELIÇADA)	
PROCESSAMENTO		MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS	MODELO INTEGRADO	PÓRTICO + GRELHAS
yz		1,34	1,40	1,34	1,39	1,37	1,38
CLASSIFICAÇÃO		Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis	Nós Móveis
DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS	EIXO X (cm)	4,09	4,39	4,13	4,40	4,43	4,40
	EIXO Y (cm)	4,11	4,26	4,17	4,24	4,37	4,23
P-Δ (ACIDENTAL)	EIXO X (cm)	0,37 >> 0,49 (30,18%)	0,39 >> 0,54 (37,49%)	0,35 >> 0,46 (29,62%)	0,37 >> 0,52 (35,22%)	0,30 >> 0,43 (39,45%)	0,29 >> 0,42 (39,03%)
	EIXO Y (cm)	0,12 >> 0,14	0,12 >> 0,15	0,14 >> 0,16	0,15 >> 0,18	0,09 >> 0,10	0,09 >> 0,11
P-Δ (VENTO)	EIXO X (cm)	26,54 >> 36,04 (35,82%)	30,08 >> 42,86 (42,58%)	27,18 >> 36,83 (35,59%)	30,08 >> 42,36 (40,92%)	29,99 >> 42,18 (40,70%)	30,08 >> 42,38 (40,99%)
	EIXO Y (cm)	22,63 >> 26,99 (19,27%)	25,33 >> 30,97 (22,32%)	23,40 >> 27,91 (19,30%)	25,33 >> 30,70 (21,22%)	25,05 >> 30,48 (21,70%)	25,32 >> 30,79 (21,59%)
P-Δ (DESAPRUMO)	EIXO X (cm)	3,17 >> 4,31 (36,24%)	3,58 >> 5,12 (43,05%)	3,15 >> 4,29 (36,00%)	3,49 >> 4,93 (41,38%)	3,48 >> 4,91 (41,22%)	3,49 >> 4,93 (41,46%)
	EIXO Y (cm)	2,10 >> 2,52 (20,24%)	2,36 >> 2,91 (23,51%)	2,10 >> 2,52 (20,09%)	2,27 >> 2,77 (22,14%)	2,27 >> 2,79 (22,82%)	2,29 >> 2,81 (22,74%)

Fonte: Autor (2024).

Nas análises utilizando o Modelo Integrado, observa-se nos casos em que foram utilizadas lajes maciças, os resultados do coeficiente de estabilidade global (Gama-Z) foram inferiores em comparação às lajes nervuradas e treliçadas. Em outras palavras, as lajes maciças conferiram à estrutura maior estabilidade, especialmente nos casos em que a edificação apresentou maior esbeltez (20 e 30 pavimentos). As lajes treliçadas apresentaram os piores resultados quando comparadas aos outros tipos de lajes estudadas (maciças e nervuradas). Tal fato tem como causa a menor rigidez transversal à flexão deste tipo de laje em relação à maciça e à nervurada: a laje treliçada tem uma rigidez maior no sentido das vigotas treliçadas, enquanto no sentido em que não há vigotas somente a capa de concreto contribui com a rigidez (CHAVES et al., 2021). Em ambos os casos seus elementos de enchimento (EPS ou cerâmica) não são considerados resistentes a esforços nos cálculos de resistência e rigidez da laje (MITTAL, 2010).

A análise dos resultados de deslocamento horizontal obtidos evidencia que, em todos os casos, os modelos não ultrapassaram os limites da Tabela 13.3 (Limites para deslocamentos) da norma ABNT NBR 6118:2023, que afirma que o deslocamento limite para movimento lateral de edifícios é $H/1700$, onde H é a altura da edificação. Além disso, as lajes maciças apresentaram menores deslocamentos no topo da edificação em comparação às nervuradas e treliçadas considerando o estado limite de serviço. Neste caso, destaque outra vez para as estruturas mais altas, em que as lajes maciças apresentaram maior influência na redução dos deslocamentos da edificação. As lajes treliçadas apresentaram os maiores deslocamentos, por conta da menor rigidez horizontal que possuem quando comparada com as lajes nervuradas e maciças.

Da mesma forma, a análise pelo método P-Delta corroborou que a utilização de lajes maciças se mostra uma alternativa eficiente para reduzir os deslocamentos horizontais no topo da edificação, já que os modelos com este tipo de laje apresentaram os menores valores para as três cargas analisadas (acidental, vento e desaprumo). Além disso, as lajes maciças apresentaram a menor variação dos resultados da análise P-Delta, especialmente em edifícios mais esbeltos, como os modelos de 20 e 30 pavimentos. Estas estruturas são os casos mais críticos do estudo por apresentarem coeficientes γ_z maiores ou próximos a 1,30.

Já nos casos em que a estrutura foi processada pelo método de Pórtico + Grelhas, é possível notar que os valores de Gama-Z aumentaram em comparação com o Modelo Integrado, principalmente nos casos com laje maciça e nervurada, tornando todas as estruturas mais flexíveis e suscetíveis aos efeitos das cargas horizontais. Tal fato se deve à consideração feita pelo programa, em que as lajes são diafragmas rígidos e têm rigidez à flexão totalmente desprezada (MONCAYO, 2011), sendo restrita sua função como um elemento capaz de compatibilizar o comportamento em todos os pontos do pavimento de uma forma equivalente (KIMURA, 2007). Ainda, nesta análise (pórtico com grelhas), as lajes treliçadas apresentaram menores valores para o coeficiente γ_z , menores deslocamentos e menores variações ao considerar esforços de 2ª ordem em comparação às lajes maciças e nervuradas. Estes resultados se direcionaram no sentido oposto aos valores obtidos no modelo integrado do Eberick, como também dos resultados apresentados em Camicia (2017). É salutar pensar que lajes com menores rigidezes (caso das lajes treliçadas em comparação com lajes nervuradas e maciças) apresentem maiores deslocamentos horizontais no topo da edificação. Portanto, recomenda-se a consideração da rigidez axial das lajes na verificação da estabilidade global da estrutura, a partir do modelo integrado de análise. Desta forma, em casos no qual a presença das lajes possa ser considerada na verificação da estabilidade global da estrutura, pode-se utilizar o modelo integrado de análise disponibilizado no software ALTOQI Eberick 2023.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação entre as formas de processamento do programa utilizado mostra que a consideração feita pelo modelo de pórtico com grelhas, na qual as lajes são tratadas como diafragmas rígidos, torna a opção por esta análise em edifícios altos menos eficientes em comparação ao modelo integrado, que se mostrou mais apropriado para a avaliação da estabilidade global de estruturas, já que este método de análise considera a rigidez à flexão das lajes.

Além disso, os modelos com laje maciça apresentaram parâmetros de estabilidade global, como o coeficiente Gama-Z, melhores entre as três tipologias de laje estudadas. Nesse sentido, é possível definir que as lajes maciças contribuem de forma mais efetiva para a estabilidade global e para os deslocamentos horizontais no topo da estrutura, em comparação com as lajes treliçadas e nervuradas. Além disso, a análise P-Delta mostrou deslocamentos horizontais elevados da laje treliçada e maiores variações ao considerar os efeitos de segunda ordem. Portanto, recomenda-se que o uso de lajes treliçadas em edifícios altos seja analisado com cautela, a fim de assegurar a estabilidade global da estrutura.

Com a finalidade de dar continuidade ao estudo recomenda-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar o comportamento de estruturas altas com laje protendida sem vigas, em parâmetros de estabilidade global;
- Analisar parâmetros de estabilidade global em edifícios médios com lajes treliçadas armadas na pior direção de estabilidade.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.

ALTOQI. **Ajuda do Eberick | AltoQi**. 2023.

ALTOQI. **Como é calculado o coeficiente p-Delta?** Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115001189434>. Acesso em: 24 jul. 2024.

ALTOQI. **Como optar entre o modelo de análise integrado ou de grelha com pórtico espacial**. Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360001391833-Como-optar-entre-o-modelo-de-an%C3%A1lise-integrado-ou-de-grelha-com-p%C3%B3rtico-espacial>. Acesso em: 21 nov. 2023.

ALTOQI. **Configurações de análise - Não linearidade física, geométrica e imperfeições globais**. Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360000297253-Configura%C3%A7%C3%B5es-de-an%C3%A1lise-N%C3%A3o-linearidade-f%C3%ADsica-geom%C3%A9trica-e-imperfei%C3%A7%C3%B5es-globais->. Acesso em: 21 nov. 2023.

ALTOQI. **Efeito da escolha do modelo de análise na estabilidade global da estrutura**. Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360002182574-Efeito-da-escolha-do-modelo-de-an%C3%A1lise-na-estabilidade-global-da-estrutura>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ALTOQI. **Modele, analise, dimensione e faça o detalhamento de projetos estruturais com o Eberick**. Disponível em: <https://www.altoqi.com.br/eberick>. Acesso em: 13 nov. 2023.

ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. **Pré-dimensionamento da estrutura**. Santa Maria/RS. Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

CAMICIA, Rodrigo Junior da Motta. **Análise da estabilidade global de edifícios com múltiplos pavimentos em concreto armado com diferentes tipos de lajes e inclusão de núcleos rígidos**. 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

CHAVES, Rogério José Solidário et al. **Contribuição da rigidez à flexão da laje treliçada para a estabilidade global da estrutura**. Revista Principia, João Pessoa, v. 57, p. 213-222, 2021.

DELALIBERA, Rodrigo Gustavo *et al.* Avaliação dos critérios para análise da estabilidade global em edifícios de concreto armado: avaliação dos critérios para análise da estabilidade global em edifícios de concreto armado: estudo de caso. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 24-37, 9 out. 2014.

DI PIETRO, J. E. **O conhecimento qualitativo das estruturas das edificações na formação do arquiteto e do engenheiro**. Tese de doutorado – Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FRANCO, M.; VASCONCELOS, A.C.D.; **Avaliação Prática dos Efeitos de 2ª Ordem em Edifícios Altos**. Colóquio on the Rio CEB-FIP - MC 90, Rio de Janeiro, 1991.

GOLDANI, Daniel. **Eficiência dos sistemas outriger em edifícios altos de concreto armado**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

GONÇALVES, R. M. *et al.* (2007). **Ação do vento nas edificações: teoria e exemplos**. EESC-USP, São Carlos, SP, 2007.

KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculo de edifícios com uso de sistemas computacionais**. São Paulo: Pini Ltda, 2007.

LANÇA, P. **Processos de construção: Pré-dimensionamento de Elementos Estruturais em Betão Armado**. Beja – Portugal: Escola Superior de Tecnologia e Gestão em Beja, Instituto Politécnico de Beja, [2006?].

LOUREIRO, G. J. Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas. SIMPÓSIO EDUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6, 2006, Fortaleza. **Resumos...** São Paulo: EDUSP, 2006, p. 1734-1755.

MIRANDA, Lucas Rodrigo. **Cálculo e Detalhamento Prático de Pilares Para Edificações de Pequeno e Médio Porte**. 2008. 224 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

MITTAL, Arcelor. **Manual técnico de lajes treliçadas, 2010**. Disponível em: <https://rangellage.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Manual-Lajes-Treli%C3%A7adas.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2024.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MUÑOZ, Socrate. **O efeito P-Delta nas estruturas de edifícios**. 2018. Disponível em: <https://maisengenharia.altoqi.com.br/wp-content/uploads/2018/07/Ebook-O-Efeito-P-Delta.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2024.

PASSOS, V. M. *et al.* **Analysis of instability of tall buildings with prestressed and waffle slabs**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 244-262, abr. 2016.

PINHEIRO, Libânio M.. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. 2007. 380 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PINTO, Rivelli da Silva. **Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado**. 1997. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

SOUTO, André Kraemer. **Análise de estruturas de edifícios altos submetidos a carregamentos horizontais e verticais**. 1993. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

TEIXEIRA, A. M. C. **Análise dos efeitos de segunda ordem de estruturas de edifícios de betão armado – Avaliação da aplicação em Projecto das metodologias preconizadas no EC2**. 2008, 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Estruturas) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

TERRA, Nuno Manuel de Sousa. **Análise das metodologias de avaliação dos efeitos de 2ª ordem previstas no Eurocódigo 2**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.