

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Matheus Freitas Lima**

**SISTEMA DE *OUTRIGGERS* EM CONCRETO ARMADO:  
ANÁLISE COMPARATIVA EM EDIFÍCIO REAL**

Porto Alegre  
Novembro 2021

**MATHEUS FREITAS LIMA**

**SISTEMA DE *OUTRIGGERS* EM CONCRETO ARMADO:  
ANÁLISE COMPARATIVA EM EDIFÍCIO REAL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Paula Manica Lazzari**  
**Coorientadora: Bárbara Chagas Rachinhas**

Porto Alegre  
Novembro 2021

**Matheus Freitas Lima**

**SISTEMA DE *OUTRIGGERS* EM CONCRETO ARMADO:  
ANÁLISE COMPARATIVA EM EDIFÍCIO REAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, Novembro de 2021

Profa. Paula Manica Lazzari  
Dra. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Orientadora

Profa. Bárbara Chagas Rachinhas  
Me. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Coorientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Paula Manica Lazzari**  
**(UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

**Profa Bárbara Chagas Rachinhas**  
**(UFRGS)**  
Me. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

**Prof. Américo Campos Filho**  
**(UFRGS)**  
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo

**Profa. Bruna Manica Lazzari**  
**(PUCRS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Selma e Manoel, e a minha namorada, Bruna, os quais o apoio foi fundamental durante o período do meu Curso de Graduação.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço às professoras Paula Manica Lazzari e Bruna Chagas Rachinhas, orientadoras deste trabalho, pelos ensinamentos e incentivos ao longo do desenvolvimento do trabalho.

À minha namorada, Bruna, pelo apoio e enorme paciência ao longo dos últimos semestres da minha graduação, fundamentais a conclusão deste trabalho.

A meus familiares, em especial a minha mãe, Selma, e seu cônjuge, Maximiliano, pelo apoio contínuo ao longos desses anos na universidade.

À empresa TQS informática e ao Eng. Alio Kimura, pelo desenvolvimento e fornecimento da versão estudantil do *software* TQS, utilizado amplamente ao decorrer do trabalho.

À engenheira Daniele Benvegnú pela ajuda prestada quanto ao edifício utilizado ao decorrer do trabalho.

Aos colegas de profissão das empresas Procalk Estruturas e Simon Engenharia, os quais contribuíram e contribuem crucialmente a minha formação.

Aos demais professores da universidade, em especial aos professores Américo Campos Filho e João Ricardo Masuero, pelas orientações prestadas durante a seleção do tema do trabalho, e durante sua realização.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino de excelência.

Há diversos tipos de curiosidade, uma de interesse, que nos leva ao desejo de aprender o que nos pode ser útil, e outra, de orgulho, que provém do desejo de saber o que os outros ignoram.

*Joseph Addison*

## RESUMO

A influência dos sistemas de contraventamento é fundamental para analisar a estabilidade das estruturas e necessária para garantir a segurança exigida. Este trabalho versa sobre um destes sistemas, conhecido como *outriggers*, em especial os projetados em concreto armado. O sistema é constituído por paredes de elevada rigidez distribuídas ao longo da altura da edificação, comumente com altura de um ou mais pavimentos, que ligam o núcleo rígido da edificação aos pilares do exterior. O objetivo do trabalho é comparar a influência desse sistema em um edifício de estudo, variando a altura do edificação (40, 60 e 80 pavimentos), a posição e a quantidade de *outriggers* (0 a 4), através da elaboração de modelos de cálculo no *software* TQS versão estudantil LP&S v22. Para validação da análise de *outriggers* através do programa, realizou-se um estudo inicial com base nos resultados obtidos por Brasil (2018), resultando em uma diferença de valores menor que 10% nos valores obtidos. Após esta avaliação, foram elaborados e comparados 24 modelos de cálculo, obtendo relações entre os deslocamentos laterais no topo da edificação, coeficientes  $\gamma_z$ , consumo de concreto e momentos fletores no núcleo principal da edificação. Concluiu-se que o aumento de pavimentos de *outriggers* leva a diminuição dos valores de  $\gamma_z$ , deslocamentos e momentos fletores nos núcleos, e essa redução tende a se estabilizar conforme o aumento de *outriggers*. Verificou-se também que a variação de altura do edifício influencia nas reduções percentuais dos fatores analisados, sendo necessário adicionar mais pavimentos de *outriggers* em edificações maiores para mesma redução percentual de deslocamentos. Também foram realizadas comparações dos parâmetros com o consumo adicional de concreto, chegando a conclusão que diferentes alturas de edifícios podem apresentar uma relação custo-benefício parecida para adoção do sistema de *outriggers*.

Palavras-chave: *Outriggers*. Contraventamento. Estruturas de edifícios. Edifícios Altos. Rigidez Horizontal. Estabilidade Global. Pórticos Rígidos.

## ABSTRACT

The influence of bracing systems is fundamental to analyze the stability of structures and necessary to ensure the safety needed. This work speaks of one of this systems, known as outriggers, in particular the ones designed with reinforced concrete. The system consists of rigid walls distributed over the building height, commonly with the height of one or more stories that connect the building core to the exterior columns. The goal of this work is to compare the influence of this system in a study building, varying the height of the building, (40, 60 or 80 stories), the position and number of outriggers, through the elaboration of calculation models in TQS student build LP&S v22 software. To validate de outrigger analysis in the software, an initial study was made based on the results obtained by Brasil (2018), resulting in a difference less than 10% in the obtained values. After this evaluation, 24 calculation models were made and compared, obtaining relationships between the horizontal displacements in the top of the building,  $\gamma_z$  coefficients, concrete consumption and bending moments in the central core of the building. The analysis resolutions is that that increase of outrigger stories leads to the decrease of  $\gamma_z$  values, horizontal displacements and bending moments in the cores, and this reductions tend to stabilize with the increase of outriggers. It was also verified that the building height variation influence in the percentage reductions of the analyzed parameters, being necessary to add more outriggers stories in taller building to achieve the same percentage reductions of displacements. The analyzed parameters were also compared with the additional concrete consumption, concluding that buildings with different heights can present similar cost benefit values for the inclusion of outrigger systems.

Key-words: Outriggers. Bracing. Building structures. Tall Buildings. Horizontal stiffness. Global stability. Rigid frames.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas do trabalho .....	21
Figura 2 – Principais elementos estruturais de um edifício.....	24
Figura 3 – Formação de pórticos em edifícios .....	25
Figura 4 – Sistemas de contraventamento .....	26
Figura 5 – Relação entre o número de pavimentos e sistemas de contraventamento .....	26
Figura 6 – Pórtico plano com nós sem enrijecimento.....	28
Figura 7 – Pórtico plano com nós enrijecidos .....	28
Figura 8 – Edifício com <i>outriggers</i> e <i>belt-trusses</i> .....	29
Figura 9 – Impacto da inserção de <i>outriggers</i> sobre o núcleo da edificação.....	30
Figura 10 – Representação dos modelos de pórtico espacial no TQS.....	38
Figura 11 – Diferenciação dos modelos de pórtico espacial pelo visualizador TQS .....	39
Figura 12 – Representação dos pavimentos criados pela modelagem de <i>outriggers</i> .....	41
Figura 13 – Arquitetura proposta por Marcadella (2016).....	42
Figura 14 – Modelo de pórticos rígidos.....	43
Figura 15 – Modelo de cálculo com presença de <i>outriggers</i> .....	43
Figura 16 – Planta de formas de edifício base idealizado por Brasil (2018) elaborado no TQS.....	45
Figura 17 – Planta baixa dos elementos de pilar-parede que simulam <i>outriggers</i> .....	46
Figura 18 – Discretização dos <i>outriggers</i> em faixa de pilar-parede.....	47
Figura 19 – Perspectiva dos <i>outriggers</i> no modelo de pórtico espacial gerado pelo TQS .....	48
Figura 20 – Corte da edificação.....	51
Figura 21 – Arquitetura do pavimento tipo da edificação.....	52
Figura 22 – Lançamento preliminar da estrutura do pavimento tipo.....	54
Figura 23 – Representação dos tipos de modelos.....	56
Figura 24 – Planta baixa de estrutura do pavimento tipo.....	57
Figura 25 – Perspectiva da estrutura do pavimento tipo.....	58
Figura 26 – Módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do concreto.....	58
Figura 27 – Cargas adicionais devido ao peso próprio das paredes.....	59
Figura 28 – Planta baixa do pilar-parede que simula os <i>outriggers</i> .....	60
Figura 29 – Perspectiva do pilar-parede que simula os <i>outriggers</i> .....	61
Figura 30 – Comparação entre os valores absolutos de $\gamma_z$ , x e o tipo de modelo.....	63
Figura 31 – Comparação entre os valores absolutos de $\gamma_z$ , y e o tipo de modelo.....	64

Figura 32 – Comparação entre os valores percentuais de $\gamma z$ , x e o tipo de modelo.....	64
Figura 33 - Comparação entre os valores percentuais de $\gamma z$ , y e o tipo de modelo.....	65
Figura 34 - Comparação entre os valores absolutos de dx e o tipo de modelo.....	66
Figura 35 - Comparação entre os valores absolutos de dy e o tipo de modelo.....	66
Figura 36 - Comparação entre os valores percentuais de dx e o tipo de modelo.....	67
Figura 37 – Comparação entre os valores percentuais de dy e o tipo de modelo.....	67
Figura 38 – Comparação entre os valores absolutos de Mx e o tipo de modelo.....	68
Figura 39 – Comparação entre os valores absolutos de My e o tipo de modelo.....	69
Figura 40 – Comparação entre os valores percentuais de Mx e o tipo de modelo.....	69
Figura 41 – Comparação entre os valores percentuais de My e o tipo de modelo.....	70
Figura 42 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e o tipo de modelo ....	71
Figura 43 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $\gamma z$ , x nos modelos com 40 pavimentos.....	71
Figura 44 - Figura 42 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $\gamma z$ , x nos modelos de 60 pavimentos.....	72
Figura 45 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $\gamma z$ , x nos modelos com 80 pavimentos.....	72
Figura 46 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $\gamma z$ , y nos modelos com 40 pavimentos.....	73
Figura 47 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $\gamma z$ , y nos modelos com 60 pavimentos.....	73
Figura 48 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $\gamma z$ , y nos modelos com 80 pavimentos.....	74
Figura 49 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de dx nos modelos com 40 pavimentos.....	74
Figura 50 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de dx nos modelos com 60 pavimentos.....	75
Figura 51 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de dx nos modelos com 80 pavimentos.....	75
Figura 52 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de dy nos modelos com 40 pavimentos.....	76
Figura 53 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de dy nos modelos com 60 pavimentos.....	76
Figura 54 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de dy nos modelos com 80 pavimentos.....	77
Figura 55 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de Mx nos modelos com 40 pavimentos.....	77
Figura 56 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de Mx nos modelos com 60 pavimentos.....	78

Figura 57 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $M_x$ nos modelos com 80 pavimentos.....	78
Figura 58 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $M_y$ nos modelos com 40 pavimentos.....	79
Figura 59 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $M_y$ nos modelos com 60 pavimentos.....	79
Figura 60 - Comparação entre o consumo adicional de concreto e os valores de $M_y$ nos modelos com 80 pavimentos.....	80

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Cargas de vento consideradas por Brasil (2018).....	44
Quadro 2 – Comparação de $\gamma z$ e deslocamentos obtidos por Brasil (2018).....	45
Quadro 3 – Comparação de resultados obtidos por Brasil (2018) e os modelos feitos no TQS.....	49
Quadro 4 – Modelos de cálculo elaborados.....	55
Quadro 5 – Cargas gravitacionais consideradas.....	59
Quadro 6 – Resumo dos resultados obtidos.....	62

## **LISTA DE SIGLAS**

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ELU – Estado Limite Último

ELS – Estado Limite de Serviço

NBR – Norma Brasileira

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CTBUH – *Council on Tall Buildings and Urban Habitat*

CMO – *Core - Megacolumn - outrigger*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma_z$  – coeficiente de avaliação da importância dos esforços de 2ª ordem

H – altura total da edificação em metros

$\alpha$  – parâmetro de instabilidade da estrutura

$(EI)_{sec}$  – rigidez secante do elemento estrutural (k.N.cm<sup>2</sup>)

$I_c$  – momento de inércia da seção bruta de concreto (cm<sup>4</sup>)

$E_{ci}$  – módulo de elasticidade tangente inicial do concreto

$A_s$  – área de seção transversal da armadura longitudinal de tração

$A_s'$  – área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão

$\Delta M_{tot,d}$  - momento de tombamento da estrutura

$M_{1,tot,d}$  - soma dos produtos das forças verticais atuantes na estrutura pelos deslocamentos horizontais obtidos na análise de primeira ordem

[F] – matriz que representa forças aplicadas sobre um elemento

[K] – matriz de rigidez do elemento analisado

[ $\delta$ ] – matriz de deslocamenti do elemento

kN – kilonewton

m – metros

MPa – megapascal

kgF – kilograma força

$\gamma_{z,x}$  – coeficiente  $\gamma_z$  na direção X do edifício

$\gamma_{z,Y}$  – coeficiente  $\gamma_z$  na direção Y do edifício

$dx$  – deslocamento do topo do edifício na direção X.

$dy$  – deslocamento do topo do edifício na direção Y

$M_x$  – momento fletor na base do núcleo central em torno do eixo X

$M_y$  – momento fletor na base do núcleo central em torno do eixo Y

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA .....</b>	<b>19</b>
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA .....	19
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	19
<b>2.2.1 Objetivo Principal .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 Objetivo Secundário .....</b>	<b>19</b>
2.3 HIPÓTESE .....	20
2.4 PRESSUPOSTOS .....	20
2.5 LIMITAÇÕES .....	20
2.6 DELINEAMENTO .....	20
<b>3 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E ANÁLISE GLOBAL.....</b>	<b>23</b>
3.1 SISTEMAS ESTRUTURAIS .....	23
<b>3.1.1 Pórticos rígidos.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.2 Sistemas de outriggers.....</b>	<b>29</b>
3.2 ESTABILIDADE GLOBAL .....	31
<b>3.2.1 Ações externas em edifícios.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.3 Não-linearidade.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.3 Esforços de 2ª ordem.....</b>	<b>33</b>
3.2.3.1 Coeficiente $\gamma_z$ .....	34
3.2.3.2 Estruturas de nós fixos.....	35
3.2.3.3 Estruturas de nós moveis.....	35
3.3 DESLOCAMENTO LATERAL.....	35
<b>4 MODELAGEM COMPUTACIONAL .....</b>	<b>36</b>
4.1 MÉTODO DA RIGIDEZ DIRETA.....	36
4.2 SISTEMA TQS.....	37
<b>4.2.1 Elemento pilar-parede .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.2 Modelagem de outriggers .....</b>	<b>40</b>
<b>5 MODELO ESTRUTURAL DE UMA EDIFICAÇÃO REAL .....</b>	<b>50</b>
5.1 ARQUITETURA.....	50
5.2 ESTRUTURA PRELIMINAR DA ESTRUTURA .....	53
5.3 MODELOS DE CÁLCULO.....	55
<b>5.3.1 Modelos propostos.....</b>	<b>55</b>
<b>5.3.2 Cargas.....</b>	<b>59</b>

<b>5.3.3 Pilar parede discretizado.....</b>	<b>60</b>
<b>5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>61</b>
<b>5.4.1 <math>\gamma_z</math>.....</b>	<b>63</b>
<b>5.4.2 Deslocamento do topo.....</b>	<b>65</b>
<b>5.4.3 Momentos na base.....</b>	<b>68</b>
<b>5.4.4 Consumo de concreto.....</b>	<b>70</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a crescente densidade populacional nas grandes cidades, e a escassez de espaços disponíveis nas áreas mais urbanizadas, há uma tendência de se construir edifícios cada vez mais altos, com o intuito de suprir a demanda por habitação. Conforme Gregoletto (2013) esse processo, denominado como verticalização, vem caracterizando o desenvolvimento urbanístico do século XXI.

Para se projetar a estrutura de tais edificações, é necessário, além de tornar viável economicamente a execução do empreendimento, atender requisitos de segurança e conforto estabelecidos normativamente. Estes requisitos são avaliados através dos chamados estados limites, subdivididos em estados limites últimos (ELU), e estados limites de serviço (ELS). Segundo as definições presentes na NBR 6118 (ABNT, 2014), os estados limites últimos determinam as condições relacionadas ao colapso da estrutura, e outras formas de ruína estrutural, levando a paralisação do uso da estrutura, totalmente ou parcialmente, e os estados limites de serviço determinam condições nas quais, apesar de não haver ruína da estrutura, perde sua função devido a outros fatores, como aberturas de fissuras, deslocamentos e vibrações excessivas.

Um dos principais requisitos necessários ao conforto dos usuários de uma edificação é a limitação do deslocamento lateral da edificação, o qual pode causar danos aos elementos não estruturais do edifício, como as alvenarias presentes entre os pavimentos. Essa limitação acaba não sendo um fator restritivo em edificações baixas, porém, conforme é aumentada a quantidade de pavimentos, os esforços laterais acabam sendo preponderantes ao dimensionamento, e esse deslocamento acaba sendo atingido mais facilmente. A NBR 6118 (ABNT, 2014) limita o deslocamento no topo da edificação a  $H/1700$ , onde  $H$  é a altura total da edificação. A fim de garantir rigidez para a estrutura aos esforços laterais, e transmití-los às fundações, é usual utilizarmos sistemas estruturais denominados como “contraventamentos”, que proporcionam rigidez lateral à estrutura e resistem a esses esforços.

De acordo com Freitas (2019), a maior parte das edificações construídas no Brasil teve sua estrutura concebida como um sistema aporticado de concreto armado, constituído de vigas e

pilares, os quais resistem aos esforços laterais através da formação de pórticos de nós rígidos. Este sistema funciona muito bem para edificações baixas, porém, para edificações altas de concreto é imprescindível a adição de outros sistemas para garantir a rigidez necessária à estrutura, como núcleos rígidos e paredes estruturais comumente utilizadas nas construções atuais.

Conforme CTBUH (2012), o sistema de *outriggers* consiste em elementos horizontais com rigidez muito elevada, dispostos em determinadas partes da altura do edifício, como treliças horizontais ou paredes estruturais, atuando como uma extensão do núcleo da edificação para os pilares do exterior. Segundo CTBUH (2012), o sistema foi utilizado em grande parte dos edifícios altos já construídos, e tem como base de funcionamento a utilização de pilares externos para combater os momentos fletores atuantes no núcleo, diminuindo os esforços em sua base e o deslocamento lateral da edificação como um todo.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é quantificar e analisar a contribuição do sistema de *outriggers* feito em concreto armado no pavimento tipo de uma edificação real, variando a quantidade e posição de *outriggers* e o número de pavimentos do edifício. Para este estudo foram elaborados 24 modelos de cálculo, separados em 3 alturas distintas (40, 60 e 80 pavimentos), através do *software* TQS (versão estudantil LP&S v22).

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual a redução do deslocamento lateral, esforços no núcleo e aumento no consumo de concreto na edificação de estudo com sistema de *outriggers* de concreto armado, com base na quantidade de pavimentos e posição dos pavimentos de *outriggers*?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal da pesquisa é comparar e analisar o efeito de pavimentos de *outriggers* de concreto armado em uma edificação real, variando sua quantidade e posição na edificação, através da elaboração de modelos de cálculo no *software* TQS.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário da pesquisa é desenvolver e validar uma forma de modelagem de *outriggers* no programa comercial TQS, o qual não apresenta uma ferramenta específica para a função.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a análise comparativa dos modelos de cálculo resultará em uma redução considerável nos deslocamentos no topo do edifício, assim como de momentos fletores na base dos núcleos, sendo esta redução proporcional a quantidade de *outriggers* presentes.

## 2.4 PRESSUPOSTOS

São pressupostos deste trabalho que:

- a) os resultados da análise linear feita pelo *software* utilizado representa de forma satisfatória a realidade;
- b) o cálculo do coeficiente  $\gamma z$  feito pelo *software* TQS é correto, e pode ser usado para dimensionamento da estrutura;
- c) os *outriggers* de concreto armado tem comportamento semelhante a um elemento finito de casca e pode ser simulado de tal forma.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a utilização de um único *software* para análise e cálculo dos esforços nos elementos estruturais e cálculo do coeficiente  $\gamma z$ ;
- b) a elaboração de uma quantidade limitada de modelos de cálculo para comparação;
- c) a consideração apenas do pavimento tipo do edifício, não sendo considerados os pavimentos restantes;
- d) a não consideração de efeitos dinâmicos na estrutura.

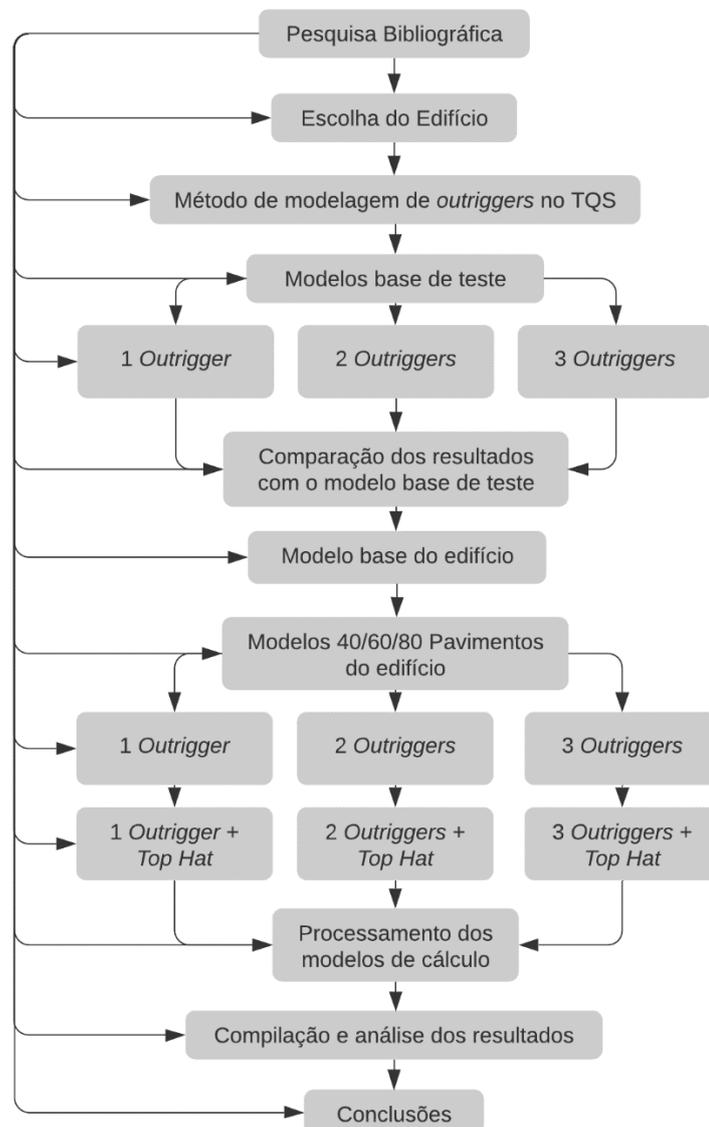
## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi desenvolvida através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1 e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) escolha do edifício a ser analisado;
- c) criação de método para modelagem de *outriggers* no *software* TQS;

- d) formulação e comparação de resultados de quatro modelos de teste, feitos com base em artigo publicado por Brasil (2018), no qual foi utilizado o *software* SAP 2000;
- e) elaboração do modelo base de cálculo do pavimento tipo, conforme estudo preliminar realizado por empresa de projetos estruturais;
- f) criação dos modelos de cálculo utilizados (24 modelos de cálculo, subdivididos entre 3 alturas diferentes e 8 configurações distintas de *outriggers* por altura), considerando ou não a presença de um pavimento de *outriggers* no topo da edificação, conhecido como *Top-Hat*;
- g) processamento dos modelos de cálculo e análise preliminar dos resultados;
- h) compilação e análise final dos resultados;
- i) conclusões.

Figura 1 – Fluxograma das etapas do trabalho



(Fonte: AUTOR, 2021)

A **pesquisa bibliográfica** foi realizada seguindo os princípios teóricos necessários à análise global do edifício, cálculo do coeficiente  $\gamma z$  e modelagem computacional de pórticos espaciais e *outriggers*. Dentre o estudo realizado destacam-se os preceitos da NBR 6118 (ABNT, 2014) e o guia “*Outrigger Design for High-Rise Buildings*” elaborado pela CTBUH (*Council on Tall Buildings and Urban Habitat*) e publicado em 2012.

A **escolha do edifício analisado** foi feita a partir do estudo preliminar da estrutura de um edifício real a ser construído, localizado na cidade de Balneário Camboriú – SC. O projeto arquitetônico do edifício tem 61 pavimentos com altura total de aproximadamente 191 metros acima do nível térreo.

O **método para modelagem de *outriggers* de concreto no software TQS** foi realizado pelo autor utilizando a ferramenta de pilar parede disponível no programa, e validado com base nos artigos elaborados por Medeiros (2014) e por Brasil (2018).

Para validação do método de modelagem de *outriggers*, foram desenvolvidos quatro **modelos de teste** no *software* TQS com base nos edifícios analisados por Brasil (2018) através do SAP 2000. Na sequência foi realizada a comparação dos resultados adquiridos via TQS com os obtidos por Brasil (2018) para validação do método de modelagem.

Com base no lançamento estrutural preliminar realizado para o empreendimento por uma empresa de projetos estruturais, foi elaborado o **modelo de cálculo base do edifício** a partir do segundo pavimento tipo da edificação. As cargas permanentes e acidentais da edificação foram definidas com base no memorial de cálculo do estudo, disponibilizado pela empresa.

A partir do modelo base do edifício foram elaborados 24 **modelos de cálculo**, variando a altura da edificação para 40, 60 e 80 pavimentos, e alterando a quantidade e posicionamento dos *outriggers*. Foram considerados de 0 a 3 *outriggers* por altura, e a existência ou não de um *outrigger* no topo da edificação, chamado de *Top-Hat*.

A seguir foi executada a **análise estrutural dos modelos de cálculo** pelo *software*, obtendo os esforços nos elementos e o comportamento global da estrutura, identificando e corrigindo possíveis erros na modelagem dos edifícios. A partir dos resultados obtidos, foi realizada a **compilação e análise dos resultados**, identificando como a presença dos *outriggers* impacta o comportamento global das estruturas analisadas. Por fim, na etapa de **considerações finais** foram acrescentadas as conclusões sobre o trabalho realizado.

### 3 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E ANÁLISE GLOBAL

Ao iniciar o processo de elaboração do projeto estrutural de uma edificação, antes da análise estrutural, é necessário, primeiramente, estabelecer o sistema estrutural a ser utilizado e o posicionamento inicial dos elementos constituintes do sistema. Esta etapa, denominada concepção estrutural, é responsável pela elaboração de uma estrutura segura e econômica, e depende grande parte da experiência e competência do engenheiro responsável pelo projeto. Segundo Alva (2007, p. 1):

A concepção da estrutura de um edifício consiste no estabelecimento de um arranjo adequado dos vários elementos estruturais do edifício, de modo a assegurar que o mesmo possa atender às finalidades para as quais foi projetado.

Para a definição desses arranjos de elementos estruturais, é necessário estabelecer a posição desses elementos de forma a otimizar sua contribuição no sistema, além de respeitar as condições de contorno impostas pelo projeto arquitetônico. Neste capítulo, serão abordadas a definição e a contribuição de diferentes sistemas estruturais na concepção estrutural de um edifício, com foco principal nos sistemas aporticados de concreto armado e no sistema *CMO* (*Core-Megacolumn-Outrigger*), caracterizado pela adição de núcleos rígidos e *outriggers* na estrutura.

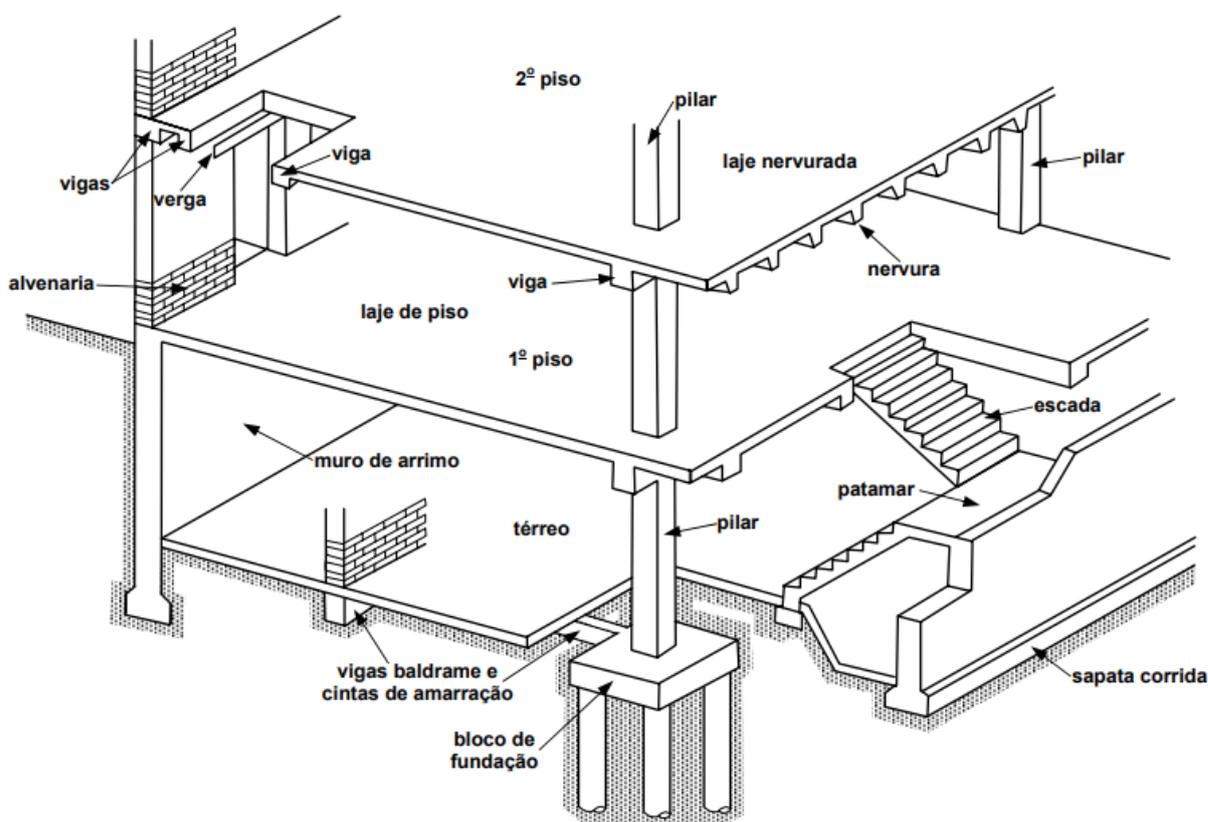
#### 3.1 SISTEMAS ESTRUTURAIS

O dever da estrutura de uma edificação é atender a função a qual foi projetada, resistindo aos esforços solicitantes e atendendo aos critérios de segurança e confortabilidade. Para cumprir tal objetivo, é necessário conceber um agrupamento de elementos estruturais que, em conjunto, vão transmitir os esforços de seu ponto de atuação até o solo. De acordo com Alva (2007), esse agrupamento de elementos, com comportamento global característico, é chamado de sistema estrutural.

O sistema estrutural de uma edificação, e os elementos que o constituem podem ser compostos de diversos materiais e formas. A escolha do sistema estrutural depende de diversos fatores,

entre eles a estética, o custo e tempo de execução, e a forma com que o sistema irá resistir e transmitir os esforços solicitantes às fundações. De acordo com Freitas (2019), no Brasil, a maior parte dos edifícios contruídos apresentam sua estrutura feita em concreto armado, devido ao seu baixo custo de execução quando comparado a outros sistemas. Outra característica desse sistema é a flexibilidade, podendo se adaptar a projetos arquitetônicos mais complexos. Para atender as funções as quais foram projetados, os edifícios costumam apresentar diversos tipos de elementos estruturais, conforme indicado na Figura 2.

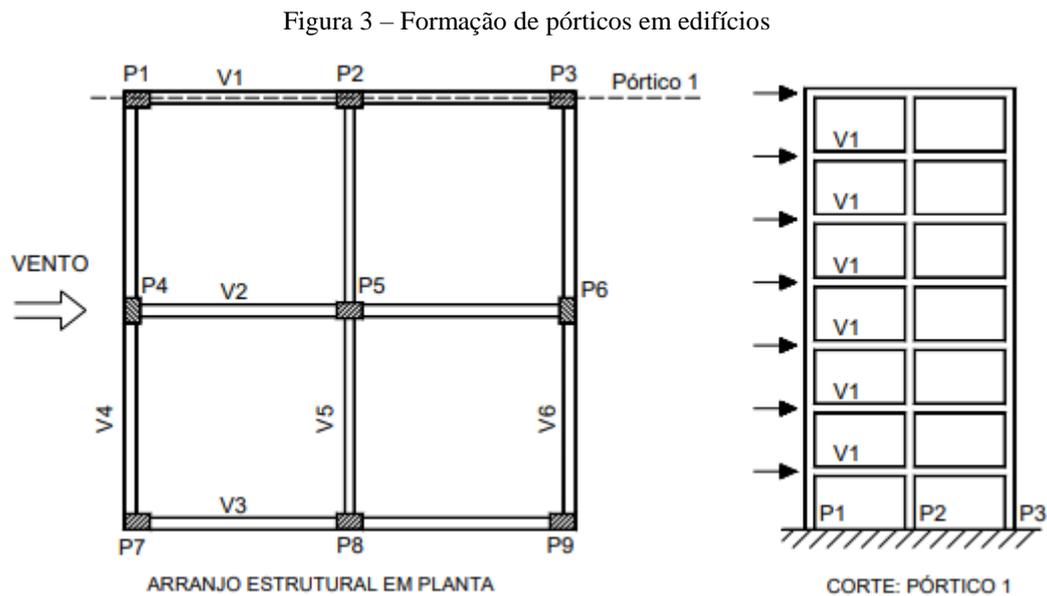
Figura 2 – Principais elementos estruturais de um edifício



(Fonte: ALVA, 2007, p. 1)

Os principais elementos em estruturas de edifícios são: as lajes, as vigas e os pilares. Juntos, estes elementos formam subsistemas horizontais e verticais para resistir aos esforços atuantes. Os subsistemas horizontais tem a função de transmitir as ações gravitacionais aos elementos verticais, normalmente constituídos pelas lajes e vigas, ou somente pela lajes apoiadas diretamente sobre os pilares. Já os subsistemas verticais tem a função de resistir aos esforços laterais atuantes sobre a estrutura, como a ação do vento e cargas geradas por sismos.

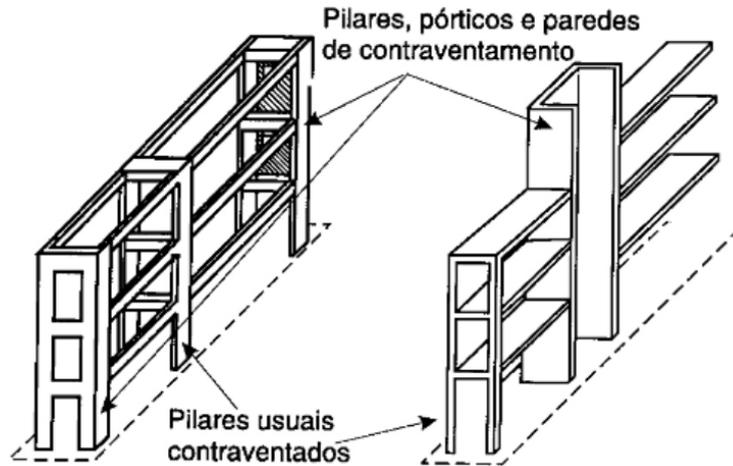
Tipologias estruturais apresentam diferentes tipos de subestruturas verticais. Em estruturas de edifícios, é comum que as vigas e os pilares possuam o mesmo alinhamento, formando pórticos planos com ligações rígidas. Os elementos perpendiculares aos pórticos planos funcionam interligando-os, formando pórticos espaciais, conforme Figura 3.



(Fonte: ALVA, 2007, p. 6)

Os subsistemas verticais possuem função de resistir e proporcionar rigidez a estrutura quanto aos esforços laterais, sendo conhecidos como subestruturas de contraventamento. O papel de contraventar a estrutura pode ser feito por diversos tipos de elementos. Em estruturas de edifícios em aço, por exemplo, é comum interligar os pórticos da estrutura com elementos inclinados, proporcionando rigidez à estrutura através da distribuição dos esforços laterais por toda estrutura. Já em edifícios de concreto, a rigidez aos esforços laterais pode ser atribuída às ligações rígidas entre as vigas e os pilares, além de elementos adicionais como núcleo rígidos e paredes estruturais, conforme Figura 4.

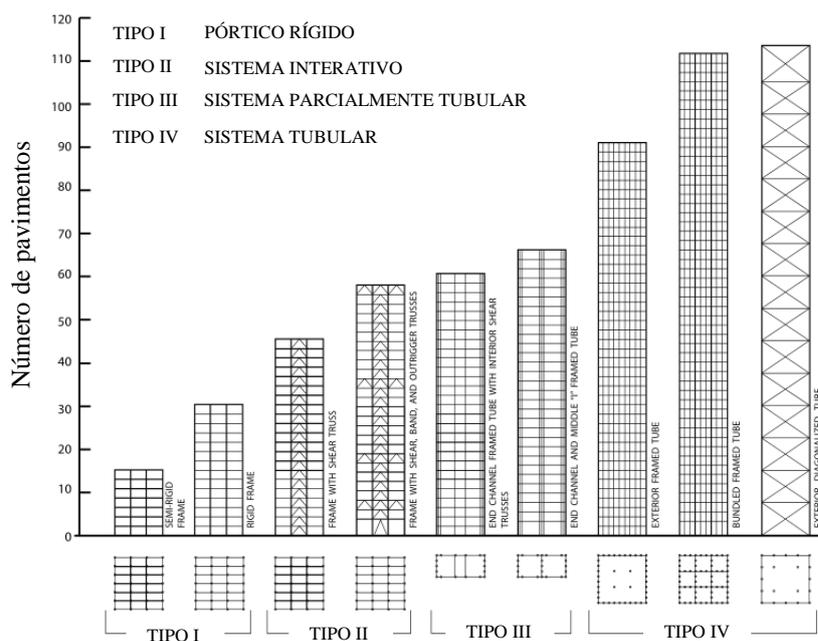
Figura 4 – Sistemas de contravento



(Fonte: FUSCO, 1995, p. 367)

A construção de edifícios cada vez mais altos aumenta a importância dos esforços laterais ao dimensionamento da estrutura, criando a necessidade de se desenvolver subsistemas de contravento mais complexos e rígidos. Ao longo do século XX foram utilizados e testados diversos tipos de sistemas. A Figura 5, adaptada da figura elaborada pela CTBUH nos anos 70, propõe uma relação entre o número de pavimentos de uma edificação e o sistema mais eficiente a ser utilizado.

Figura 5 – Relação entre o número de pavimentos e sistemas de contravento



(Fonte: adaptada de CBTUH, 1970)

É possível notar que os sistemas tubulares, caracterizados por uma quantidade grande de pilares próximos nas fachadas do edifício, proporcionavam maior efetividade para os edifícios mais altos. O sistema de núcleo-*outrigger*, foco deste trabalho, era indicado para edifícios entre 50 e 60 pavimentos. No entanto, com o passar dos anos o sistema tubular perdeu espaço na concepção estrutural de edifícios altos, devido a sua baixa flexibilidade arquitetônica. Nas próximas seções serão discutidos com mais detalhes os sistemas de pórticos rígidos, e de núcleos rígidos com *outriggers*, conhecido como *CMO*.

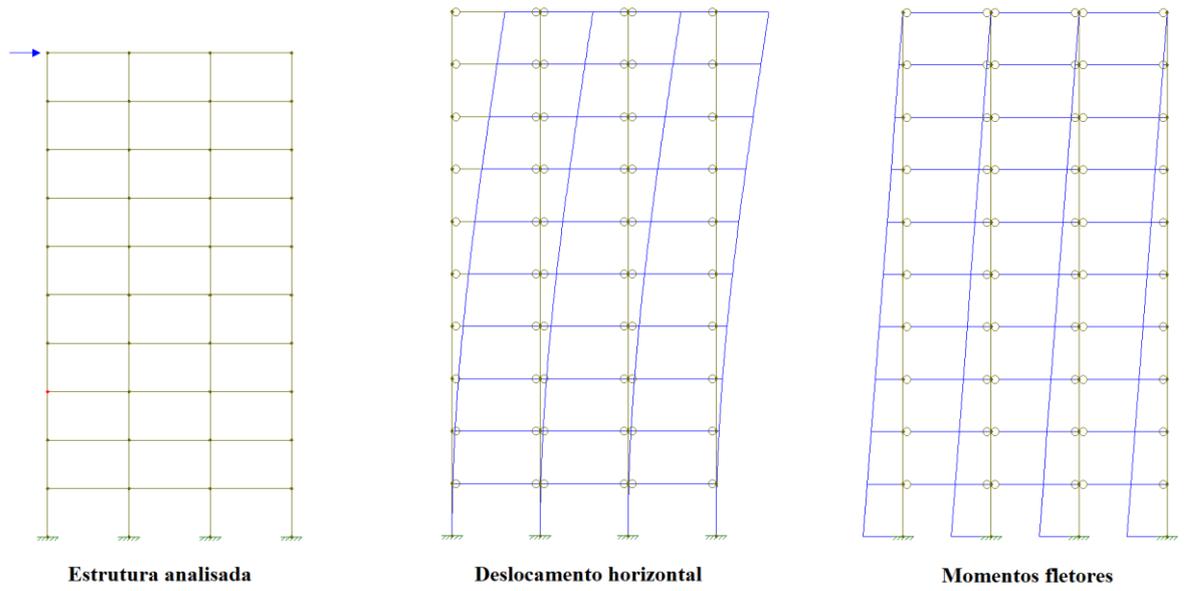
### 3.1.1 Pórticos rígidos

O sistema de pórticos rígidos é comumente utilizado em edifícios comerciais e residenciais de concreto armado. Isto se deve, principalmente, a eficiência deste sistema em edifícios de poucos pavimentos e sua flexibilidade para atender as condições impostas no projeto arquitetônico. Ao sofrer esforços laterais, o pórtico tende a se deslocar, solicitando os pilares e as vigas, de forma a impedir o deslocamento lateral.

Para demonstrar o efeito que os nós rígidos provocam no comportamento da estrutura, foram elaborados os modelos apresentados nas Figuras 6 e 7, utilizando o *software* Ftool. Os modelos são compostos por um pórtico plano formado por barras de concreto C30, com seção retangular de 30x30 centímetros e um carga horizontal aplicada no topo da estrutura. O primeiro modelo, apresentado na Figura 6, não considera ligações rígidas entre as vigas e os pilares da estrutura. Neste modelo, a força aplicada é distribuída entre os 4 pilares presentes, os quais apresentam o comportamento de uma viga em balanço engastada no solo, já que as vigas intermediárias não contribuem com a rigidez da estrutura.

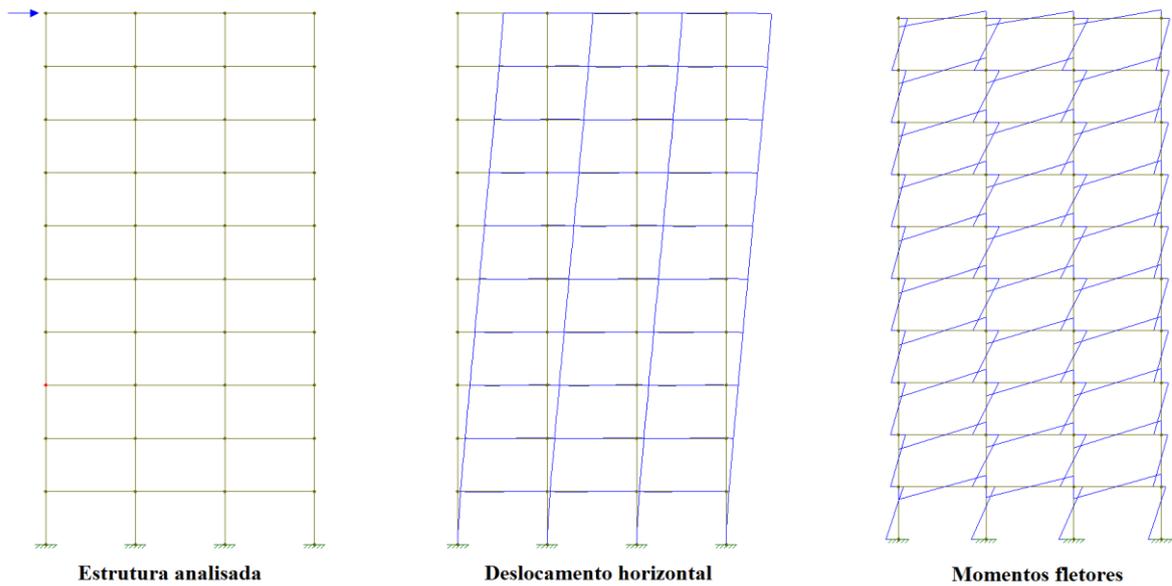
Por outro lado, o modelo da Figura 7 considera ligações rígidas entre as vigas e os pilares, apresentando um comportamento distinto do modelo da Figura 6. Ao se deslocarem, os nós entre as vigas e os pilares tendem a rotacionar, porém como a ligação entre os elementos é rígida, a rotação é restringida. Isto faz com que surjam momentos fletores nas vigas e nos pilares, combatendo a rotação relativa entre os elementos e conseqüentemente contribuindo para a redução do deslocamento lateral e dos momentos fletores na base dos pilares. A rigidez considerada entre as vigas e os pilares é fundamental para a estabilidade global da estrutura, conforme demonstrado nas Figuras 6 e 7, e deve ser considerada na concepção estrutural de edifícios que utilizam esse sistema.

Figura 6 – Pórtico plano com nós não enrijecidos



(Fonte: AUTOR, 2021)

Figura 7 – Pórtico plano com nós enrijecidos

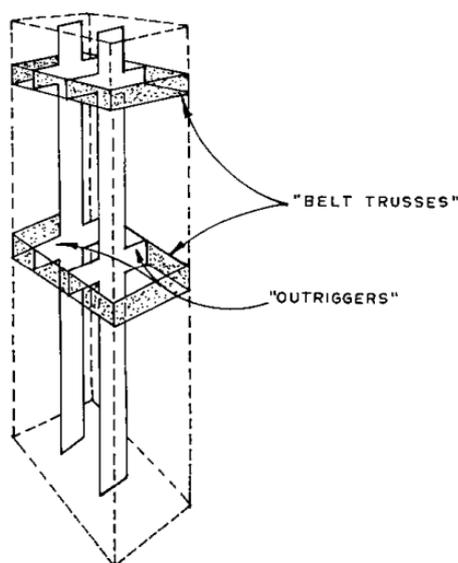


(Fonte: AUTOR, 2021)

### 3.1.2 Sistemas de *Outriggers*

Sistemas de pórticos rígidos são eficientes para edifícios de poucos pavimentos. Ao aumentar a altura da edificação, os esforços laterais passam a ser predominantes, e somente os pórticos de contraventamento não são suficientes para estabilizar a estrutura. É comum, em edifícios, acrescentar outros tipos de elementos a estrutura para contribuir aos subsistemas verticais, como núcleos rígidos e parede estruturais. Os núcleos rígidos são elementos de grande rigidez ao deslocamento lateral, normalmente compostos da junção de paredes estruturais em mais de uma direção. O sistema de *outriggers*, somado à presença de núcleos rígidos, tem a função de contribuir ao sistema de contraventamento da estrutura, através da inserção de elementos horizontais com rigidez elevada em alguns pavimentos da edificação, conforme Figura 8.

Figura 8 – Edifício com *Outriggers* e *Belt-trusses*



(Fonte: RIBEIRO, 1990, p. 26)

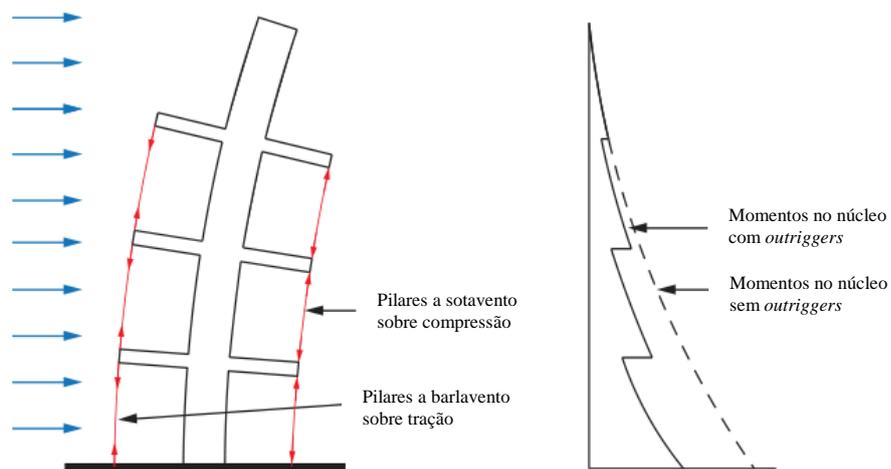
Segundo CTBUH (2012), os elementos que conectam diretamente o núcleo rígido da edificação com os pilares do exterior são chamados de *Outriggers* diretos. Já os elementos que conectam os pilares do exterior entre si, são chamados de *Outriggers* indiretos, ou *Belt-Trusses*, fazendo referência a uma cinta envolvendo a edificação

Na maior parte das edificações que utilizam esse sistema, os *outriggers* são concebidos em estrutura metálica, de forma a criar treliças verticais de altura igual ou superior a um pavimento da edificação, apresentando a rigidez necessária para gerar o comportamento desejado. Os

*outriggers* de concreto armado são concebidos como paredes estruturais ligando os pilares exteriores ao núcleo, com espessura suficiente para criar um comportamento de engastamento entre os elementos, conforme exemplificado por CBTUH (2012, p. 51)

Como o deslocamento lateral em edifícios com presença de núcleos rígidos é governado pela rigidez do núcleo, esse elemento acaba absorvendo grande parte do momento fletor gerado na estrutura e contribui de maneira quase isolada para a redução do deslocamento lateral. Segundo CTBUH (2012), a ideia por trás do sistema de *outriggers* é utilizar os pilares externos da edificação para combater os momentos fletores no atuantes núcleo, conforme Figura 9.

Figura 9 – Impacto da inserção de *outriggers* sobre o núcleo da edificação



(Fonte: adaptado de TARANATH, 1998)

O resultados esperados com a inserção do sistema de *outriggers* em uma edificação são a diminuição do deslocamento lateral da edificação, a redução do momento fletor do núcleo e o aumento de solicitações nos pilares externos, conforme disposto em CTBUH (2012).

### 3.2 ESTABILIDADE GLOBAL

Na etapa do dimensionamento da estrutura analisada, além de verificar os elementos constituintes isoladamente, é necessário considerar o comportamento da estrutura devido aos esforços atuantes como um todo. Quando se realiza a análise estrutural, considera-se a estrutura em sua forma não deslocada para obter os esforços nos elementos estruturais. Porém, os

esforços horizontais decorrentes da ação do vento e do desaprumo da edificação podem deslocar significativamente a estrutura. Esse deslocamento gera uma excentricidade aos esforços verticais, produzindo esforços adicionais que não existem na forma não deslocada da estrutura. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) estes esforços são chamados de esforços de segunda ordem. Os esforços obtidos inicialmente pela configuração não deformada da estrutura são conhecidos como esforços de primeira ordem.

A estabilidade global de uma edificação está relacionada com o quão relevantes são os esforços de segunda ordem em relação aos de primeira ordem para o dimensionamento da estrutura. Quanto menor a relação entre esforços de segunda ordem para os esforços de primeira ordem, mais estável é a estrutura. Conforme a definição de Kimura (2018, p. 385):

A estabilidade global de uma estrutura é inversamente proporcional à sua sensibilidade perante os efeitos de segunda ordem. Em outras palavras, quanto mais estável for a estrutura, menores serão os efeitos de segunda ordem. Ou ainda, quanto maiores forem os efeitos de segunda ordem, menos estável será a estrutura.

Nesta seção, será discutida a influência dos esforços de segunda ordem no dimensionamento da estrutura e o quanto varia sua significância dependendo do tipo de edificação analisada.

### **3.2.1 Ações externas em edifícios**

Para projetar qualquer estrutura é indispensável analisar os esforços a que ela estará submetida. O bom entendimento das ações atuantes é fundamental para atender os critérios de economia e segurança necessários ao projeto estrutural.

As ações comumente consideradas no projeto estrutural de um edifício, segundo a NBR 8681 (ABNT, 2003), podem ser divididas entre permanentes e variáveis. As ações permanentes podem apresentar pequenas variações em seu valor ao longo da vida útil da estrutura, como o peso próprio dos elementos construtivos e revestimentos. Já as ações variáveis apresentam um desvio maior em seus valores, como a sobrecarga de utilização da estrutura e os esforços provenientes do vento. Além da divisão entre cargas permanentes e variáveis, as ações podem ser divididas entre cargas verticais, causadas pela ação da gravidade, e horizontais, causadas principalmente pelo vento, sismos e desaprumo da edificação.

Tendo em vista que edifícios cada vez mais altos são projetados, a ordem de importância das ações externas ao dimensionamento da estrutura acaba se alterando. Em edifícios de poucos pavimentos, as ações que atuam verticalmente a estrutura, como o peso próprio e a sobrecarga, são fortemente determinantes ao dimensionamento dos elementos estruturais. Segundo Ribeiro (2010), em edifícios altos, os esforços horizontais decorrentes da ação do vento tem uma significância maior e podem determinar o dimensionamento dos elementos estruturais para atender aos limites de estabilidade global da estrutura.

### 3.2.2 Não-linearidade

A análise elástica linear, em muitos casos, pode ser próxima do comportamento real da estrutura, mas em outros pode não representar completamente a forma que a estrutura responderá as ações externas. Isto ocorre, principalmente, porque o comportamento real da estrutura apresenta não-linearidades nas relações entre tensões e deformações. Em estruturas de concreto armado a não-linearidade dos elementos estruturais pode ser dividida entre geométrica e física, ambas de consideração obrigatória, segundo o prescrito na NBR 6118 (ABNT, 2014).

A não-linearidade geométrica considera a deformação de um elemento ao sofrer esforços de compressão, gerando esforços de segunda ordem. Pode ser considerada por métodos presentes na NBR 6118 (ABNT, 2014) dependendo do valor de esbeltez do elemento analisado.

A não-linearidade física está relacionada com o comportamento da relação tensão-deformação do concreto não ser linear, devido às imperfeições do material. Em razão da complexidade de se analisar com exatidão o comportamento dos elementos de concreto, quanto à não-linearidade física. A NBR 6118 (ABNT, 2014) propõe um método simplificado, dependendo do tipo de elemento analisado através, da redução de sua rigidez conforme a seguir.

Para a análise dos esforços globais de 2ª ordem, em estruturas reticuladas com no mínimo quatro andares, pode ser considerada a não-linearidade física de maneira aproximada, tomando-se como rigidez dos elementos estruturais os valores seguintes:

- lajes:  $(EI)_{sec} = 0,3 E_{ci} I_c$
- vigas:  $(EI)_{sec} = 0,4 E_{ci} I_c$  para  $A_s \neq A_s'$  e  
 $(EI)_{sec} = 0,5 E_{ci} I_c$  para  $A_s = A_s'$
- pilares:  $(EI)_{sec} = 0,8 E_{ci} I_c$

Onde  $I_c$  é o momento de inércia da seção bruta de concreto, incluindo, quando for o caso, as mesas colaborantes.

Para a análise correta da estabilidade global de um edifício, é imprescindível a consideração da redução da rigidez dos elementos pela consideração da não-linearidade física, pois esse critério influencia de forma significativa os deslocamentos da estrutura.

### 3.2.3 Esforços de 2ª ordem

Para elaborar um projeto estrutural com economia e segurança, é necessário que o dimensionamento dos elementos estruturais esteja coerente com os esforços atuantes na estrutura. Para isso é necessário verificar diversos estados-limites estabelecidos pelas normas vigentes, tanto últimos quanto de serviço.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) separa os esforços de 2ª ordem em globais, locais e localizados. Os efeitos globais são atuantes na estrutura de forma global, e dependem do deslocamento da estrutura como um todo. Os efeitos locais ocorrem em elementos isolados, como o deslocamento gerado pela flambagem de um elemento comprimido. Por fim, os efeitos localizados ocorrem em regiões específicas da estrutura que podem apresentar uma não-retilineidade diferente do restante da estrutura, gerando esforços adicionais, como partes de pilares-parede.

Os elementos constituintes da estrutura devem ser verificados para os esforços de 2ª ordem gerados na estrutura deformada. O estado-limite último que considera a resistência do elementos estruturais aos esforços de 2ª ordem é chamado de estado-limite último de instabilidade, definido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) como:

Nas estruturas de concreto armado, o estado-limite último de instabilidade é atingido sempre que, ao crescer a intensidade do carregamento e, portanto, das deformações, há elementos submetidos a flexo-compressão em que o aumento da capacidade resistente passa a ser inferior ao aumento da sollicitação.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define como 10% o limite entre esforços de 2ª ordem se comparados aos de primeira ordem para que seja possível desprezar a consideração destes. A norma supracitada propõe dois métodos de avaliação dos esforços de 2ª ordem: o parâmetro de

instabilidade  $\alpha$  e o coeficiente  $\gamma z$ . Além desses dois métodos, é possível analisar os efeitos de 2ª ordem mais precisamente através do processo P-Delta, adequado para a análise computacional da estrutura. A avaliação dos esforços de 2ª ordem nos edifícios analisados neste trabalho foi feita a partir do cálculo do coeficiente  $\gamma z$ .

### 3.2.3.1 Coeficiente $\gamma z$

O coeficiente  $\gamma z$  é definido de acordo com a equação 1.

$$\gamma z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

$\Delta M_{tot,d}$  : o momento de tombamento da estrutura, ou seja, a soma dos momentos gerados por todas as ações horizontais atuantes, em relação a base;

$M_{1,tot,d}$  : a soma dos produtos das forças verticais atuantes na estrutura pelos deslocamentos horizontais obtidos na análise de primeira ordem.

O valor obtido através dessa relação indica a importância dos esforços de 2ª ordem na estrutura analisada. A NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica as edificações em duas categorias: estruturas de nós fixos ( $\gamma z \leq 1,1$ ) e estruturas de nós móveis ( $\gamma z \geq 1,1$ )

### 3.2.3.2 Estruturas de nós fixos

Nas estruturas de nós fixos, em que  $\gamma z \leq 1,1$ , a NBR 6118 (ABNT, 2014) considera-se que a estrutura analisada em sua forma deslocada não gera esforços de 2ª segunda ordem significativos para o dimensionamento da estrutura. Tal fato permite desconsiderar os efeitos globais de 2ª ordem no dimensionamento dos elementos estruturais. Os efeitos locais e localizados de 2ª ordem devem ser considerados, de acordo com seus próprios critérios definidos na NBR 6118 (ABNT, 2014).

### 3.2.3.3 Estruturas de nós móveis

Para as estruturas que apresentam o coeficiente  $\gamma z > 1,1$  é obrigatória a consideração dos esforços de 2ª ordem no dimensionamento dos elementos estruturais. Em estruturas que apresentam o valor de  $\gamma z$  entre 1,1 e 1,3 a NBR 6118 (ABNT, 2014) permite considerar de forma simplificada os esforços de 2ª ordem, majorando os valores dos esforços de primeira ordem por  $0,95 \gamma z$ . Para valores de  $\gamma z$  acima de 1,3 é necessário analisar os esforços de 2ª ordem de forma mais complexa, preferencialmente através do processo P-delta.

## 3.3 DESLOCAMENTO LATERAL

A Tabela 13.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014) define os deslocamentos limites para os elementos estruturais analisados, tanto para aceitabilidade sensorial dos deslocamentos, quanto para garantir que os elementos não-estruturais não sofram danos. O movimento lateral no topo de edifícios é limitado em  $H/1700$  e  $H_i/850$  entre pavimentos, sendo H a altura da edificação e  $H_i$  a distância entre pavimentos.

## 4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Com o avanço computacional observado ao longo dos séculos XX e XXI, os processos envolvidos no desenvolvimento de projetos estruturais sofreram atualizações significativas. Os cálculos necessários ao se realizar a análise de uma estrutura, os quais costumavam ser feitos manualmente, hoje em dia podem ser automatizados, poupando uma grande quantidade de tempo no processo de desenvolvimento do projeto, criando a possibilidade de se analisar diversas concepções estruturais em um tempo reduzido. A facilidade que a análise estrutural computacional trouxe levou ao desenvolvimento de métodos automatizáveis, como o método das matrizes de rigidez, utilizado por grande parte dos *softwares* comerciais.

Neste capítulo será apresentado o método de análise estrutural por matrizes de rigidez. Também será abordado o funcionamento do *software* TQS, a forma de modelagem desenvolvida para a simulação dos *outriggers* no programa, utilizada ao decorrer do trabalho.

### 4.1 MÉTODO DA RIGIDEZ DIRETA

Segundo Buchaim (2006), o conceito de rigidez de um elemento está associado a dois fatores, ao módulo de elasticidade do material, e ao momento de inércia que a geometria daquele elemento tem em torno do eixo analisado. Em geral, quanto maior for a rigidez de um elemento, maior é o esforço necessário para deslocá-lo. Essa relação entre as forças aplicadas sobre um elemento, e os deslocamentos gerados pode ser expressa de forma matricial através da equação 2:

$$[F] = [k] \cdot [\delta] \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

[F] a matriz que representa as forças aplicadas sobre o elemento;

[k] a matriz de rigidez do elemento analisado;

[ $\delta$ ] a matriz de deslocamentos do elemento.

Através da formulação das matrizes de rigidez dos elementos constituintes da estrutura, é possível compatibilizá-las através de seus deslocamentos e das condições de contorno da estrutura. Este processo faz com que seja possível obter uma matriz que relaciona de forma global as ações da estrutura com seus deslocamentos, e conseqüentemente forneça os esforços nos elementos.

O método da rigidez direta tem formulação simples, porém leva a necessidade de se solucionar matrizes muito extensas, o que seria muito trabalhoso ou impossível de se resolver manualmente. Estes fatores tornam o método adequado para soluções computacionais, sendo utilizado na maioria dos *softwares* de análise computacional disponíveis no mercado.

## 4.2 SISTEMA TQS

Para o desenvolvimento dos modelos de cálculo desenvolvidos ao longo deste trabalho, foi utilizado o *software* comercial TQS (versão estudantil LP&S v22), desenvolvido com o propósito de ser um sistema integrado para projetos estruturais de concreto armado. Segundo Kimura (2007, pg. 36):

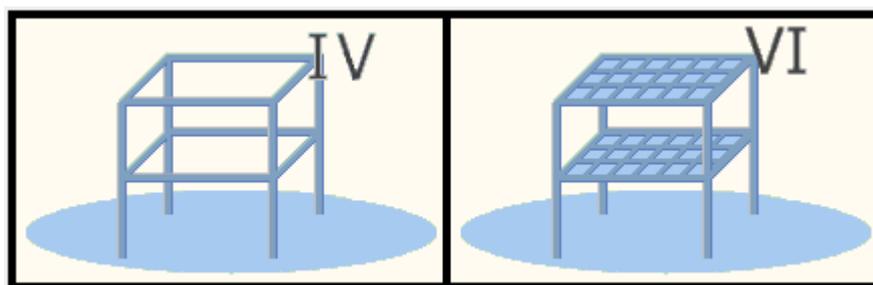
Um sistema integrado abrange todas as etapas do projeto. Calcula a estrutura, dimensiona e detalha as armaduras, gera e imprime os desenhos finais. É o tipo de *software* mais utilizado para projetar edifícios de concreto no Brasil.

O lançamento da estrutura no *software* é feito através de plantas baixas que representam as plantas de formas dos pavimentos do edifício. É possível utilizar elementos de vigas, lajes e pilares, cada um com suas próprias configurações e características. Após o lançamento dos elementos, o processamento dos esforços é realizado pelos modelos de grelhas e/ou pórticos espaciais, por meio de um dos tipos de modelos de análise disponíveis no programa, conhecidos como Modelo IV e Modelo VI. A conexão entre os elementos nos modelos de análise gerados pelo TQS é feita automaticamente através de barras rígidas que ligam os componentes da estrutura aos seus apoios.

No modelo IV, os elementos de lajes são simulados através da analogia de grelhas, que substitui as lajes por elementos de barra lineares espaçados conforme critérios, e simula os pavimentos

separadamente como grelhas estruturais, com apoios na localização dos pilares. Após o cálculo de esforços nos pavimentos, é gerado automaticamente o modelo de pórtico espacial, com as vigas e os pilares substituídos por elementos de barra, e as cargas obtidas nas vigas através da análise das grelhas dos pavimentos. O modelo VI consiste no mesmo processo, porém as grelhas dos pavimentos são inseridas dentro do modelo de pórtico espacial, através de sua discretização por meio de elementos de barra. Este processo gera um modelo mais realista e mais complexo, considerando a rigidez nas ligações entre as lajes e vigas, e o esforço axial nas lajes. É usual considerar o Modelo IV em edifícios mais simples, pois o modelo não considera a influência das lajes na rigidez global do edifício, ficando a favor da segurança e diminuindo consideravelmente o tempo de processamento da estrutura. A diferença entre os modelos de pórticos espaciais é demonstrada de forma simplificada na figura 10.

Figura 10 – Representação dos modelos de pórtico espacial no TQS



(Fonte: TQS, 2021)

Neste trabalho, devido a necessidade de ferramentas mais complexas para simulação dos elementos da estrutura, foi utilizado o Modelo VI, o qual consiste na modelagem de um pórtico espacial constituído de pilares, vigas e lajes. A análise computacional dos esforços é calculada através da montagem e resolução das matrizes de rigidez da estrutura, e com base nos esforços encontrados, o *software* consegue gerar uma solução para o detalhamento das armaduras dos elementos.

A escolha do TQS como ferramenta de análise foi feita pela sua ampla utilização nos escritórios de projetos estruturais no Brasil, e por sua disponibilidade de versões estudantis com os mesmos recursos das versões comerciais. Além disso, a escolha teve o intuito de desenvolver um método para representação do comportamento de *outriggers*, pois o *software* não apresenta uma ferramenta própria para a modelagem destas estruturas.

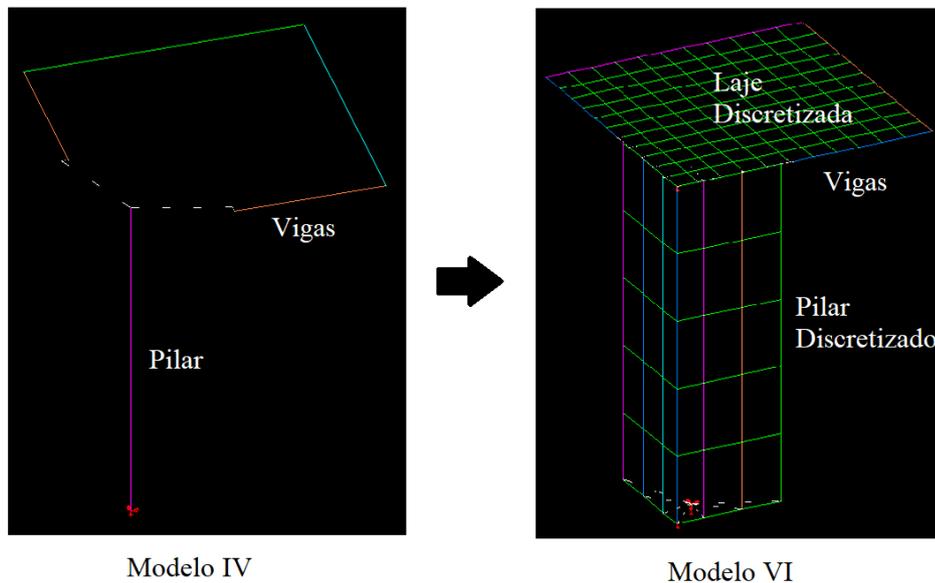
### 4.2.1 Elemento pilar-parede

Como a representação dos elementos estruturais no chamado Modelo IV do TQS é feita através de elementos de barra com propriedades da seção transversal do elemento analisado, Medeiros (2014) ressalta:

Quando a presença do núcleo gera assimetria na estrutura do edifício, a sua representação por uma barra única conduz a modelos que não captam de forma precisa o real comportamento estrutural do edifício sujeito a forças horizontais.

A partir deste fato, foi incluído no denominado Modelo VI a possibilidade de se discretizar os pilares paredes em malhas de elementos de barras, verticais e horizontais, para simular o comportamento real da estrutura aos esforços laterais, conforme indicado na Figura 11. O elemento pilar, ao ser analisado no pórtico espacial, é simulado através de uma barra com as propriedades da seção longitudinal. A partir da discretização desse elemento, as barras geradas no pórtico espacial são substituídas por barras verticais com a inércia de cada faixa, e barras horizontais com inércia corrigida ligando as barras verticais.

Figura 11 – Diferenciação dos modelos de pórtico espacial pelo visualizador TQS



(Fonte: AUTOR, 2021)

O estudo realizado por Medeiros (2014) visou comparar os resultados obtidos com a modelagem de núcleos rígidos de edifícios de duas maneiras, com elementos finitos de casca e por malhas de barras. Medeiros (2014) chega a conclusão que:

Os resultados obtidos pelo modelo de barras apresentam uma grande concordância com os do modelo de casca, principalmente para casos de carregamento com forças paralelas ao eixo de simetria do núcleo, quando o mesmo sofre flexão sem torção.

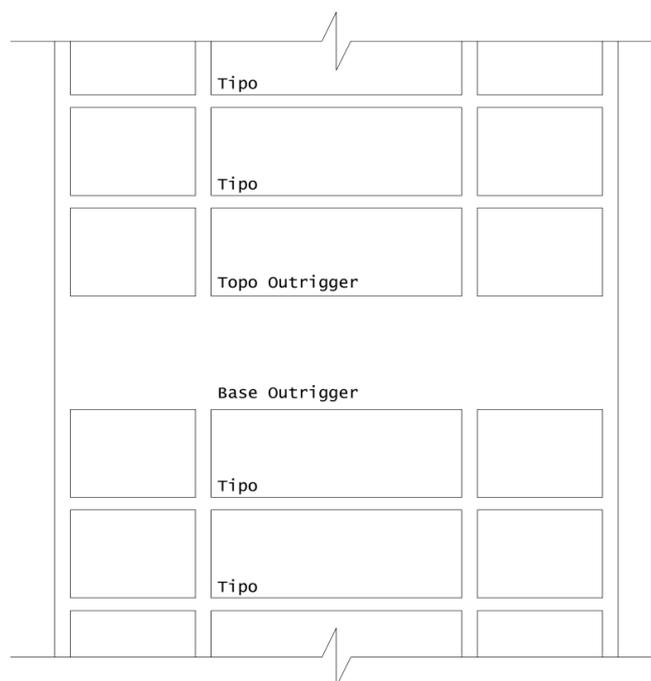
A partir desta análise feita por Medeiros (2014), conclui-se que é coerente a representação de elementos finitos de casca por malhas de barras geradas automaticamente pelo TQS. Somando este fator com a hipótese que os *outriggers* podem ser simulados coerentemente através de elementos de casca, concluí-se que sua modelagem é possível utilizando o TQS, por meio da sua representação com malhas de barras, disponível no *software* através da ferramenta “pilar-parede”.

#### **4.2.2 Modelagem de *Outriggers***

A partir dos estudos realizados por Medeiros (2014), e da premissa que o comportamento de *outriggers* pode ser simulado corretamente por meio de elementos finitos de casca, a forma utilizada para se modelar os *outriggers* no TQS foi através do elemento “pilar” discretizado pelas faixas para simular o comportamento de pilar parede.

Para o lançamento desse elemento no TQS, de forma que o pórtico espacial gerado automaticamente pelo *software* represente coerentemente o comportamento real da estrutura, foram necessários utilizar alguns artifícios de modelagem. Primeiramente, foram inseridos dois tipos de pavimentos ao longo da edificação, para servirem de base e topo para os *outriggers*, como demonstrado na Figura 12.

Figura 12 – Representação dos pavimentos criados para modelagem de *outriggers*



(Fonte: AUTOR, 2021)

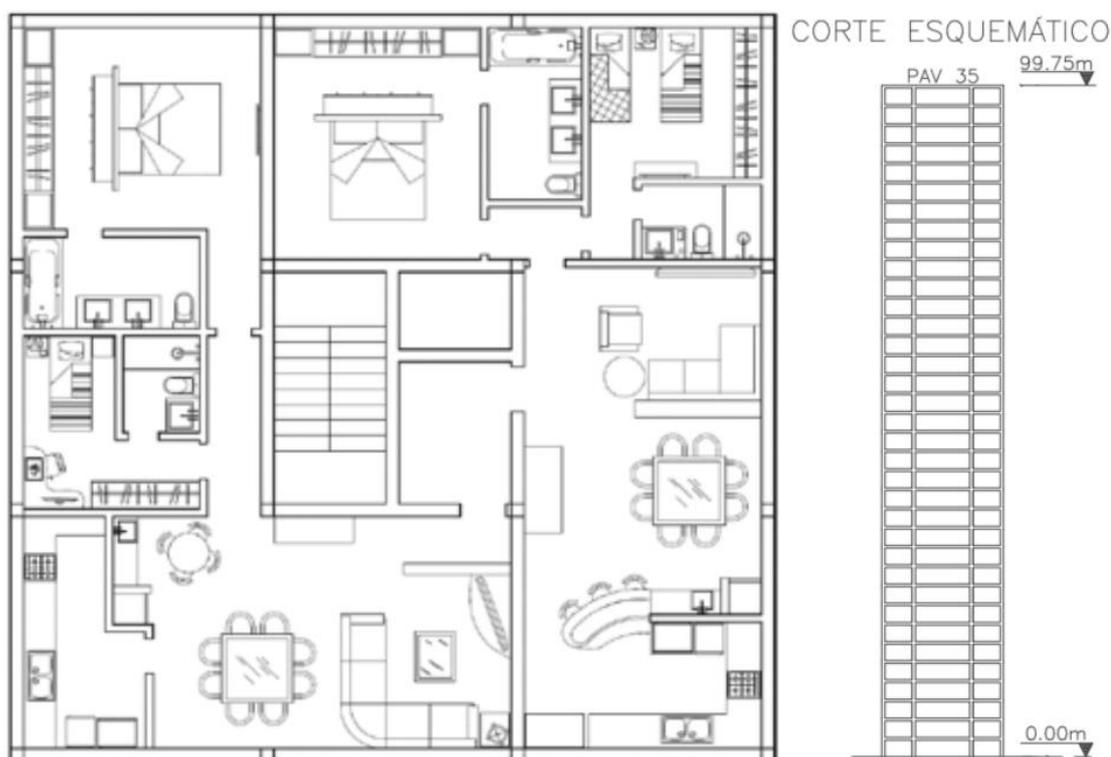
Esta inserção de pavimentos permitiu com que os elementos de pilares modelados da edificação, considerados com mesma seção em todos os pavimentos, fossem divididos em duas partes. A primeira parte dos pilares tem seu início coincidindo com o primeiro nível da edificação, e seu término no nível do pavimento chamado de “Base *Outrigger*”. Já a segunda parte dos elementos começa no nível chamado de “Topo *Outrigger*” e termina no último pavimento da edificação, deixando livre o espaço entre os pavimentos de base e topo do *Outrigger* para modelagem do pilar-parede que funcionará como os *outriggers* da edificação, o qual terá a altura completa do pavimento.

A modelagem dos *outriggers* foi feita com o intuito de usar as malhas de barras dos pilares-parede criadas automaticamente na geração dos pórticos para simular os *outriggers*. Para isso, entre os pavimentos “Base *Outrigger*” e “Topo *Outrigger*” foi modelado um elemento de pilar com a projeção dos demais pilares da edificação e das paredes que ligam os pilares externos ao núcleo. A partir da inserção dos pilares-parede, é feita a discretização desses pilares em faixas, as quais tem a função de subdividir a inércia inicial do pilar em partes menores, sendo representadas no modelo TQS por pequenas seções dentro do pilar de seção maior. Cada uma dessas seções é então substituída no modelo de pórtico espacial por barras verticais com inércia equivalente da subdivisão. A discretização em faixas de pilar-parede dos outros pilares da

edificação é obrigatória, mesmo que não sejam considerados como pilar-parede, pois é necessária para o cálculo coerente dos esforços na edificação. A representação em planta dos pilares-parede que simulam os *outriggers* será demonstrada com mais detalhes na Figura 13.

Para validação do método de modelagem no TQS, foram elaborados 3 modelos de cálculo com base no edifício analisado por Brasil (2018). No artigo, o autor analisa 17 modelos de cálculo com diferentes sistemas de contraventamento em um edifício hipotético de 35 pavimentos, com intuito de comparar a influência de cada um desses sistemas. Entre os modelos analisados pelo autor, foram escolhidos 4 para serem feitos no TQS com o método de pilares-parede discretizados. A arquitetura utilizada no edifício analisado foi proposta inicialmente por Marcadella (2016), e consiste em um pavimento tipo com planta baixa de 35x35 m e 35 pavimentos, totalizando uma altura de 99,75 m, conforme Figura 13.

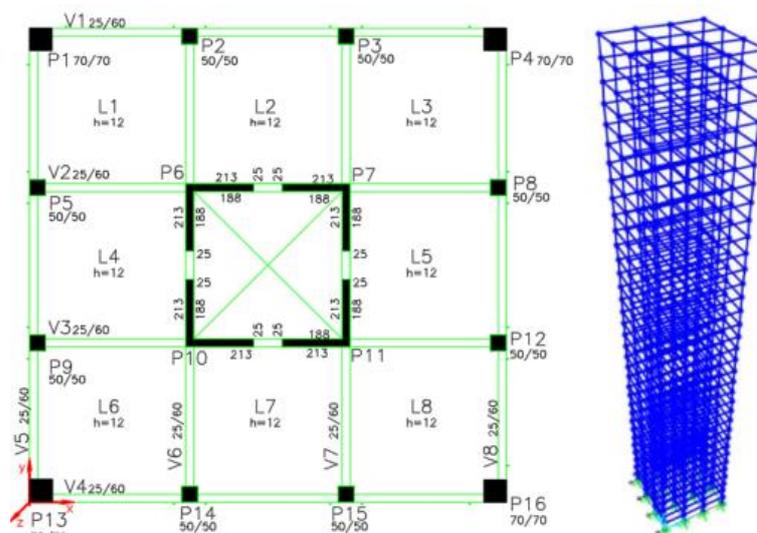
Figura 13 – Arquitetura proposta por Marcadella (2016)



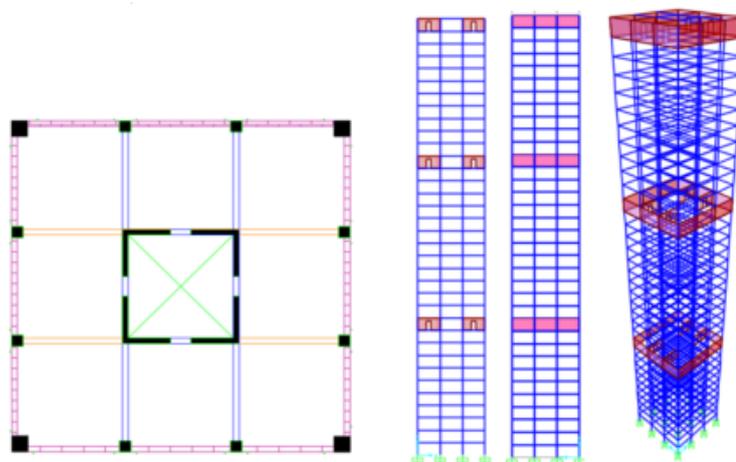
(Fonte: MARCADELLA, 2016)

Dentre os modelos elaborados por Brasil (2018), foram destacados o modelo inicial, analisado como sistema de pórticos rígidos, conforme Figura 14, e os modelos identificados como 10, 11 e 12, que contam com a presença *outriggers* intermediários conforme a Figura 15:

Figura 14 – Modelo de pórticos rígidos



(Fonte: BRASIL, 2018)

Figura 15 – Modelo de cálculo com presença de *outriggers*

(Fonte: BRASIL, 2018)

As cargas consideradas nos modelos analisados por Brasil (2018) foram o peso próprio dos elementos estruturais, a sobrecarga nas lajes e o vento. O peso próprio foi calculado automaticamente pelo *software* utilizado, a carga acidental considerada nas lajes foi de  $2 \text{ kN/m}^2$ , e a carga de vento foi considerada pelos critérios da NBR 6123 (ABNT, 1998), obtendo os valores indicados no Quadro 1. Nos modelos utilizados não foram modeladas as lajes da edificação, e portanto seu peso próprio e a carga acidental foram distribuídas nas vigas ao redor. Para os modelos analisados, não foram consideradas as cargas de alvenaria, tanto nos modelos elaborados por Brasil (2018), quanto nos desenvolvidos neste trabalho.

Quadro 1 – Cargas de vento consideradas por Brasil (2018)

PAV	S2	Vk (m/s)	q (N/m <sup>2</sup> )	Ae	Ca	Fa (kN)	Fa (kN/m)
35	1.20	51.41	1620.42	42.6645	1.44	99.55	6.64
34	1.19	51.27	1611.05	42.6645	1.44	98.98	6.60
33	1.19	51.11	1601.46	42.6645	1.44	98.39	6.56
32	1.19	50.96	1591.64	42.6645	1.43	97.11	6.47
31	1.18	50.79	1581.56	42.6645	1.43	96.49	6.43
30	1.18	50.63	1571.22	42.6645	1.42	95.19	6.35
29	1.17	50.46	1560.61	42.6645	1.42	94.55	6.30
28	1.17	50.28	1549.69	42.6645	1.41	93.22	6.21
27	1.17	50.10	1538.46	42.6645	1.41	92.55	6.17
26	1.16	49.91	1526.89	42.6645	1.40	91.20	6.08
25	1.16	49.71	1514.96	42.6645	1.39	89.84	5.99
24	1.15	49.51	1502.64	42.6645	1.39	89.11	5.94
23	1.15	49.30	1489.91	42.6645	1.38	87.72	5.85
22	1.14	49.08	1476.72	42.6645	1.37	86.31	5.75
21	1.14	48.85	1463.04	42.6645	1.36	84.89	5.66
20	1.13	48.62	1448.84	42.6645	1.35	83.45	5.56
19	1.12	48.37	1434.05	42.6645	1.35	82.60	5.51
18	1.12	48.11	1418.63	42.6645	1.34	81.10	5.41
17	1.11	47.83	1402.50	42.6645	1.33	79.58	5.31
16	1.11	47.54	1385.60	42.6645	1.32	78.03	5.20
15	1.10	47.24	1367.83	42.6645	1.31	76.45	5.10
14	1.09	46.91	1349.08	42.6645	1.3	74.83	4.99
13	1.08	46.57	1329.24	42.6645	1.28	72.59	4.84
12	1.07	46.19	1308.13	42.6645	1.27	70.88	4.73
11	1.06	45.79	1285.56	42.6645	1.26	69.11	4.61
10	1.05	45.36	1261.29	42.6645	1.25	67.27	4.48
9	1.04	44.88	1234.99	42.6645	1.25	65.86	4.39
8	1.03	44.36	1206.23	42.6645	1.23	63.30	4.22
7	1.02	43.77	1174.45	42.6645	1.17	58.63	3.91
6	1.00	43.10	1138.79	42.6645	1.14	55.39	3.69
5	0.98	42.32	1098.01	42.6645	1.12	52.47	3.50
4	0.96	41.39	1050.09	42.6645	1.09	48.83	3.26
3	0.94	40.22	991.37	42.6645	1	42.30	2.82
2	0.90	38.62	914.15	42.6645	1	39.00	2.60
1	0.84	36.03	795.82	42.6645	1	33.95	2.26

(Fonte: BRASIL, 2018)

A comparação de critérios realizada foi feita com base nos valores obtidos do coeficiente  $\gamma z$  e do deslocamento lateral no topo da edificação, e resultaram nos seguintes valores, dispostos no quadro 2 adaptado a seguir.

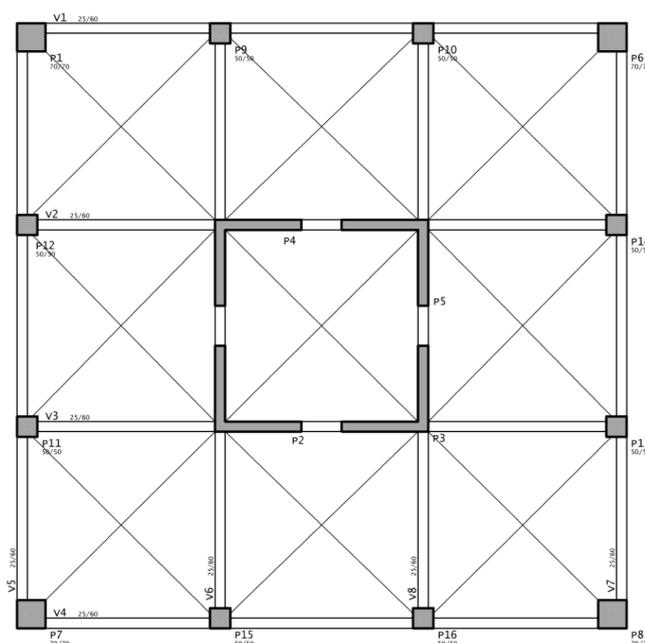
Quadro 2 – Comparação de  $\gamma_z$  e deslocamentos obtidos por Brasil (2018)

MODELO	ESTRUTURA	$\gamma_z$	$\gamma_z$ (cm)	$\delta$ (cm)	$\delta$ (%)
Original	Pórtico	1,109	0,00%	11,410	0,00%
10	Pórtico + Outrigger	1,103	-0,54%	10,680	-6,40%
11	Pórtico + 2 Outrigger	1,095	-1,24%	9,810	-14,02%
12	Pórtico + 3 Outrigger	1,096	-1,13%	9,760	-14,46%

(Fonte: adaptado de BRASIL, 2018)

Os modelos realizados no TQS foram baseados nos mesmos parâmetros. Foi elaborado um modelo base com estrutura de pórtico rígidos, com elementos dispostos conforme Figura 16. As cargas de peso próprio nas vigas foram calculadas automaticamente pelo *software*, com adição de uma carga adicional de 4,8 kN/m para considerar o peso próprio das lajes, as cargas acidentais foram consideradas com valor de 5,7 kN/m na vigas internas e 2,3 kN/m nas vigas de bordo. As cargas de vento foram analisadas conforme Brasil (2018), e foram ponderadas no TQS de forma a obter um valor de deslocamento no topo no edifício base próximo do modelo apresentado no artigo pelo autor, pois a distribuição das cargas no *software* ocorre de forma distinta do consirado manualmente por Brasil (2018).

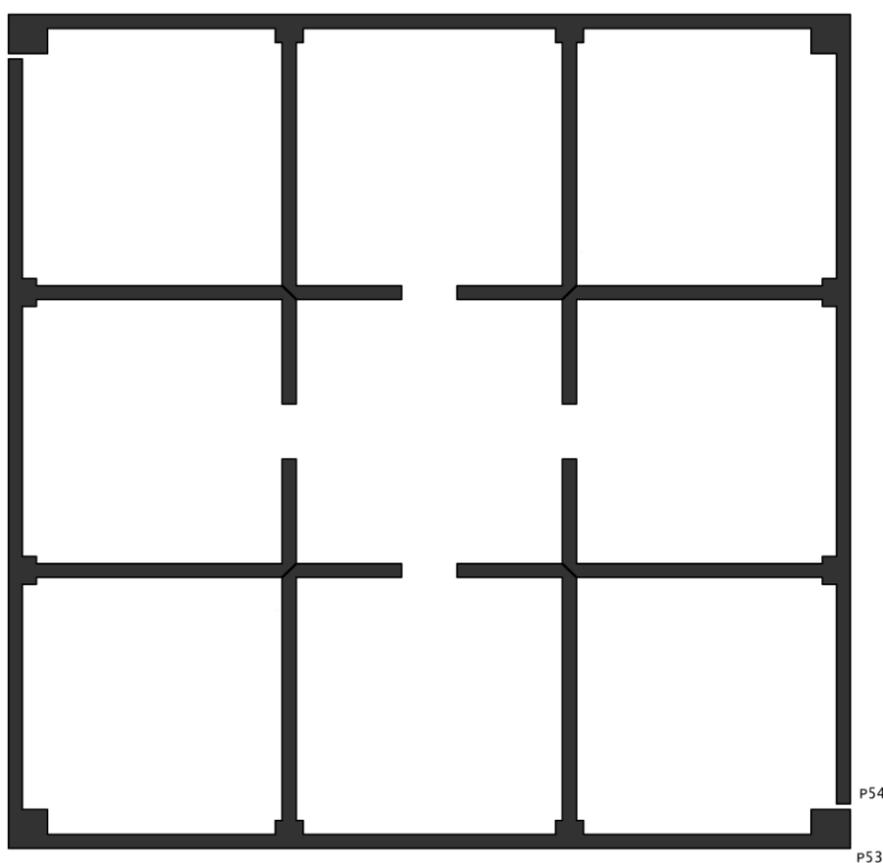
Figura 16 – Planta de formas do edifício base utilizado por Brasil (2018) elaborado no TQS



(Fonte: AUTOR, 2021)

Os modelos com presença de *outriggers* foram elaborados conforme disposto anteriormente. O modelo com 1 *outrigger* tem o pavimento “Base *Outrigger*” no pavimento 19, o modelo com 2 *outriggers* nos pavimentos 10 e 23, e o modelo com 3 *outriggers* nos pavimentos 10, 23 e 35. As proporções da posição dos *outriggers* na altura do edifício foram as indicadas por Ribeiro (1990), sendo  $0,455 \cdot H$  para 1 *outrigger*, e  $0,312 \cdot H$  e  $0,685 \cdot H$  para dois *outriggers*. Para simular os pavimentos de *outriggers* foram inseridos 2 elementos de pilar discretizados conforme disposto na Figura 17.

Figura 17 – Planta baixa dos elementos de pilar-parede que simulam *outriggers*

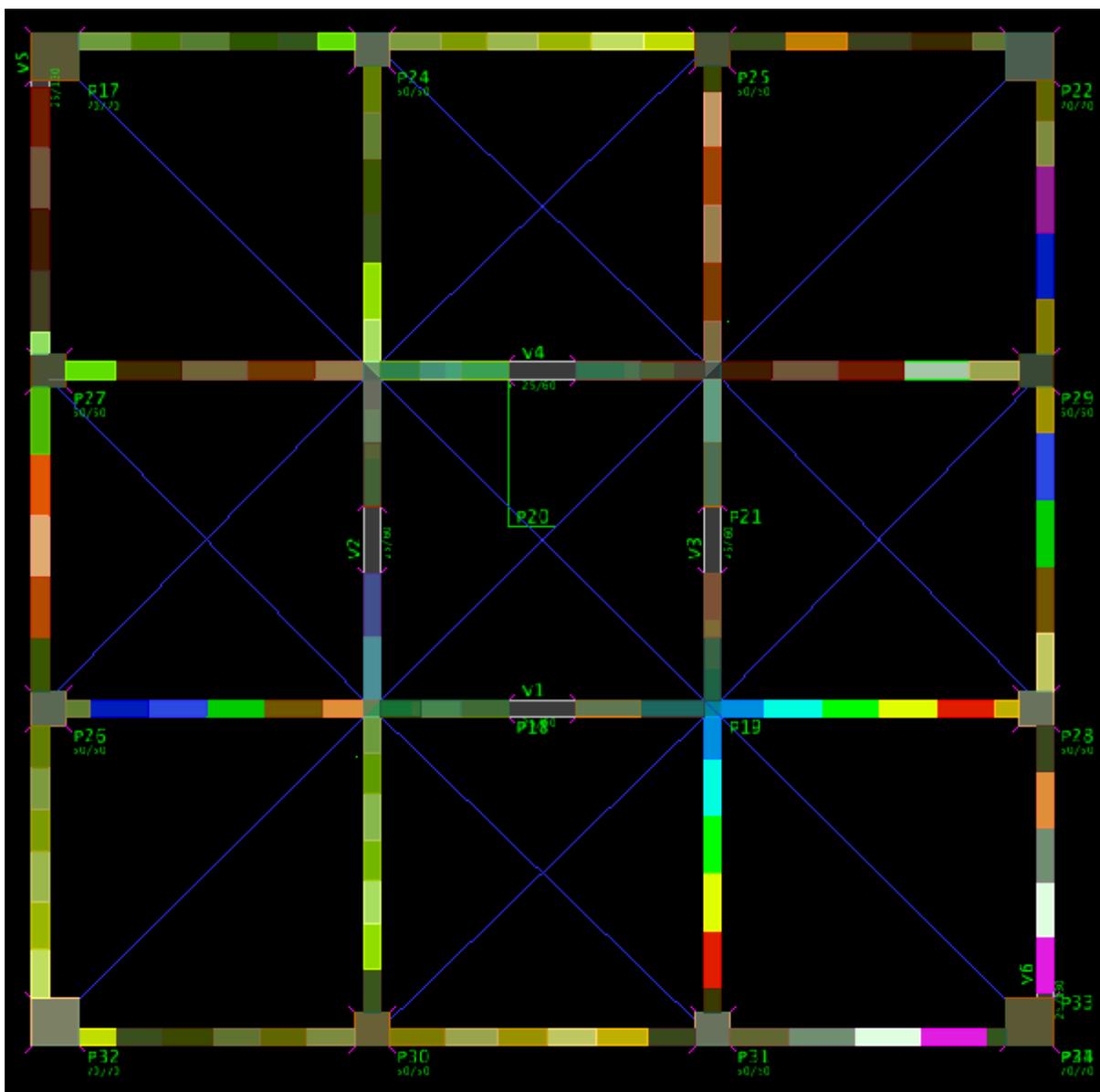


(Fonte: AUTOR, 2021)

Os pilares P53 e P54 são necessariamente poligonais fechadas representando a projeção dos outros pilares da edificação somadas com as paredes estruturais que simulam os *outriggers* e *belt-trusses* da edificação. Esses pilares tem função de transmitir os esforços da parte central da edificação para os pilares do exterior através da sua alta rigidez no plano horizontal. A discretização destes pilares em faixas fica como disposto na Figura 18, onde cada separação em cores é a projeção de uma faixa de pilar parede, com o intuito de separar as barras geradas no

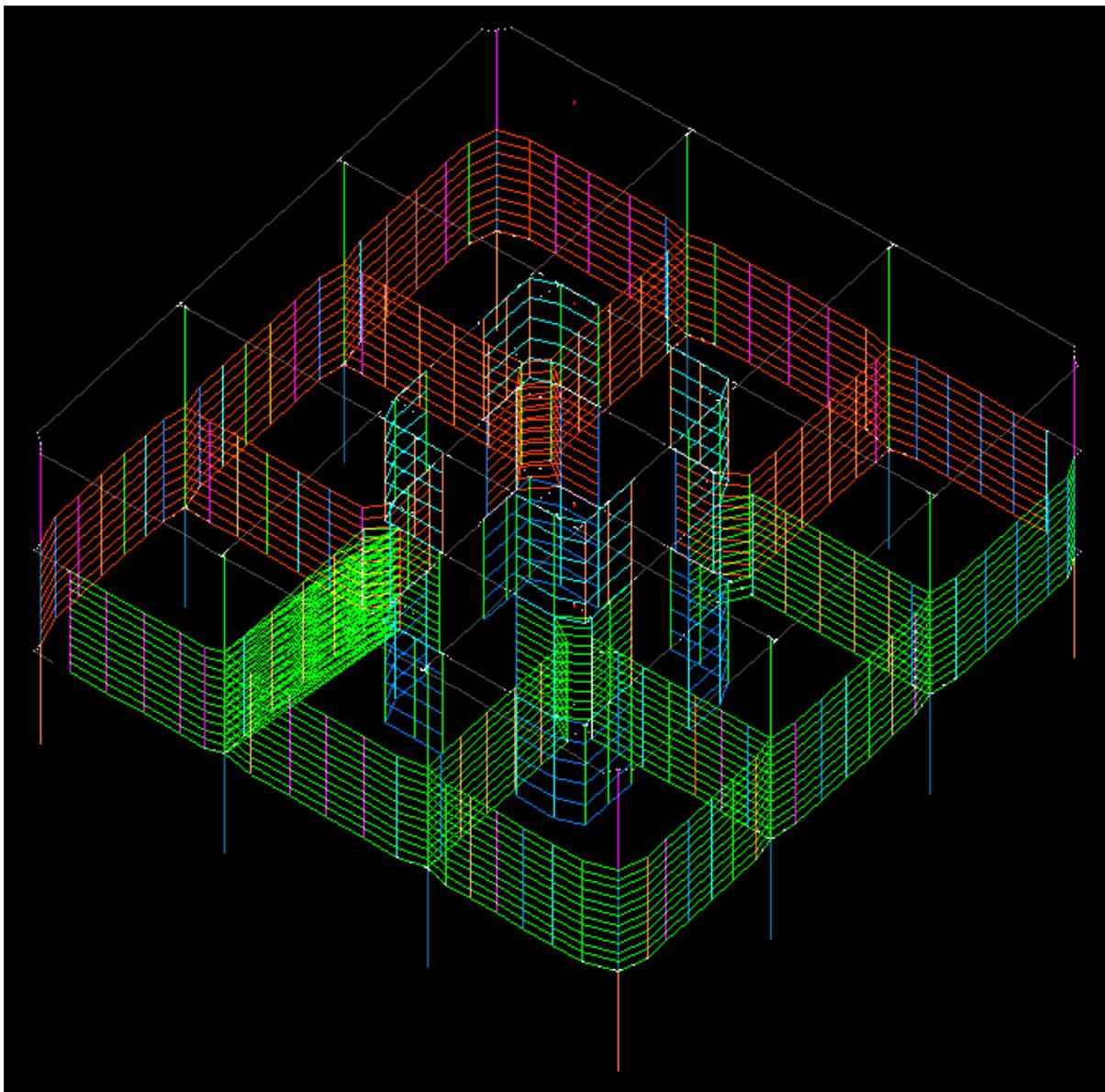
pórtico espacial em outras barras com menor inércia, ligadas por barras horizontais. O pórtico espacial gerado automaticamente pelo TQS para análise estrutural fica como disposto na Figura 19.

Figura 18 – Discretização dos *outriggers* em faixa de pilar-parede



(Fonte: AUTOR, 2021)

Figura 19 – Perspectiva dos *outriggers* no modelo de pórtico espacial gerado pelo TQS



(Fonte: AUTOR, 2021)

Os resultados das análises no *software* TQS e a comparação com os resultados obtidos por Brasil (2018) são apresentados através do Quadro 3, a seguir.

Quadro 3 – Comparação de resultados obtidos por BRASIL (2018) e os modelos feitos no TQS

	<b>Modelos Brasil (2018)</b>			
	$\gamma z$	$\Delta\gamma z(\%)$	d (cm)	$\Delta d(\%)$
Pórtico	<b>1.11</b>	-	<b>11.41</b>	-
1 <i>Outrigger</i>	<b>1.10</b>	0.54	<b>10.68</b>	6.40
2 <i>Outrigger</i>	<b>1.10</b>	1.26	<b>9.81</b>	14.02
3 <i>Outrigger</i>	<b>1.10</b>	1.17	<b>9.76</b>	14.46

	<b>Modelos TQS</b>			
	$\gamma z$	$\Delta\gamma z(\%)$	d (cm)	$\Delta d(\%)$
Pórtico	<b>1.06</b>	-	<b>12.05</b>	-
1 <i>Outrigger</i>	<b>1.06</b>	0.00	<b>11.06</b>	8.22
2 <i>Outrigger</i>	<b>1.05</b>	0.94	<b>10.45</b>	13.28
3 <i>Outrigger</i>	<b>1.05</b>	0.94	<b>10.35</b>	14.11

	<b>Diferença entre Brasil (2018) e TQS</b>	
	$\gamma z$	d
Pórtico	5%	6%
1 <i>Outrigger</i>	4%	4%
2 <i>Outrigger</i>	5%	7%
3 <i>Outrigger</i>	5%	6%

(Fonte: AUTOR, 2021)

Alguns fatores podem ter contribuído para a diferença de valores observada entre os modelos elaborados por Brasil (2018) e os desenvolvidos no *software* TQS, entre eles destaca-se a forma que o TQS considera os esforços de vento. As cargas utilizadas por Brasil (2018) foram calculadas manualmente através do processo descrito na NBR 6123 (ABNT, 1988), e inseridas como cargas distribuídas nas vigas. Já o processo automatizado realizado pelo TQS atribui os carregamentos no pórtico espacial com uma ponderação de coeficientes de arrasto diferente da utilizada por Brasil (2018).

Visto a pequena diferença da ordem de grandeza dos resultados obtidos através da modelagem de *outriggers* por elementos finitos de casca, e por malhas de barras geradas automaticamente nos pilares-parede discretizados no TQS, concluiu-se que é válida a consideração adotada para a modelagem de *outriggers* no TQS, e pode ser utilizada para as comparações efetuadas ao decorrer deste trabalho.

## 5 MODELO ESTRUTURAL DE UMA EDIFICAÇÃO REAL

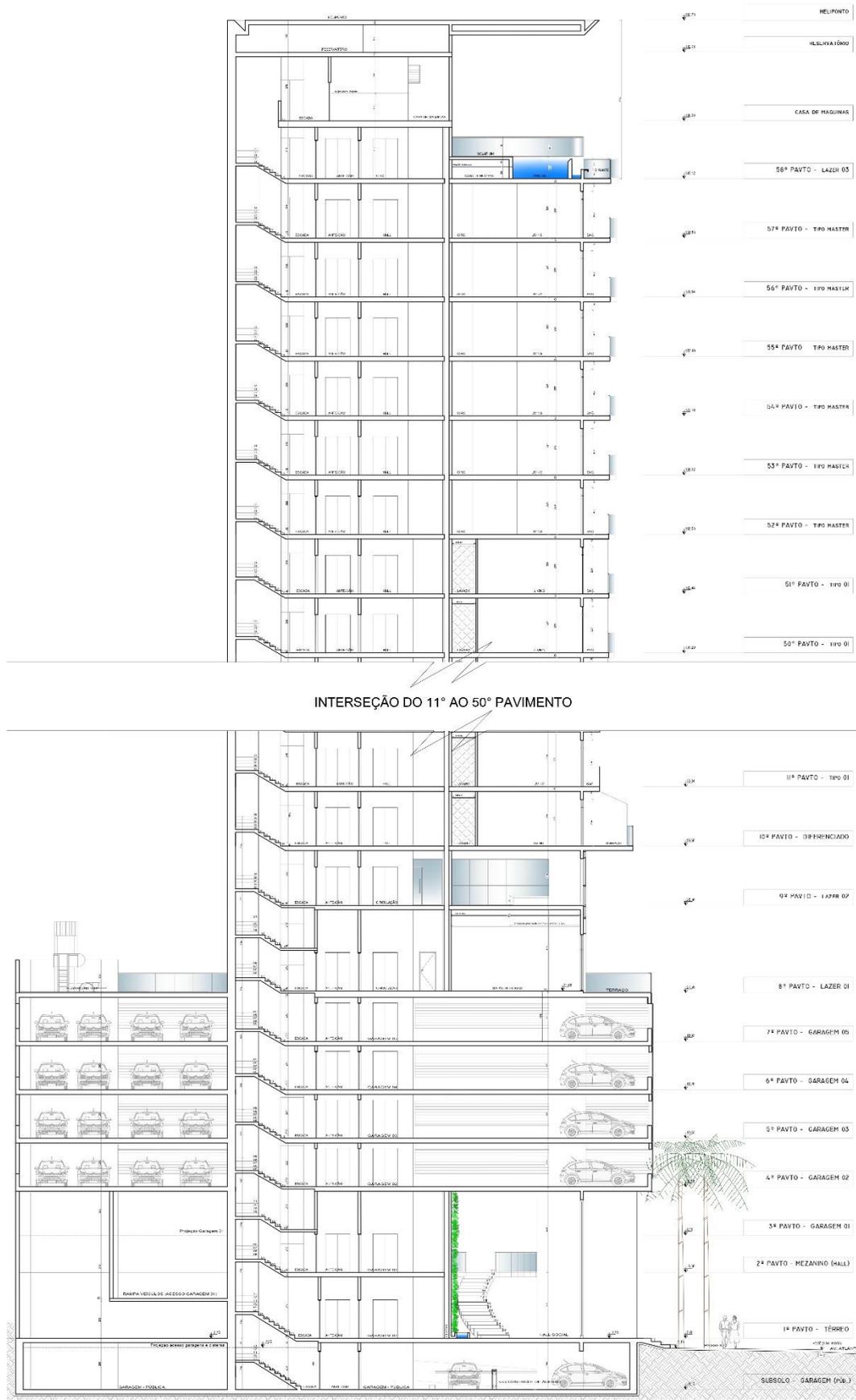
O trabalho foi desenvolvido com base na comparação de parâmetros obtidos na análise computacional de 24 modelos de cálculo, através do *software* TQS. Os modelos foram baseados no pavimento tipo de uma edificação real, projetada para ser construída na cidade de Balneário Camború no estado de Santa Catarina.

Este capítulo tem a função de introduzir o edifício utilizado no trabalho, e descrever os métodos e parâmetros utilizados na elaboração dos modelos de cálculo analisados.

### 5.1 ARQUITETURA

O projeto arquitetônico utilizado no trabalho é de um edifício residencial de 61 pavimentos, sendo os primeiros 10 considerados parte do embasamento da edificação, com áreas de garagem e lazer, além da presença de lojas nos pavimentos térreo e 2º pavimento. A arquitetura da edificação apresenta 2 modelos de pavimentos tipo, sendo o primeiro presente do 11º ao 51º andar da edificação, composto por 2 apartamentos com área privativa de 199.18 m<sup>2</sup> cada, e o segundo extendendo-se do 52º ao 57º pavimento, com 1 apartamento com área privativa de 410.17 m<sup>2</sup>. O andar número 58 é reservado para lazer e os pavimentos 59, 60 e 61 são reservados para áreas técnicas, reservatórios e heliponto, respectivamente. A Figura 20 representa em corte os níveis da edificação.

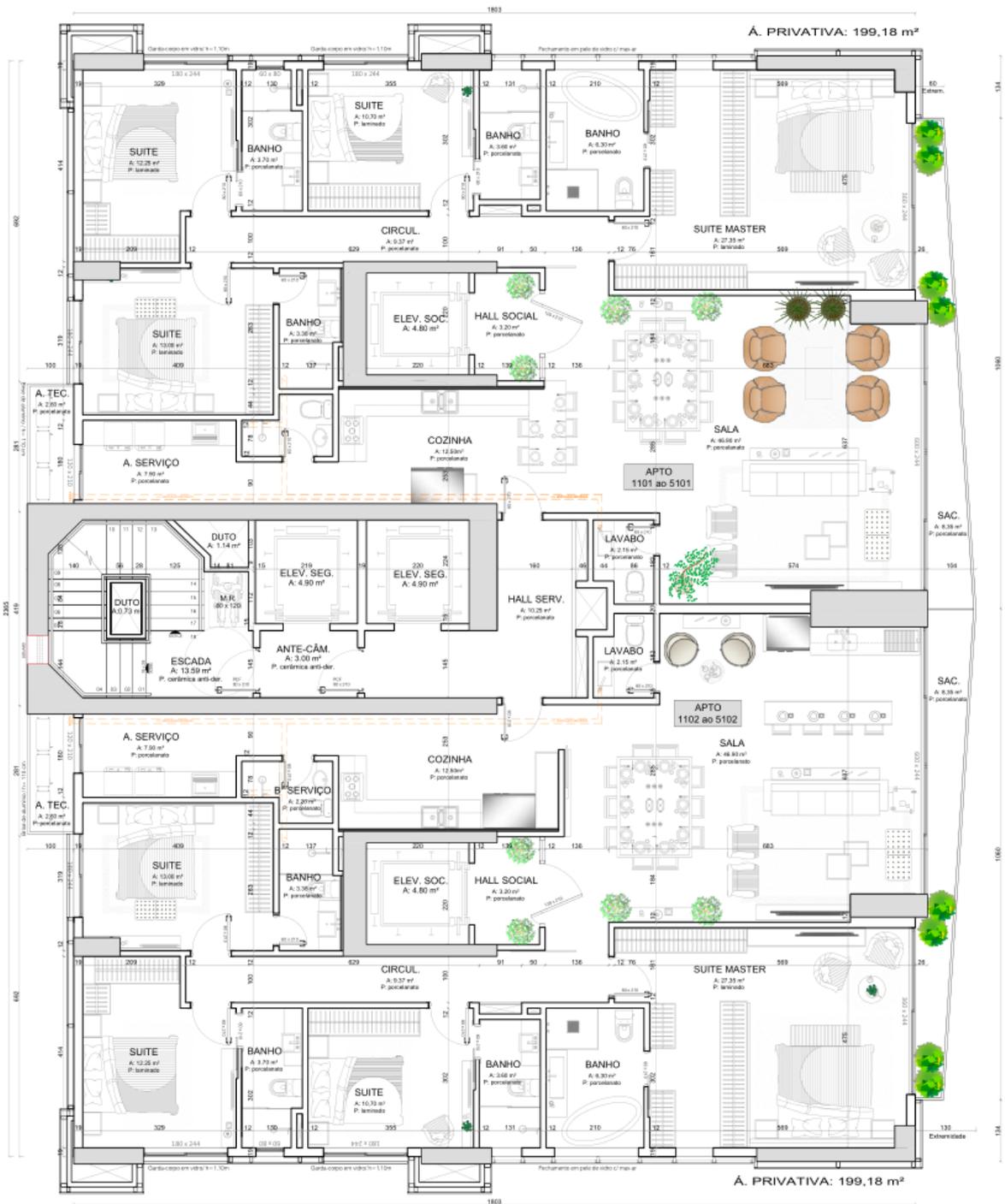
Figura 20 – Corte da edificação



(Fonte: projeto arquitetônico)

O trabalho foi desenvolvido com base no primeiro pavimento tipo da edificação, que estende-se do 11° ao 51° pavimento, demonstrado na figura 21. A altura entre os pavimentos da edificação varia conforme sua utilização, porém no pavimento tipo considerado se mantém constante em 3,24 m.

Figura 21 – Arquitetura do pavimento tipo da edificação



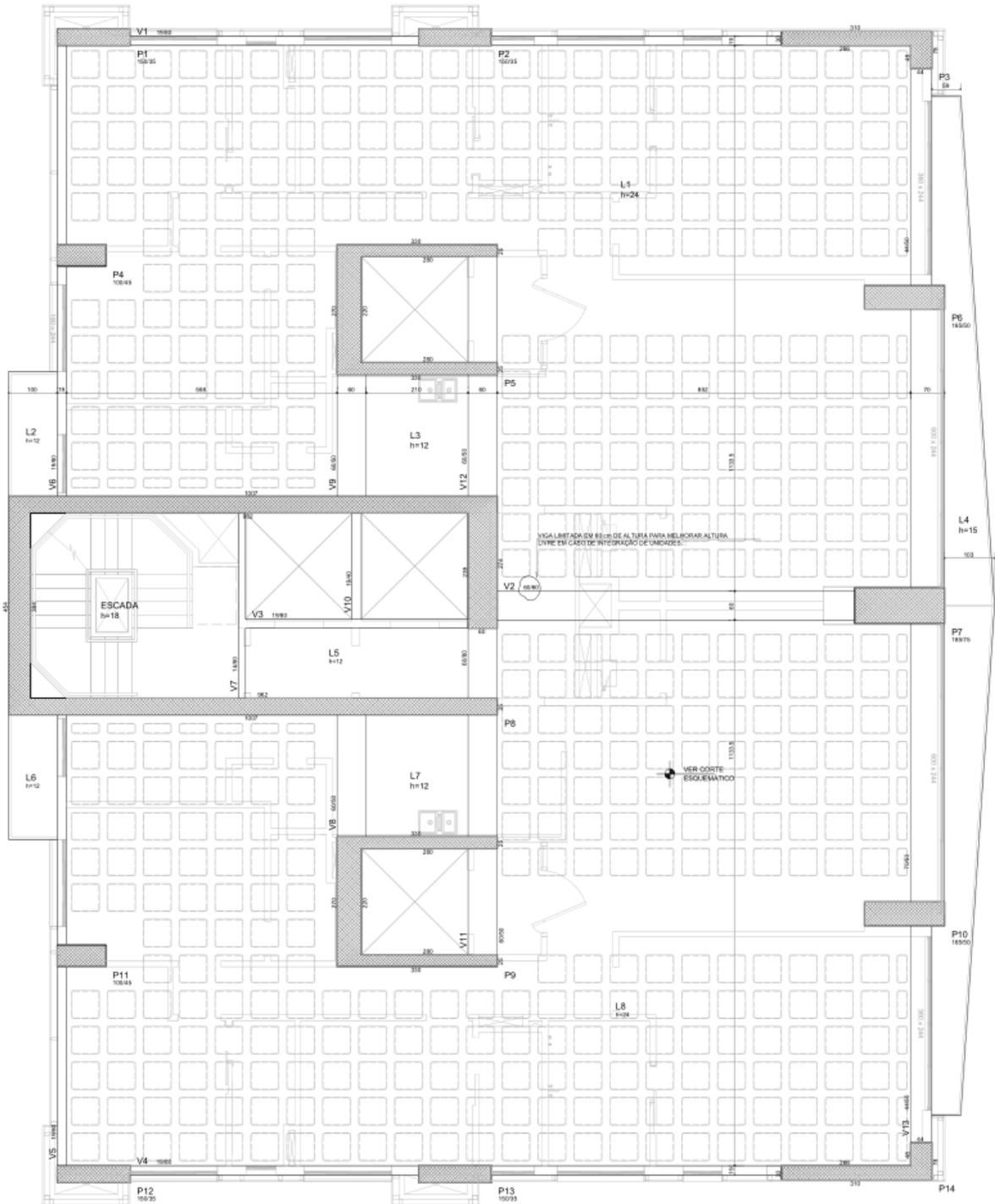
(Fonte: projeto arquitetônico)

## 5.2 ESTUDO PRELIMINAR DA ESTRUTURA

Para a dimensão e posicionamento dos elementos estruturais empregados nos modelos iniciais, sem presença do sistema de *outriggers*, foram utilizadas as plantas baixas fornecidas pela empresa de projetos estruturais que realizou o estudo preliminar da estrutura. O estudo realizado teve como objetivo propor uma solução inicial para a estrutura da edificação, podendo sofrer alterações até a conclusão da execução da obra.

A proposta da empresa para a estrutura do pavimento foi dividida em dois tipos, sendo o primeiro do pavimento número 11 até o pavimento 30, onde ocorre uma diminuição da seção dos pilares, seguindo até o pavimento 51 com a nova seção. Para o desenvolvimento dos modelos analisados foram utilizados os elementos estruturais acima do pavimento 30, após a redução da seção dos pilares, presentes nos pavimentos 31 ao 51, conforme disposto na figura 22. O pavimento apresenta lajes nervuradas de 24 cm de espessura, e conta com a presença de 3 núcleos rígidos no centro da edificação. Os modelos elaborados ao decorrer do trabalho desconsideraram os demais pavimentos da estrutura, com o intuito de simplificar a análise dos resultados, retirando possíveis variáveis adicionais. Os *outriggers* incluídos nos modelos desenvolvidos têm a altura total de um pavimento, ou seja, 3,24 m de altura, e sua espessura foi imposta 30 cm.

Figura 22 – Lançamento preliminar da estrutura do pavimento tipo



(fonte: projeto estrutural)

### 5.3 MODELOS DE CÁLCULO

A partir das informações disponibilizadas pelos projetos arquitetônicos e estruturais, foram elaborados os modelos de cálculo para comparação no *software* TQS.

#### 5.3.1 Modelos propostos

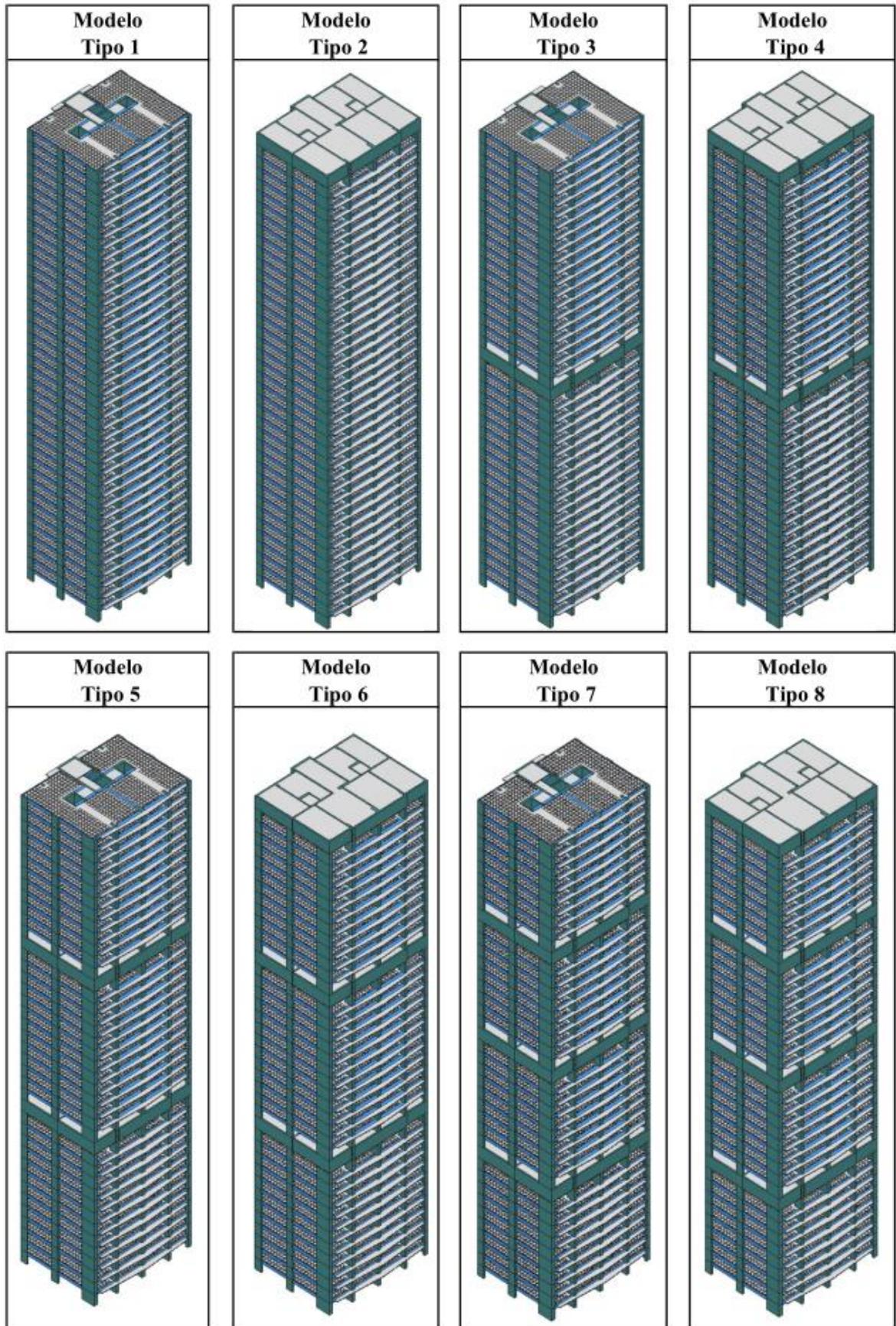
Para a determinação das características dos modelos de cálculo desenvolvidos, foi necessário analisar os fatores que interferem na contribuição dos *outriggers* no sistema de contraventamento. A partir disso, foram definidas 3 alturas distintas para os modelos estruturais (40, 60 e 80 pavimentos), e 8 configurações diferentes de *outriggers*, variando sua quantidade entre 0 e 4, como demonstrado no quadro 4. As quantidades e posições dos pavimentos de *outriggers* estão representados em perspectiva através da Figura 23, definindo o tipo de cada edifício.

Quadro 4 – Modelos de cálculo elaborados

<b>40 Pavimentos</b>	<b>60 Pavimentos</b>	<b>80 Pavimentos</b>
<i>0 Outriggers</i>	<i>0 Outriggers</i>	<i>0 Outriggers</i>
<i>0 Outriggers + Top Hat</i>	<i>0 Outriggers + Top Hat</i>	<i>0 Outriggers + Top Hat</i>
<i>1 Outrigger</i>	<i>1 Outrigger</i>	<i>1 Outrigger</i>
<i>1 Outrigger + Top Hat</i>	<i>1 Outrigger + Top Hat</i>	<i>1 Outrigger + Top Hat</i>
<i>2 Outrigger</i>	<i>2 Outrigger</i>	<i>2 Outrigger</i>
<i>2 Outrigger + Top Hat</i>	<i>2 Outrigger + Top Hat</i>	<i>2 Outrigger + Top Hat</i>
<i>3 Outrigger</i>	<i>3 Outrigger</i>	<i>3 Outrigger</i>
<i>3 Outrigger + Top Hat</i>	<i>3 Outrigger + Top Hat</i>	<i>3 Outrigger + Top Hat</i>

(AUTOR, 2021)

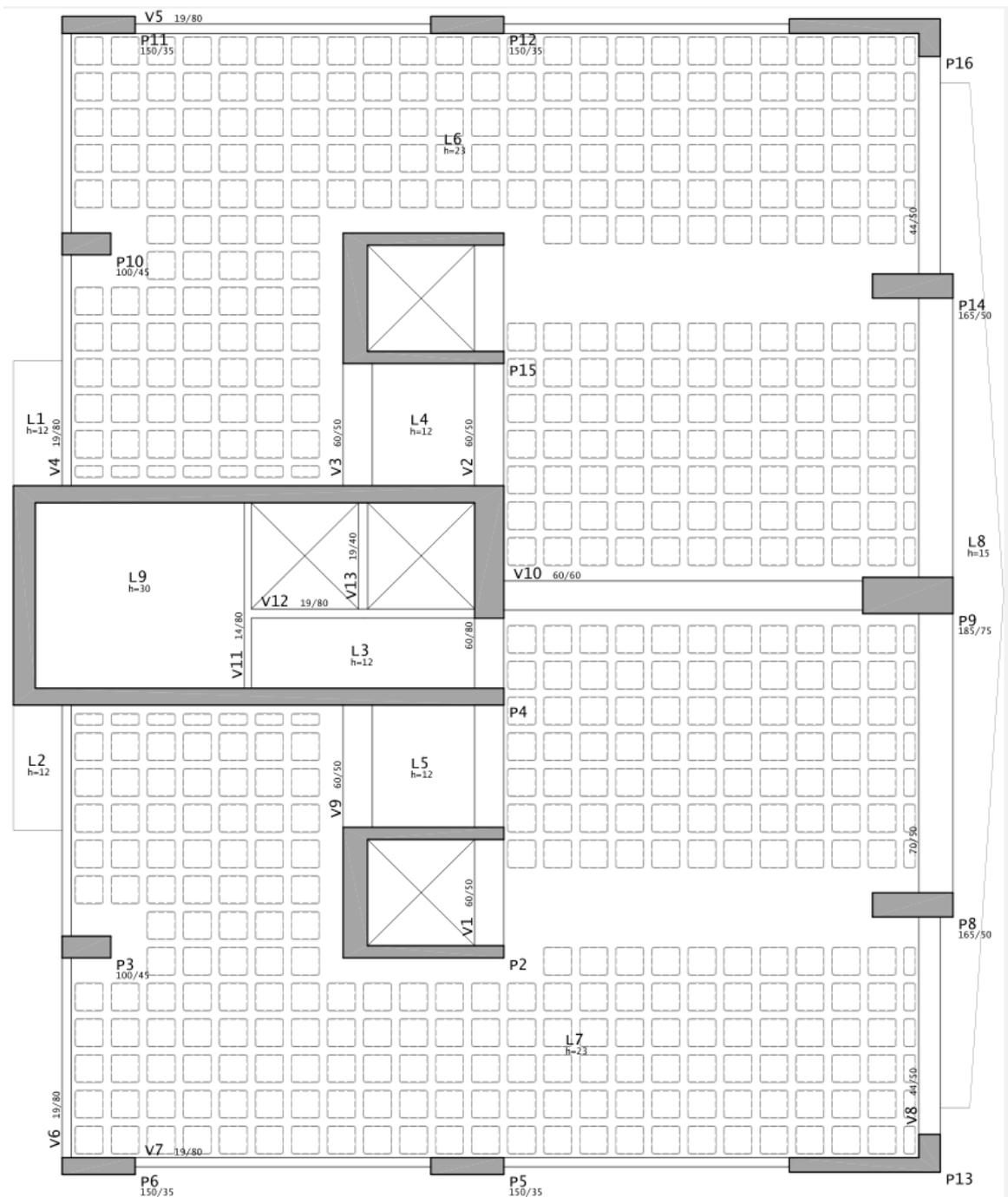
Figura 23 – Representação dos tipos de modelos



(AUTOR, 2021)

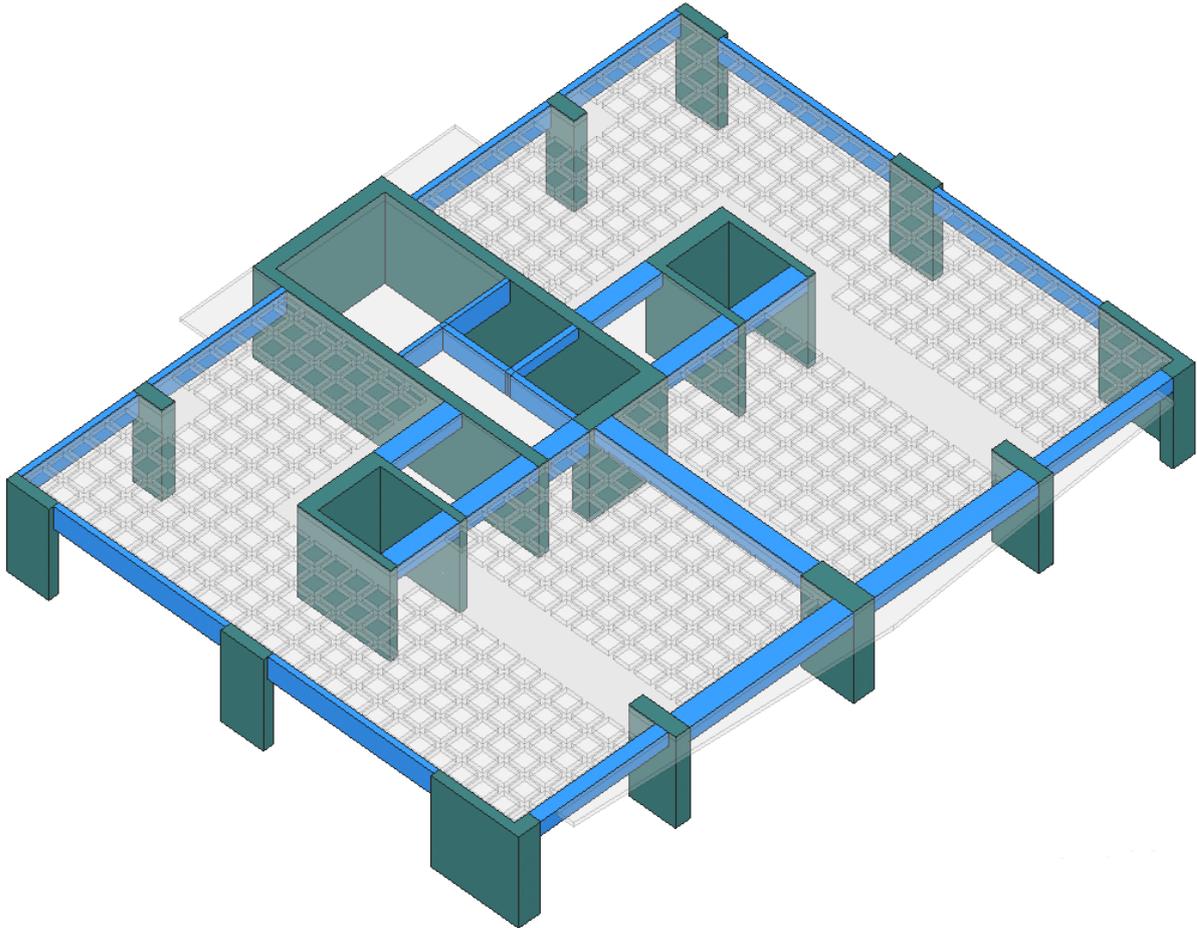
Seguindo as recomendações apresentadas por CTBUH (2012), os modelos que contam com 1 pavimento de *outriggers* intermediário tem sua localização na metade da edificação, e os que apresentam 2 pavimentos de *outriggers* intermediários têm sua localização nos terços do edifício. A disposição dos elementos estruturais no pavimento tipo, após o lançamento da estrutura no TQS, ficou como demonstrado nas figuras 24 e 25.

Figura 24 – Planta baixa da estrutura do pavimento tipo



(AUTOR, 2021)

Figura 25 – Perspectiva da estrutura do pavimento tipo



(AUTOR, 2021)

O concreto considerado nos modelos de cálculo desenvolvidos tem resistência de 40 MPa, com módulo de elasticidade considerado conforme definição da tabela 8.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) presente na figura 26, resultando no valor de 35 MPa.

Figura 26 – Módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do concreto

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
$E_{ci}$ (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
$E_{cs}$ (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
$\alpha_i$	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

(ABNT, 2014)

### 5.3.2 Cargas

Para definição das cargas na edificação, foi utilizado como base o memorial descritivo do estudo preliminar da estrutura, disponibilizado pela empresa de projetos estruturais, além das definições presentes na NBR 6120 (ABNT, 2019) para as cargas gravitacionais, e o disposto na NBR 6123 (ABNT, 1998) para o carregamento do vento.

As cargas permanentes e acidentais consideradas nos modelos analisados estão dispostas no quadro 5, retirada do memorial descritivo do projeto. Foram consideradas apenas as cargas do pavimento tipo, utilizado para elaboração do trabalho.

Quadro 5 – Cargas gravitacionais consideradas

<b>Tabela de Cargas de Cada Pavimento</b>			
<b>Pavimento</b>	<b>Permanente (kgf/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Acidental (kgf/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Descrição</b>
<b>Pavimento Tipo</b>	170	150	Suíte/Sala/Cozinha/Banho/Lavabo
	170	300	Área de circulação
	50	300	Escada
	100	300	Área técnica
	200	300	Sacada

(Fonte: Adaptada de projeto estrutural)

As cargas provenientes do peso próprio das paredes de vedação foram consideradas conforme a tabela 11 da NBR 6120 (ABNT, 2019), disposta na figura 27, resultando na consideração adicional de 1 kN/m<sup>2</sup> na carga permanente das lajes dos apartamentos.

Figura 27 – Cargas adicionais devido ao peso próprio das paredes

<b>Peso próprio (p.p.) da parede acabada kN/m</b>	<b>Carga adicional kN/m<sup>2</sup></b>
p.p. ≤ 1,0	0,5
1,0 < p.p. ≤ 2,0	0,75
2,0 < p.p. ≤ 3,0	1,0
p.p. > 3,0	Não permitido

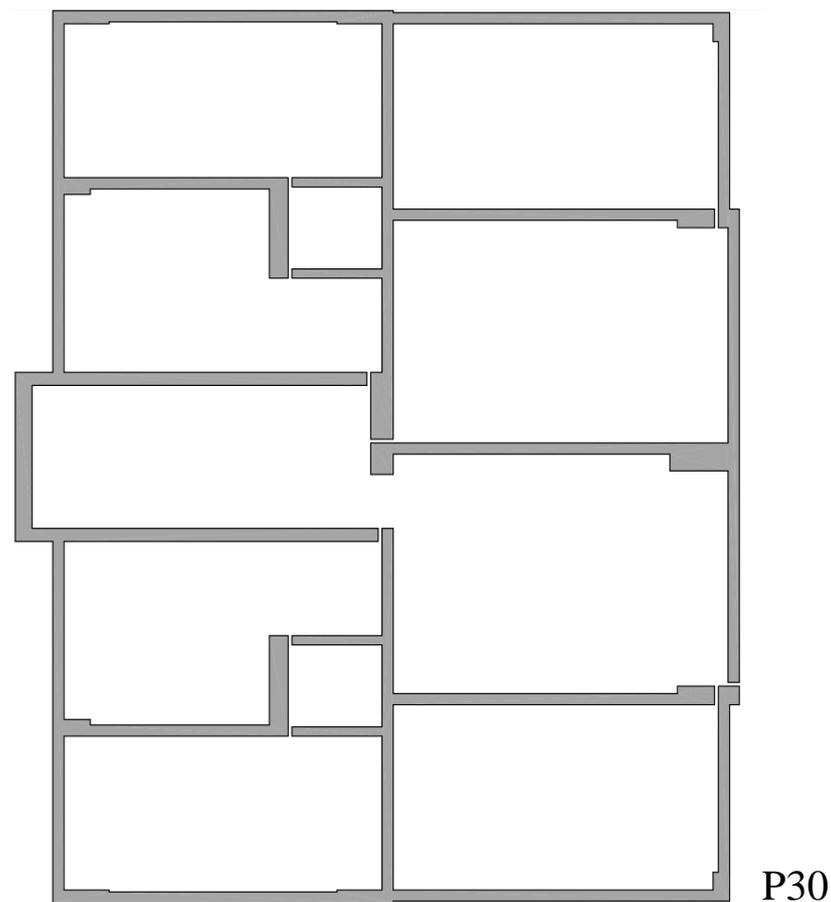
(ABNT, 2019)

As cargas provenientes dos esforços de vento foram calculadas automaticamente pelo TQS, considerando a velocidade básica do vento como 43 m/s, categoria de rugosidade do terreno III, classe C da edificação para o cálculo do coeficiente S2 e considerando 1 para os coeficientes S1 e S3. O peso próprio dos elementos estruturais foi calculado automaticamente pelo *software*, tendo o peso específico do concreto armado como 2500 kgf/m<sup>3</sup>. Para consideração das escadas, foi feita sua substituição por uma laje maciça com espessura igual a 30 cm, e cargas distribuídas conforme indicado anteriormente no quadro 7.

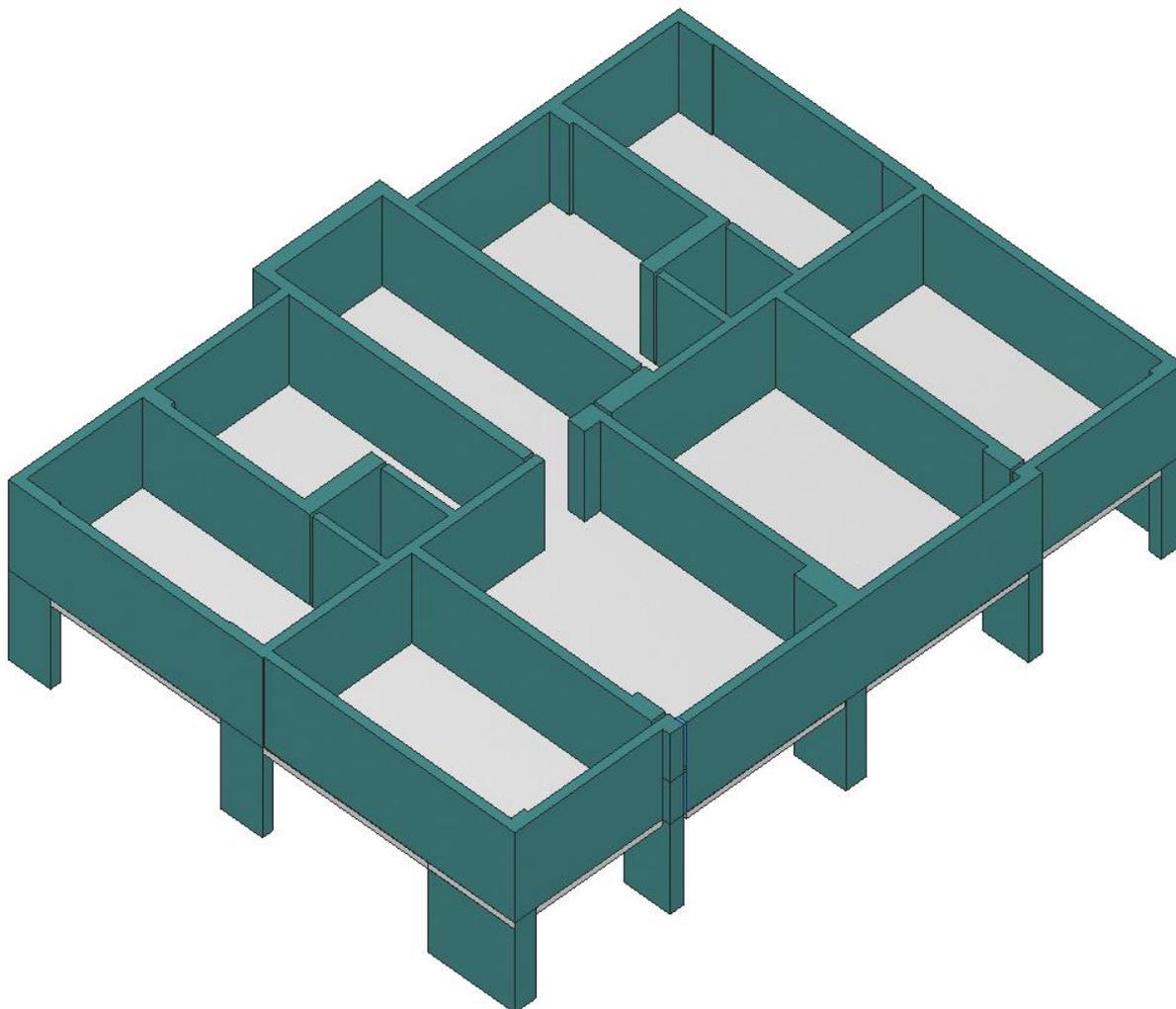
### 5.3.3 Pilar parede discretizado

A modelagem dos pavimentos de *outriggers* foi feita conforme descrito no capítulo 5, resultando no pilar parede disposto nas figuras 27 e 28, com 3,24 m de altura e discretizado em faixas de pilar parede com 30 cm de espessura para simular o comportamento de *outriggers*.

Figura 28 – Planta baixa do pilar-parede que simula os *outriggers*



(AUTOR, 2021)

Figura 29 – Perspectiva do pilar-parede que simula os *outriggers*

(AUTOR, 2021)

## 5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentadas e discutidas as relações obtidas entre as variáveis analisadas ao decorrer das análises dos modelos de cálculo elaborados, comparando os valores do coeficiente  $\gamma_z$ , os deslocamentos laterais, e os momentos fletores na base do núcleo central da edificação. Os resultados estão sintetizados no quadro 6, apresentado a seguir.

Quadro 6 – Resumo dos resultados obtidos

			Resultados																				
			yz, x	yz, y	dx(cm)	dy(cm)	Mx (tf.m)	My (tf.m)	Consumo(m <sup>3</sup> )	Δyz x	Δyz y	Δdx(cm)	Δdy(cm)	ΔMx (tf.m)	ΔMy (tf.m)	Δconsumo(m <sup>3</sup> )	Δyz x(%)	Δyz y(%)	Δdx(%)	Δdy(%)	ΔMx (%)	ΔMy (%)	Δconsumo(%)
40 Pav.	Modelo 40.1	40P	1.07	1.09	4.15	4.04	6456.60	25682.31	6162.97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Modelo 40.2	40P-TOP	1.06	1.10	3.73	4.28	5651.67	24938.67	6253.08	-0.01	0.01	-0.42	0.24	-804.93	-743.64	90.11	-0.93%	0.92%	-10.12%	5.94%	-12.47%	-2.90%	1.46%
	Modelo 40.3	40P-1OUT	1.05	1.09	3.42	3.95	5390.77	22704.95	6278.01	-0.02	0.00	-0.73	-0.09	-1065.83	-2977.36	115.04	-1.87%	0.00%	-17.59%	-2.23%	-16.51%	-11.59%	1.87%
	Modelo 40.4	40P-1OUT-TOP	1.05	1.09	3.18	3.72	5336.97	22307.97	6419.31	-0.02	0.00	-0.97	-0.32	-1119.63	-3374.34	256.34	-1.87%	0.00%	-23.37%	-7.92%	-17.34%	-13.14%	4.16%
	Modelo 40.5	40P-2OUT	1.04	1.08	3.05	3.53	5002.29	20537.58	6427.18	-0.03	-0.01	-1.10	-0.51	-1454.31	-5144.73	264.21	-2.80%	-0.92%	-26.51%	-12.62%	-22.52%	-20.03%	4.29%
	Modelo 40.6	40P-2OUT-TOP	1.04	1.08	2.92	3.34	4898.07	20251.71	6568.47	-0.03	-0.01	-1.23	-0.70	-1558.53	-5430.60	405.50	-2.80%	-0.92%	-29.64%	-17.33%	-24.14%	-21.15%	6.58%
	Modelo 40.7	40P-3OUT	1.04	1.07	2.82	3.24	4635.86	19218.80	6571.10	-0.03	-0.02	-1.33	-0.80	-1820.74	-6463.51	408.13	-2.80%	-1.83%	-32.05%	-19.80%	-28.20%	-25.17%	6.62%
	Modelo 40.8	40P-3OUT-TOP	1.04	1.07	2.74	3.06	4501.53	18917.68	6712.39	-0.03	-0.02	-1.41	-0.98	-1955.07	-6764.63	549.42	-2.80%	-1.83%	-33.98%	-24.26%	-30.28%	-26.34%	8.91%
60 Pav.	Modelo 60.1	60P	1.19	1.21	18.51	15.48	12908.95	55153.86	9244.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Modelo 60.2	60P-TOP	1.18	1.23	17.53	16.23	11681.48	54359.41	9308.31	-0.01	0.02	-0.98	0.75	-1227.47	-794.45	63.86	-0.84%	1.65%	-5.29%	4.84%	-9.51%	-1.44%	0.69%
	Modelo 60.3	60P-1OUT	1.15	1.21	16.42	15.39	11294.73	50691.52	9346.37	-0.04	0.00	-2.09	-0.09	-1614.22	-4462.34	101.92	-3.36%	0.00%	-11.29%	-0.58%	-12.50%	-8.09%	1.10%
	Modelo 60.4	60P-1OUT-TOP	1.15	1.21	15.79	14.85	11234.34	50310.75	9487.67	-0.04	0.00	-2.72	-0.63	-1674.61	-4843.11	243.22	-3.36%	0.00%	-14.69%	-4.07%	-12.97%	-8.78%	2.63%
	Modelo 60.5	60P-2OUT	1.13	1.19	15.23	14.42	10808.99	46733.18	9499.48	-0.06	-0.02	-3.28	-1.06	-2099.96	-8420.68	255.03	-5.04%	-1.65%	-17.72%	-6.85%	-16.27%	-15.27%	2.76%
	Modelo 60.6	60P-2OUT-TOP	1.13	1.19	14.84	13.95	10721.34	46311.89	9640.77	-0.06	-0.02	-3.67	-1.53	-2187.61	-8841.97	396.32	-5.04%	-1.65%	-19.83%	-9.88%	-16.95%	-16.03%	4.29%
	Modelo 60.7	60P-3OUT	1.12	1.17	14.45	13.71	10297.40	43777.39	9646.02	-0.07	-0.04	-4.06	-1.77	-2611.55	-11376.47	401.57	-5.88%	-3.31%	-21.93%	-11.43%	-20.23%	-20.63%	4.34%
	Modelo 60.8	60P-3OUT-TOP	1.12	1.17	14.22	13.26	10163.79	43281.33	9787.31	-0.07	-0.04	-4.29	-2.22	-2745.16	-11872.53	542.86	-5.88%	-3.31%	-23.18%	-14.34%	-21.27%	-21.53%	5.87%
80 Pav.	Modelo 80.1	80P	1.46	1.46	55.68	43.48	21307.1	94747.03	12325.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Modelo 80.2	80P-TOP	1.44	1.50	54.19	44.87	19526.76	94377.75	12363.55	-0.02	0.04	-1.49	1.39	-1780.34	-369.28	37.61	-1.37%	2.74%	-2.68%	3.20%	-8.36%	-0.39%	0.31%
	Modelo 80.3	80P-1OUT	1.37	1.44	51.74	43.30	19026.61	89848.31	12414.73	-0.09	-0.02	-3.94	-0.18	-2280.49	-4898.72	88.79	-6.16%	-1.37%	-7.08%	-0.41%	-10.70%	-5.17%	0.72%
	Modelo 80.4	80P-1OUT-TOP	1.37	1.44	50.6	42.24	18957.87	89546.23	12556.03	-0.09	-0.02	-5.08	-1.24	-2349.23	-5200.80	230.09	-6.16%	-1.37%	-9.12%	-2.85%	-11.03%	-5.49%	1.87%
	Modelo 80.5	80P-2OUT	1.33	1.40	49.22	41.46	18387.80	83858.07	12573.09	-0.13	-0.06	-6.46	-2.02	-2919.30	-10888.96	247.15	-8.90%	-4.11%	-11.60%	-4.65%	-13.70%	-11.49%	2.01%
	Modelo 80.6	80P-2OUT-TOP	1.33	1.41	48.44	40.53	18357.82	83834.24	12713.07	-0.13	-0.05	-7.24	-2.95	-2949.28	-10912.79	387.13	-8.90%	-3.42%	-13.00%	-6.78%	-13.84%	-11.52%	3.14%
	Modelo 80.7	80P-3OUT	1.31	1.38	47.47	40.15	17819.56	79437.68	12720.94	-0.15	-0.08	-8.21	-3.33	-3487.54	-15309.35	395.00	-10.27%	-5.48%	-14.74%	-7.66%	-16.37%	-16.16%	3.20%
	Modelo 80.8	80P-3OUT-TOP	1.31	1.38	46.98	39.25	17699.58	78763.53	12862.24	-0.15	-0.08	-8.70	-4.23	-3607.52	-15983.50	536.30	-10.27%	-5.48%	-15.63%	-9.73%	-16.93%	-16.87%	4.35%

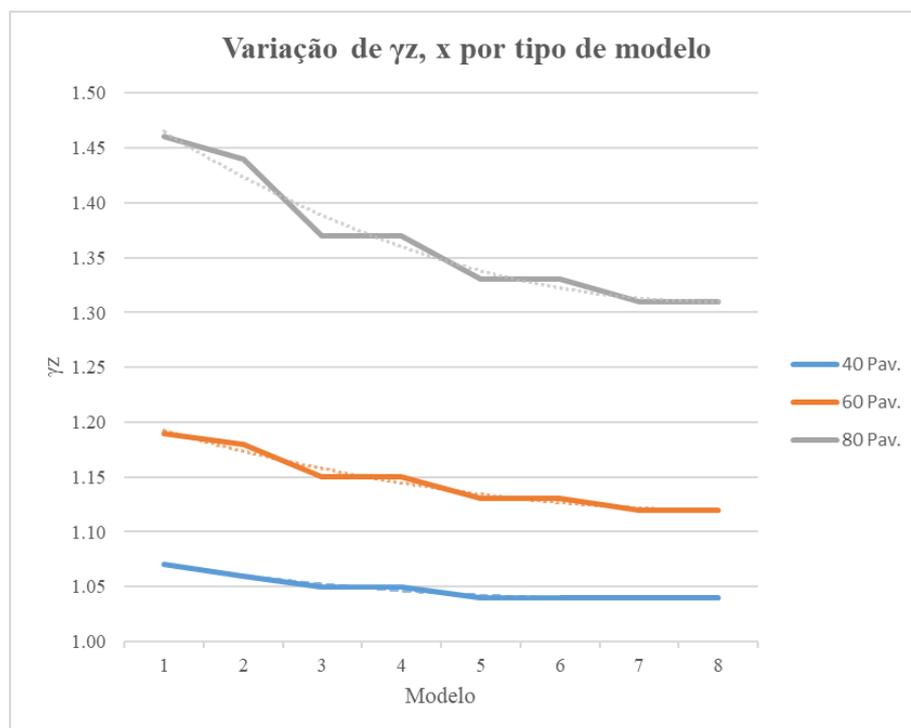
(AUTOR, 2021)

Através da análise dos resultados sintetizados no Quadro 6, é possível notar algumas relações entre os parâmetros analisados com a variação da altura da edificação e da quantidade de *outriggers*. Conforme esperado, o aumento da quantidade de pavimentos de *outriggers* leva ao enrijecimento da estrutura, diminuindo os deslocamentos laterais e, conseqüentemente, os valores de  $\gamma_z$  e dos momentos fletores nos núcleos. Além disso, é possível notar que a contribuição relativa de um *outrigger* varia com a altura do edifício, sendo necessária uma maior quantidade de *outriggers* em edifícios mais altos para atingir a mesma redução relativa nos valores de deslocamentos laterais e momentos fletores nos núcleos. Já os valores de  $\gamma_z$  tem maior redução relativa com o aumento da quantidade de pavimentos. A seguir serão apresentados graficamente os valores obtidos para os parâmetros analisados, e a comparação com o consumo de concreto adicional.

#### 5.4.1 $\gamma_z$

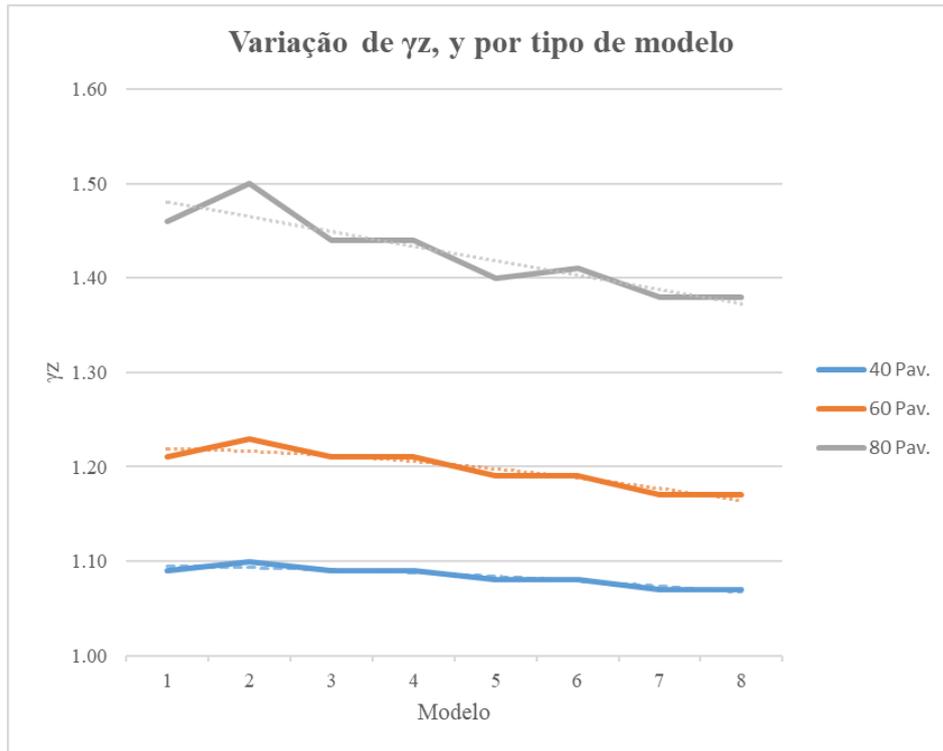
A seguir estão representadas graficamente as relações entre o coeficiente  $\gamma_z$  com os tipos de modelos analisados.

Figura 30 – Comparação entre os valores absolutos de  $\gamma_{z,x}$  e o tipo de modelo



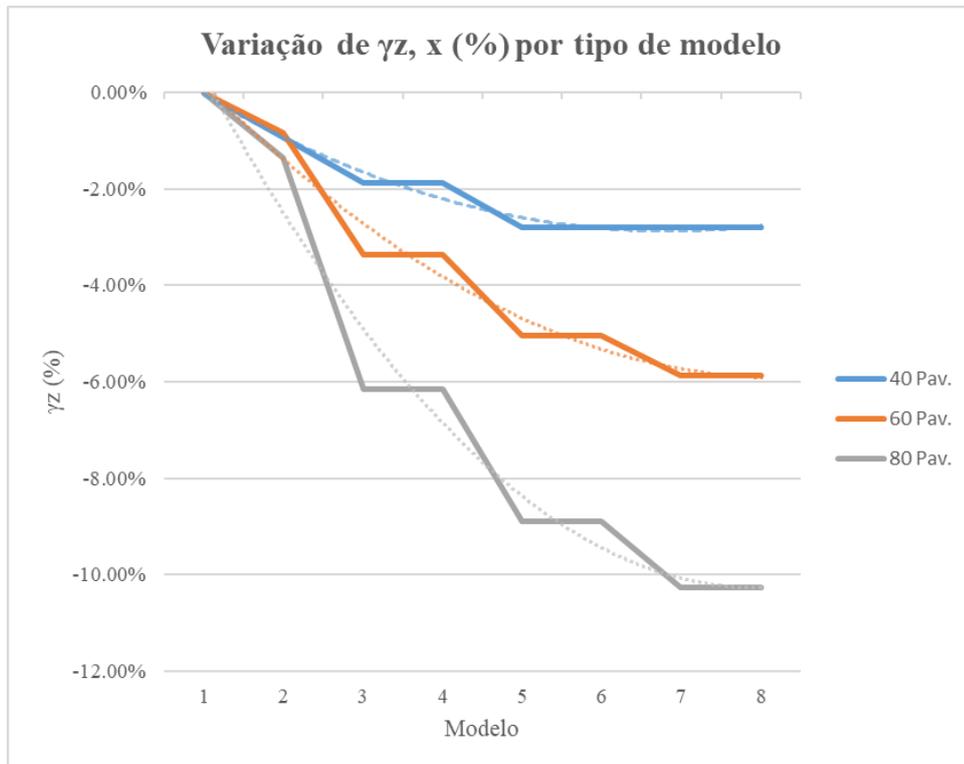
(AUTOR, 2021)

Figura 31 – Comparação entre os valores absolutos de  $\gamma_{z,y}$  e o tipo de modelo

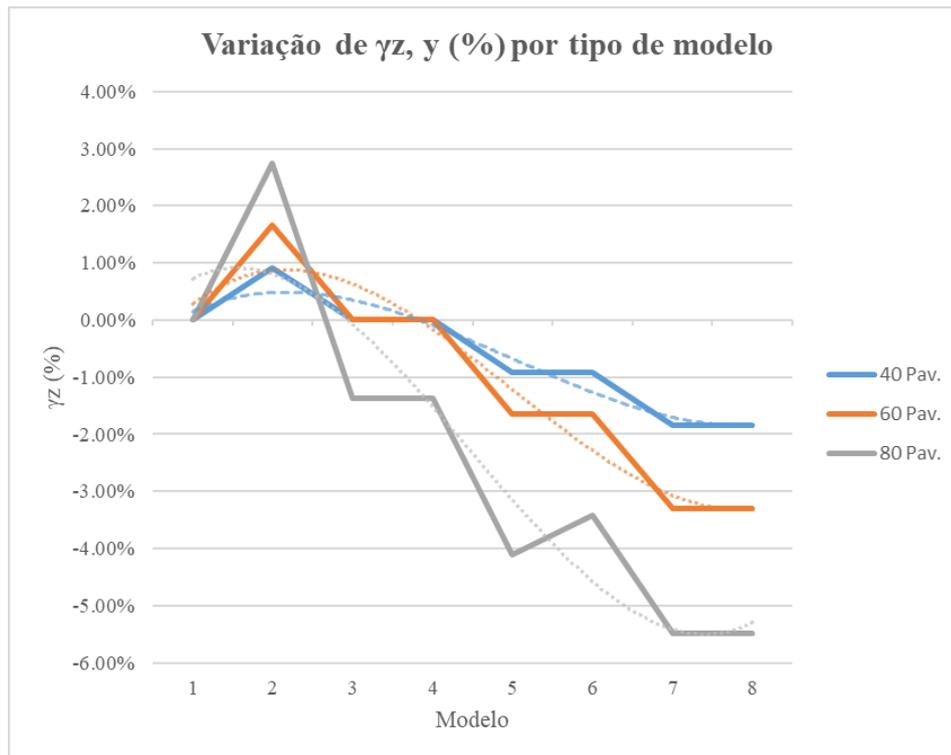


(AUTOR, 2021)

Figura 32 – Comparação entre os valores percentuais de  $\gamma_{z,x}$  e o tipo de modelo



(AUTOR, 2021)

Figura 33 – Comparação entre os valores percentuais de  $\gamma_{z,y}$  e o tipo de modelo

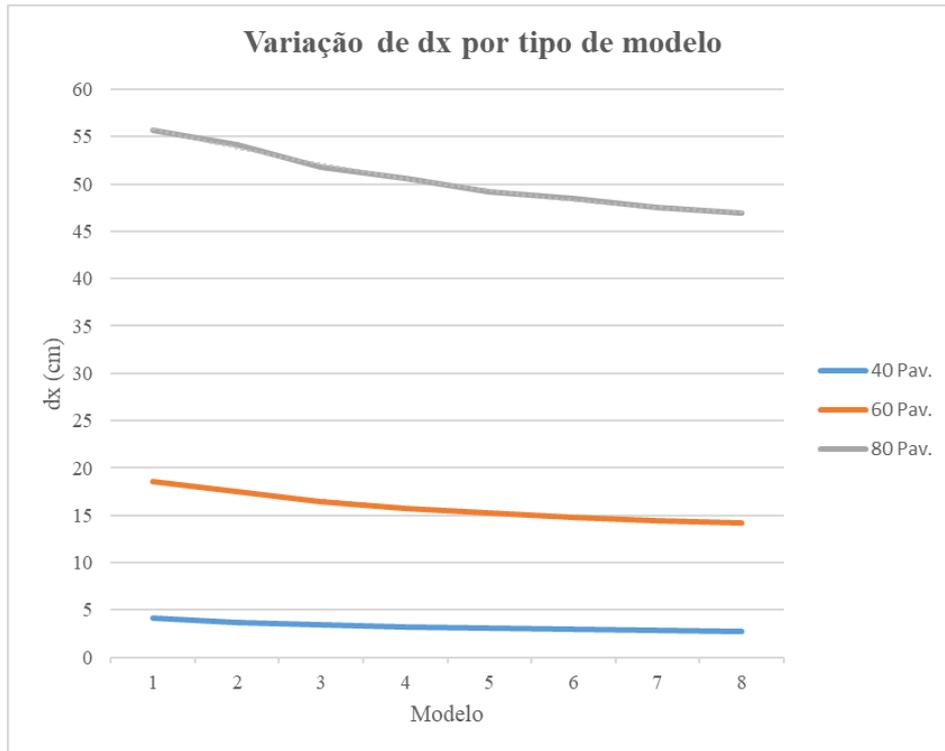
(AUTOR, 2021)

Através da análise dos gráficos apresentados, é possível concluir que o valor obtido do coeficiente  $\gamma_z$ , em ambos sentidos da edificação, apresenta maior variação absoluta e percentual com o aumento da altura da edificação, e varia muito pouco com a inserção adicional de *Top-Hats* no último pavimento do edifício. Na direção Y houve um aumento no valor do coeficiente  $\gamma_z$  nos modelos do tipo 2, com a presença apenas do *Top-Hat*, pois o deslocamento obtido nessa direção foi maior do que nos modelos base. Nota-se também que a variação tende a uma estabilização com a inserção de mais pavimentos de *outriggers*.

#### 5.4.2 Deslocamentos no topo

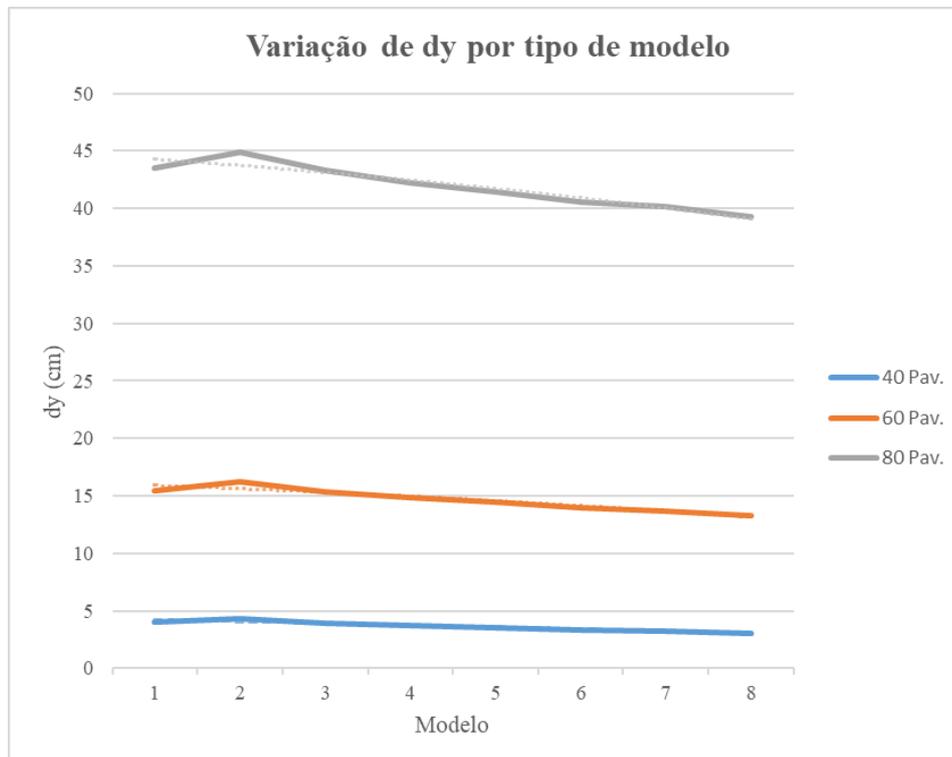
A seguir estão representadas graficamente as relações do deslocamento lateral no topo do edifício com os tipos de modelos analisados.

Figura 34 – Comparação entre os valores absolutos de dx e o tipo de modelo



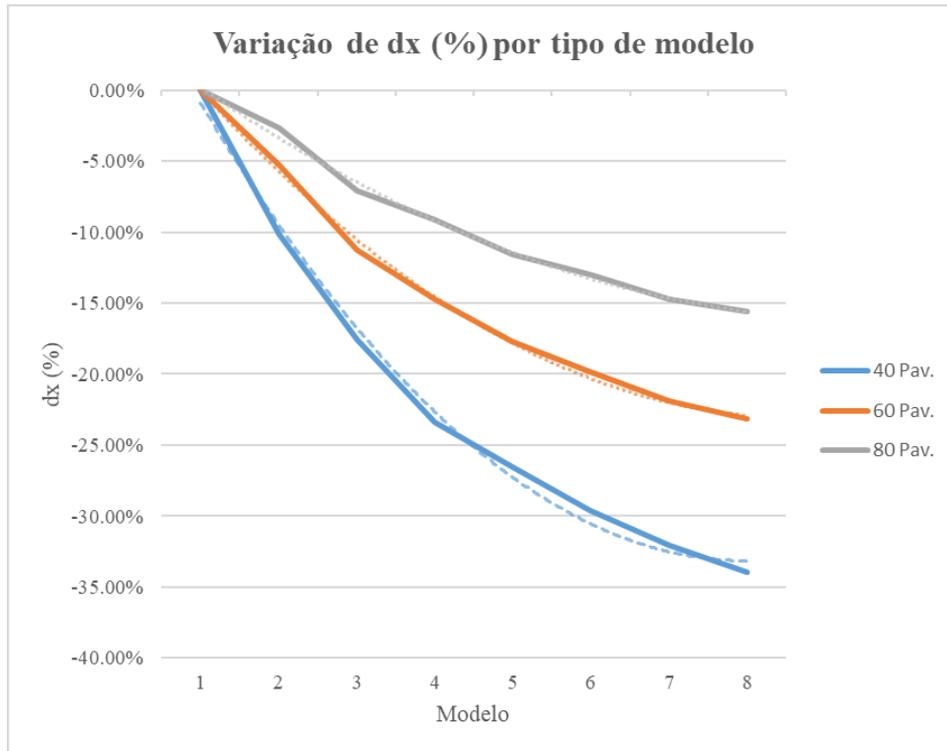
(AUTOR, 2021)

Figura 35 – Comparação entre os valores absolutos de dy e o tipo de modelo



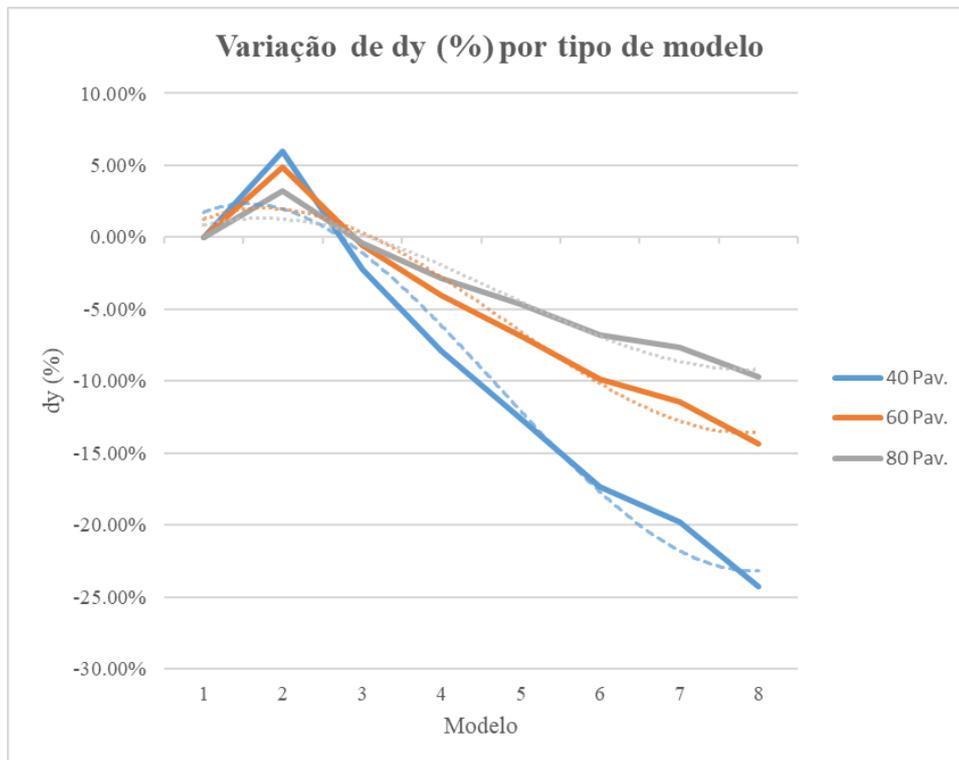
(AUTOR, 2021)

Figura 36 – Comparação entre os valores percentuais de dx e o tipo de modelo



(AUTOR, 2021)

Figura 37 – Comparação entre os valores percentuais de dy e o tipo de modelo



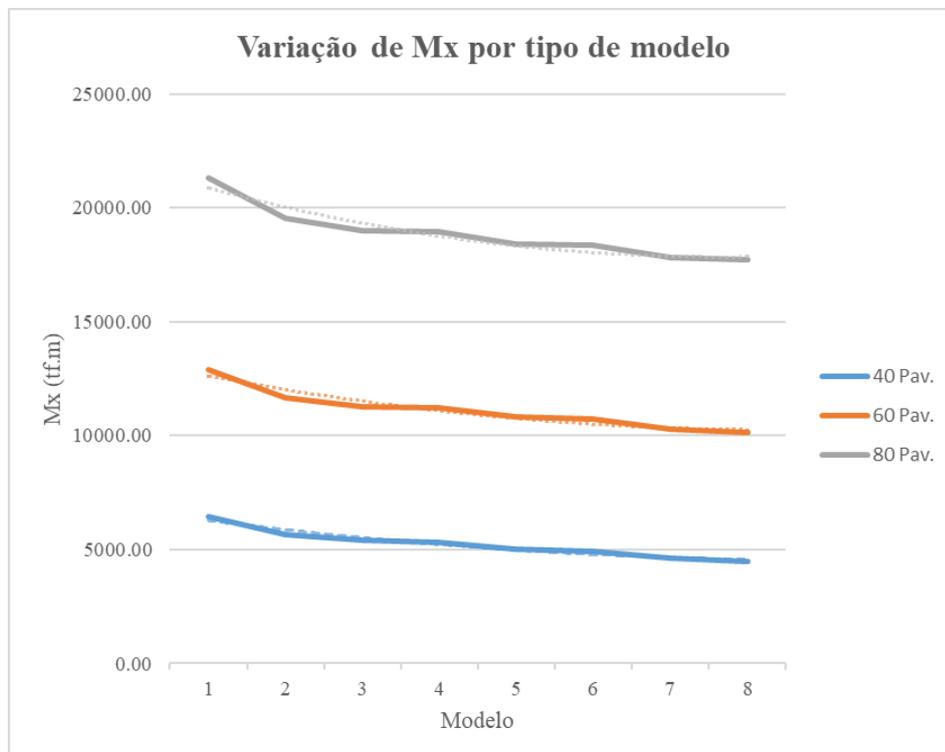
(AUTOR, 2021)

A variação dos valores obtidos para o deslocamentos laterais da edificação, diferentemente dos valores obtidos para o coeficiente  $\gamma_z$ , não apresenta a mesma tendência entre valores absolutos e percentuais. O aumento da quantidade de pavimentos da edificação faz com que, apesar da variação dos valores absolutos de deslocamento ser maior, a variação dos valores percentuais diminui. Nos modelos do tipo 2 houve um aumento nos deslocamentos observados na direção Y, levando ao aumento do coeficiente  $\gamma_z$  nessa direção. É possível notar que os modelos que tiveram a inserção de *Top-Hats* contribuíram para a diminuição dos deslocamentos, o que não ocorreu na análise do coeficiente  $\gamma_z$ , e também nota-se uma tendência de estabilização dos valores com o aumento da quantidade de pavimentos de *outriggers*.

### 5.4.3 Momentos na base

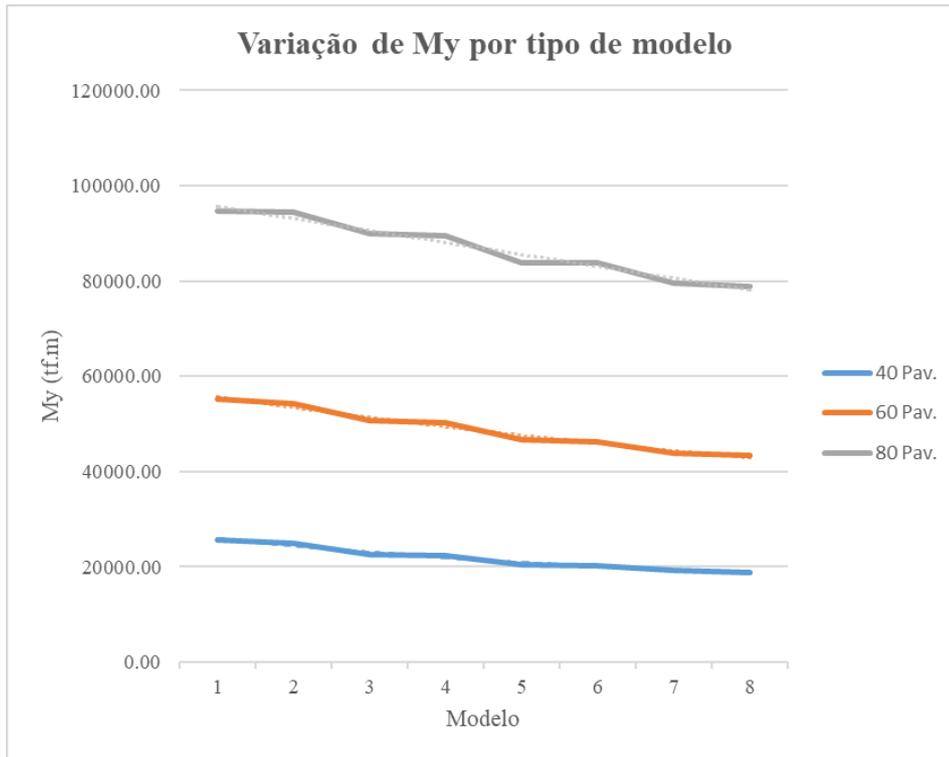
A seguir estão representadas graficamente as relações dos momentos fletores na base do núcleo rígido central da edificação com os tipos de modelos analisados.

Figura 38 – Comparação entre os valores absolutos de Mx e o tipo de modelo



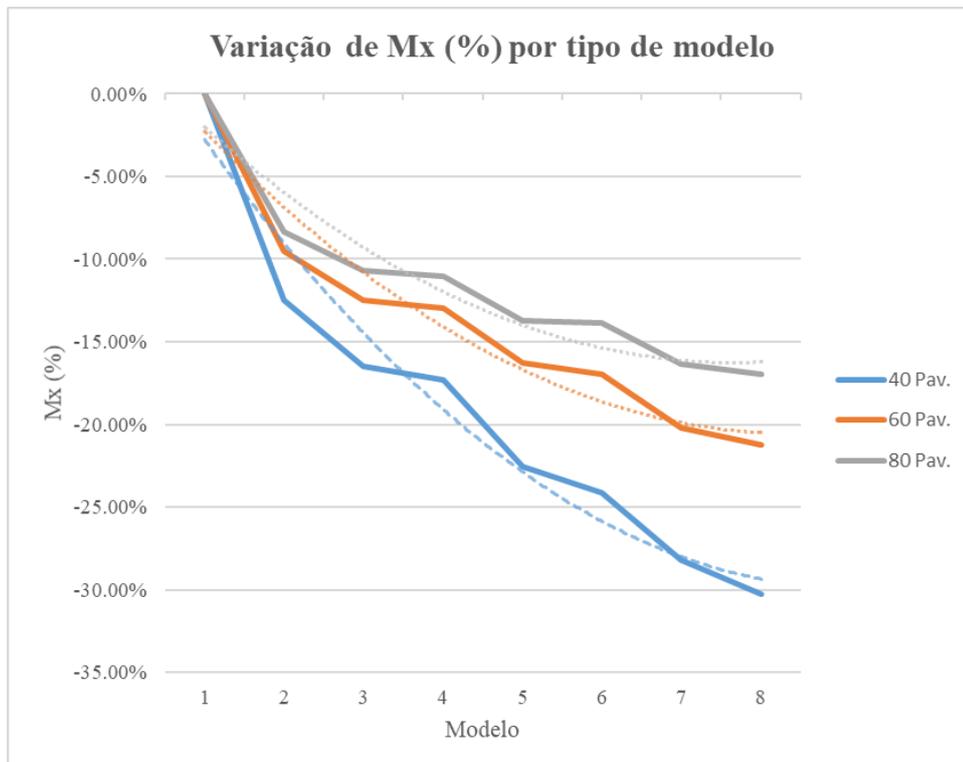
(AUTOR, 2021)

Figura 39 – Comparação entre os valores absolutos de My e o tipo de modelo

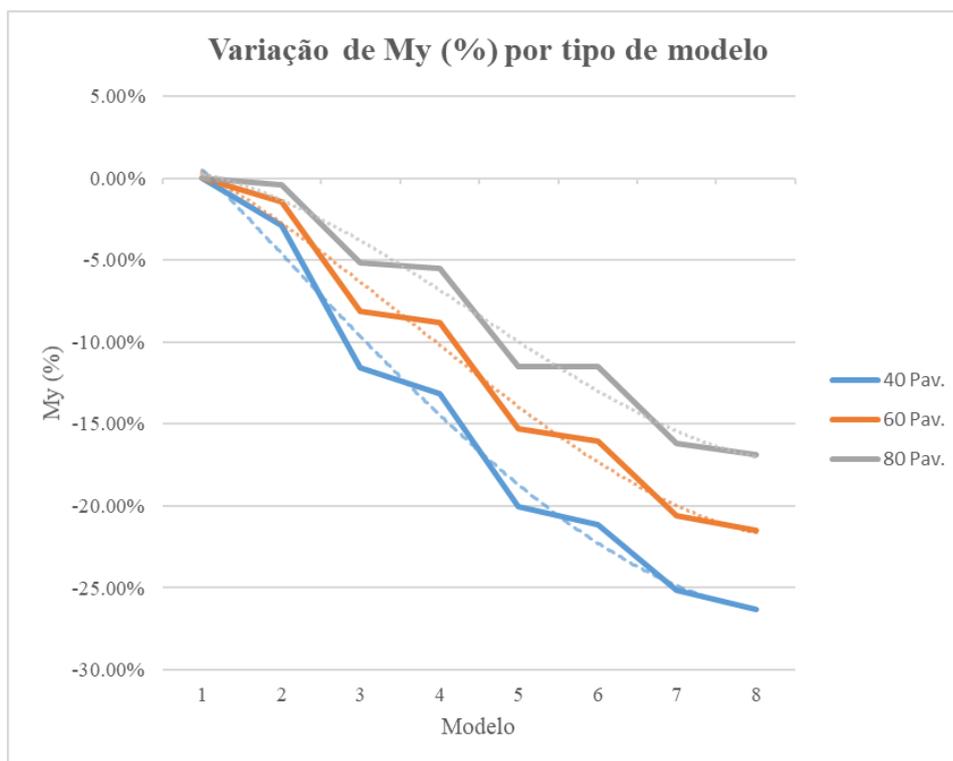


(AUTOR, 2021)

Figura 40 – Comparação entre os valores percentuais de Mx e o tipo de modelo



(AUTOR, 2021)

Figura 41 – Comparação entre os valores percentuais de  $M_y$  e o tipo de modelo

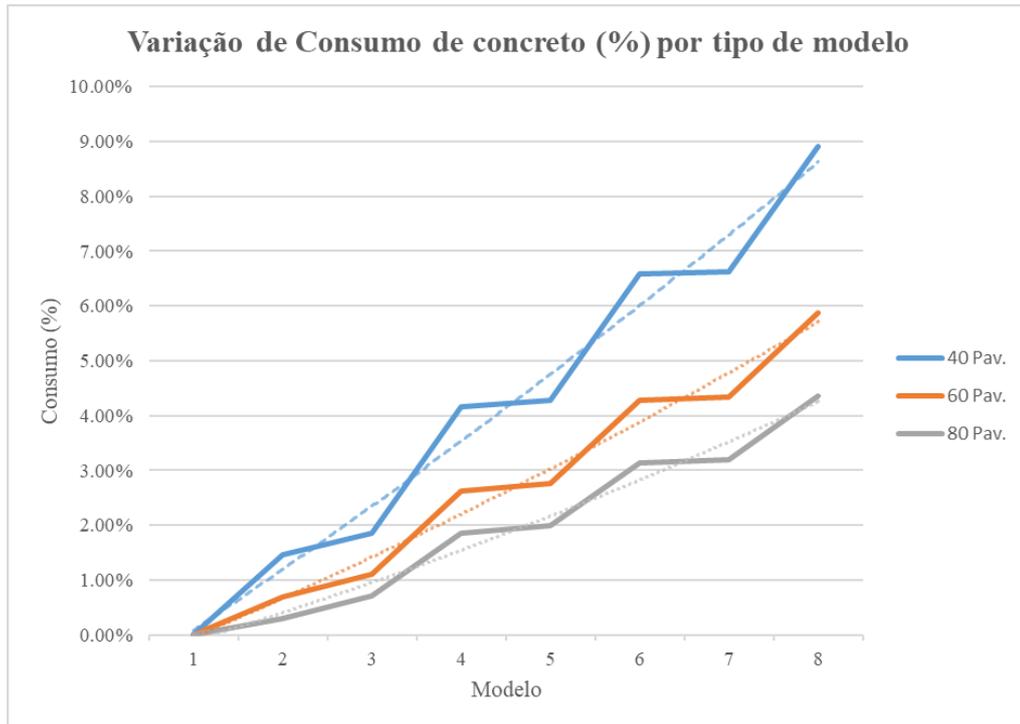
(AUTOR, 2021)

A tendência de variação dos momentos fletores na base do núcleo central é similar a obtida nos deslocamentos laterais, inclusive em sua ordem de grandeza, porém, a inclusão de *Top-Hats* na edificação não altera de forma significativa os valores obtidos. É necessário destacar que apesar da inclusão de pavimentos de *outriggers* diminuir as solicitações nos núcleos, os pilares exteriores tem suas solicitações aumentadas, o que não foi levado em consideração nas análises realizadas.

#### 5.4.4 Consumo de concreto

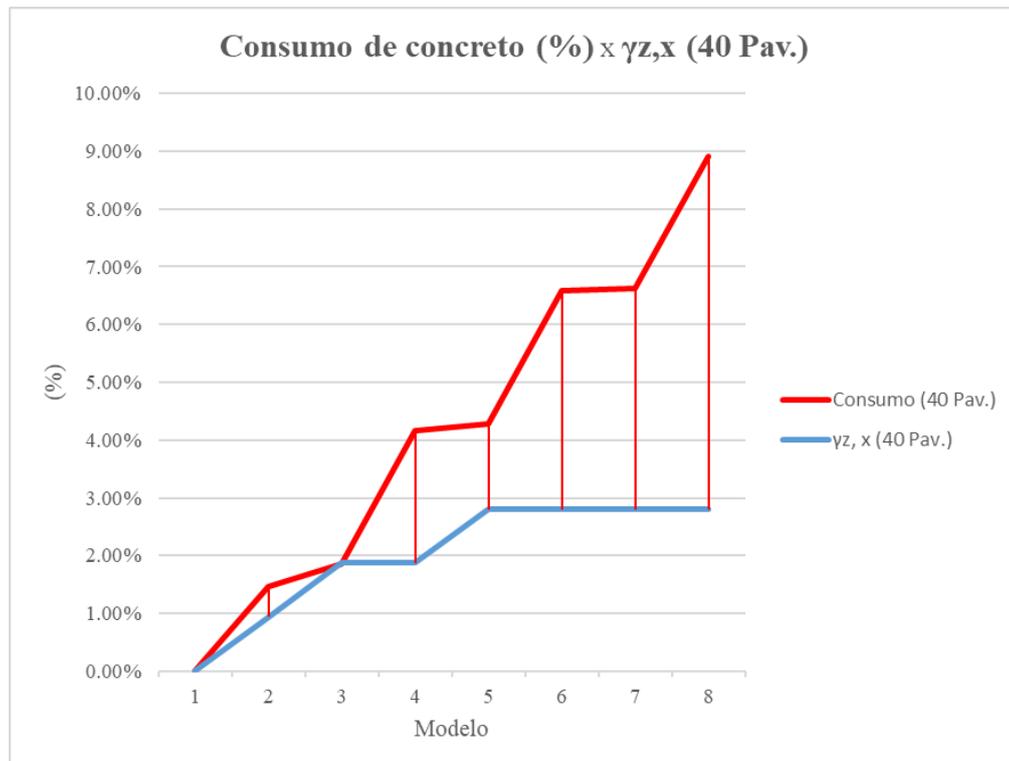
A seguir estão representadas graficamente as relações entre o consumo de concreto adicional com a inserção dos *outriggers* e as demais variáveis analisadas.

Figura 42 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e o tipo de modelo



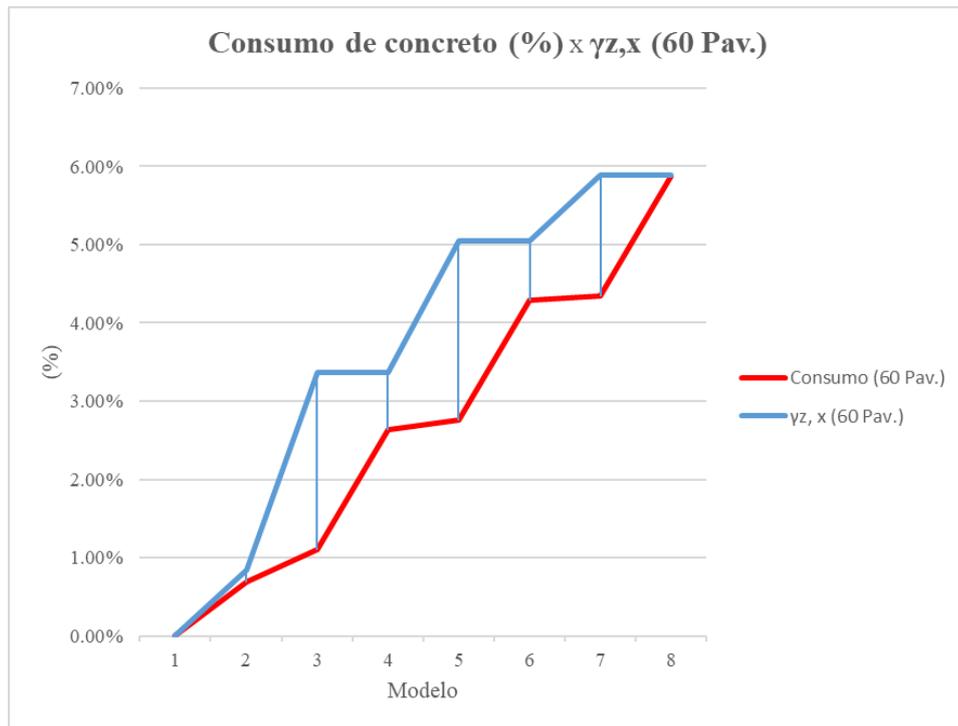
(AUTOR, 2021)

Figura 43 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $\gamma_{z,x}$  nos modelos com 40 pavimentos



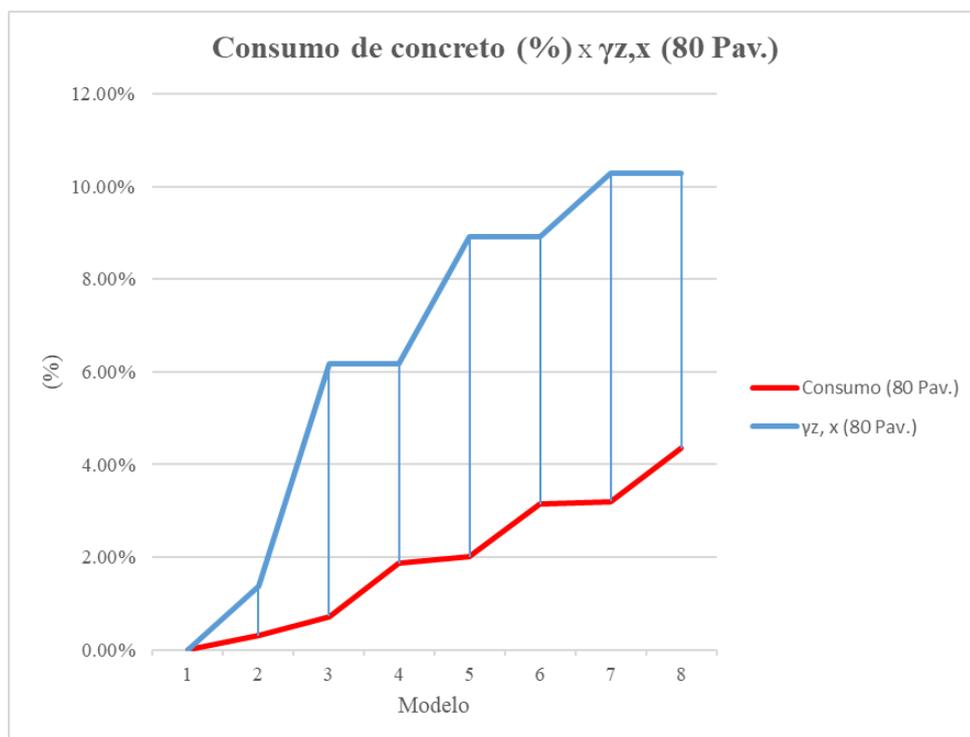
(AUTOR, 2021)

Figura 44 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $\gamma z, x$  nos modelos com 60 pavimentos



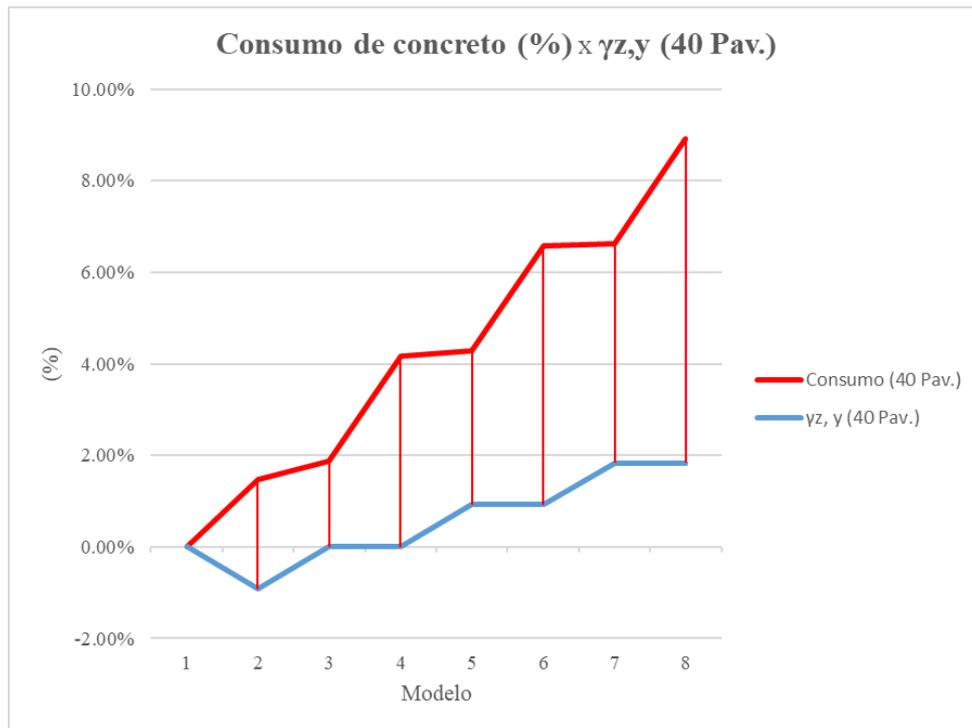
(AUTOR, 2021)

Figura 45 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $\gamma z, x$  nos modelos com 80 pavimentos



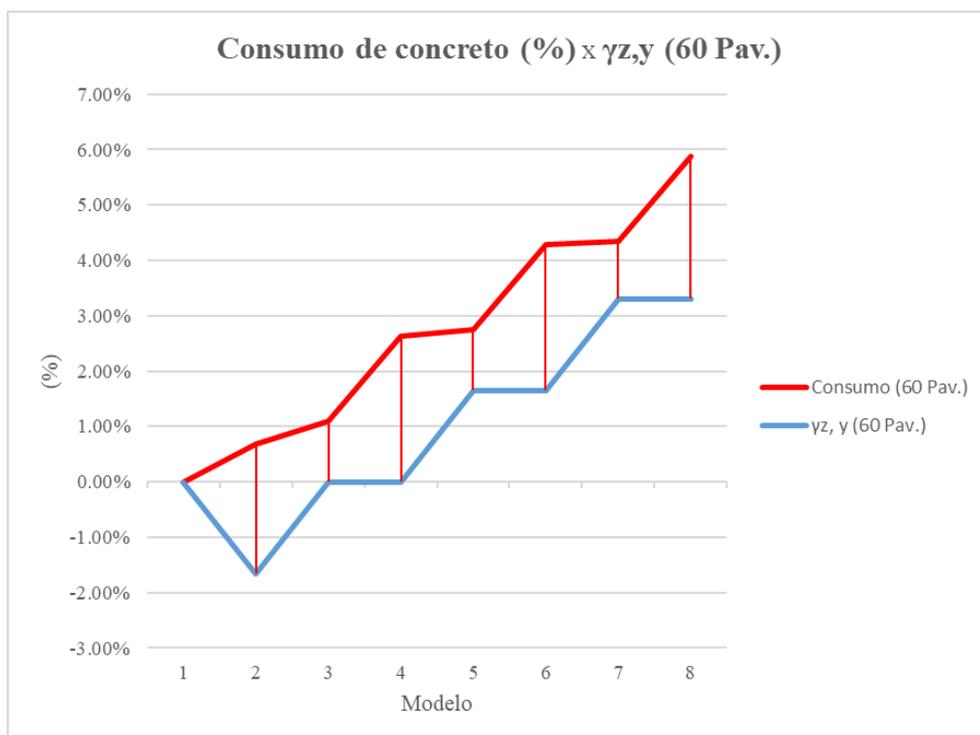
(AUTOR, 2021)

Figura 46 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $\gamma_z, \gamma$  nos modelos com 40 pavimentos



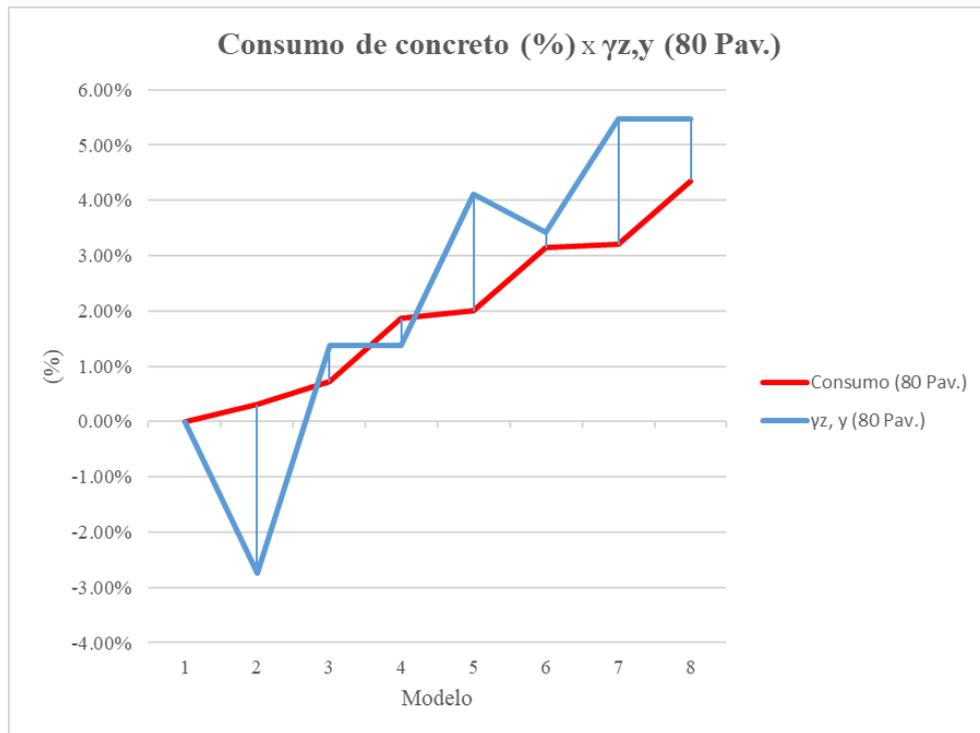
(AUTOR, 2021)

Figura 47 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $\gamma_z, \gamma$  nos modelos com 60 pavimentos



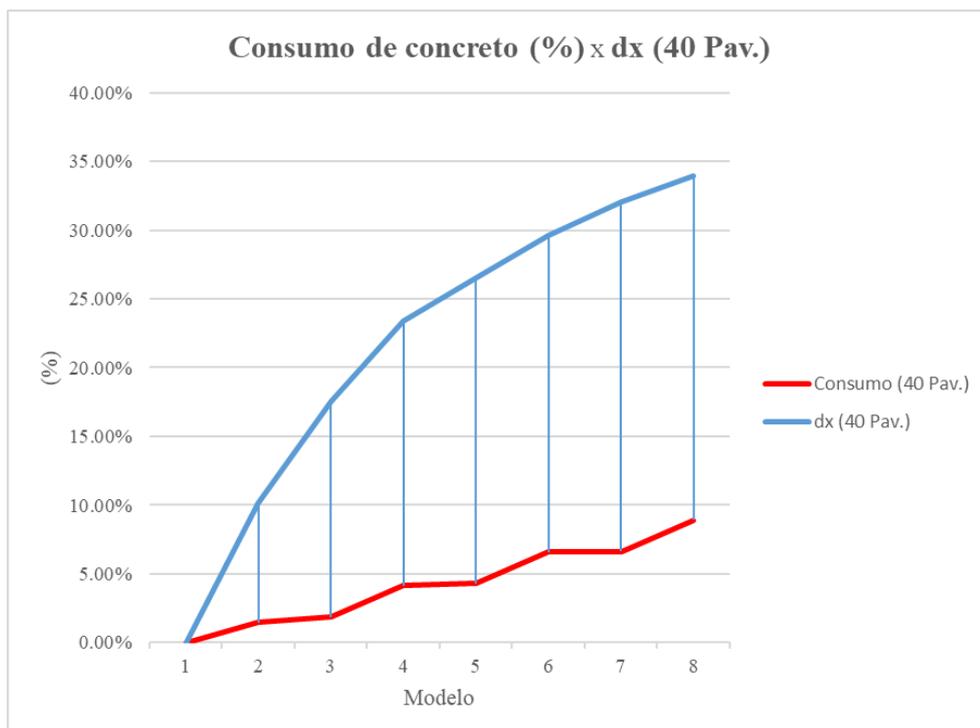
(AUTOR, 2021)

Figura 48 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $\gamma z, y$  nos modelos com 80 pavimentos



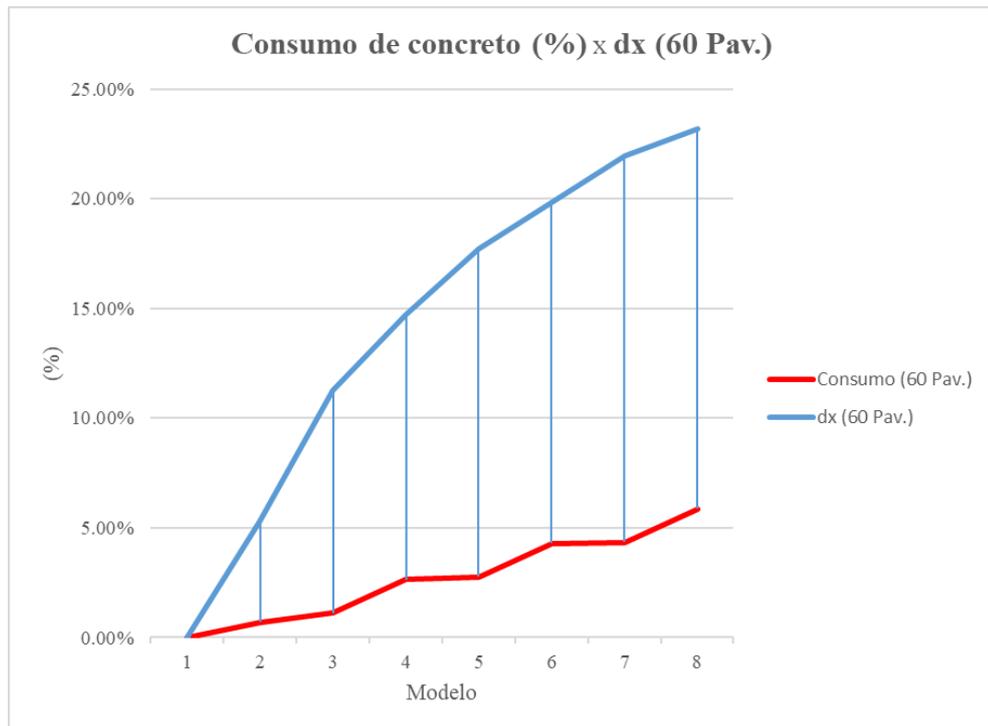
(AUTOR, 2021)

Figura 49 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $dx$  nos modelos com 40 pavimentos



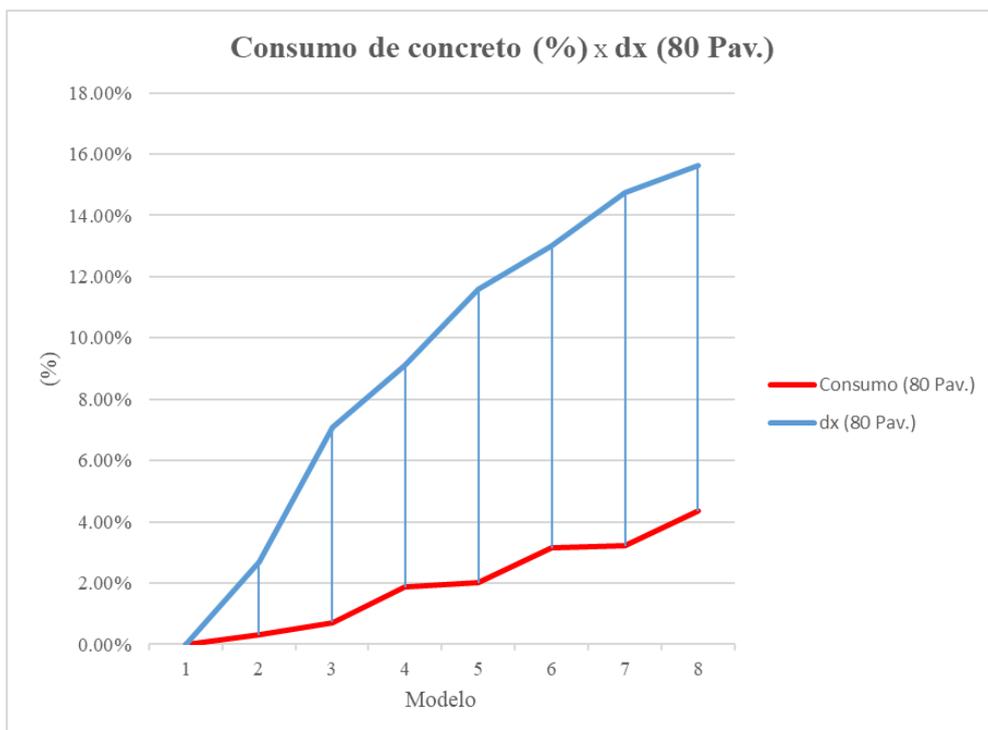
(AUTOR, 2021)

Figura 50 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de dx nos modelos com 60 pavimentos



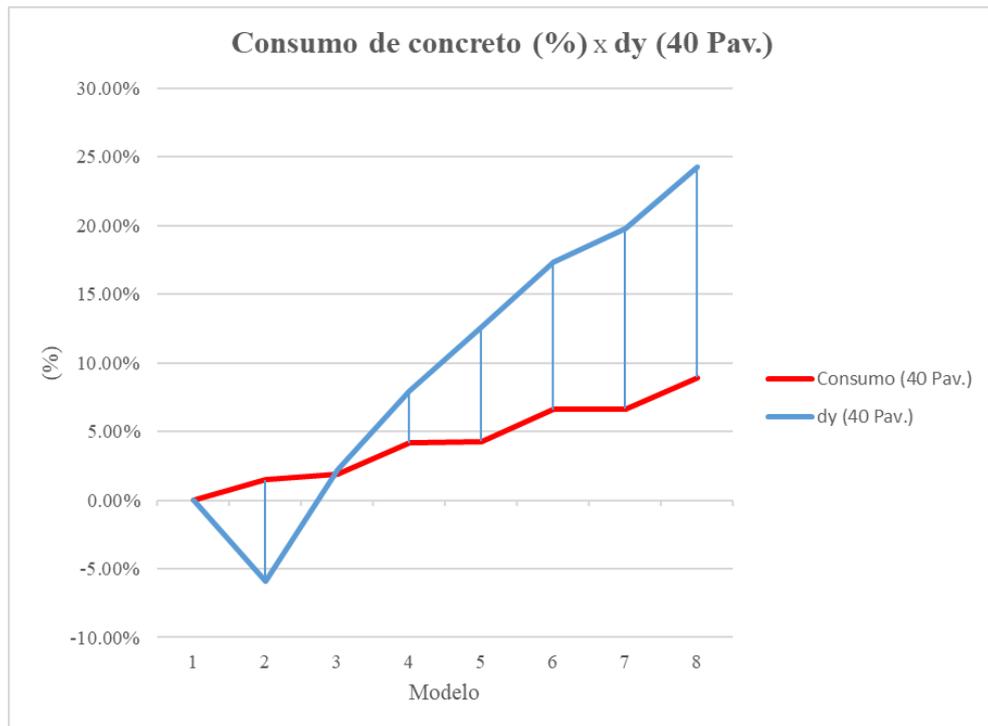
(AUTOR, 2021)

Figura 51 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de dx nos modelos com 80 pavimentos



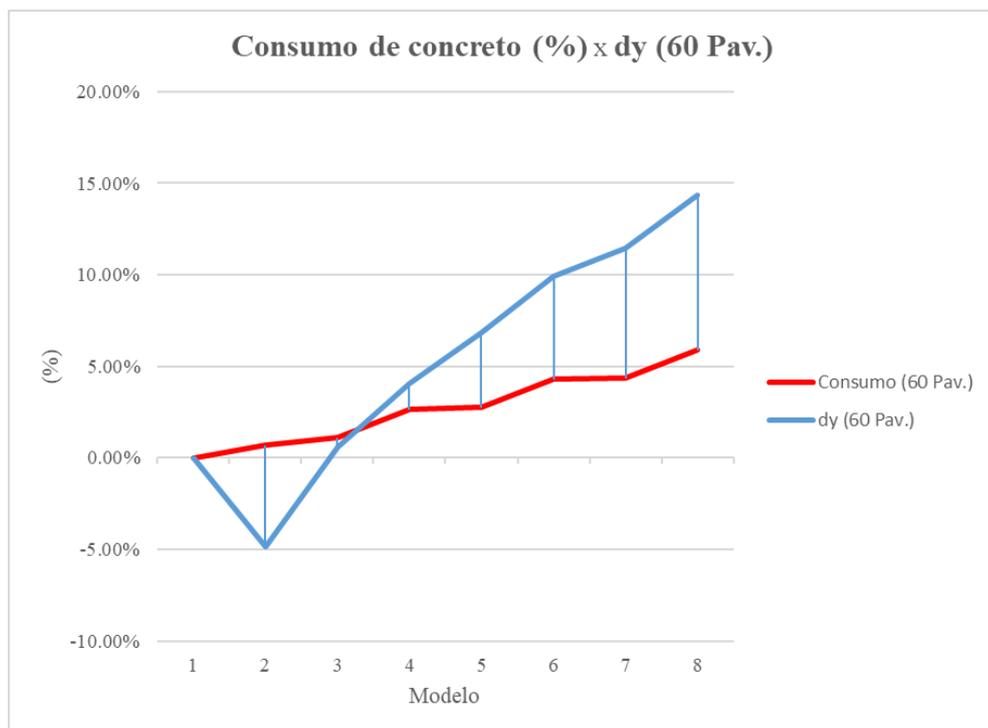
(AUTOR, 2021)

Figura 52 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $d_y$  nos modelos com 40 pavimentos



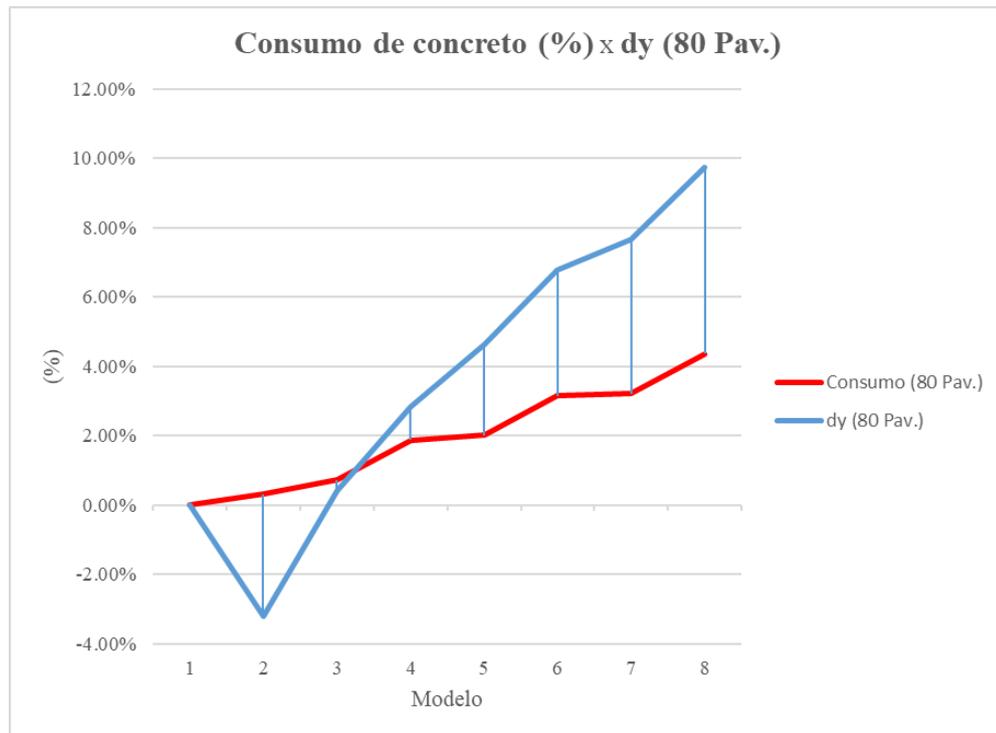
(AUTOR, 2021)

Figura 53 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $d_y$  nos modelos com 60 pavimentos



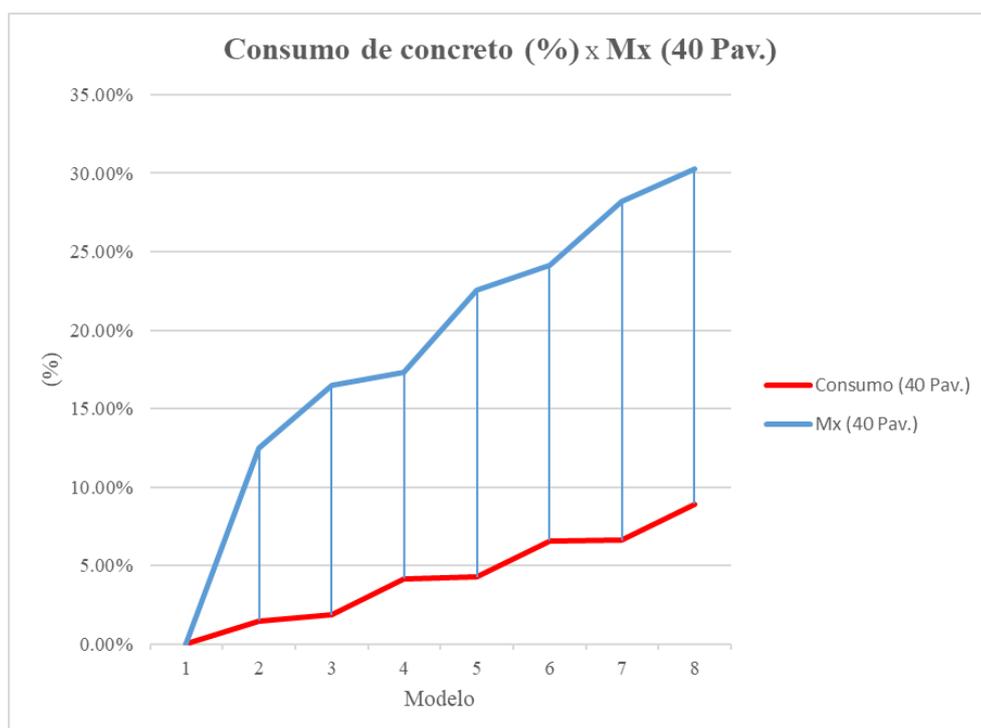
(AUTOR, 2021)

Figura 54 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $d_y$  nos modelos com 80 pavimentos



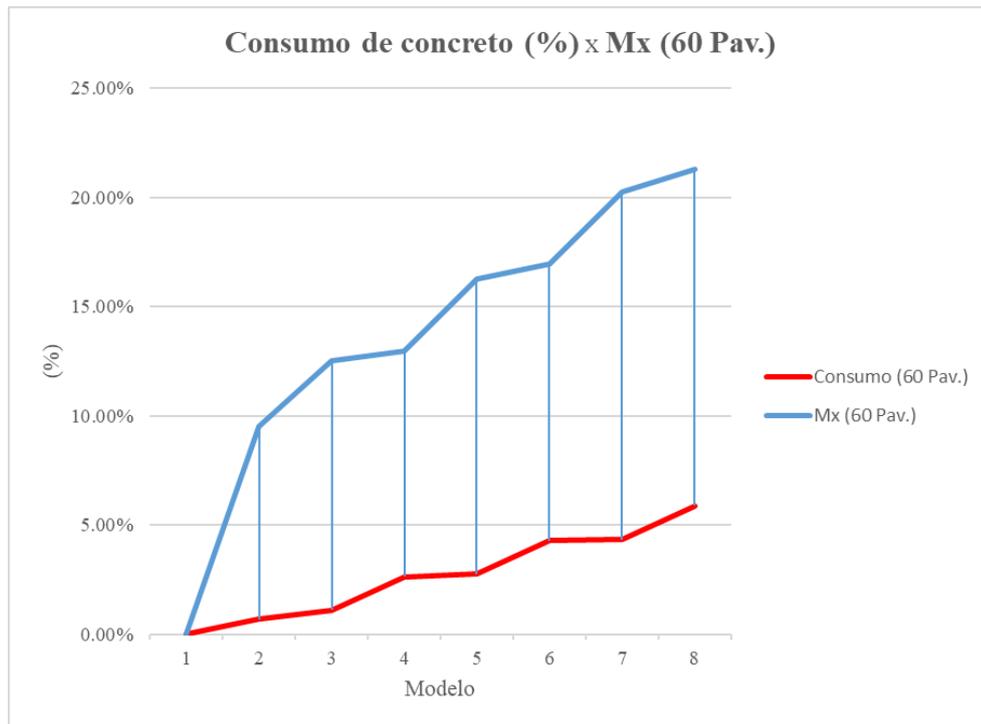
(AUTOR, 2021)

Figura 55 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $M_x$  nos modelos com 40 pavimentos



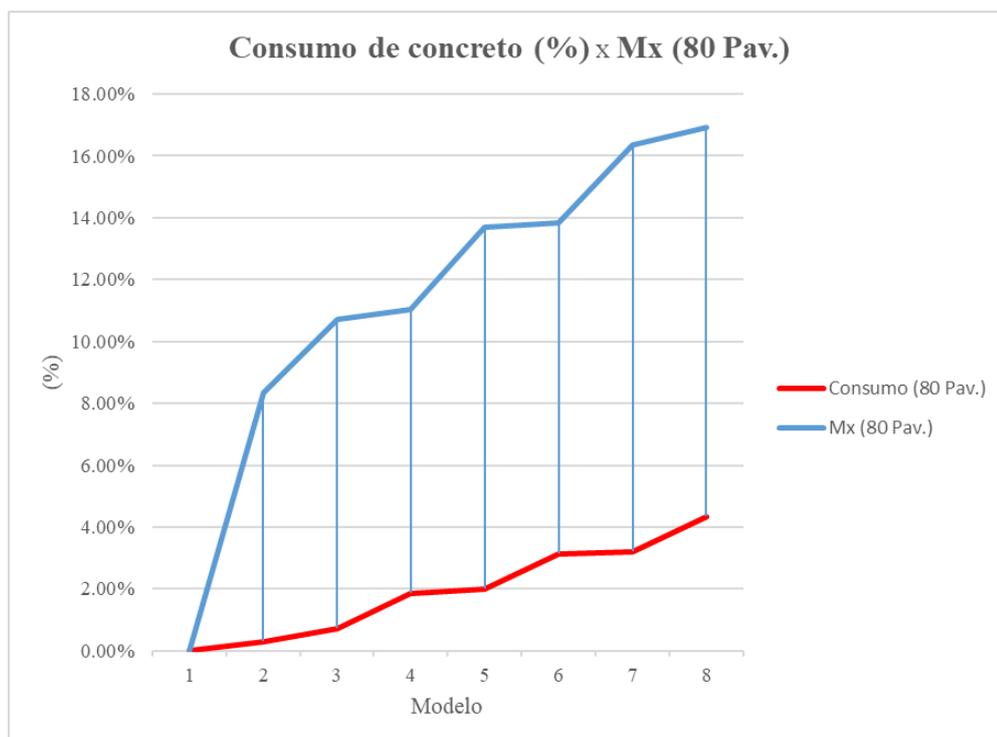
(AUTOR, 2021)

Figura 56 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de Mx nos modelos com 60 pavimentos



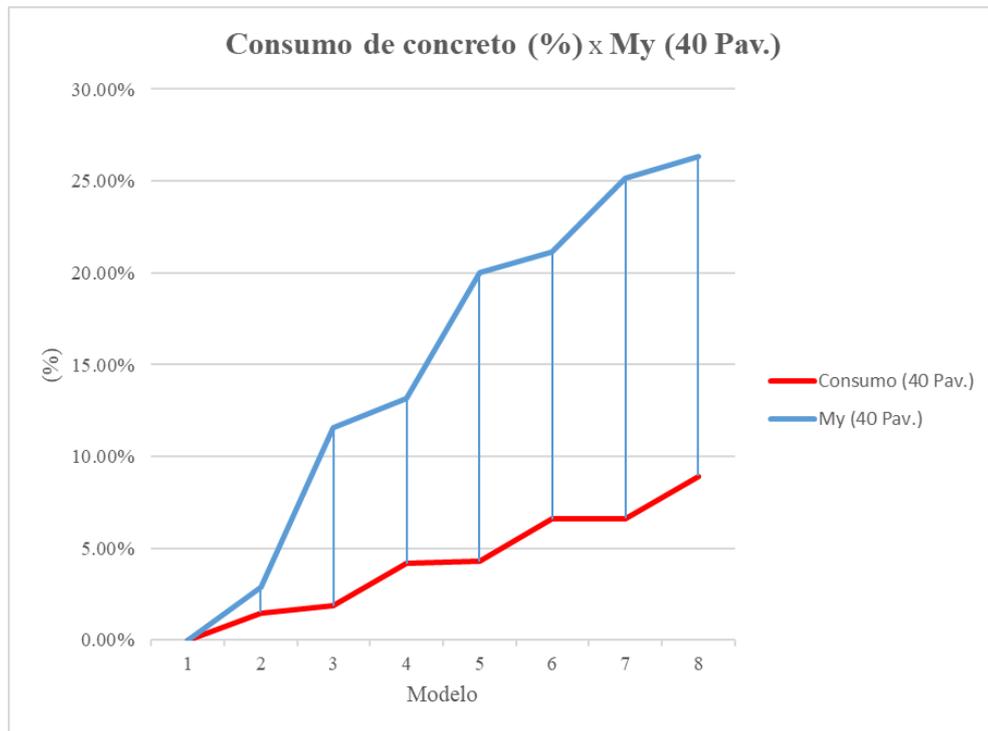
(AUTOR, 2021)

Figura 57 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de Mx nos modelos com 80 pavimentos



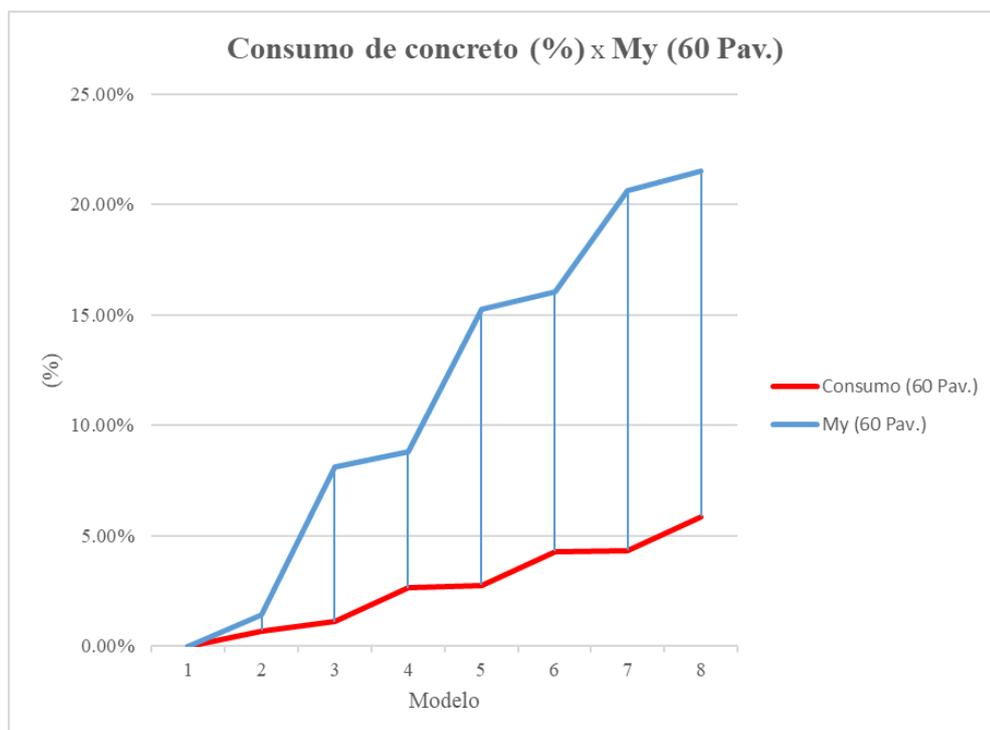
(AUTOR, 2021)

Figura 58 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $M_y$  nos modelos com 40 pavimentos



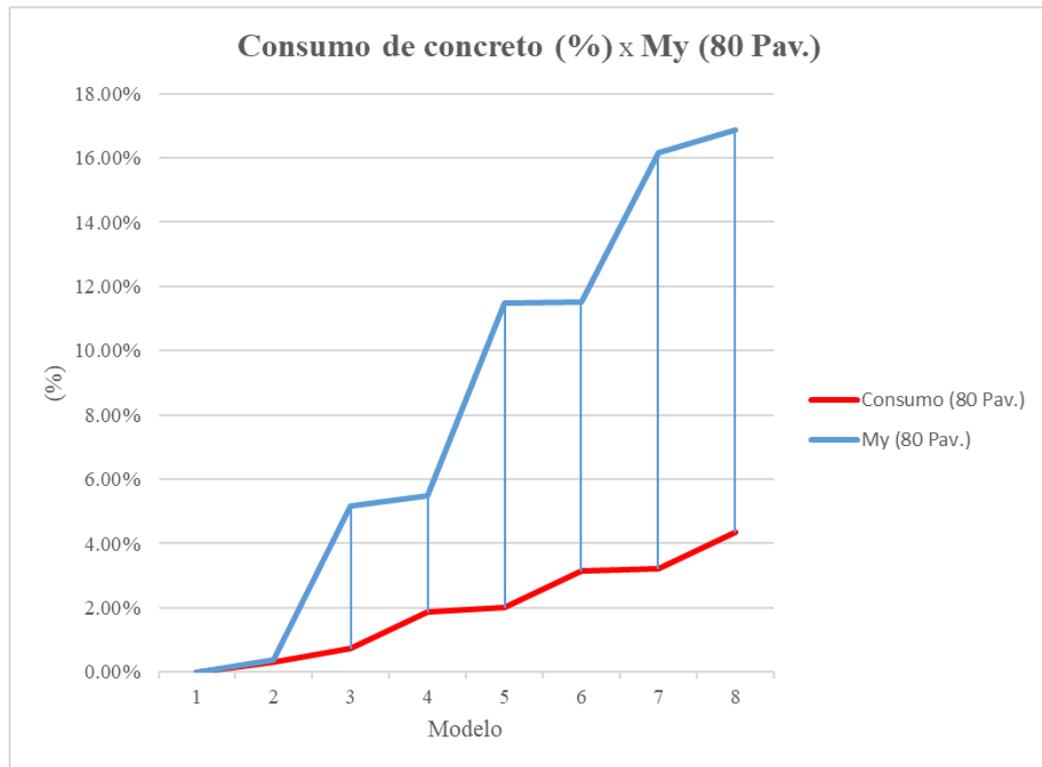
(AUTOR, 2021)

Figura 59 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de  $M_y$  nos modelos com 60 pavimentos



(AUTOR, 2021)

Figura 60 – Comparação entre o consumo adicional de concreto e a redução dos valores de My nos modelos com 80 pavimentos



(AUTOR, 2021)

Conforme esperado, a relação entre o consumo de concreto e os modelos analisados aumenta de forma linear. A diferença observada entre o consumo e o coeficiente  $\gamma z$  varia conforme a quantidade de pavimentos, notando-se uma maior relação entre o ganho obtido na redução do valor de  $\gamma z$  em edifícios de maior altura. Já na relação do consumo com os deslocamento laterais e momentos fletores, observa-se pouca diferença na ordem de grandeza das diferenças.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado visou estabelecer a influência da inserção de pavimentos com *outriggers* de concreto armado no caso específico da edificação analisada, com as características próprias do pavimento tipo utilizado, e através da análise dos resultados obtidos, observou-se que o sistema pode influenciar significativamente na redução dos valores do coeficiente  $\gamma_z$ , do deslocamento lateral no topo da edificação e na redução dos momentos fletores nos núcleos.

Para a validação do método desenvolvido para a modelagem de *outriggers*, os resultados obtidos através da comparação dos modelos de teste feitos no TQS com os modelos desenvolvidos por Brasil (2018) resultaram em diferenças de deslocamento lateral menor que 10%, demonstrando-se satisfatórios para validação do método de modelagem utilizado no trabalho.

Foi observada uma diminuição nas reduções percentuais dos deslocamentos laterais e dos momentos fletores na base do núcleo conforme o aumento da altura da edificação, gerando a necessidade de aumentar a quantidade de pavimentos de *outriggers* em edifícios mais altos para a mesma redução percentual. O comportamento das curvas referentes aos parâmetros analisados ( $\gamma_z$ , deslocamento lateral e momentos fletores) demonstrou tendência a se horizontalizar conforme o aumento de pavimentos de *outriggers*, e se comparadas com o consumo de concreto, a proporção da redução dos deslocamentos laterais e dos momentos fletores na base do núcleo rígido varia pouco com o aumento da altura do edifício, gerando uma relação similar entre o custo-benefício do sistema. Por outro lado, a redução do coeficiente  $\gamma_z$ , se comparada com o consumo de concreto, é maior proporcionalmente nos edifícios mais altos.

Nos casos em que houve a inclusão de um *Top-Hat* no último pavimento da edificação, houve uma contribuição menor do que com a adição de um pavimento de *outriggers* intermediário na edificação. Esse fator pode ser ponderado pela maior facilidade de se inserir os *outriggers* no topo da edificação, comumente composto por reservatórios e áreas técnicas.

O trabalho realizado limitou-se a poucas variações de altura e posições de *outriggers*, além de considerar apenas uma espessura para as paredes do sistema. Como sugestões a trabalhos futuros, indica-se a complementação dos dados obtidos, inserindo valores diferentes para a

espessura dos *outriggers* e suas posições. Também é sugerida uma variação maior na altura da edificação, extendendo o trabalho realizado para edifícios com mais de 100 pavimentos, além da consideração de diferentes seções e resistências para os elementos estruturais, principalmente os pilares exteriores, os quais serão mais solicitados com a inserção dos *outriggers*.

A quantificação das armaduras dos elementos também é uma variável importante a ser comparada, pois a área de aço necessária para os *outriggers* e para os pilares externos afetará os quantitativos. Esta análise também fica sugerida a trabalhos futuros, com recomendação de se desenvolver comparativos entre os custos adicionais gerados pelo sistema de maneira mais aprofundada.

## REFERÊNCIAS

- PETERSON, James B. Comparison of Analysis and Optimization Methods for Core-Megacolumn-Outrigger Skyscrapers. **BYU ScholarsArchive**, Provo, 2011.
- ALI, Lame. **Optimization of Outrigger Structures**. Tehran, 2007.
- HALLEBRAND, Erick; JAKOBSSON, Wilhelm. **Structural design of high-rise buildings**. Lund, 2016.
- RIBEIRO, Luiz. R. **Utilização de Outriggers em edifícios altos**. Rio de Janeiro, 1990.
- BENINCÁ, Matheus E. **Comparação entre modelos de análise estrutural de edifícios em concreto armado: estudo de caso**. Porto Alegre, 2016.
- RIBEIRO, Jairo F. **Estabilidade global em edifícios: análise dos efeitos de segunda ordem nas estruturas de concreto**. Porto Alegre, 2010.
- KUMMER, Fabricio D. **Análise de pórticos espaciais pelo método da rigidez: consideração dos efeitos da deformação por corte**. Porto Alegre, 2014.
- SILVA, Maurício F. V. **Rigidez horizontal de pórticos: estudo paramétrico dos principais fatores que a influenciam**. Porto Alegre, 2015.
- ALMEIDA, Cássio D. **Estudo comparativo entre sistemas estruturais para um edifício comercial em concreto armado**. Porto Alegre, 2015.
- DREYER, Maurel. **Análise comparativa da estabilidade global de edificações de concreto armado: sistema de paredes e de pórticos rígidos**. Porto Alegre, 2018.
- CHOI, Hi S.; HO, Goman; JOSEPH, Leonard; MATHIAS, N. **Outrigger Design for High-Rise buildings**. Routledge. Chicago, 2012.
- ALVA, Gerson M. S. **Concepção estrutural de edifícios em concreto armado**. Santa Maria, 2007.
- MEDEIROS, Sérgio R. P. Modelos estruturais de núcleos de edifícios – barra vs. casca. **TQSNEWS**, ano XVII, nº 39, 2014.
- FREITAS, Maria L. M. X. História e historiografia da arquitetura e do urbanismo modernos no Brasil. **DOCOMOMO**, 13º Seminário. Salvador, 2019.
- KIMURA, Alio. **Informática aplicada a estruturas de concreto armado**. 2. ed. Oficina de textos. São Paulo, 2018.
- ARAÚJO, José M. **Curso de concreto armado**. 3. ed. Dunas. Rio Grande, 2010.
- FUSCO, Péricles B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 1. ed. Pini. São Paulo, 1995.

GREGOLETTO, Débora. **Impactos de edifícios altos na percepção da estética urbana.** Porto Alegre, 2013.

BARBOZA, Marcos R. **Concepção e análise de estruturas de edifícios em concreto armado.** Bauru, 2008.

BRASIL, Giovanni S. **Análise de modelos de contraventamento em edifício de concreto armado.** Porto Alegre, 2018.

MARCADELLA, C. **Análise comparativa dos deslocamentos horizontais de três sistemas estruturais propostos de contraventamento frente às cargas estáticas do vento.** Porto Alegre, 2016.

TARANATH, B. S. **Structural analysis and design of tall buildings.** 1º ed., New York, **McGraw-Hill**, 1988.