

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

THAMY ALISSAN DE SENE ANTUNES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MODELAGEM DE LAJES MACIÇAS NO
CONTRAVENTAMENTO DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO**

CAMPO MOURÃO

2021

THAMY ALISSAN DE SENE ANTUNES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MODELAGEM DE LAJES MACIÇAS NO
CONTRAVENTAMENTO DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO**

**Study of the influence of solid slab modeling on the bracing structure of
reinforced concrete buildings**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Esp. Cristian Giroldo Pinheiro

CAMPO MOURÃO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

THAMY ALISSAN DE SENE ANTUNES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MODELAGEM DE LAJES MACIÇAS NO
CONTRAVENTAMENTO DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Esp. Cristian Giroldo Pinheiro

Data de aprovação: 25 de novembro de 2021

Cristian Giroldo Pinheiro

Especialista

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Douglas Fukunaga Surco

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Leandro Waidemam

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2021

AGRADECIMENTOS

Relembrar como foi toda minha trajetória até aqui me faz refletir o quanto devemos acreditar em nossos sonhos, lutar por eles e, acima de qualquer coisa, acreditar que somos capazes de conquistá-los. Mas nada disso seria possível sozinha.

Primeiramente, agradeço à Deus, por ser minha fortaleza diante de todos os obstáculos, até aqueles que eu nem mesmo era capaz de compreender. Graças à Ele, tudo foi possível e tudo foi encaminhado.

Agradeço aos meus pais, Andrea e Wilton, por todo o apoio e por nunca terem medido esforços para que esse sonho se tornasse realidade. Por isso, dedico a eles esse trabalho, com todo meu amor e gratidão.

Às minhas irmãs, Ana Laura e Lívia, que foram o meu combustível desde tão pequenas. Agradeço por toda compressão com a minha ausência e por todo amor doado com tanta ingenuidade.

Agradeço a toda minha família e amigos por se fazerem presentes mesmo que distantes fisicamente.

Agradeço aos novos amigos que a faculdade me apresentou, que foram como uma família durante todo esse período. Em especial à Camila, Nayara, Alessandro, Erbes, Marcio, Junior, Raema, Juliana, Heloa, Ana Laura e Naiara.

A todos os professores por todos os ensinamentos compartilhados. Em especial, ao Giovanni, por toda dedicação, paciência e orientação.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma estiveram presentes nessa caminhada e puderam contribuir para que ela chegasse até aqui.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento das lajes maciças do ponto de vista da estrutura de contraventamento. As análises elástico lineares foram realizadas no software de elementos finitos *Autodesk Robot Structural Analysis*. Foram estudados dois exemplos distintos, o primeiro com planta retangular e o segundo com planta em formato de L. Para os exemplos, foram consideradas três metodologias distintas para a modelagem das lajes na estrutura de contraventamento, o chamado modelo 1, considera que a laje seja um diafragma indeformável, o modelo 2, considera que a laje seja deformável em seu plano e com uma rigidez nula a flexão, e o terceiro modelo considera que a laje seja deformável no seu plano e que possua rigidez à flexão. Os resultados mostraram que para os exemplos estudados os modelos 1 e 2 apresentam resultados praticamente idênticos, e que o modelo 3, apresenta incremento de rigidez nas situações onde os painéis de contraventamento sejam menos rígidos.

Palavras-chave: diafragma rígido, estrutura de contraventamento, concreto armado.

ABSTRACT

This paper presents a study on the behavior of solid slabs based on the bracing structure. Linear elastic analyzes were performed using a finite element software, *Autodesk Robot Structural Analysis*. Two different examples were studied, the first one, a rectangular plant and the second with an L-shaped plant. For the examples, three different methodologies were considered for modeling the slabs in the bracing structure, the so-called model 1, considers that the slab is an indeformable diaphragm, model 2, considers that the slab is deformable in its plane and with zero flexural stiffness, and the third model considers that the slab is deformable in its plane and that it has flexural stiffness. The results shows that for the examples studied, models 1 and 2 present almost identical results, and that model 3 presents an increase in stiffness in situations where the bracing panels are less rigid.

Keywords: rigid diaphragm, bracing structure, reinforced concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Área de influência do pilar P1.....	22
Figura 2 - Área de influência do pilar P5.....	23
Figura 3 - Planta Baixa do Exemplo 1	25
Figura 4 – Sistema de eixos locais.....	27
Figura 5 – Isométrica do exemplo 1	27
Figura 6 – Aplicação das forças do vento nas direções X e Y.....	28
Figura 7 – Modelo 1: Deslocamentos Caso 1	31
Figura 8 – Modelo 1: Deslocamentos Caso 2	31
Figura 9 - Modelo 2: Deslocamentos Caso 1	32
Figura 10 - Modelo 2: Deslocamentos Caso 2.....	32
Figura 11 - Modelo 3: Deslocamentos Caso 1	33
Figura 12 - Modelo 3: Deslocamentos Caso 2.....	33
Figura 13 – Modelo 1: Reações de apoio Caso 1	34
Figura 14 - Modelo 1: Reações de apoio Caso 2.....	35
Figura 15 - Modelo 2: Reações de apoio Caso 1	35
Figura 16 - Modelo 2: Reações de apoio Caso 2.....	36
Figura 17 - Modelo 3: Reações de apoio Caso 1	36
Figura 18 - Modelo 3: Reações de apoio Caso 2.....	37
Figura 19 - Planta Baixa do Exemplo 2	39
Figura 20 - Isométrica do Exemplo 2.....	40
Figura 21 - Modelo 1: Deslocamentos Caso 1	42
Figura 22 - Modelo 1: Deslocamentos Caso 2	42
Figura 23 - Modelo 2: Deslocamentos Caso 1	43
Figura 24 - Modelo 2: Deslocamentos Caso 2.....	43
Figura 25 - Modelo 3: Deslocamentos Caso 1	44
Figura 26 - Modelo 3: Deslocamentos Caso 2.....	44
Figura 27 - Modelo 1: Reações de apoio Caso 1	46
Figura 28 - Modelo 1: Reações de apoio Caso 2.....	46
Figura 29 - Modelo 2: Reações de apoio Caso 1	47
Figura 30 - Modelo 2: Reações de apoio Caso 2.....	47
Figura 31 - Modelo 3: Reações de apoio Caso 1	48
Figura 32 - Modelo 3: Reações de apoio Caso 2.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Determinação da força do vento V_x	26
Tabela 2 - Determinação da força do vento V_y	26
Tabela 3 - Deslocamentos nas direções x e y para o Caso 1(Pilar P9)	30
Tabela 4 - Deslocamentos nas direções x e y para o Caso 2(Pilar P9)	30
Tabela 5 - Reações de apoio para o Caso 1	37
Tabela 6 - Reações de apoio para o Caso 2	38
Tabela 7 - Determinação da força do vento V_x	40
Tabela 8 - Determinação da força do vento V_y	40
Tabela 9 - Deslocamentos nas direções x e y para o Caso 1(Pilar P16) ..	41
Tabela 10 - Deslocamentos nas direções x e y para o Caso 2(Pilar P16)	41
Tabela 11 - Reações de apoio para o Caso 1	49
Tabela 12 - Reações de apoio para o Caso 2	49

LISTA DE SÍMBOLOS

f_c – resistência à compressão do concreto

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto

f_{ct} – resistência do concreto à tração direta

E_{ci} – módulo de elasticidade inicial do concreto

E_{cs} – módulo de elasticidade secante do concreto

E_c – módulo de elasticidade representativo do concreto

α_E – parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade

ν – coeficiente de Poisson

α – parâmetro de instabilidade

γ_z – coeficiente de majoração dos esforços globais de 1ª ordem devidos aos carregamentos horizontais para obtenção dos esforços finais de 2ª ordem

$(EI)_{sec}$ – rigidez secante

I_c – momento de inércia da seção bruta do concreto

$M_{1,tot,d}$ – momento de tombamento de 1ª ordem

σ – tensão média à compressão do concreto

P – força normal no pilar ou pressão constante

q – carga estimada

A_{infl} – área de influência do pilar

N_{pav} – número de pavimentos

A – área da seção transversal do pilar

l – largura da viga

h – altura da viga ou laje

L – largura do vão

L_x – largura do menor vão

F_v – força do vento

A_f – área da fachada

I_x – momento de inércia em torno do eixo x

I_y – momento de inércia em torno do eixo y

I_z – momento de inércia em torno do eixo z

I_g – rigidez à flexão da laje

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	JUSTIFICATIVA	14
4	REFERENCIAL TEÓRICO	15
4.1	Concreto	15
4.1.1	Módulo de Elasticidade Inicial ou Tangente	15
4.1.2	Módulo de Elasticidade Secante.....	15
4.1.3	Módulo de Elasticidade Representativo.....	16
4.1.4	Coefficiente de Poisson	16
4.2	Estruturas de Contraventamento	16
4.2.1	Painel Parede	16
4.2.2	Painel Pórtico	17
4.2.3	Painel Laje.....	17
4.3	Lajes	17
4.3.1	Lajes Maciças.....	17
4.4	Diafragmas Rígidos	18
4.5	Ação Horizontal: Vento	18
4.6	Análise Global de 2ª Ordem	18
4.6.1	Parâmetro α	19
4.6.2	Coefficiente γ_z	20
5	METODOLOGIA	21
5.1	Pré-dimensionamento dos pilares	21
5.1.1	Cálculo da área da seção transversal.....	21
5.1.2	Estimativa da força normal	22
5.1.3	Cálculo das dimensões dos pilares	23
5.2	Pré-dimensionamento das vigas	23
5.3	Pré-dimensionamento das lajes maciças	24
6	EXEMPLOS	25
6.1	Exemplo 1	25
6.1.1	Modelo 1	28

6.1.2	Modelo 2.....	29
6.1.3	Modelo 3.....	29
6.1.4	Análise e resultados	29
6.1.4.1	Deslocamentos horizontais.....	29
6.1.4.2	Reações de apoio.....	34
6.2	Exemplo 2.....	38
6.2.1	Análise e resultados	41
6.2.1.1	Deslocamentos horizontais.....	41
6.2.1.2	Reações de apoio.....	45
7	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento dos centros urbanos devido ao aumento populacional associado à falta de espaço e a elevados custos dos terrenos, fizeram com que engenheiros e arquitetos buscassem soluções para suprir a necessidade de espaço. Começou então um processo de verticalização das edificações, surgindo edifícios cada vez mais altos e esbeltos. Embora quanto à altura não haja uma classificação clara e objetiva, do ponto de vista do comportamento estrutural, um edifício pode ser considerado alto quando, em função de sua altura ou esbeltez, as ações laterais oriundas do vento passam a ser preponderantes na determinação de esforços e deslocamentos.

Com o avanço tecnológico, o setor da informática teve seu desenvolvimento acelerado e o surgimento de novas ferramentas de análise estrutural permitiu que as análises estruturais fossem aprimoradas, a fim de buscar soluções que atendam às necessidades do usuário e que sejam economicamente viáveis para a construção de edifícios de múltiplos andares.

Devido à altura elevada, é necessário encontrar um sistema de contraventamento que resista às ações horizontais de maneira eficiente, resultando em deslocamentos menores e redução dos esforços de segunda ordem em vigas e pilares. De acordo com Bottura (1991), a distribuição das ações horizontais entre os painéis que compõem a estrutura de contraventamento pode ser feita de forma bastante eficiente através da consideração das lajes do pavimento como um diafragma rígido. Assim a laje é considerada como um elemento indeformável no seu plano, tendo apenas deslocamentos de corpo rígido.

Do ponto de vista técnico, considerar a hipótese de lajes maciças com comportamento de diafragma rígido, em edifícios de plantas aproximadamente retangulares, não muito alongadas, onde o lado maior do retângulo não supera em três vezes o lado menor, e sem grandes aberturas é razoável e contemplada pela ABNT NBR 6118:2014. Porém, em diversas outras situações há dúvidas quanto a essa consideração.

O presente trabalho busca abordar algumas das situações em que os edifícios possuam plantas que em princípio estariam em desacordo com a prescrição da ABNT NBR 6118:2014 para a consideração da hipótese de diafragma rígido da laje. Foram analisados dois edifícios hipotéticos, sendo um deles com planta retangular e outro

com planta em formato de L. As análises foram realizadas utilizando o software *Autodesk Robot Structural Analysis*.

Para cada um dos exemplos foram consideradas três alternativas para a modelagem da laje na estrutura de contraventamento, sendo a primeira através da consideração do diafragma rígido, a segunda com a discretização da laje como elemento de chapa, portanto sem rigidez à flexão e a terceira com a discretização da laje com elemento de casca, portanto considerando a sua rigidez à flexão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento das estruturas de dois edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado projetados com lajes maciças, sujeitas às ações horizontais, avaliando a influência nas reações de apoio e deslocamentos devido às ações horizontais em função de três alternativas para a consideração da laje na modelagem.

2.2 Objetivos Específicos

Avaliar, através da modelagem em software, a influência do comportamento de diafragma de lajes maciças em edifícios altos com plantas retangulares e em formatos de L.

Avaliar, para os casos estudados, em quais arranjos as lajes podem ser consideradas como diafragma rígido.

Avaliar a influência da modelagem das lajes nos deslocamentos horizontais devido às ações horizontais

Avaliar a influência da modelagem das lajes nas reações de apoio devido às ações horizontais

3 JUSTIFICATIVA

Com as mudanças arquitetônicas e o uso de sistemas estruturais não convencionais (estruturas mistas de aço e concreto, estruturas em concreto protendido, *steel frame*, *wood frame*, entre outros), os projetistas vem encontrando dificuldades em cumprir as prescrições da ABNT NBR 6118:2014, com relação à estabilidade global das estruturas. Além das ações verticais, como cargas de uso e peso próprio, as ações oriundas do vento têm grande influência nos deslocamentos horizontais da estrutura. Por essa razão, escolher um sistema de contraventamento eficiente é fundamental ao elaborar um projeto.

Bezerra (1995) mostrou através de uma análise de 1ª ordem, que ao considerar a laje como parte do sistema de contraventamento e também a sua rigidez à flexão, existe uma redução significativa dos deslocamentos horizontais.

Segundo Martins (2001), ao considerar a rigidez transversal das lajes, há uma maior interação dos esforços e deslocamentos com os demais elementos (vigas, pilares e núcleos), comparado aos modelos que consideram as lajes como diafragmas totalmente flexíveis fora do seu plano.

Devido a maior interação entre os elementos da estrutura, Goulart (2008) ressaltou que além de influir nos parâmetros de estabilidade global, a consideração da rigidez à flexão da laje pode gerar reduções significativas dos esforços nas vigas e pilares. Isso afeta diretamente o dimensionamento para combinações ELU (estado-limite último) e, conseqüentemente, pode gerar uma economia de armaduras.

Diante da limitação de casos que a ABNT NBR 6118:2014 trata com relação à utilização de lajes como diafragmas rígidos, esta pesquisa poderá auxiliar os engenheiros que se depararem com lajes em formato geométrico não contemplado pela referida normativa.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Concreto

Por definição da ABNT NBR 6118:2014, elementos de concreto armado são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre o concreto e armadura. Como o objetivo deste é analisar os deslocamentos e esforços solicitantes nos elementos da estrutura, foram apresentadas as seguintes propriedades do concreto: f_{ck} , módulo de elasticidade inicial, módulo de elasticidade secante e módulo de elasticidade representativo; coeficiente de Poisson.

4.1.1 Módulo de Elasticidade Inicial ou Tangente

É caracterizado pelo valor da tangente no início do diagrama tensão-deformação. Na ausência de ensaios para as classes de resistência até C50, pode ser estimado pela equação 1:

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ entre 20 e 50 MPa.} \quad (1)$$

Onde:

E_{ci} e f_{ck} são dados em megapascal (MPa)

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse

$\alpha_E = 0,9$ para calcário

$\alpha_E = 0,7$ para arenito

4.1.2 Módulo de Elasticidade Secante

Empregado principalmente nas análises das situações de Estado Limite de Serviço da estrutura. Pode ser estimado pela equação 2:

$$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci} \quad (2)$$

Onde:

$$\alpha_i = 0,8 + \left(0,2 \times \frac{f_{ck}}{80}\right) \leq 1,0$$

4.1.3 Módulo de Elasticidade Representativo

O módulo de elasticidade representativo é o mais adequado para análise global, situação em que a estrutura está submetida às ações verticais e horizontais. De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, seu valor pode ser estimado através da majoração do módulo de elasticidade secante em 10%, conforme a equação 3:

$$E_c = 1,1 \times E_{cs} \quad (3)$$

4.1.4 Coeficiente de Poisson

É a relação entre a deformação transversal e a longitudinal, quando se aplica uma força uniaxial em elemento. Segundo a ABNT NBR 6118:2014: “Para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ e tensões de tração menores que f_{ct} , o coeficiente de Poisson pode ser tomado como igual a 0,2”, portanto.

$$\nu = 0,2$$

4.2 Estruturas de Contraventamento

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, estruturas de contraventamento são subestruturas que devido a sua grande rigidez a ações horizontais, possuem maior resistência para os esforços decorrentes das mesmas. Shiguemitsu (1989) evidencia que a associação de elementos estruturais como pilares, vigas e lajes pode formar painéis de contraventamento, sendo eles: painel parede, painel pórtico, painel laje.

4.2.1 Painel Parede

Shiguemitsu (1989) evidencia que são denominados “Painel Parede” os painéis cheios, com seção constante ao longo da sua altura, sem rigidez transversal,

engastados na base, que sofrem predominantemente os efeitos e deformações decorrente das ações de momento fletor. Em edifícios altos, relativamente esbeltos, pode-se desprezar os efeitos provocados pelo esforço cortante na subestrutura.

4.2.2 Painel Pórtico

São painéis compostos por vigas e pilares, sem rigidez transversal, e segundo Bottura (1991), sua deformação pode ser caracterizada apenas pelos efeitos da força cortante, desprezando os efeitos dos momentos fletores.

4.2.3 Painel Laje

De acordo com Shiguemitsu (1989), as lajes podem ser tratadas como painéis horizontais planos, sem rigidez transversal e deformáveis em seu plano predominantemente pelas ações do momento fletor. Quando submetidas às ações horizontais possuem comportamento equivalente ao de vigas, transmitindo apenas os esforços horizontais aos elementos verticais, uma vez que a rigidez transversal das lajes pode ser considerada nula, a depender da estratégia de modelagem.

4.3 Lajes

Segundo Bastos (2015), as lajes são classificadas como elementos horizontais, planos e bidimensionais, onde as dimensões de comprimento e largura possuem valores muito maiores que sua espessura. Tem como finalidade receber a maior parte das ações provenientes do uso da estrutura, como pessoas, mobiliário, seu peso próprio, revestimentos e paredes. Essas ações geralmente são perpendiculares ao plano da laje e distribuídas para as vigas de apoio, ou, no caso de lajes lisas e cogumelos, são transmitidas diretamente aos pilares.

4.3.1 Lajes Maciças

São aquelas compostas por concreto em todo seu volume, que de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, a depender da situação, devem ter alturas mínimas que

variam de 7 cm a 15 cm. As lajes maciças contêm armaduras longitudinais e eventualmente transversais, podendo ser armada em uma ou duas direções. São projetadas para diversos tipos de construção, como edifícios de múltiplos pavimentos, escadas, reservatórios, muros de arrimo, entre outros. De modo geral, não são aplicadas em construções de pequeno porte, pois nesses tipos de edificações as lajes nervuradas pré-fabricadas geralmente apresentam vantagens econômicas e construtivas.

4.4 Diafragmas Rígidos

Diafragmas rígidos podem ser caracterizados como estruturas horizontais planas, compostas por elementos cuja rigidez em seu plano é muito grande, fazendo com que o pavimento funcione como um elemento infinitamente rígido em seu plano.

No caso de lajes com comportamento de diafragma rígido, a principal função é transferir as ações horizontais atuantes na fachada da estrutura para os painéis de contraventamento. A contribuição da sua rigidez transversal à flexão pode ser considerada nula ou não. Neste trabalho foi analisada a influência destas duas considerações.

Para que esse modelo seja confirmado sem a ocorrência de patologias na estrutura e até mesmo a ruptura, deve-se atentar para o detalhamento das ligações entre os elementos verticais e horizontais, a fim de garantir uma perfeita transmissão dos esforços entre eles.

4.5 Ação Horizontal: Vento

Neste trabalho não foi determinada a ação horizontal do vento de acordo com a ABNT NBR 6123: 1988, foram considerados valores representativos. Para as análises, foi considerada uma pressão constante de $1,00\text{kN/m}^2$ atuando perpendicularmente a cada uma das fachadas.

4.6 Análise Global de 2ª Ordem

Segundo Pinto (1997), quando há uma mudança de posição da estrutura no espaço, surgem efeitos devidos à não-linearidade geométrica (NLG), que podem ser

desprezados em estruturas mais rígidas. Entretanto, nas estruturas menos rígidas passam a ser significativos e devem ser obrigatoriamente considerados.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, uma estrutura pode ser classificada como de nós fixos quando os deslocamentos horizontais resultam no acréscimo de efeitos inferiores a 10% dos respectivos esforços de 1ª ordem. Quando esse acréscimo possui valor superior a 10%, as estruturas são classificadas como de nós móveis e devem ser considerados os esforços globais de 2ª ordem, além dos esforços de 1ª ordem.

Para a análise da dispensa ou não dos efeitos de 2ª ordem, serão usados o parâmetro α de instabilidade e o coeficiente γ_z .

4.6.1 Parâmetro α

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, uma estrutura pode ser classificada com de nós fixos se seu parâmetro de instabilidade α for menor que α_1 , conforme a equação 4:

$$\alpha = H_{\text{tot}} \times \sqrt{N_k / E_{cs} I_c} \quad (4)$$

Onde:

$$\alpha_1 = 0,2 + 0,1n, \text{ se } n \leq 3;$$

$$\alpha_1 = 0,6, \text{ se } n \geq 4;$$

Onde:

n é o número de níveis de barras horizontais (andares) acima da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo;

H_{tot} é a altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo;

N_k é o somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura (a partir do nível considerado para o cálculo de H_{tot}), com seu valor característico;

$E_{cs} I_c$ representa o somatório dos valores de rigidez equivalente na direção considerada.

4.6.2 Coeficiente γ_z

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, o coeficiente γ_z é válido para estruturas com no mínimo quatro pavimentos, que poderá ser considerada de nós fixos se $\gamma_z \leq 1,1$. Para cada combinação de carregamento, calcula-se por meio da equação 5:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (5)$$

Onde:

$\Delta M_{tot,d}$ é o acréscimo de momentos devido ao deslocamento horizontal;

$M_{1,tot,d}$ é o momento de tombamento de 1ª ordem.

Para análise global de 2ª ordem deve ser considerada uma rigidez penalizada com os seguintes valores:

Lajes: $(EI)_{sec} = 0,3 E_c I_c$

Vigas: $(EI)_{sec} = 0,4 E_c I_c$, para $A_s' \neq A_s$ e

$(EI)_{sec} = 0,5 E_c I_c$, para $A_s' = A_s$

Pilares: $(EI)_{sec} = 0,8 E_c I_c$

5 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada com base nas análises feitas no software *Autodesk Robot Structural Analysis*.

Inicialmente foi realizado o pré-dimensionamento dos elementos estruturais (pilares, vigas e lajes) para cada exemplo, conforme descrito em 5.1 dessa metodologia.

Em seguida, para cada exemplo, foram analisadas as estruturas considerando os seguintes modelos:

- a) Modelo 1: Pavimento com comportamento de diafragma rígido, sem modelagem da laje;
- b) Modelo 2: Pavimento considerando a deformabilidade da laje em seu plano, modelada com elementos de chapa. Nesse modelo foi desprezada sua rigidez à flexão;
- c) Modelo 3: Pavimento considerando a deformabilidade da laje em seu plano, modelada com elementos de casca. Nesse modelo foi considerada a rigidez à flexão penalizada, $(EI)_{sec} = 0,3 E_c I_c$.

Finalizadas as modelagens, foram analisadas as diferenças de esforços e de deslocamentos horizontais nos elementos estruturais.

5.1 Pré-dimensionamento dos pilares

5.1.1 Cálculo da área da seção transversal

Para o cálculo da área da seção transversal, foi considerado que a tensão média na seção pode ser determinada pela equação 6:

$$\sigma = 0,5 \times f_{ck} \quad (6)$$

Sendo a tensão média na seção o resultado da aplicação de uma força P uniformemente distribuída sobre uma área A , conforme a equação 7 :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (7)$$

Sendo assim, a área da seção transversal será dada pela equação 8:

$$A = \frac{P}{0,5 \times f_{ck}} \quad (8)$$

Onde:

P é a força normal estimada no pilar do primeiro pavimento;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão.

5.1.2 Estimativa da força normal

Para o cálculo da estimativa da força normal P , foi utilizada equação 9:

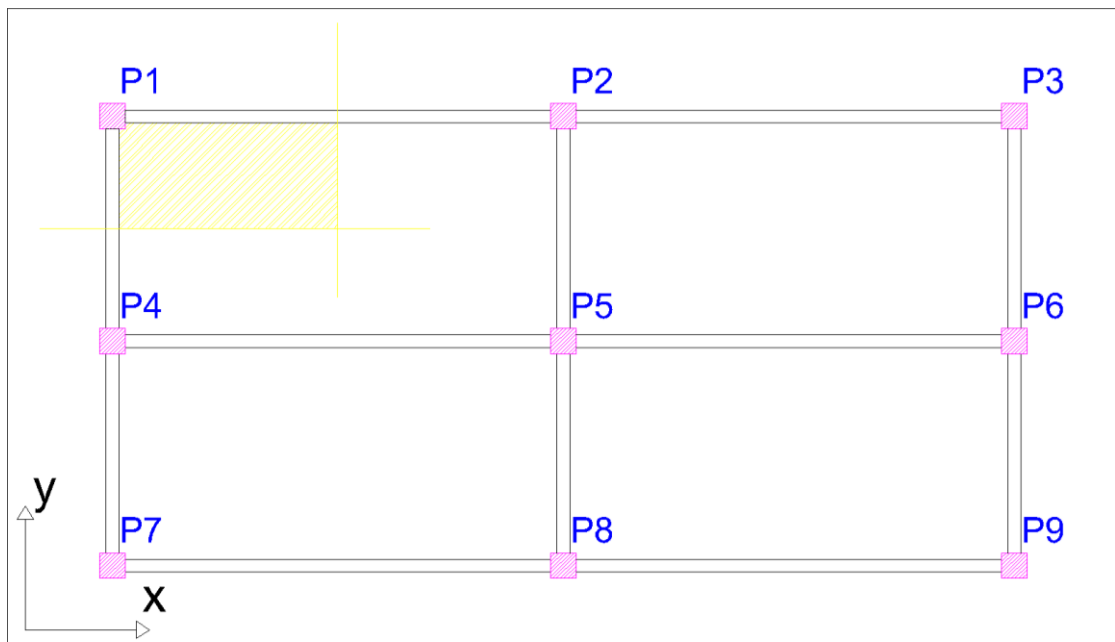
$$P = q \times A_{inf} \times N_{pav} \quad (9)$$

Onde:

q é a carga estimada por metro quadrado. Foi adotado: $q = 10 \text{ kN/m}^2$;

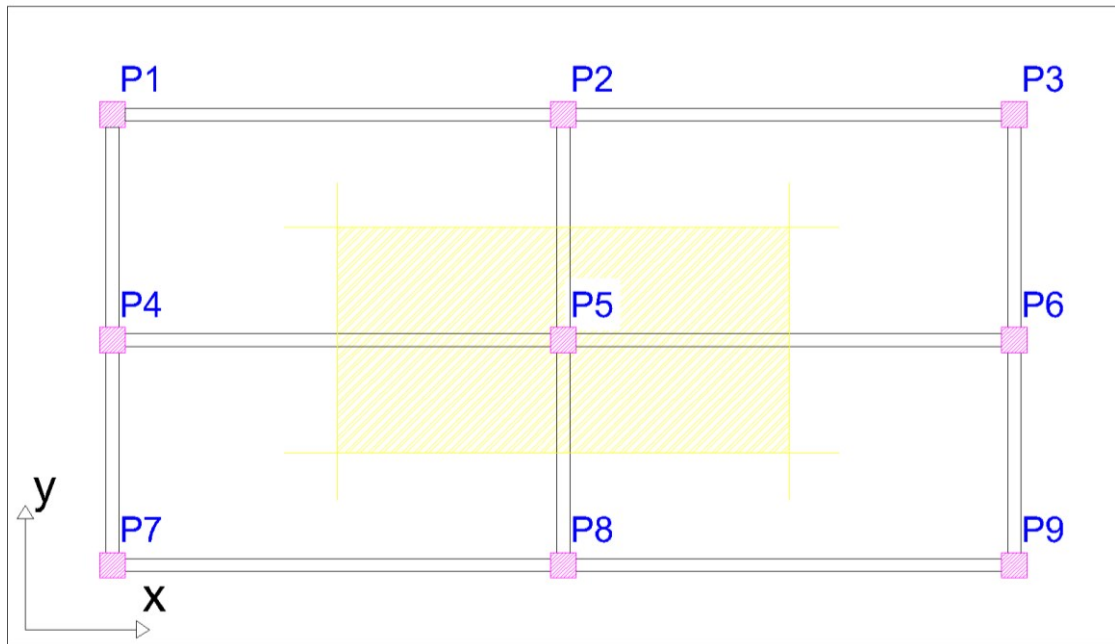
A_{inf} é área de influência de cada pilar, que é calculada traçando as retas à meia distância de cada eixo dos pilares, a exemplo das Figuras 1 e 2:

Figura 1 - Área de influência do pilar P1



Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 2 - Área de influência do pilar P5



Fonte: Autoria Própria (2021)

N_{pav} é o número de pavimentos.

Para o cálculo da estimativa da força normal P , não foram verificados os deslocamentos e limites horizontais.

5.1.3 Cálculo das dimensões dos pilares

Tendo determinada a área da seção transversal de cada pilar, é possível calcular as respectivas dimensões dos pilares através da equação 10:

$$A = x \times y \quad (10)$$

Onde x e y , são as dimensões do pilar. Vamos adotar pilares quadrados, onde $x = y$.

5.2 Pré-dimensionamento das vigas

Para o pré-dimensionamento das vigas, foi adotado da seguinte forma:

$$\begin{cases} l = 15 \text{ cm} \\ h = L \div 12 \end{cases}$$

Onde:

l é a largura da viga;

h é a altura da viga;

L é a comprimento do vão.

5.3 Pré-dimensionamento das lajes maciças

Para o pré-dimensionamento das lajes, foi adotado o procedimento dado pela equação a seguir:

$$h \geq \begin{cases} h_{\min} \\ 0,025 \times L_x \end{cases}$$

Onde:

h_{\min} é a altura mínima estabelecida pelo Item 13.2.4.1 da ABNT NBR 6118:2014. Foram consideradas lajes de piso não em balanço, sendo assim,

$h_{\min} = 8\text{cm}$;

L_x é a largura do menor vão.

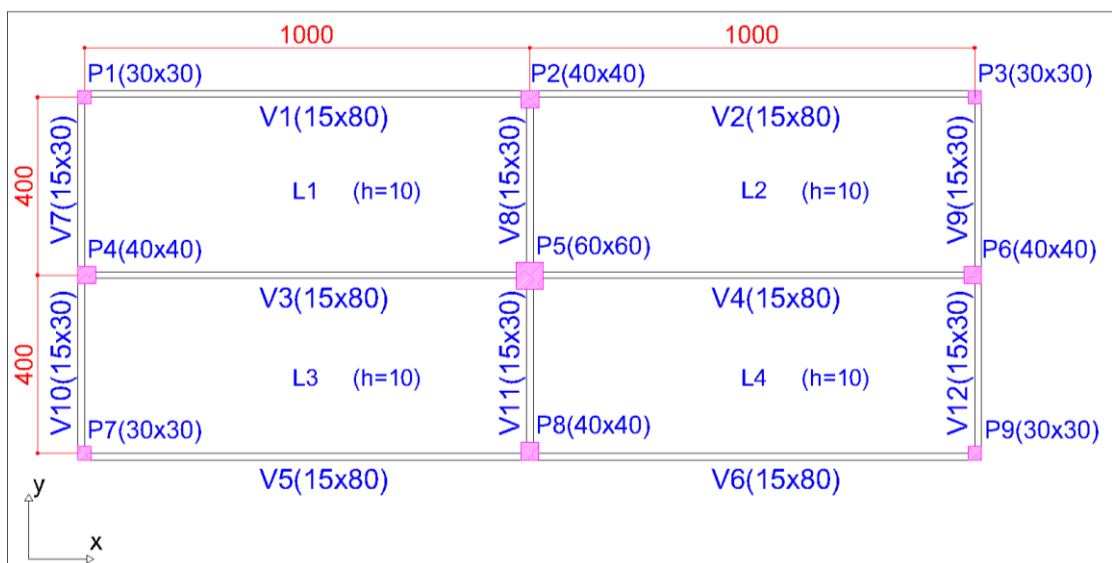
Visto que não é interessante que hajam lajes com alturas variadas, é recomendável que se faça uma uniformização das alturas das lajes, em geral toma-se a maior altura dentre as lajes como referência.

6 EXEMPLOS

6.1 Exemplo 1

Trata-se de um edifício de planta em formato retangular, com 10 pavimentos, com pé direito de 3 metros para cada pavimento, compostos por pórticos e lajes em concreto armado. Para todos os elementos estruturais foi considerado o concreto de $f_{ck} = 25$ Mpa, com módulo de elasticidade representativo de 31.878 MPa (calculado em função do módulo de elasticidade secante e o módulo de elasticidade tangencial, considerando o $\alpha_E = 1,2$, conforme explanado em 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3) e coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$. As seções transversais dos pilares e vigas e as espessuras das lajes foram considerados pelo pré-dimensionamento dos elementos, conforme a Figura 3, onde as medidas estão em centímetros.

Figura 3 - Planta Baixa do Exemplo 1



Fonte: Autoria Própria (2021)

Para determinar as ações horizontais do vento, foi considerada uma pressão constante de $1,00 \text{ kN/m}^2$ atuando perpendicularmente a cada uma das fachadas, os resultados encontrados foram apresentados nas Tabelas 1 e 2, sendo o número de pavimentos iniciado da base para o topo.

$$F_v = P \times A_f$$

Onde:

F_v é a Força horizontal do vento;

P é a pressão constante de 1,00kN/m²;

A_f é a área da fachada na qual a pressão está atuando.

Tabela 1 – Determinação da força do vento V_x

Pavimento	Pressão (kN/m ²)	A_f (m ²)	F_v (kN)	F_v distribuída (kN/m)
1 ao 9	1,00	24	24	3
10	1,00	12	12	1,5

Fonte: Autoria Própria (2021)

Tabela 2 - Determinação da força do vento V_y

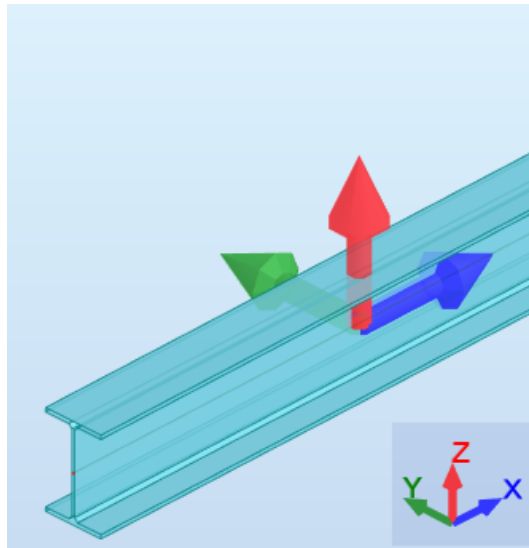
Pavimento	Pressão (kN/m ²)	A_f (m ²)	F_v (kN)	F_v distribuída (kN/m)
1 ao 9	1,00	60	60	3
10	1,00	30	30	1,5

Fonte: Autoria Própria (2021)

Para a definição das seções de barras no software *Autodesk Robot Structural Analysis*, consideramos a redução dos momentos de inércia dos pilares e vigas conforme a seguir:

- Pilares: 0,00 I_x ; 0,8 I_y ; 0,8 I_z
- Vigas: 0,00 I_x ; 0,4 I_y ; 0,4 I_z

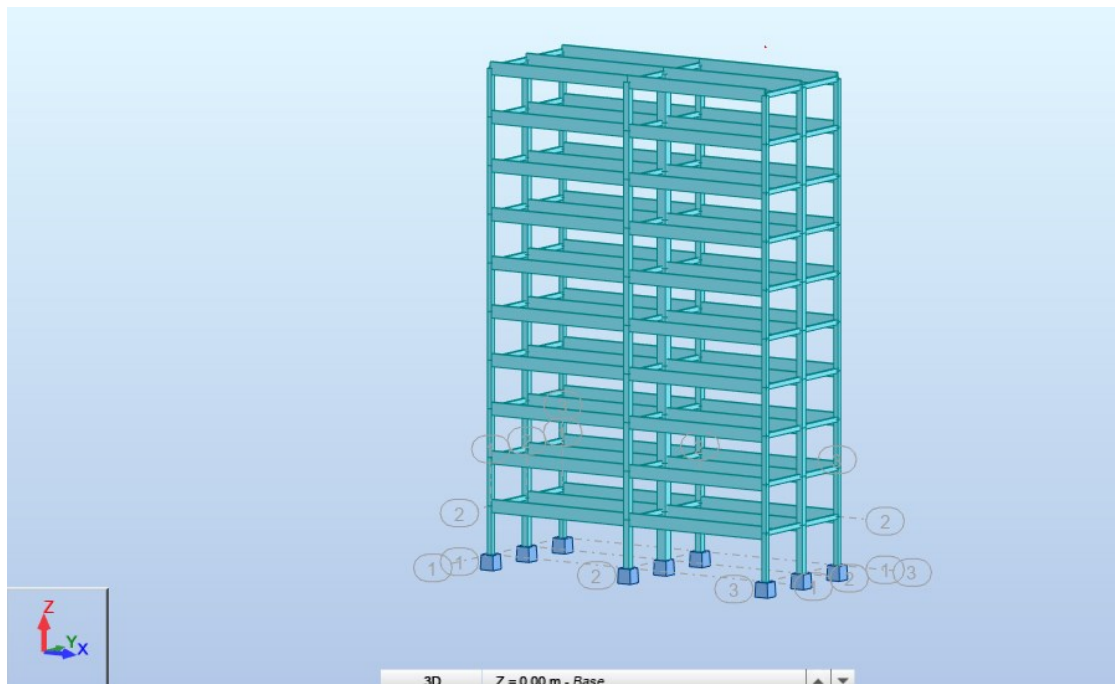
Onde I_x , I_y e I_z , são as inércias em torno dos eixos locais x, y, e z, respectivamente. A Figura 4 apresenta o sistema de eixos locais usado para vigas e pilares, sendo o eixo x (em azul) sempre o eixo longitudinal do elemento.

Figura 4 – Sistema de eixos locais

Fonte: Autoria Própria (2021)

Para os vínculos na fundação, foi considerado engastamento perfeito, restringindo os seis graus de liberdade nodais do espaço tridimensional.

Após definidas as seções de barras e apoios, foi realizada a montagem da estrutura. Uma vista isométrica é mostrada na Figura 5.

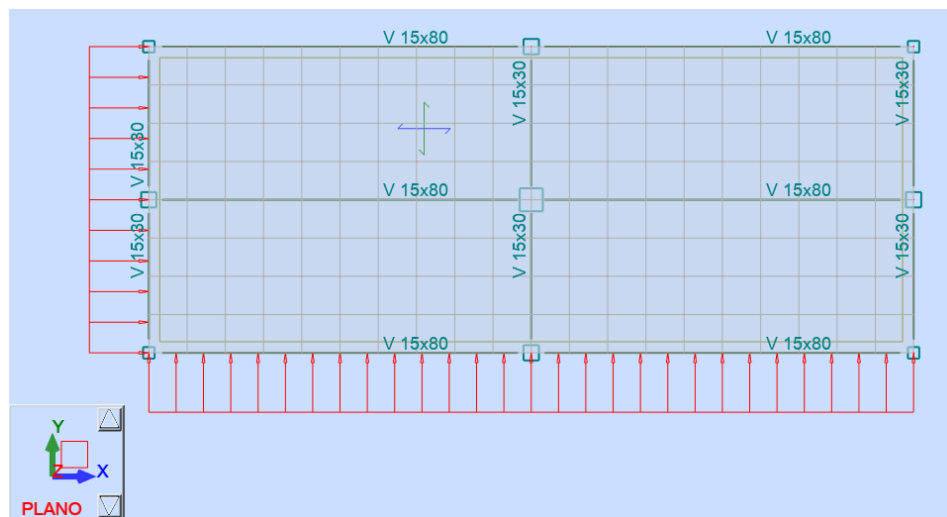
Figura 5 – Isométrica do exemplo 1

Fonte: Autoria Própria (2021)

Para a definição de cargas, foram considerados dois casos, sendo eles:

- Caso nº1 – Vento X: Força uniformemente distribuída horizontal nas vigas da fachada, conforme Figura 6, os valores são mostrados na Tabela 1.
- Caso nº2 – Vento Y: Força uniformemente distribuída horizontal nas vigas da fachada, conforme Figura 6, os valores são mostrados na Tabela 2.

Figura 6 – Aplicação das forças do vento nas direções X e Y



Fonte: Autoria Própria (2021)

6.1.1 Modelo 1

Neste modelo considera-se o comportamento de diafragma rígido, sem modelagem da laje. Foi criado um novo vínculo rígido (Geometria > Atributos adicionais > Vínculos rígidos) denominado Diafragma Rígido, com as direções UX, UY e RZ bloqueadas, sendo UX, UY e UZ, respectivamente, os deslocamentos e giro de acordo com o sistema de eixos global indicado no canto inferior esquerdo da Figura 6. Para aplicação desse vínculo, o nó principal foi considerado no CG do pavimento e os nós secundários os demais nós dos pilares do pavimento.

Após concluídas todas as etapas da modelagem, foi realizada a criação de malha (Análise > Criação de malha > Opções de criação de malha > Opção: Geração de malha simples, tamanho do elemento: 0,30m).

6.1.2 Modelo 2

Nesse modelo considera-se a modelagem da laje maciça, criando um elemento de casca (Geometria > Pisos > Nova espessura > Homogêneo), com altura de 10cm (conforme definido no pré-dimensionamento), e com a rigidez à flexão desprezada (considerando a redução do momento de inércia: $0,00 * I_g$).

Após concluídas todas as etapas da modelagem, foi realizada a criação de malha (Análise > Criação de malha > Opções de criação de malha > Opção: Geração de malha simples, tamanho do elemento: 0,30m).

6.1.3 Modelo 3

Nesse modelo considera-se a modelagem da laje maciça, criando um elemento de casca (Geometria > Pisos > Nova espessura > Homogêneo), com altura de 10cm (conforme definido no pré-dimensionamento), e com a rigidez à flexão penalizada (considerando a redução do momento de inércia: $0,3 * I_g$).

Após concluídas todas as etapas da modelagem, realiza-se a criação de malha (Análise > Criação de malha > Opções de criação de malha > Opção: Geração de malha simples, tamanho do elemento: 0,30m).

6.1.4 Análise e resultados

6.1.4.1 Deslocamentos horizontais

Foram extraídos dos Modelos 1, 2 e 3 os deslocamentos nos eixos x (U_x) e y (U_y) do pilar P9, em cada pavimento, devido às ações horizontais dos ventos V_x (Caso 1) e V_y (Caso 2), conforme as Tabelas 3 e 4 e Figuras 7 a 12.

Tabela 3 - Deslocamentos nas direções x e y para o Caso 1 (Pilar P9)

Pavimento	Caso	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
		Ux (cm)	Uy (cm)	Ux (cm)	Uy (cm)	Ux (cm)	Uy (cm)
1	1	0,2	0	0,2	0	0,2	0
2	1	0,6	0	0,6	0	0,6	0
3	1	1	0	1	0	1	0
4	1	1,3	0	1,3	0	1,3	0
5	1	1,6	0	1,6	0	1,6	0
6	1	1,9	0	1,9	0	1,8	0
7	1	2	0	2	0	2	0
8	1	2,2	0	2,2	0	2,2	0
9	1	2,3	0	2,3	0	2,2	0
10	1	2,3	0	2,3	0	2,3	0

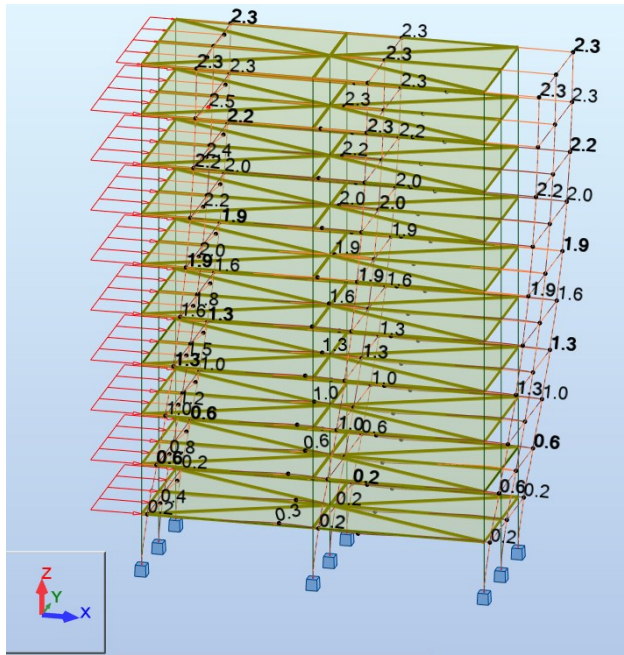
Fonte: Autoria Própria (2021)

Tabela 4 - Deslocamentos nas direções x e y para o Caso 2 (Pilar P9)

Pavimento	Caso	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
		Ux (cm)	Uy (cm)	Ux (cm)	Uy (cm)	Ux (cm)	Uy (cm)
1	2	0	1,5	0	1,5	0	1,4
2	2	0	4,9	0	4,9	0	4,5
3	2	0	8,9	0	8,9	0	8,1
4	2	0	12,9	0	12,9	0	11,7
5	2	0	16,6	0	16,5	0	14,9
6	2	0	19,8	0	19,7	0	17,7
7	2	0	22,5	0	22,3	0	20
8	2	0	24,5	0	24,4	0	21,8
9	2	0	26	0	25,9	0	23
10	2	0	27,1	0	27	0	24

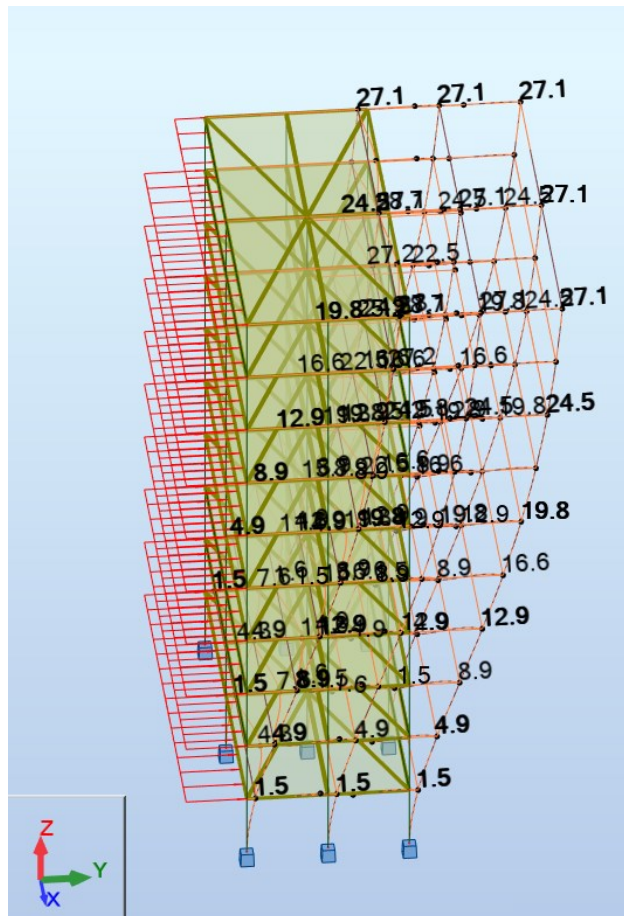
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 7 – Modelo 1: Deslocamentos Caso 1



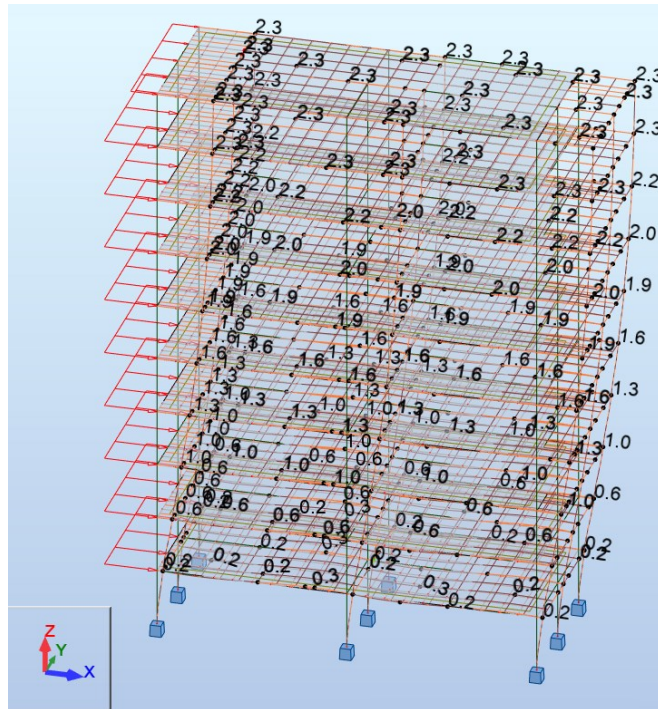
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 8 – Modelo 1: Deslocamentos Caso 2



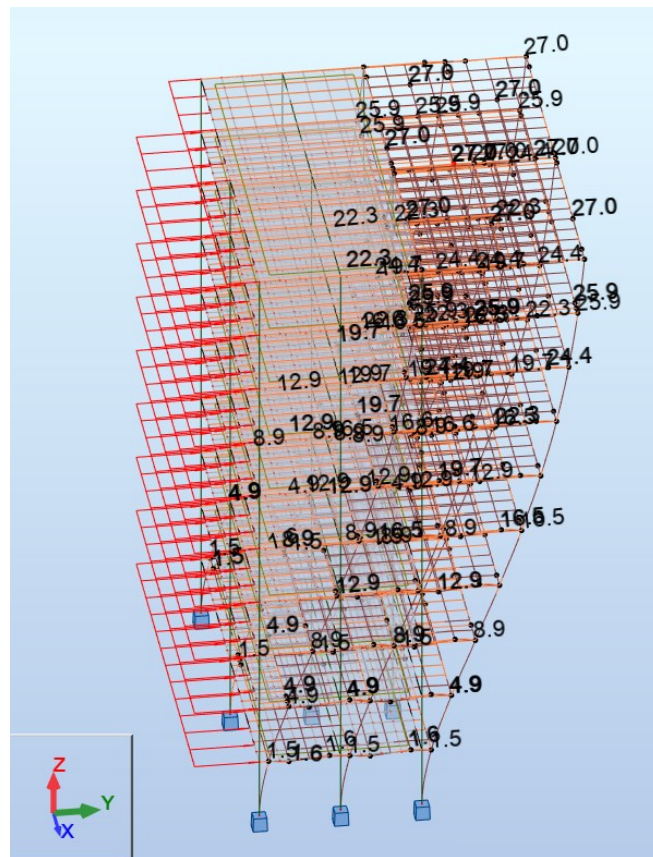
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 9 - Modelo 2: Deslocamentos Caso 1



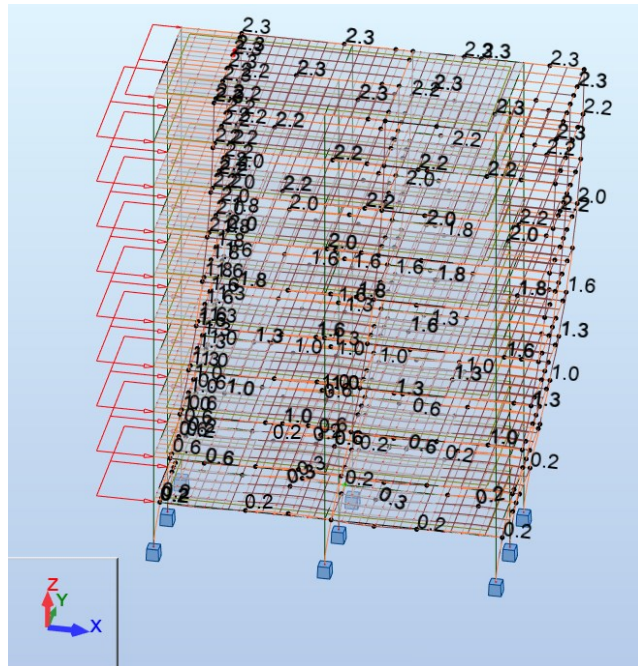
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 10 - Modelo 2: Deslocamentos Caso 2



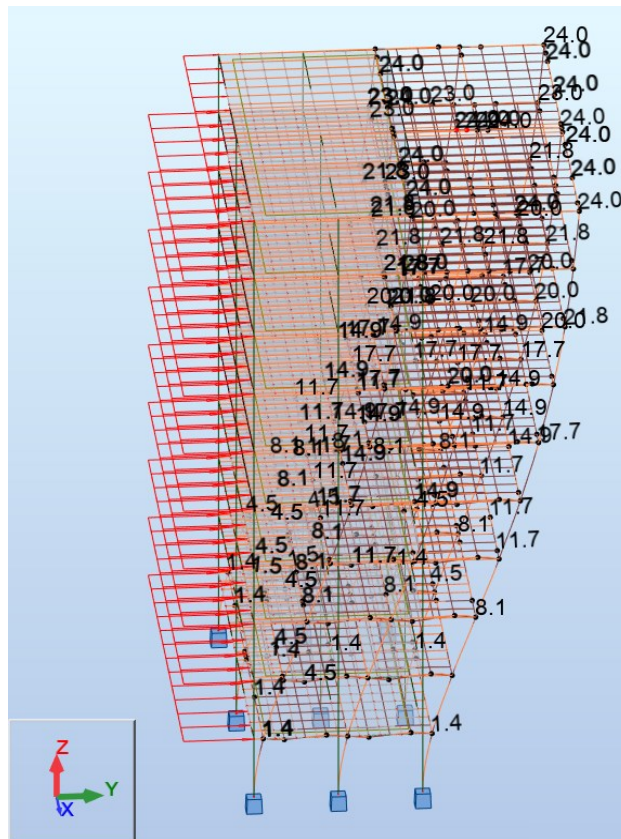
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 11 - Modelo 3: Deslocamentos Caso 1



Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 12 - Modelo 3: Deslocamentos Caso 2



Fonte: Autoria Própria (2021)

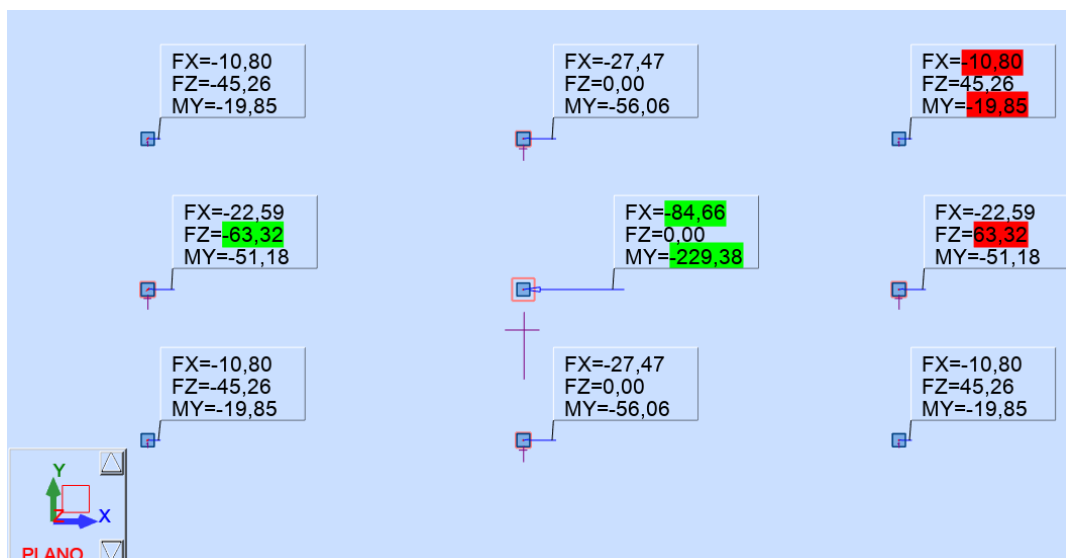
Comparando os resultados dos deslocamentos na direção x, vimos que os valores foram similares entre os modelos 1, 2 e 3, pois para essa direção a estrutura de contraventamento é muito rígida, de forma que a contribuição da rigidez das lajes é muito pequena.

Fazendo uma análise dos resultados dos deslocamentos na direção y, verificamos que, entre os modelos 1 e 2, os valores foram similares. No entanto, ao comparar os resultados do modelo 3, houve uma redução de aproximadamente 11,4% com relação ao modelo 1, devido à contribuição da rigidez à flexão das lajes.

6.1.4.2 Reações de apoio

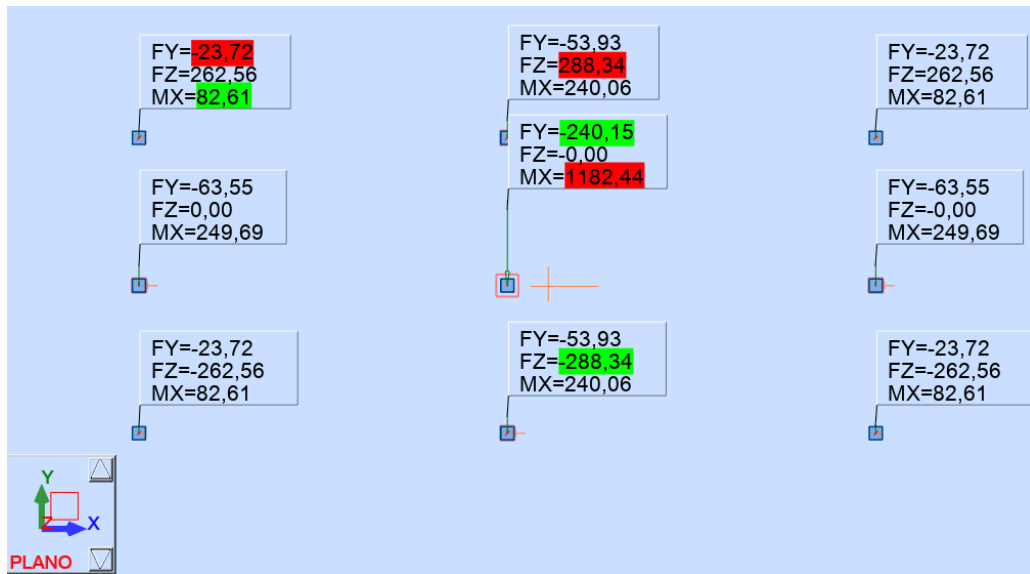
Foram extraídos dos Modelos 1, 2 e 3 as reações de apoio na fundação devido às ações horizontais, assim como nos resultados relativos aos deslocamentos, os valores das reações são mostrados separadamente para cada modelo e cada caso de carregamento, V_x (Caso 1) e V_y (Caso 2), conforme as Tabelas 5 e 6 e Figuras 13 a 18. As reações estão de acordo com o sistema de eixos global do canto inferior esquerdo de cada figura e as unidades são kN e kN.m.

Figura 13 – Modelo 1: Reações de apoio Caso 1



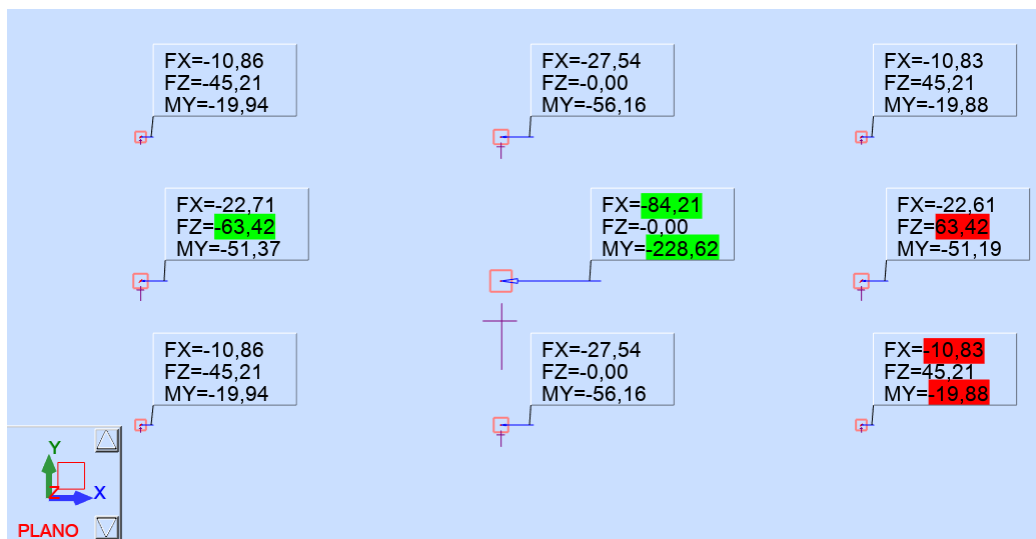
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 14 - Modelo 1: Reações de apoio Caso 2



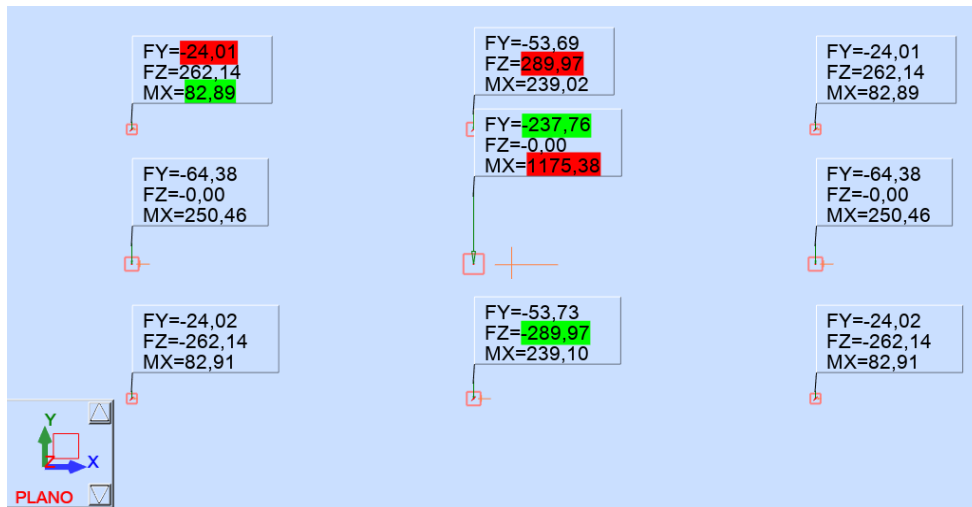
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 15 - Modelo 2: Reações de apoio Caso 1



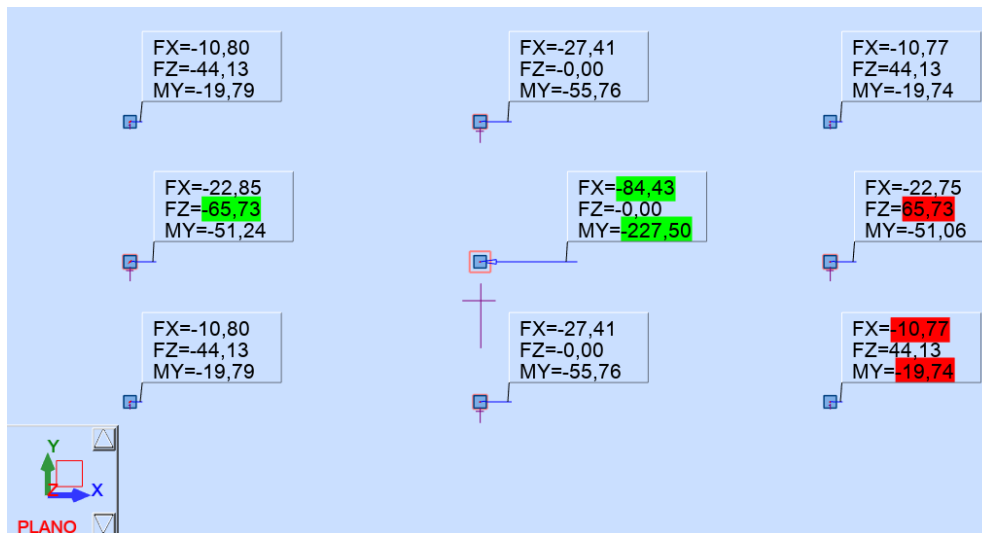
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 16 - Modelo 2: Reações de apoio Caso 2



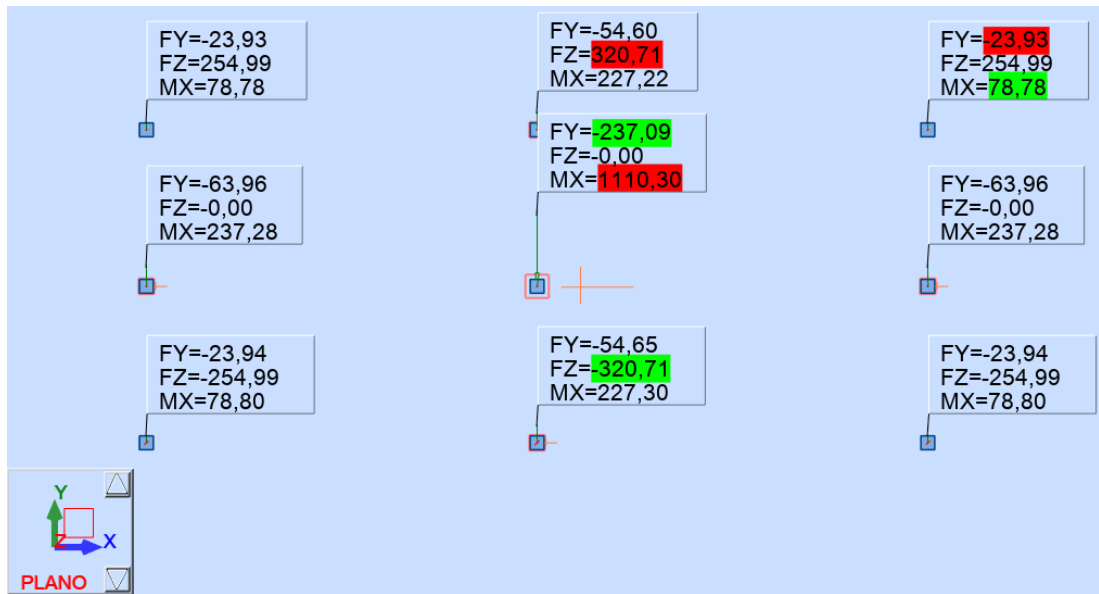
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 17 - Modelo 3: Reações de apoio Caso 1



Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 18 - Modelo 3: Reações de apoio Caso 2



Fonte: Autoria Própria (2021)

Tabela 5 - Reações de apoio para o Caso 1

Pilar	Caso	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
		Fx (kN)	Fx (kN)	Fx (kN)
P1	1	-10,80	-10,86	-10,80
P2	1	-27,47	-27,54	-27,41
P3	1	-10,80	-10,83	-10,77
P4	1	-22,59	-22,71	-22,85
P5	1	-84,66	-84,21	-84,43
P6	1	-22,59	-22,61	-22,75
P7	1	-10,80	-10,86	-10,80
P8	1	-27,47	-27,54	-27,41
P9	1	-10,80	-10,83	-10,77

Fonte: Autoria Própria (2021)

Tabela 6 - Reações de apoio para o Caso 2

Pilar	Caso	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
		Fy (kN)	Fy (kN)	Fy (kN)
P1	2	-23,72	-24,01	-23,93
P2	2	-53,93	-53,69	-54,60
P3	2	-23,72	-24,01	-23,93
P4	2	-63,55	-64,38	-63,96
P5	2	-240,15	-237,76	-237,09
P6	2	-63,55	-64,38	-63,96
P7	2	-23,72	-24,02	-23,94
P8	2	-53,93	-53,73	-54,65
P9	2	-23,72	-24,02	-23,94

Fonte: Autoria Própria (2021)

Assim como no caso dos deslocamentos, para a direção X, as diferenças nas reações são desprezíveis, com diferenças inferiores à 1%, devido à pequena rigidez relativa da laje comparada à rigidez da estrutura de contraventamento formada pelos pilares e vigas. Para a direção Y, em que a rigidez relativa da laje é um pouco maior, houve uma pequena diferença nas reações, ocorrendo um aumento nos painéis mais rígidos (painel central) e um alívio nos painéis menos rígidos (laterais), mas ainda assim as diferenças são inferiores à 1,3%, não podendo colocar em risco a estabilidade da estrutura.

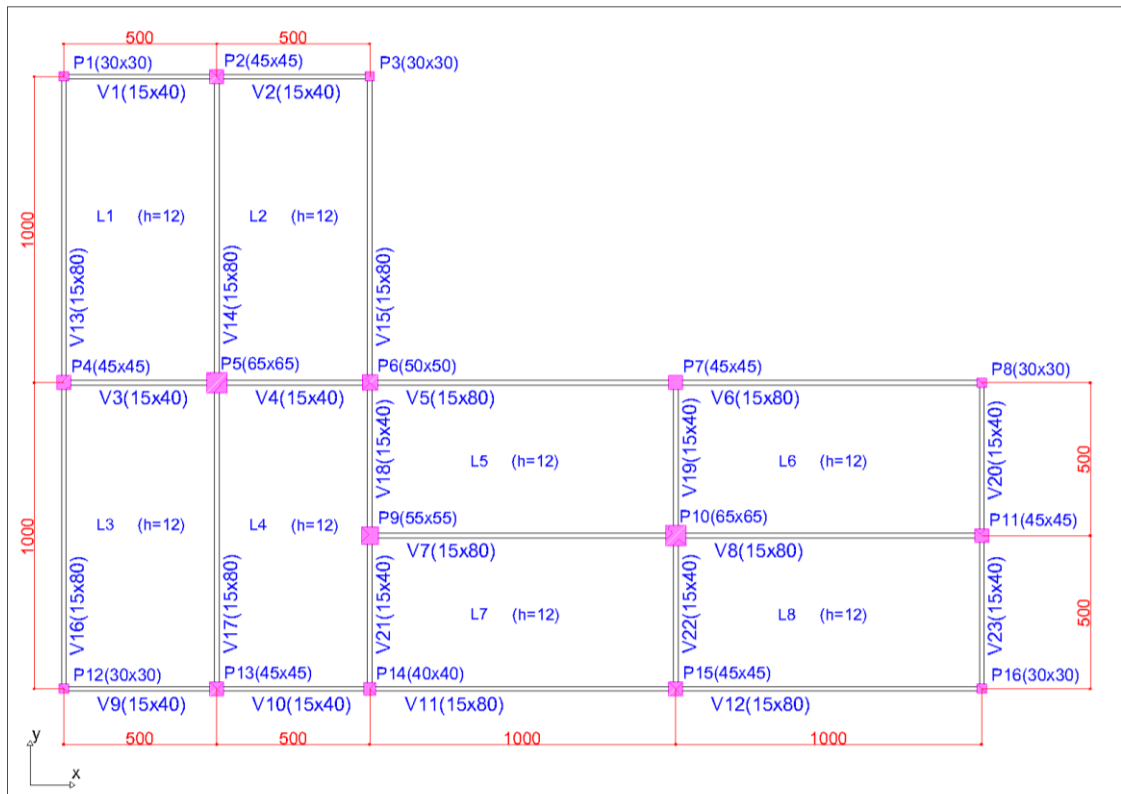
Fica evidente assim como no caso da análise dos deslocamentos que os modelos 1 e 2 são muito próximos em termos de comportamento, o que evidencia que para este exemplo a consideração da laje na modelagem através da imposição de um diafragma rígido é perfeitamente razoável.

6.2 Exemplo 2

Trata-se de um edifício de planta em formato de L, com 10 pavimentos, com pé direito de 3 metros para cada pavimento, compostos por pórticos e lajes em concreto armado. Para todos os elementos estruturais foi considerado o concreto de $f_{ck} = 25$ Mpa, com módulo de elasticidade representativo de 31.878 MPa (calculado em função do módulo de elasticidade secante e o módulo de elasticidade tangencial, considerando o $\alpha_E = 1,2$, conforme explanado em 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3) e coeficiente de

Poisson $\nu = 0,2$. As seções transversais dos pilares e vigas e as espessuras das lajes foram considerados pelo pré-dimensionamento dos elementos, conforme a Figura 19, onde as medidas estão em centímetros.

Figura 19 - Planta Baixa do Exemplo 2



Fonte: Autoria Própria (2021)

Para determinar as ações horizontais do vento, foi considerada uma pressão constante de $1,00\text{kN/m}^2$ atuando perpendicularmente a cada uma das fachadas, os resultados encontrados foram apresentados nas Tabelas 5 e 6 pela seguinte equação:

$$F_v = P \times A_f$$

Onde:

F_v é a Força horizontal do vento;

P é a pressão constante de $1,00\text{kN/m}^2$;

A_f é a área da fachada na qual a pressão está atuando.

Tabela 7 - Determinação da força do vento V_x

Pavimento	Pressão (kN/m ²)	A_f (m ²)	F_v (kN)	F_v distribuída (kN/m)
1 ao 9	1,00	60	60	3
10	1,00	30	30	1,5

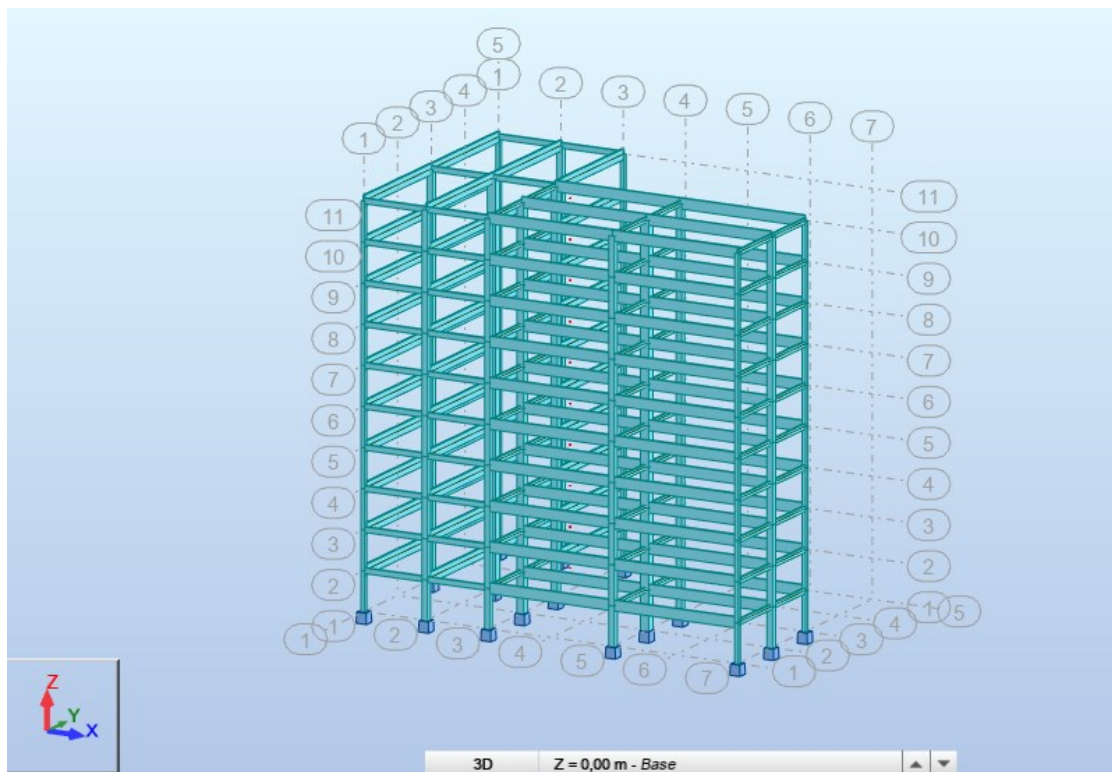
Fonte: Autoria Própria (2021)

Tabela 8 - Determinação da força do vento V_y

Pavimento	Pressão (kN/m ²)	A_f (m ²)	F_v (kN)	F_v distribuída (kN/m)
1 ao 9	1,00	90	90	3
10	1,00	45	45	1,5

Fonte: Autoria Própria (2021)

As reduções de inércia, vinculação, aplicação das forças horizontais e modelos seguem as mesmas diretrizes apresentadas no Exemplo 1. Na Figura 20, é mostrada uma isométrica da estrutura com seus respectivos eixos globais no canto inferior esquerdo.

Figura 20 - Isométrica do Exemplo 2

Fonte: Autoria Própria (2021)

6.2.1 Análise e resultados

6.2.1.1 Deslocamentos horizontais

Foram extraídos dos Modelos 1, 2 e 3 os deslocamentos nos eixos x (U_x) e y (U_y) do pilar P16, em cada pavimento, devido às ações horizontais dos ventos V_x (Caso 1) e V_y (Caso 2), conforme as Tabela 7 e 8 e Figuras 21 a 26.

Tabela 9 - Deslocamentos nas direções x e y para o Caso 1 (Pilar P16)

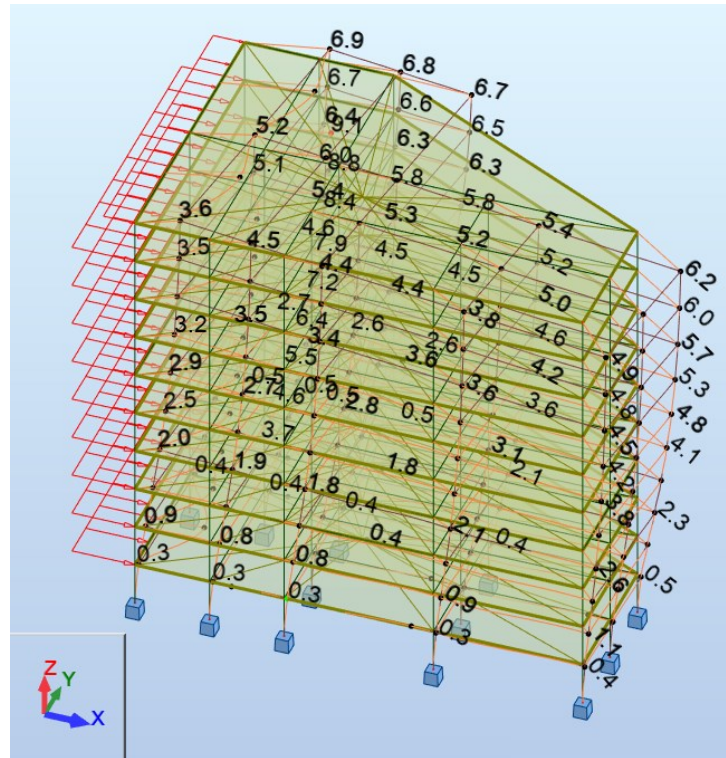
Pavimento	Caso	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
		U_x (cm)	U_y (cm)	U_x (cm)	U_y (cm)	U_x (cm)	U_y (cm)
1	1	0,3	-0,2	0,3	-0,2	0,3	-0,2
2	1	0,8	-0,7	0,8	-0,7	0,8	-0,7
3	1	1,3	-1,3	1,3	-1,3	1,3	-1,2
4	1	1,8	-1,9	1,8	-1,8	1,8	-1,7
5	1	2,2	-2,3	2,2	-2,3	2,2	-2,2
6	1	2,6	-2,8	2,6	-2,7	2,5	-2,6
7	1	2,9	-3,1	2,9	-3,1	2,8	-2,9
8	1	3,1	-3,3	3,1	-3,3	3	-3,1
9	1	3,2	-3,5	3,2	-3,5	3,1	-3,2
10	1	3,3	-3,6	3,3	-3,6	3,2	-3,3

Fonte: Autoria Própria (2021)

Tabela 10 - Deslocamentos nas direções x e y para o Caso 2 (Pilar P16)

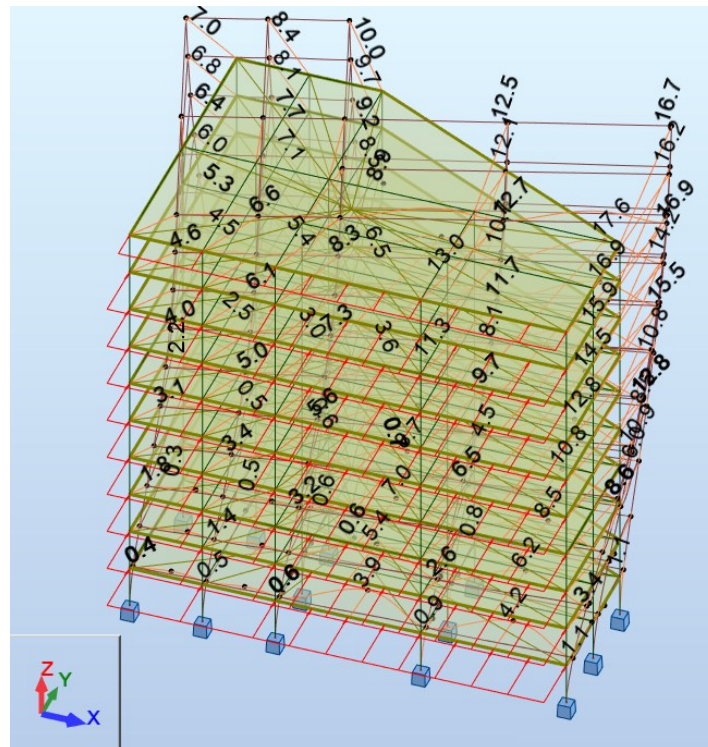
Pavimento	Caso	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
		U_x (cm)	U_y (cm)	U_x (cm)	U_y (cm)	U_x (cm)	U_y (cm)
1	2	0,2	1,1	0,2	1,1	0,2	1,1
2	2	0,5	3,4	0,5	3,4	0,5	3,2
3	2	1	6	1	6	0,9	5,6
4	2	1,4	8,5	1,4	8,5	1,3	8
5	2	1,7	10,8	1,7	10,7	1,6	10,1
6	2	2	12,7	2	12,6	1,9	11,8
7	2	2,3	14,2	2,3	14,1	2,1	13,2
8	2	2,5	15,3	2,5	15,3	2,3	14,3
9	2	2,6	16,1	2,6	16,1	2,4	15
10	2	2,7	16,7	2,7	16,6	2,5	15,5

Figura 21 - Modelo 1: Deslocamentos Caso 1



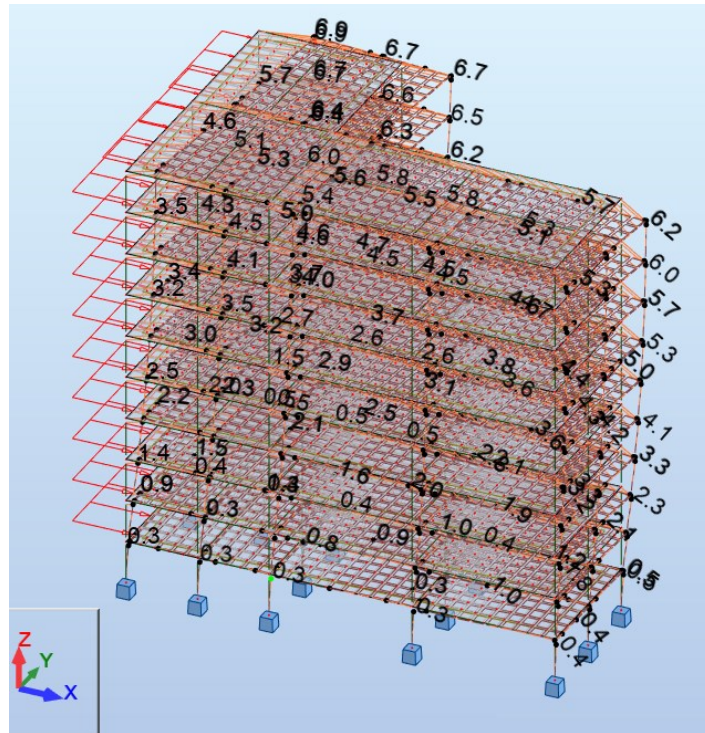
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 22 - Modelo 1: Deslocamentos Caso 2



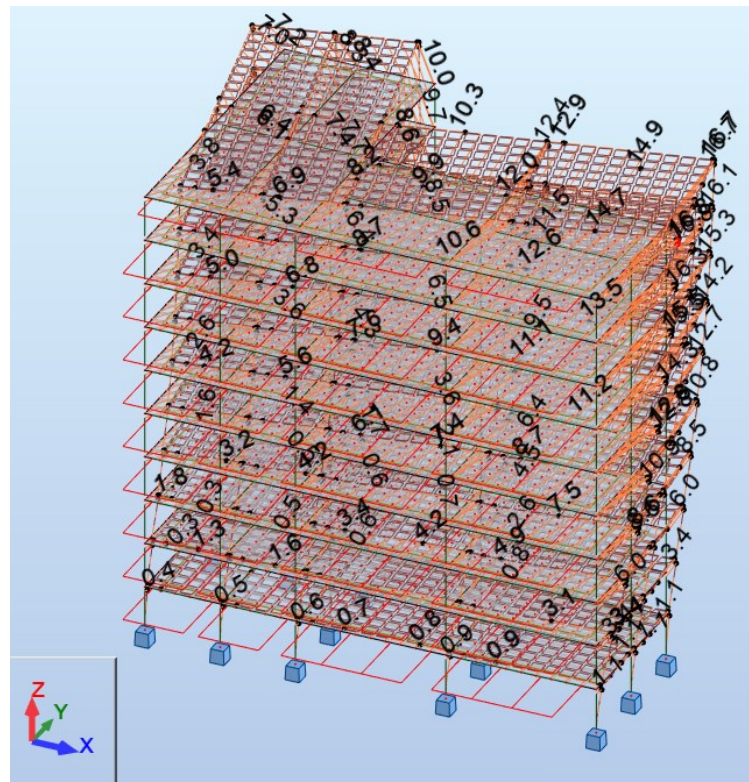
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 23 - Modelo 2: Deslocamentos Caso 1



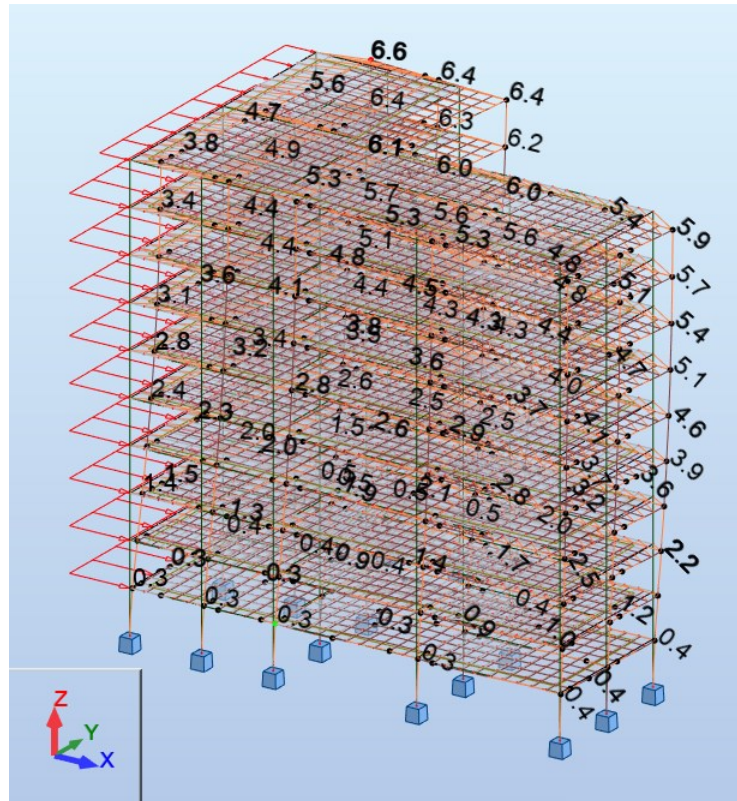
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 24 - Modelo 2: Deslocamentos Caso 2



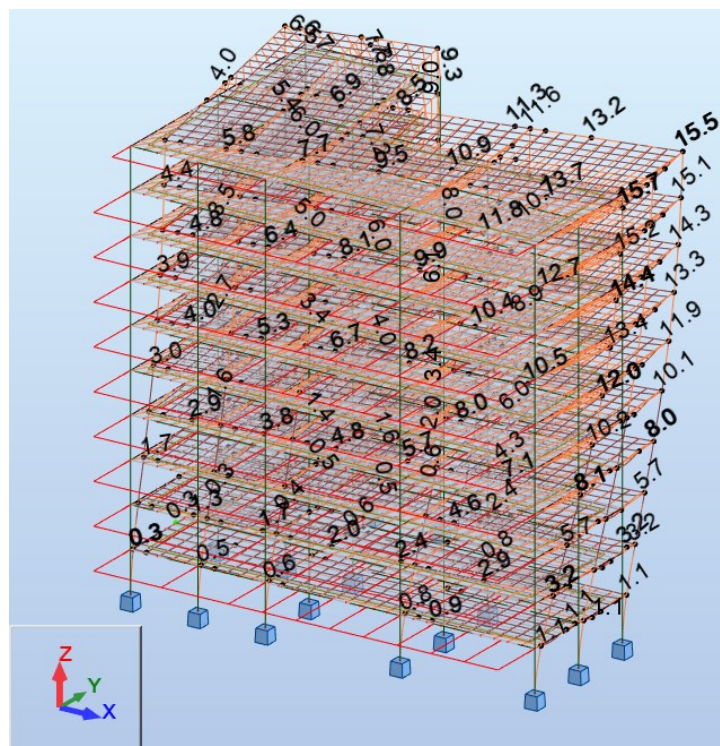
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 25 - Modelo 3: Deslocamentos Caso 1



Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 26 - Modelo 3: Deslocamentos Caso 2



Fonte: Autoria Própria (2021)

Comparando os resultados dos deslocamentos na direção x, vimos que os valores foram similares entre os modelos 1 e 2. Já ao comparar os resultados do modelo 3, encontramos uma redução de aproximadamente 3% no Caso 1 (Vento Vx) e de aproximadamente 7% no Caso 2 (Vento Vy), com relação ao modelo 1.

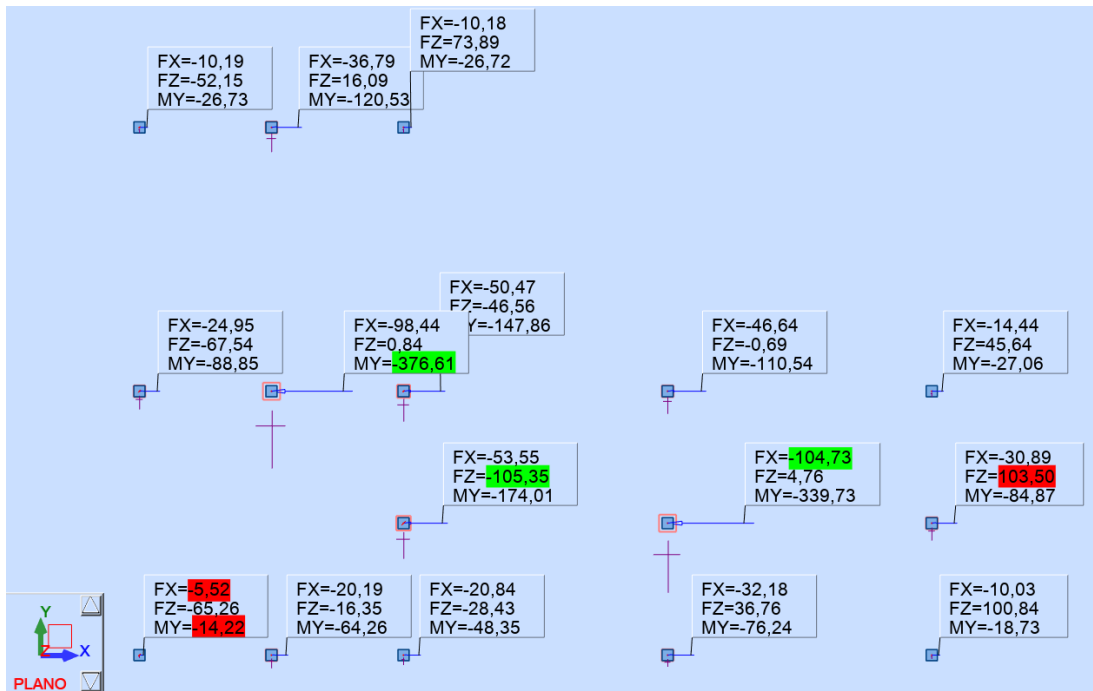
Fazendo uma análise dos resultados dos deslocamentos na direção y, verificamos que, entre os modelos 1 e 2, os valores também foram similares. No entanto, ao comparar os resultados do modelo 3, houve uma redução de aproximadamente 8% no Caso 1 (Vento Vx) e de aproximadamente 7% no Caso 2 (Vento Vy), com relação ao modelo 1. Assim como primeiro exemplo, a influência das lajes nos deslocamentos está relacionada à sua rigidez relativa à rigidez dos painéis de contraventamento.

Repetindo a tendência apresentada no exemplo 1, fica evidente também que a diferença entre os modelos 1 e 2 é muito pequena, evidenciando que a consideração da laje como um diafragma é razoável para esse exemplo que tem uma planta em formato de L.

6.2.1.2 Reações de apoio

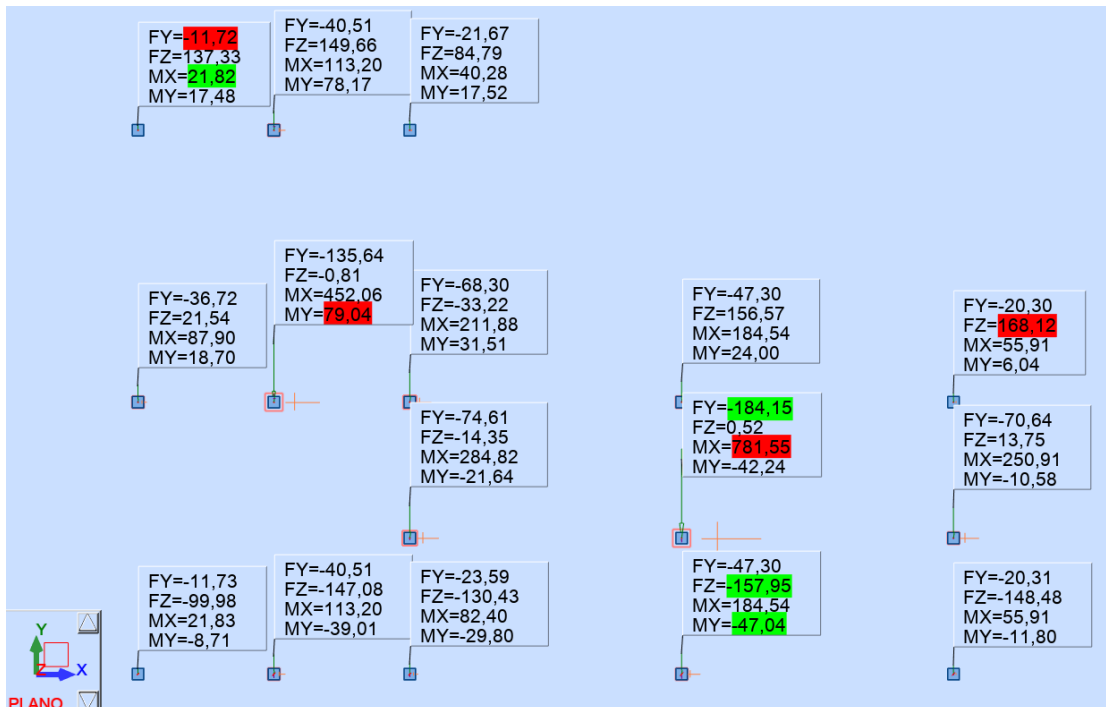
Foram extraídos dos Modelos 1, 2 e 3 as reações de apoio na fundação devido às ações horizontais, assim como nos resultados relativos aos deslocamentos, os valores das reações são mostrados separadamente para cada modelo e cada caso de carregamento, Vx (Caso 1) e Vy (Caso 2), conforme as Tabelas 11 e 12 e Figuras 27 a 32. As reações estão de acordo com o sistema de eixos global do canto inferior esquerdo de cada figura e as unidades são kN e kN.m.

Figura 27 - Modelo 1: Reações de apoio Caso 1



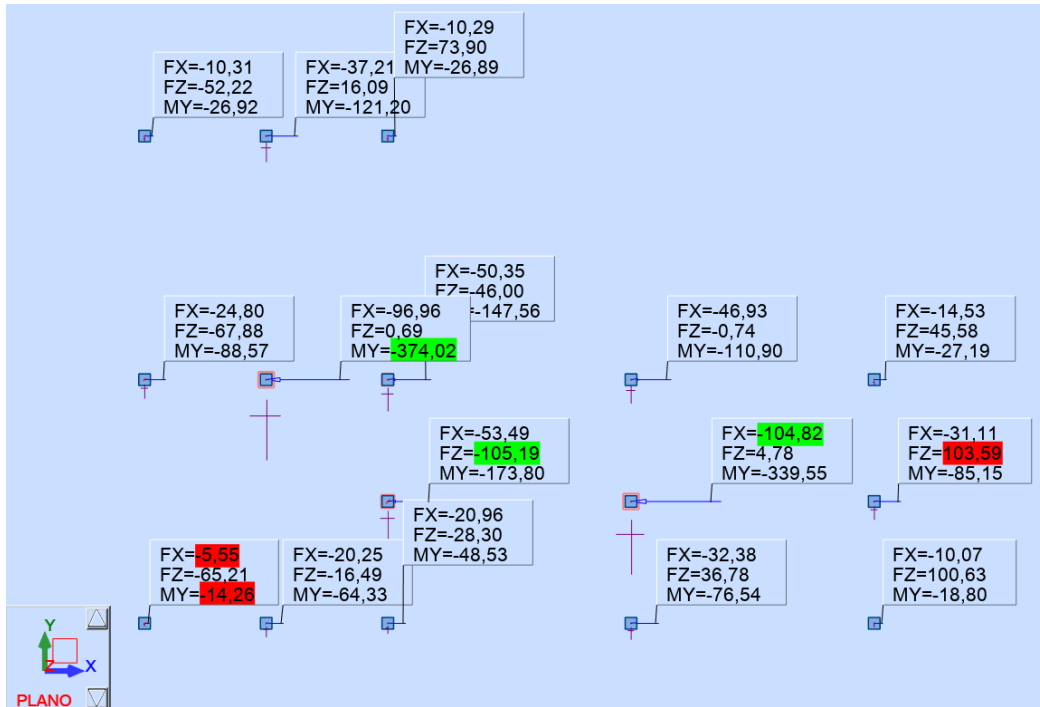
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 28 - Modelo 1: Reações de apoio Caso 2



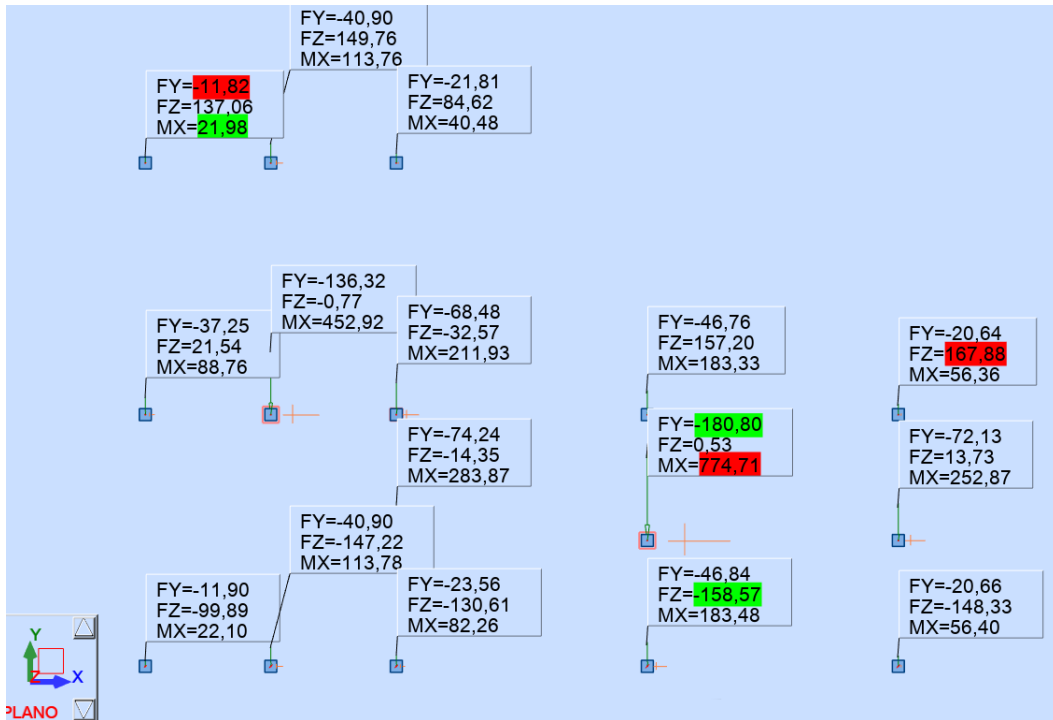
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 29 - Modelo 2: Reações de apoio Caso 1



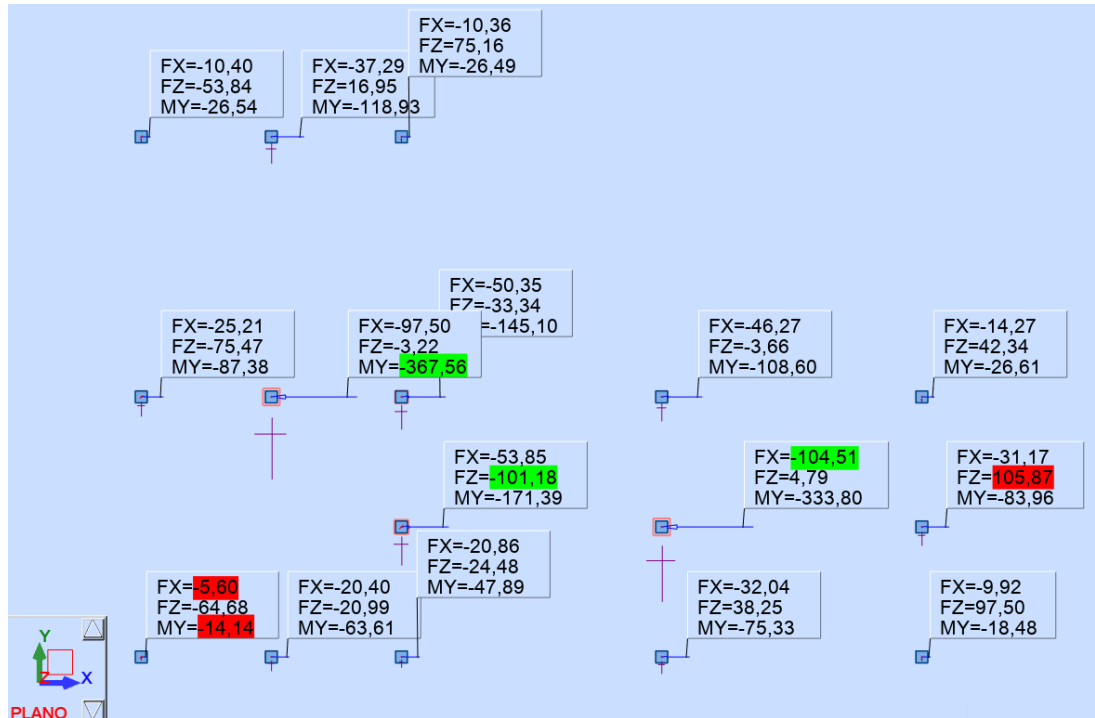
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 30 - Modelo 2: Reações de apoio Caso 2



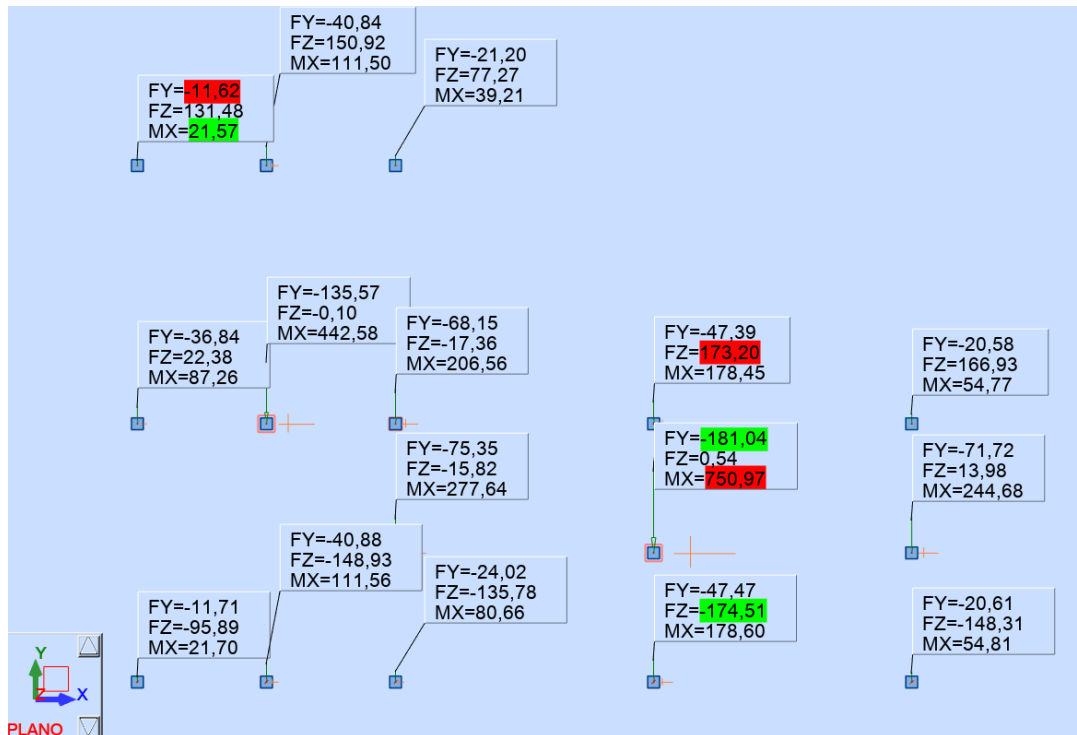
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 31 - Modelo 3: Reações de apoio Caso 1



Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 32 - Modelo 3: Reações de apoio Caso 2



Fonte: Autoria Própria (2021)

Tabela 11 - Reações de apoio para o Caso 1

Pilar	Caso	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
		Fx (kN)	Fx (kN)	Fx (kN)
P1	1	-10,19	-10,31	-10,40
P2	1	-36,79	-37,21	-37,29
P3	1	-10,18	-10,29	-10,36
P4	1	-24,95	-24,80	-25,21
P5	1	-98,44	-96,96	-97,50
P6	1	-50,47	-50,35	-50,35
P7	1	-46,64	-46,93	-46,27
P8	1	-14,44	-14,53	-14,27
P9	1	-53,55	-53,49	-53,85
P10	1	-104,73	-104,82	-104,51
P11	1	-30,89	-31,11	-31,17
P12	1	-5,52	-5,55	-5,60
P13	1	-20,19	-20,25	-20,40
P14	1	-20,84	-20,96	-20,86
P15	1	-32,18	-32,38	-32,04
P16	1	-10,03	-10,07	-9,92

Fonte: Autoria Própria (2021)

Tabela 12 - Reações de apoio para o Caso 2

Pilar	Caso	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
		Fy (kN)	Fy (kN)	Fy (kN)
P1	2	-11,72	-11,82	-11,62
P2	2	-40,51	-40,90	-40,84
P3	2	-21,67	-21,81	-21,20
P4	2	-36,72	-37,25	-36,84
P5	2	-135,64	-136,32	-135,57
P6	2	-68,30	-68,48	-68,15
P7	2	-47,30	-46,76	-47,39
P8	2	-20,30	-20,64	-20,58
P9	2	-74,61	-74,24	-75,35
P10	2	-184,15	-180,80	-181,04
P11	2	-70,64	-72,13	-71,72
P12	2	-11,73	-11,90	-11,71
P13	2	-40,51	-40,90	-40,88
P14	2	-23,59	-23,56	-24,02
P15	2	-47,30	-46,84	-47,47
P16	2	-20,31	-20,66	-20,61

Fonte: Autoria Própria (2021)

Assim como no primeiro exemplo, as diferenças nas reações quando comparados os modelos 1 e 2 são desprezíveis, não ultrapassando 2%, o que também foi evidenciado quando comparados os deslocamentos, assim do ponto de vista das reações, a consideração da hipótese de que a laje possa ser considerado um diafragma é válida. As diferenças entre os modelos 1 ou 2 e o modelo 3 é menos evidente, pois as diferenças são menores, mas a tendência de que os painéis mais rígidos tenham um incremento nas reações é mantida.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou a influência da modelagem da laje para dois exemplos distintos, o primeiro com uma planta retangular e o segundo com uma planta em formato de L, foram analisados os deslocamentos e reações de apoio em função dos três modelos propostos para a modelagem das lajes maciças.

Pode-se verificar que para os dois exemplos estudados, os modelos 1 e 2 apresentaram resultados com diferenças desprezíveis, inferiores a 2%, o que confirma que para as geometrias estudadas no presente trabalho, a consideração de que a laje seja um diafragma indeformável em seu plano é válida, o que vai ao encontro com as prescrições da ABNT NBR6118:2014, além da bibliografia consultada.

Para os deslocamentos, a consideração da rigidez a flexão das lajes (modelo 3) levou a uma diminuição dos deslocamentos horizontais, que variou de 7 a 11,4%, para as situações de painéis de contraventamento menos rígidos. Para as situações onde os painéis são mais rígidos, a contribuição da rigidez à flexão das lajes para a diminuição dos deslocamentos horizontais foi menor, resultando numa variação de 3 a 7%.

Para as reações de apoio, pode-se perceber um comportamento que acompanha o observado para os deslocamentos, onde a influência da rigidez à flexão das lajes está relacionada à rigidez dos painéis de contraventamento, esta influência foi maior nas situações de painéis menos rígidos.

Como sugestão a trabalhos futuros ficam ao menos dois pontos a serem explorados:

- 1 – Avaliação dos esforços nas vigas em função das considerações quanto à modelagem das lajes;
- 2 – Avaliação das forças normais e momentos fletores nas lajes devido às ações horizontais em função das considerações da modelagem das lajes.

REFERÊNCIAS

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

BASTOS, Paulo S. S. **Lajes de concreto**. 119f. Notas de Aula da disciplina Estruturas de Concreto I – Universidade do Estado de São Paulo, Bauru, 2015.

BEZERRA, Dermival P. **Análise de estruturas tridimensionais de edifícios altos considerando a rigidez transversal à flexão das lajes**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

BOTTURA, H. M. **Estudo sobre o efeito da deformabilidade das lajes na distribuição dos esforços horizontais nos painéis de contraventamento**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

GOULART, Mauricio dos S. S. G. **Contribuição da rigidez à flexão das lajes para a estabilidade global de edifícios**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARTINS, Carlos H. **Análise não linear de estruturas tridimensionais de edifícios de andares múltiplos com núcleos resistentes, considerando a rigidez transversal à flexão das lajes**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

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

SHIGUEMITSU, Y. **Análise do efeito do vento em estruturas de edifícios com lajes deformáveis**. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.