

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

HENRIQUE AFONSO GARCIA BUZO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DIAFRAGMA RÍGIDO DE LAJES
MACIÇAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2017

HENRIQUE AFONSO GARCIA BUZO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DIAFRAGMA RÍGIDO DE LAJES MACIÇAS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Me. Angelo Giovanni Bonfim Corelhano

CAMPO MOURÃO

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DIAFRAGMA RÍGIDO DE LAJES MACIÇAS

por

Henrique Afonso Garcia Buzo

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19h30min do dia 21 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof.Msc. Douglas Fukunaga Surco

(UTFPR)

Prof. Tiago Tadeu Amaral De Oliveira

(UTFPR)

**Prof. Msc. Angelo Giovanni Bonfim
Corelhano**

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho ao meu Deus,
e ao meu pai, Marco, por ter sido
o maior exemplo de vida para mim.

AGRADECIMENTOS

Estes poucos parágrafos não serão capazes de demonstrar toda minha gratidão por todas as pessoas que estiveram ao meu lado nesta fase tão importante da minha vida.

Agradeço a Deus por ser meu porto seguro, e nunca ter me deixado perder a esperança e a força de vontade.

Agradeço à minha família que sempre ficou ao meu lado, e peço desculpas por todo o tempo que fiquei sem visitá-los.

Agradeço ao Prof. Msc. Angelo Giovanni Bonfim Corelhano por toda a sabedoria e paciência ao me orientar.

Agradeço a todos os meus amigos, companheiros desta caminhada tão marcante para mim.

RESUMO

BUZO, Henrique Afonso Garcia. **Estudo do comportamento de diafragma rígido de lajes maciças**, 2017. 52f. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.

Esta pesquisa apresenta um estudo do comportamento de diafragma rígido em lajes maciças, por meio de análises comparativas entre dois modelos. Os resultados foram obtidos através do software Autodesk *Robot Structural Analysis*, o qual proporcionou uma análise estrutural dos modelos. O objetivo era investigar nos exemplos de estruturas estudados, as diferenças no comportamento estrutural entre a modelagem considerando que a laje seja infinitamente rígida em seu plano e considerando sua rigidez axial através de elementos de casca. Os exemplos aplicados tiveram como base os trabalhos de Heitor Bottura(1991) e Shiguemitsu Yoshida(1989). Como resultados finais, se afirmou se nos exemplos apresentados adotar a hipótese de diafragma rígido é válido ou não.

Palavras-Chave: diafragma rígido, lajes, análise comparativa.

ABSTRACT

BUZO, Henrique Afonso Garcia. **Study of the rigid diaphragm behavior of massive slabs**, 2017. 52p. Monograph of Course Completion (Graduation) – Civil Engineering, Federal Technological of Paraná, Campo Mourão, 2017.

This research presents a study of the rigid diaphragm behavior in massive slabs, through comparative analysis between two models. The results were obtained through the software *Autodesk Robot Structural Analysis*, which one provided a structural analysis of the models. The objective was to investigate in the examples of structures analyzed, the differences in the structural behavior between the modeling considering that the slab is infinitely rigid in its plane and considering its axial rigidity through bark elements. The examples used here were based on the articles of Heitor Bottura(1991) and Shiguemitsu Yoshida(1989). As final results, It has affirmed if in the examples analyzed the rigid diaphragm hypothesis is valid.

Keywords: rigid diaphragm, slabs, comparative analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PAINÉL PAREDE	20
FIGURA 2- PAINÉL PÓRTICO	21
FIGURA 3- PLANTA BAIXA DA ESTRUTURA DO PRIMEIRO EXEMPLO.....	25
FIGURA 4 – ELEVAÇÃO DA ESTRUTURA DO PRIMEIRO EXEMPLO.	26
FIGURA 5- PILAR ESCOLHIDO COMO BASE PARA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	26
FIGURA 6- LOCAÇÃO DA ABERTURA NAS LAJES.	27
FIGURA 7- PLANTA BAIXA DA ESTRUTURA DO SEGUNDO EXEMPLO.	27
FIGURA 8- ELEVAÇÃO DA ESTRUTURA DO SEGUNDO EXEMPLO.	28
FIGURA 9- PILAR ESCOLHIDO COMO BASE PARA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	28
FIGURA 10- LOCAÇÃO DA ABERTURA NAS LAJES.	28
FIGURA 11- PLANTA BAIXA DA ESTRUTURA DO TERCEIRO EXEMPLO.....	29
FIGURA 12- ELEVAÇÃO DA ESTRUTURA DO TERCEIRO EXEMPLO.	29
FIGURA 13- PILAR ESCOLHIDO COMO BASE PARA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	30
FIGURA 14- PLANTA BAIXA DO QUARTO EXEMPLO.	30
FIGURA 15- PILAR ESCOLHIDO COMO BASE PARA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	31
FIGURA 16- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	32
FIGURA 17- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	33
FIGURA 18- PLANTA BAIXA.....	33
FIGURA 19- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	34
FIGURA 20- PLANTA BAIXA.....	34
FIGURA 21- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	35
FIGURA 22- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	36
FIGURA 23- DEMONSTRAÇÃO DA DIFERENÇA DE DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS COM ESTRUTURA NÃO	37
FIGURA 24- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	38
FIGURA 25- DEMONSTRAÇÃO DA DIFERENÇA DE DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS COM ESTRUTURA NÃO SIMÉTRICA.....	38
FIGURA 26- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	40
FIGURA 27- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	41
FIGURA 28- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	42
FIGURA 29- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	43
FIGURA 30- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	44
FIGURA 31- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS	45
FIGURA 32- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS MÁXIMOS E MÍNIMOS.....	45
FIGURA 33- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	47
FIGURA 34- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	48
FIGURA 35- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	49
FIGURA 36- DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DO PRIMEIRO EXEMPLO	39
TABELA 2 - REAÇÃO HORIZONTAL DO PILAR DO PRIMEIRO EXEMPLO	39
TABELA 3 - DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DO SEGUNDO EXEMPLO	46
TABELA 4 - REAÇÃO HORIZONTAL DO PILAR DO SEGUNDO EXEMPLO	46
TABELA 5 - DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DO TERCEIRO EXEMPLO	48
TABELA 6 - REAÇÃO HORIZONTAL DO PILAR DO TERCEIRO EXEMPLO	49
TABELA 7 - DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DO QUARTO EXEMPLO	50
TABELA 8 - REAÇÃO HORIZONTAL DO PILAR DO QUARTO EXEMPLO	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivos Gerais.....	15
2.2	Objetivos Específicos.....	15
3	JUSTIFICATIVA.....	16
4	METODOLOGIA.....	18
5	REFERENCIAL TEÓRICO_.....	19
5.1	Concreto.....	19
5.1.1	Módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}).....	19
5.1.2	Módulo de elasticidade secante (E_{cs}).....	19
5.1.3	Módulo de elasticidade representativo (E_c).....	19
5.2	Estruturas de contraventamento	20
5.2.1	Painel parede.....	20
5.2.2	Painel Pórtico.....	21
5.2.3	Painel Laje.....	21
5.3	Lajes.....	22
5.3.1	Lajes maciças.....	22
5.3.2	Lajes nervuradas	23
5.4	Diafragmas rígidos	23
6	EXEMPLOS.....	25
6.1	Primeiro Exemplo.....	25
6.2	Segundo Exemplo.....	27
6.3	Terceiro exemplo	29
6.4	Quarto exemplo.....	30
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
7.1	Primeiro exemplo	32
7.1.1	Modelagem considerando a laje como diafragma rígido	32

7.1.2	Modelagem considerando a laje como uma casca de concreto armado. ..	33
7.1.3	Modelagem considerando a laje como casca de concreto armado e com abertura de 2x5m em todas as lajes do lado direito.....	33
7.1.4	Modelagem considerando a laje como diafragma rígido e com abertura de 2x5m em todas as lajes do lado direito.	34
7.1.5	Modelagem aumentando a seção dos pilares do terceiro pórtico, visto em planta, para 100x25cm, adotando a laje como diafragma rígido.....	36
7.1.6	Modelagem aumentando a rigidez do terceiro pórtico, visto em planta, para 100x25cm, adotando a laje como casca de concreto armado.	38
7.1.7	Comparação de resultados.....	39
7.1.8	Discussão	39
7.2	Segundo exemplo	40
7.2.1	Modelagem considerando a laje como diafragma rígido	40
7.2.2	Modelagem adotando a laje como casca de concreto armado.....	41
7.2.3	Modelagem adotando a laje como diafragma rígido e colocando aberturas de 2x5m em todas as lajes do lado direito.	42
7.2.4	Modelagem adotando a laje como casca de concreto armado e colocando aberturas de 2x5m em todas as lajes do lado direito.	43
7.2.5	Modelagem aumentando a rigidez do terceiro pilar-parede para 400x30cm, adotando a laje como diafragma rígido.	44
7.2.6	Modelagem aumentando a rigidez do terceiro pilar-parede para 400x30cm, adotando a laje como casca de concreto armado.....	45
7.2.7	Comparação de resultados.....	46
7.2.8	Discussão	46
7.3	Terceiro exemplo	47
7.3.1	Modelagem considerando a laje como diafragma rígido.	47
7.3.2	Modelagem adotando a laje como casca de concreto armado.....	48
7.3.3	Comparação de resultados.....	48
7.3.4	Discussão	49
7.4	Quarto exemplo.....	49
7.4.1	Modelagem considerando a laje como diafragma rígido	49

7.4.2	Modelagem considerando a laje como casca de concreto armado	50
7.4.3	Comparação de resultados.....	50
7.4.4	Discussão	51
8	CONCLUSÃO.....	52
9	BIBLIOGRAFIA.....	53

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, vivemos em uma sociedade capitalista, onde as palavras eficiência e eficácia são usadas em grandes escalas em projetos econômicos. Na construção civil não é diferente, com a evolução tecnológica que se intensifica cada dia mais, é tarefa dos engenheiros buscar sempre projetos eficientes, nos quais se preze a otimização de materiais e mão de obra.

Evolução tecnológica a qual proporciona ao ramo da engenharia civil edifícios de multipavimentos com alturas cada vez maiores. Prática muito presente nos grandes centros urbanos, locais onde não existem mais espaço em abundância para se construir. Sendo assim, a exigência sobre os projetos não se demanda somente sobre a viabilidade econômica, e sim também sobre a viabilidade física do mesmo. Assim, um assunto que tem grande importância para que o engenheiro no momento de elaborar seu projeto consiga alcançar esses parâmetros que o mercado tanto exige, são os efeitos que as ações horizontais, como o vento, por exemplo, provocam nas estruturas.

Nesse ambiente, o estudo do comportamento das lajes sobre esses efeitos é imprescindível, pela sua importância na distribuição das ações horizontais aos painéis de contraventamento. Comportamento o qual pode ser considerado a hipótese de diafragma rígido, ou não.

Segundo a atual norma de concreto armado brasileira:

“A laje de um pavimento pode ser considerada como uma chapa totalmente rígida em seu plano, desde que não apresente grandes aberturas e cujo lado maior do retângulo circunscrito ao pavimento em planta não supere em três vezes o lado menor”(ABNT NBR 6118:2014).

Em situações diferentes das acima citadas existem ainda algumas dúvidas sobre a hipótese de indeformabilidade do pavimento no seu plano.

Nos edifícios de multipavimentos com plantas irregulares (em formas aproximadas a L, T, U) ou que tenham grandes aberturas, ou que possuam sistemas diferentes de contraventamento, como pórticos e pilares-parede na mesma estrutura, a hipótese de diafragma rígido deve ser revista, necessitando de análises um pouco mais cuidadosas no comportamento das lajes na distribuição das ações entre os vários painéis de contraventamento.

Os resultados para possibilitar as análises serão retirados do software Autodesk Robot Structural Analysis, o qual possibilita uma análise 3D dos efeitos que as ações horizontais provocam.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de lajes de edifícios de multipavimentos com geometrias variadas, sob efeitos de ações horizontais com a intenção de considerar ou não a hipótese do diafragma rígido.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento de lajes de edifícios com sistemas de contraventamento diferentes, ou com plantas não retangulares, ou com grandes aberturas.
- Determinar, para os casos analisados, em quais arranjos as lajes podem ser consideradas diafragma rígido.

3 JUSTIFICATIVA

Na ABNT NBR 6118:2014, o texto que se tem relacionando lajes com a hipótese do diafragma rígido abrange um número muito limitado sobre os diversos tipos que podem ocorrer, e segundo vários autores, adotar ou não essa hipótese pode gerar grandes diferenças no comportamento da estrutura.

BEZERRA (1995) mostrou que, em uma análise de primeira ordem, quando a laje é acoplada ao sistema de contraventamento, existe uma redução significativa nos deslocamentos horizontais.

MARTINS (2001) evidenciou que a rigidez transversal da laje influencia demasiadamente o comportamento estrutural do edifício:

Verifica-se que até para alguns casos a influência da rigidez transversal da laje chegou a ser tão significativa, que em teoria de 2ª ordem considerando a rigidez transversal da laje, os deslocamentos foram menores do que no modelo em teoria de 1ª ordem sem a consideração da rigidez transversal à flexão das lajes.(MARTINS (2001), p 234)

Entre a escolha do pavimento como diafragma rígido, ou considerar sua rigidez transversal à flexão, observou-se que em alguns dos pontos da estrutura houve inversão entre os esforços obtidos pelos dois modelos, acarretando elemento super-armados ou sub-armados. O resultado disso foi o aparecimento de fissuras na construção. (AVILLA et al.,2012, p. 12)

GOULART (2008) mostrou que a consideração da rigidez à flexão da laje influencia não apenas nos parâmetros de estabilidade global, mas também nos esforços solicitantes em pilares e vigas, acarretando assim grandes variações no dimensionamento destes elementos, quando combinados em Estado Limite Último.

BRISOT (2001) concluiu que deve-se questionar a hipótese do diafragma rígido na maioria dos casos usuais, sendo que existe a diferença de 35% em relação a solução do modelo de diafragma flexível.

GOULART (2008) estudou a contribuição da rigidez da laje à flexão em três edifícios. Dois destes edifícios possuíam sistema estrutural de lajes nervuradas com partes maciças circundando os pilares, e o terceiro apresentava estrutura convencional, com laje maciça e pórticos rígidos formados por vigas e pilares. Nos edifícios com

estruturas não convencionais ficou claro a importância da contribuição da rigidez à flexão das lajes. As estruturas que não tinham essa contribuição apresentaram resultados referentes a estabilidade global e deslocamentos insatisfatórios, quando comparados ao modelo completo. Observou-se também um aumento na eficiência da estrutura quando se foi considerado a rigidez à flexão das lajes.

O engenheiro civil ao começar a elaborar seu projeto estrutural se preocupa bastante com o sistema de contraventamento a ser adotado, e se ele será suficiente para garantir a estabilidade global de sua estrutura. Neste momento, não se deve apenas se preocupar com as ações verticais incidentes em sua estrutura, como cargas de uso e peso próprio, mas também prestar a devida atenção às ações horizontais presentes na mesma. Entre elas, pode-se destacar o vento que tem demasiada influência nos deslocamentos horizontais da estrutura.

Para ajudar nessa estabilidade global, o engenheiro precisa saber se é viável adotar a laje como parte do sistema de contraventamento ou não, ou seja: se ela pode ou não ser considerada diafragma rígido.

GOULART(2008) no começo de seu trabalho evidenciou que atualmente os edifícios estão ficando cada vez mais altos e esbeltos, o que exige do engenheiro uma grande quantidade de não só conhecimento, mas também de certeza ao exercer sua função.

4 METODOLOGIA

A pesquisa foi baseada nos resultados de uma análise feita no software *Autodesk Robot Structural Analysis*. Inicialmente será modelado o primeiro exemplo da dissertação de mestrado de Heitor Bottura (1991) buscando chegar nos mesmos resultados, para poder validar a metodologia de modelagem usada no trabalho. Depois disso, foram modelados os outros exemplos, buscando as variações para poder fazer a análise comparativa.

Os exemplos foram considerados como modelos elasticamente lineares de concreto armado. Os parâmetros e efeitos de segunda ordem não foram considerados neste trabalho, assim como o efeito Poisson.

As ações horizontais tiveram seu valor baseado no trabalho de BOTTURA (1991).

Primeiro, foram analisadas estruturas considerando a laje como diafragma rígido, depois considerando como casca, ou seja, deformável em seu plano. Outras variações foram feitas, são elas:

- Tornar a estrutura de contraventamento assimétrica, através da alteração da seção de alguns pilares;
- Introdução de aberturas significativas nas lajes;

Finalizadas as modelagens, são analisadas as diferenças de deslocamentos e de esforços nos pilares. As reações horizontais foram analisadas no primeiro pavimento, e os deslocamentos no último. Para validar a hipótese de diafragma rígido, usou-se como base o valor de 10% entre as diferenças dos resultados, que é um valor bastante empregado na ABNT NBR 6118:2014. Se a mesma se obteve menor que este valor, é válida a hipótese.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

5.1 Concreto

CARVALHO (2012) caracteriza o concreto por uma mistura de aglomerante, agregados e água, resultando em um material de construção homogêneo. Como o objetivo deste trabalho é analisar os deslocamentos e esforços solicitantes nas estruturas, será dado às propriedades: módulo de elasticidade do concreto, que pode ser dividido em inicial, secante e representativo; coeficiente de Poisson.

5.1.1 Módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci})

É caracterizado pelo valor da tangente no início do diagrama tensão-deformação. Na ausência de ensaios ou dados mais precisos sobre o concreto, a ABNT NBR 6118:2014 permite o uso da equação:

$$E_{ci} = 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

Para f_{ck} (resistência característica de compressão do concreto) entre 20 e 50 MPa,

$$E_{ci} = 21500 \times (f_{ck}/10 + 1,25)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Para f_{ck} entre 55 e 90 Mpa.

5.1.2 Módulo de elasticidade secante (E_{cs})

Empregado principalmente nas análises de serviços da estrutura .A ABNT NBR 6118:2014 permite o uso da equação:

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci} \quad (3)$$

5.1.3 Módulo de elasticidade representativo (E_c)

É a média ponderada entre os outros módulos de elasticidade.A ABNT NBR 6118:2014 permite o uso da equação:

$$E_c = 1,1 \times E_{cs} \quad (4)$$

5.2 Estruturas de contraventamento

Segundo a atual norma de concreto armado brasileira:

Por conveniência de análise, é possível identificar, dentro da estrutura, subestruturas que, devido à sua grande rigidez a ações horizontais, resistem à maior parte dos esforços decorrentes dessas ações. Essas subestruturas são chamadas subestruturas de contraventamento. Os elementos que não participam da subestrutura de contraventamento são chamados elementos contraventados. (ABNT NBR 6118:2014)

SHIGUEMITSU (1989, pg.6) define as estruturas de contraventamento como “uma subestrutura plana, resistente em seu plano às forças horizontais e suposta de rigidez nula na direção transversal”, e complementa que essas estruturas podem ser compostas através da combinação de pilares, pilares paredes e vigas.

5.2.1 Painel parede

SHIGUEMITSU (1989) evidencia que painéis parede são subestruturas de contraventamento que geralmente sofrem os efeitos e deformações das ações de momento fletor, e tem por características ser engastado na base, e em toda sua extensão ter a seção constante sem rigidez transversal. Ainda diz que pela altura dos edifícios, geralmente esbeltos, pode-se desprezar o efeito das ações cortantes na subestrutura.



Figura 1 - Painél parede
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

5.2.2 Painel Pórtico

BOTTURA (1991) diz que painéis pórticos não possuem rigidez transversal assim como sua deformação pode ser caracterizada apenas pelos efeitos das ações cortantes. Os efeitos dos momentos fletores também podem ser ignorados neste tipo de subestrutura de contraventamento.

SHIGUEMITSU (1989) em sua formulação do modelo para calcular os deslocamentos nas estruturas, cita que quando é admitido que os pórticos são regulares, e os pilares e as vigas que fazem parte tiverem seções constantes, quando são solicitados à cargas laterais os momentos nulos se localizam nos centros dos vãos de vigas e pilares, sendo assim, as rotações de todos os nós da viga de um andar sejam iguais.

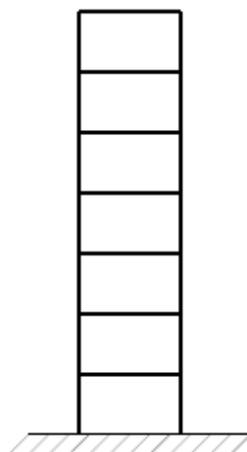


Figura 2- Painel Pórtico
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

5.2.3 Painel Laje

Como o objetivo do presente trabalho é fazer uma análise comparativa entre edifícios modelados com lajes classificadas como diafragmas rígidos, e como deformáveis, será explanado os dois casos, citando como referência o trabalho de SHIGUEMITSU (1989) que tratou as lajes como deformáveis em seu plano, e o de BOTTURA (1991) que tratou tanto da laje deformável, quanto diafragma rígido.

SHIGUEMITSU (1989) em seu trabalho tratou os painéis laje como painéis horizontais planos que não possuem rigidez transversal e que são deformáveis em seu plano, geralmente devido aos efeitos dos momentos fletores. Quando submetidas à ações horizontais, podem ter o comportamento equiparado a vigas, em seu plano, sendo assim, a transmissão das ações para os elementos verticais se aplica somente às horizontais, já que a rigidez transversal das lajes é nula.

5.3 Lajes

Podem-se classificar as lajes como elementos estruturais bidimensionais horizontais e planos com as dimensões de comprimento e largura com valores muito maiores que a terceira, ou seja, da espessura. Tem como principal função receber as ações provenientes do uso da estrutura, como pessoas e mobiliário, que na maioria das vezes são perpendiculares ao seu plano, e as distribuí-las para as vigas nas quais são apoiadas, ou, no caso das lajes lisas, distribuir diretamente para os pilares.

5.3.1 Lajes maciças

São caracterizadas por lajes nas quais se tem concreto em toda sua espessura, contendo armaduras longitudinais em uma ou duas direções além das transversais. Quando as dimensões de largura e comprimento tem relação maior que 2, as lajes contêm armaduras longitudinais em apenas uma direção, do contrário a mesma passa a ser uma malha. Geralmente são apoiadas em vigas ou pilares-parede, ou no caso da laje lisa ou cogumelo, apoiadas diretamente em pilares.

Podem serem construídas em concreto armado ou protendido. Raramente é vista em residências, ou edifícios de pequeno porte, pelo fato de as lajes com material pré-moldado terem vantagens financeiras em relação a maciça.

5.3.2 Lajes nervuradas

A definição para lajes nervuradas segundo a ABNT NBR 6118:2014 é “Lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.” A parte da seção que é tracionada não tem influência na estrutura, ou seja, o que garante a rigidez do elemento são a capa de concreto (mesa) e as nervuras, que se solidarizam e se tornam um elemento só.

Geralmente implantadas em edifícios com lajes de grandes vãos livres, são empregadas quando se encontra grandes vãos ou altas ações verticais. As grandes vantagens deste tipo de laje é a minoração no peso da estrutura, menor consumo de concreto e capacidade de vencer grandes vãos.

Os espaços entre as nervuras podem ser preenchidos por vários materiais, como isopor, bloco cerâmico entre outros. Pode-se optar por não usar nenhum material também, deixando as nervuras aparentes.

5.4 Diafragmas rígidos

Podemos caracterizar diafragmas rígidos de uma estrutura elementos cuja sua rigidez é extremamente maior do que as dos outros, sendo assim, o elemento é infinitamente rígido no seu plano. Isso significa que o pavimento irá funcionar como um elemento infinitamente rígido no seu plano e perfeitamente flexível na direção normal à esse plano.

Com a ausência de quaisquer deformações, o pavimento se comporta como elemento folha, que se resume à compatibilização de seus deslocamentos no seu plano.

Sendo assim, há a expressiva redução do número de graus de liberdade da laje, pois ela não é classificada como grelha mais, remetendo o elemento a somente três: duas translações no plano do pavimento e uma rotação normal. A modelagem acaba transformando esses graus de liberdade de todos os nós do nível do diafragma, em somente um chamado “nó mestre”.

É válido citar que quando a laje tem o comportamento de diafragma rígido, a contribuição da rigidez transversal à flexão em seu próprio plano, é nula.

Deve-se dar atenção às ligações dos elementos rígidos verticais aos horizontais, para que haja a perfeita transmissão dos esforços, garantindo a rigidez axial da laje e não permitindo assim, a ruptura. Se não houver a perfeita transmissão, acarretará patologias na obra, desde a estrutura até o sistema de vedação. Patologias as quais podem ocasionar desconforto nos usuários da obra ou até ruína.

O EUROCODE 2/2004 trata de diversas suposições para lajes pré-moldadas com comportamento de diafragma rígido:

- O Modelo estrutural usado deve levar em conta a compatibilidade de deformação dos elementos de contraventamento.
- Devem-se considerar os deslocamentos horizontais em todos os locais da estrutura.
- A armação do diafragma deve ser dimensionada para resistir à todos os esforços de tração solicitantes.

6 EXEMPLOS

6.1 Primeiro Exemplo

Terá como base o primeiro exemplo da dissertação de mestrado de BOTTURA (1991), o qual também já foi estudado por STAMATO (1983). O objetivo da análise deste exemplo, é chegar nos mesmos valores do modelo discreto de Bottura, o qual foi calculado como diafragma rígido.

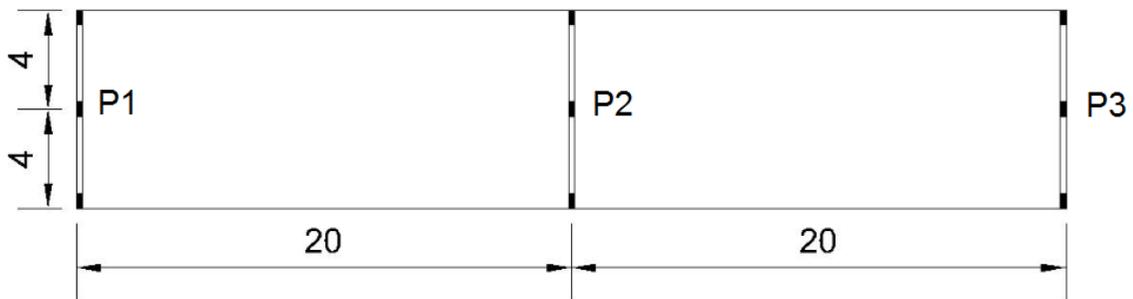


Figura 3– Planta baixa da estrutura do primeiro exemplo
Fonte: Adaptado de Bottura (1991).

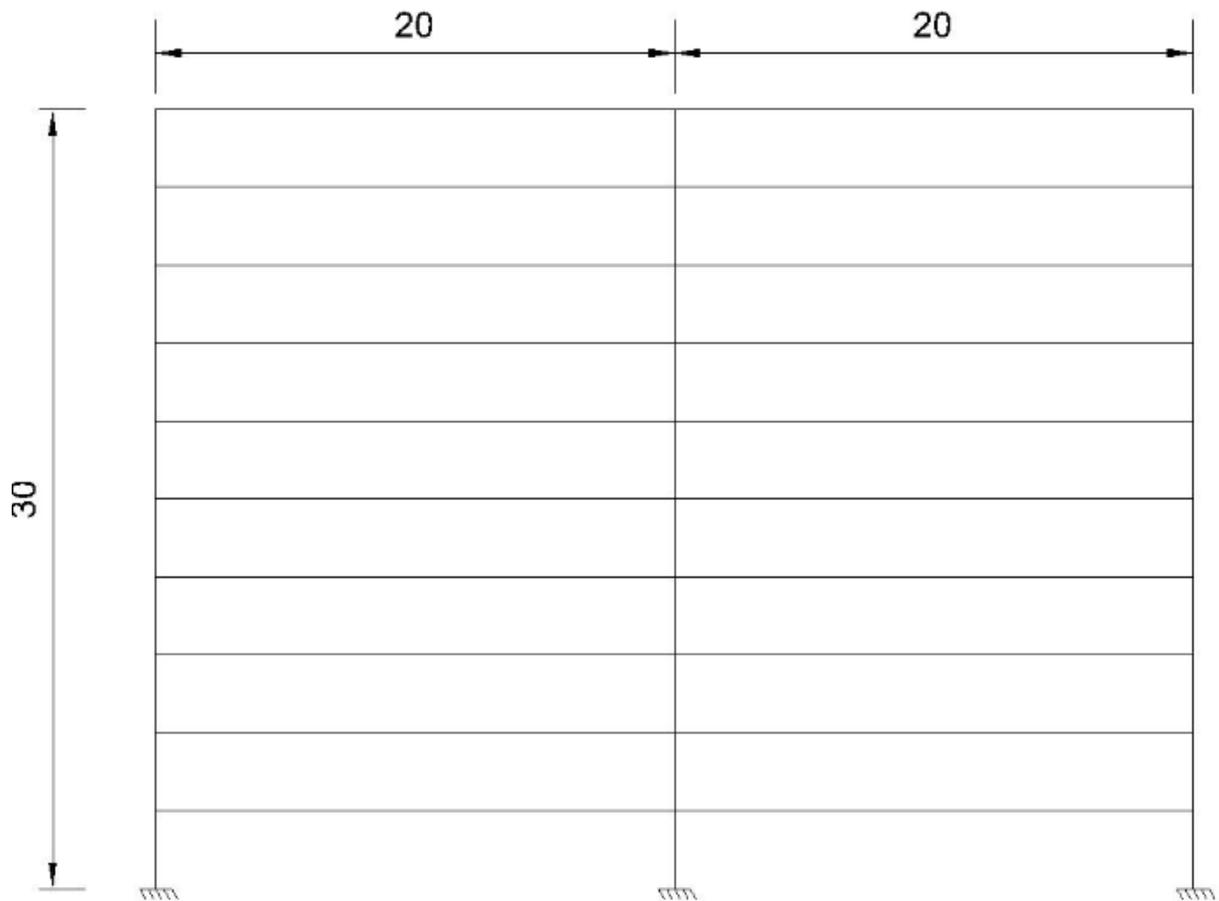


Figura 4 – Elevação da estrutura do primeiro exemplo
Fonte: Adaptado de Bottura (1991).



Figura 5– Pilar escolhido como base para comparação dos resultados
Fonte: Adaptado de Bottura (1991).

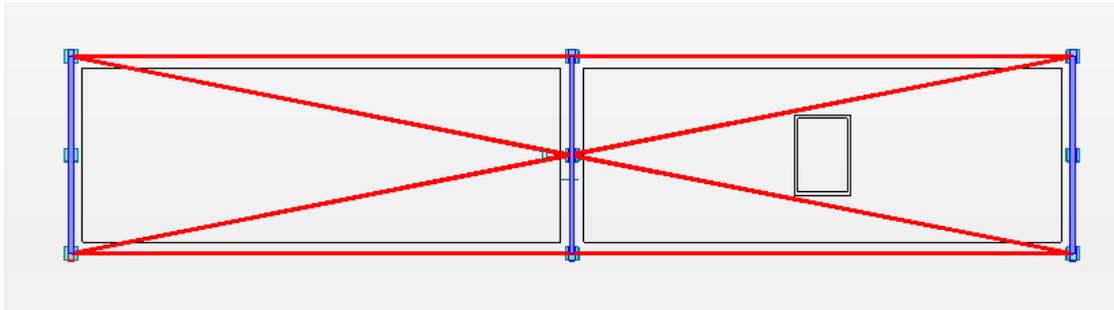


Figura 6- Localização da abertura nas lajes
Fonte: Adaptado de Bottura (1991).

A estrutura do edifício de 10 pavimentos, é composta por pórticos e lajes em concreto armado, com módulo de deformação longitudinal de 20000MPa. As lajes têm espessura de 7 centímetros, os pilares têm seção transversal de 25 x 60 cm, e as vigas seção de 20 x 50 cm. A distância entre as lajes é de 3 metros. O carregamento foi obtido através das resultantes das ações de pressão e sucção, com valor de 1,0 kN/m², calculando a força concentrada pela sua área de influência.

6.2 Segundo Exemplo

A geometria deste exemplo é similar a do anterior, com a mudança que ao invés de conter três pórticos, neste existem três painéis-paredes, com seção de 400x20 cm. As demais condições são as mesmas do primeiro exemplo.

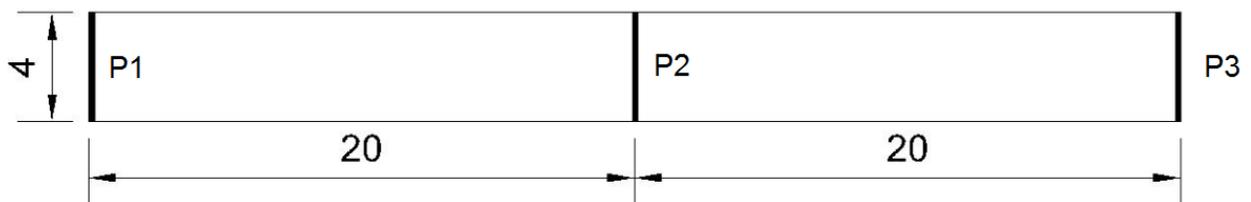


Figura 7- Planta baixa da estrutura do segundo exemplo
Fonte: Adaptado de Bottura (1991).

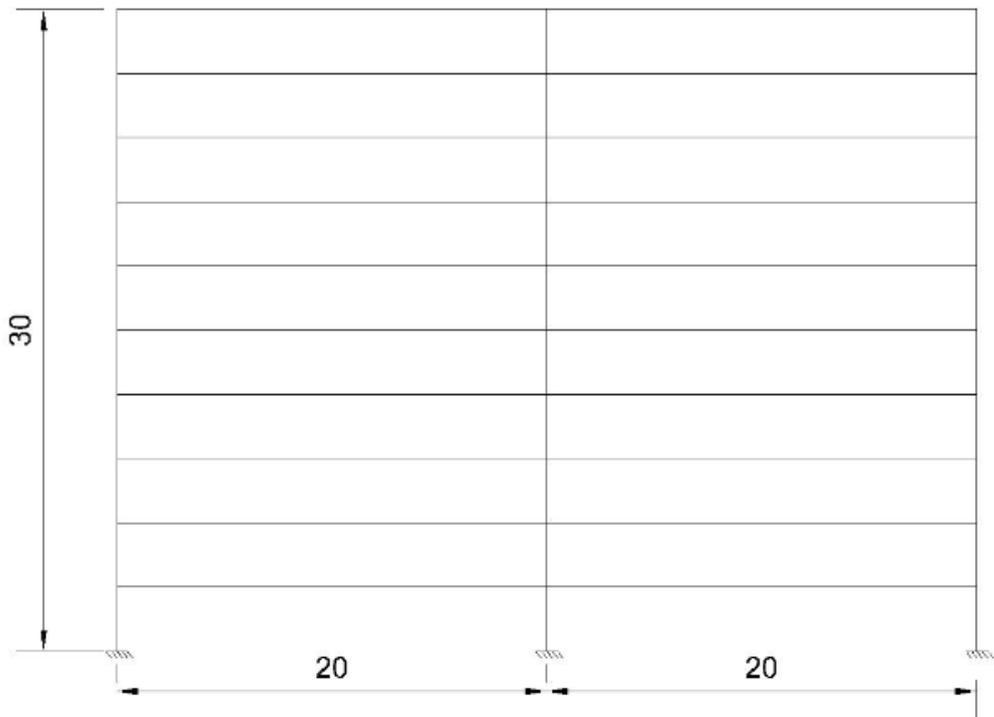


Figura 8– Elevação da estrutura do segundo exemplo
 Fonte: Adaptado de Bottura (1991).



Figura 9- Pilar escolhido como base para comparação de resultados
 Fonte: Adaptado de Bottura (1991).

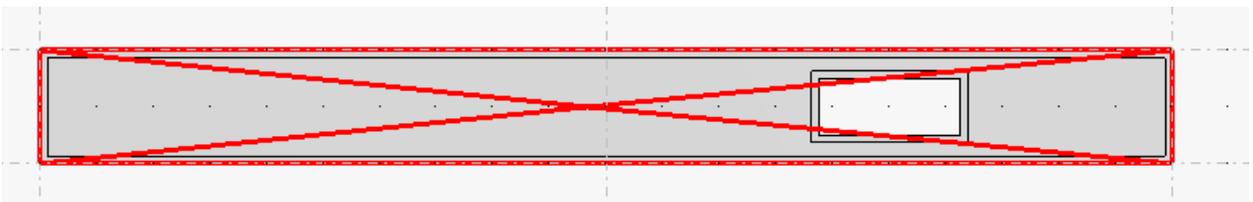


Figura 10- Localização da abertura nas lajes
 Fonte: Adaptado de Bottura (1991).

6.3 Terceiro exemplo

Exemplo que tem como base o quarto exemplo da dissertação de mestrado de YOSHIDA. A estrutura é de um edifício de 10 pavimentos de concreto armado com módulo de elasticidade longitudinal de 20000mPa. Os painéis parede têm espessura de 21,464 cm, os pilares têm seção de 20x120cm e as vigas dos pórticos 20x60cm. As forças foram aplicadas por metodologia igual às dos exemplos anteriores, por meio da área de influência. A diferença de altura entre as lajes é de 3m.

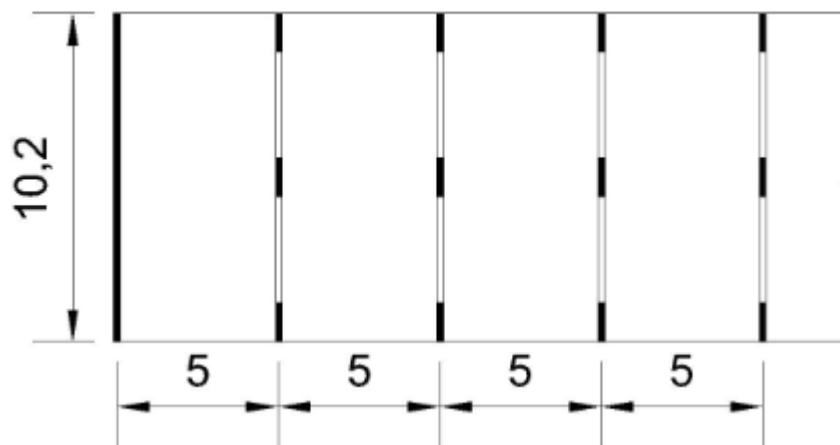


Figura 11- Planta baixa da estrutura do terceiro exemplo
Fonte: Adaptado de Yoshida (1989).

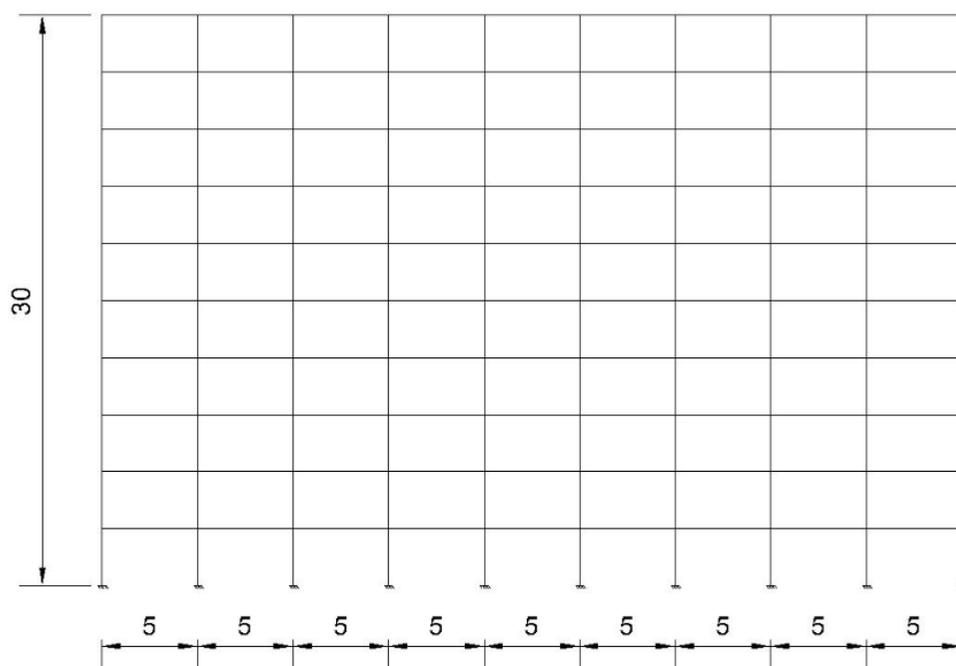


Figura 12- Elevação da estrutura do terceiro exemplo
Fonte: Adaptado de Yoshida (1989).

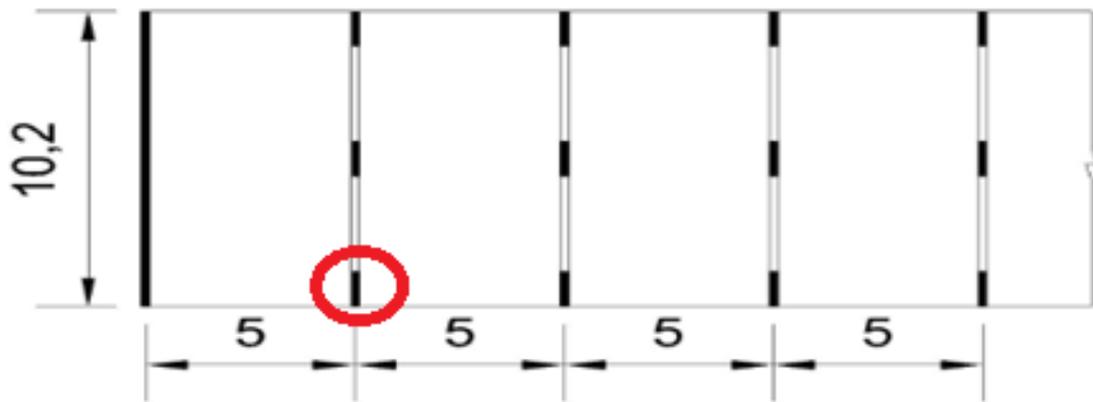


Figura 13- Pilar escolhido como base para comparação de resultados
 Fonte: Adaptado de Yoshida (1989).

6.4 Quarto exemplo

Possui as mesmas características que o primeiro exemplo. Possui mudança na planta baixa, deixando a laje com o formato em L.

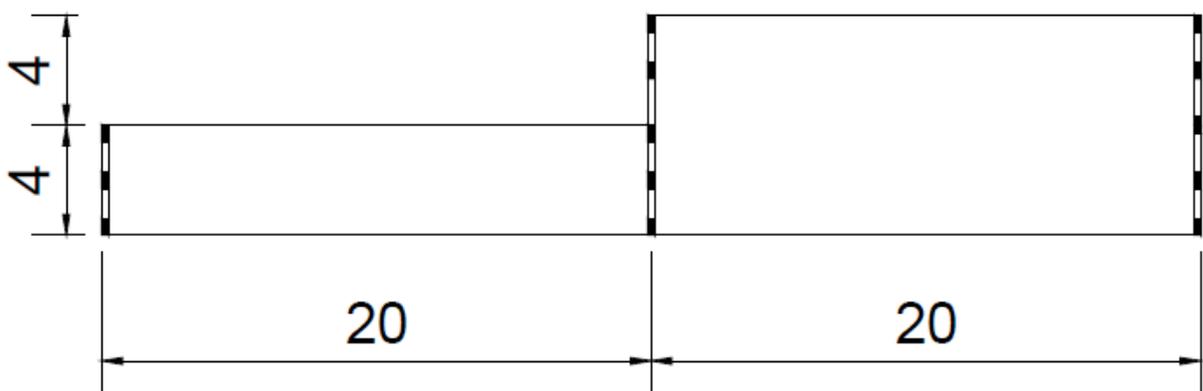


Figura 14- Planta baixa do quarto exemplo
 Fonte: Autoria própria.

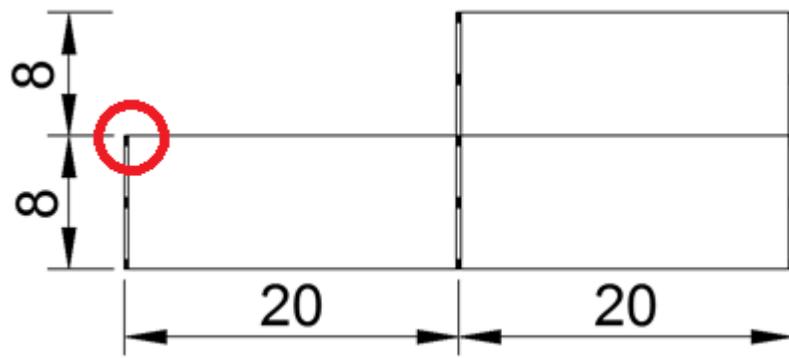


Figura 15- Pilar escolhido como base para comparação de resultados
Fonte: Adaptado de Bottura (1991).

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Será mostrado aqui os deslocamentos em centímetros dos nós dos pilares dos pórticos no sentido da força de vento aplicada, e a parcela de força horizontal resistida por um pilar específico.

7.1 Primeiro exemplo

7.1.1 Modelagem considerando a laje como diafragma rígido

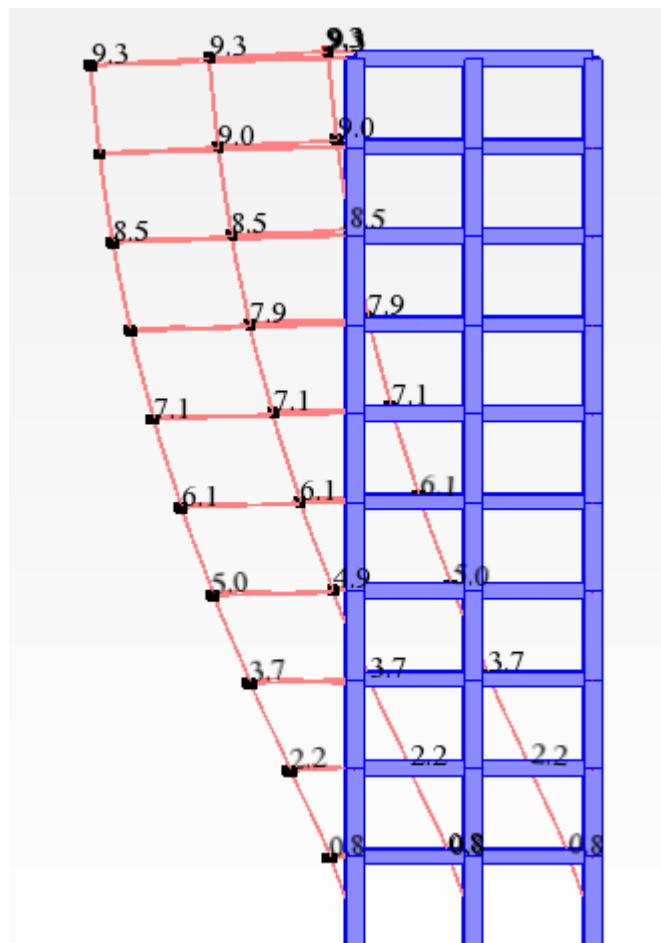


Figura 16- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.1.2 Modelagem considerando a laje como uma casca de concreto armado.

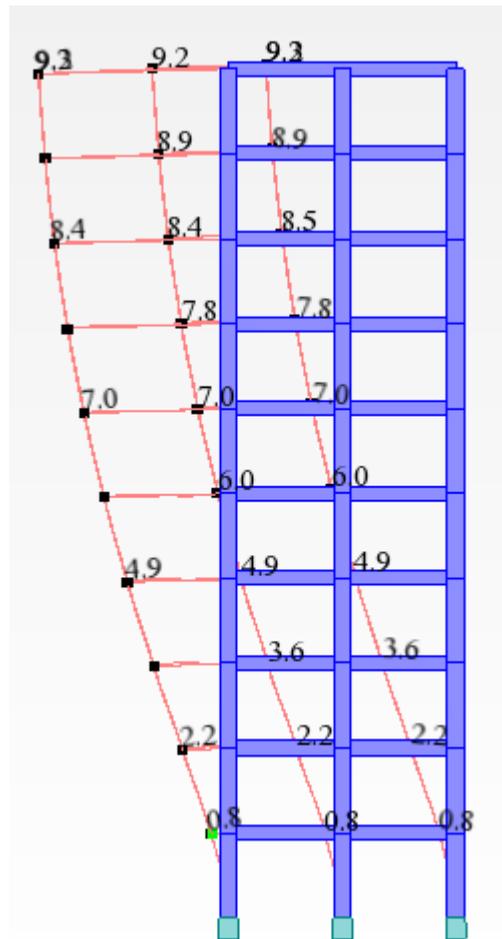


Figura 17- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.1.3 Modelagem considerando a laje como casca de concreto armado e com abertura de 2x5m em todas as lajes do lado direito.

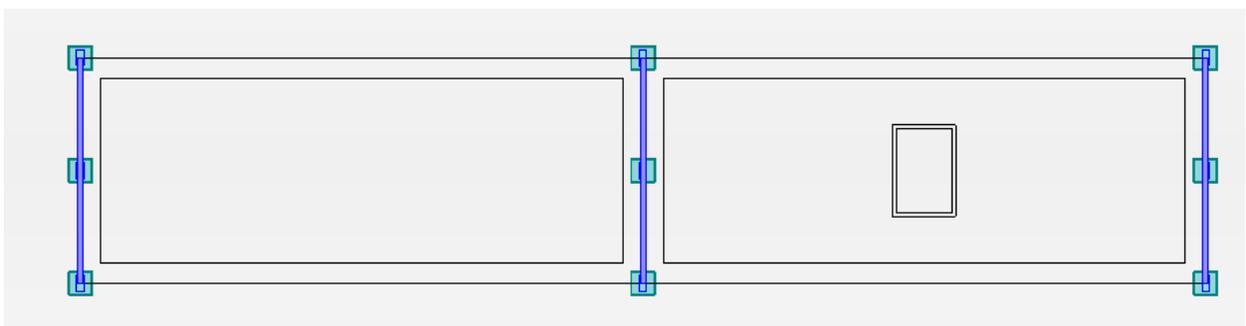


Figura 18- Planta Baixa
Fonte: Autoria própria.

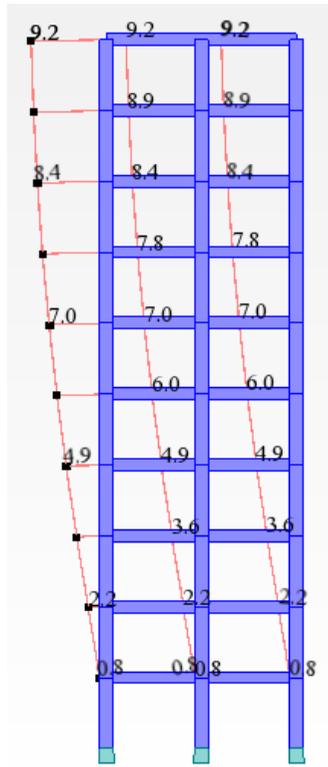


Figura 19- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.1.4 Modelagem considerando a laje como diafragma rígido e com abertura de 2x5m em todas as lajes do lado direito.

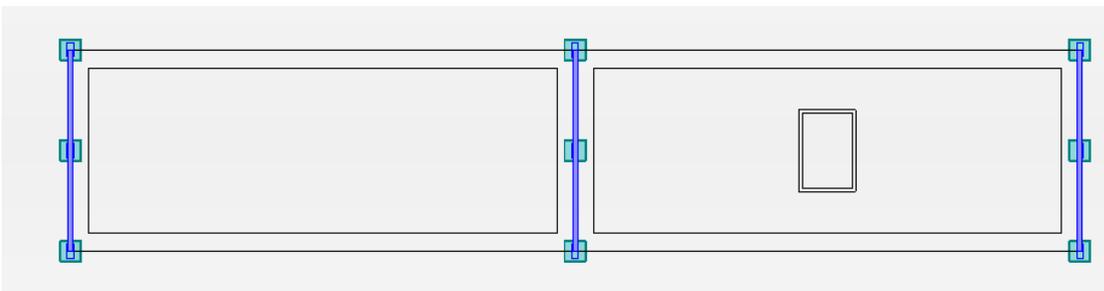


Figura 20- Planta baixa
Fonte: Autoria própria.

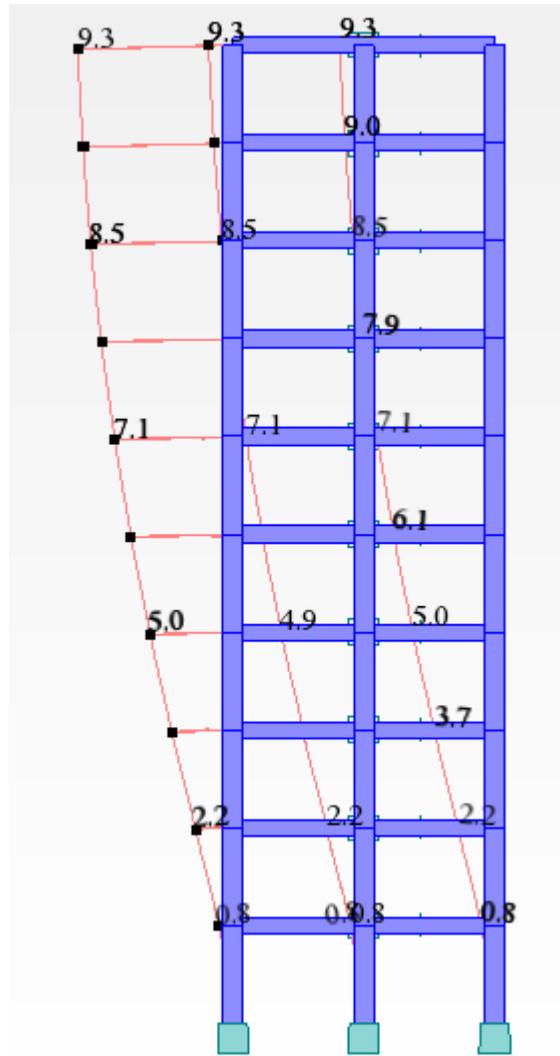


Figura 21- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.1.5 Modelagem aumentando a seção dos pilares do terceiro pórtico, visto em planta, para 100x25cm, adotando a laje como diafragma rígido.

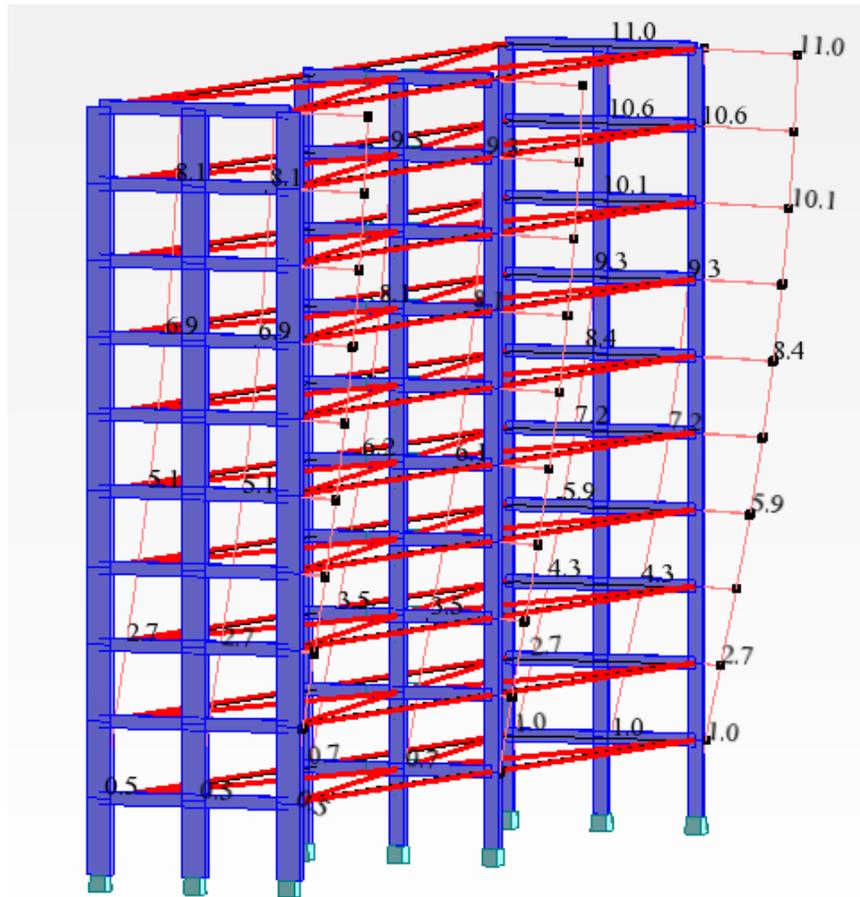


Figura 22- Deslocamentos horizontais

Fonte: Autoria própria.

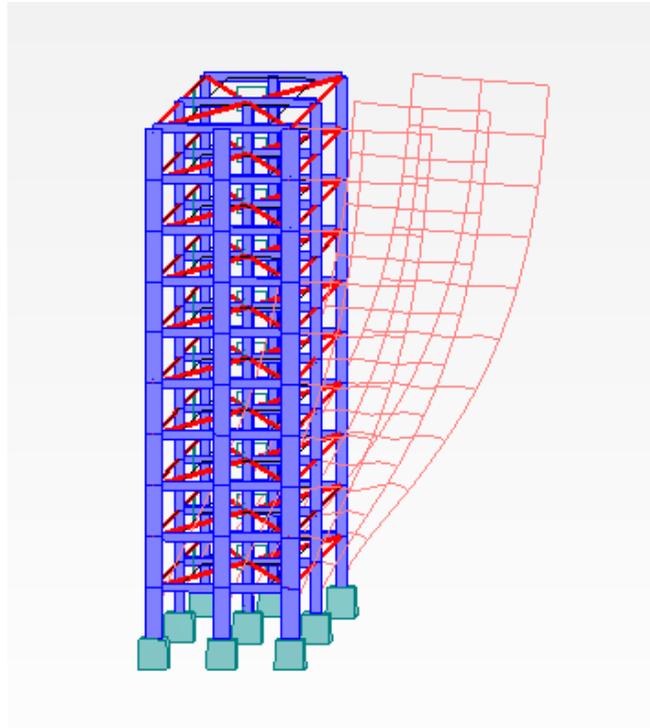


Figura 23- Demonstração da diferença de deslocamentos horizontais com estrutura não simétrica
Fonte: Autoria própria.

7.1.6 Modelagem aumentando a rigidez do terceiro pórtico, visto em planta, para 100x25cm, adotando a laje como casca de concreto armado.

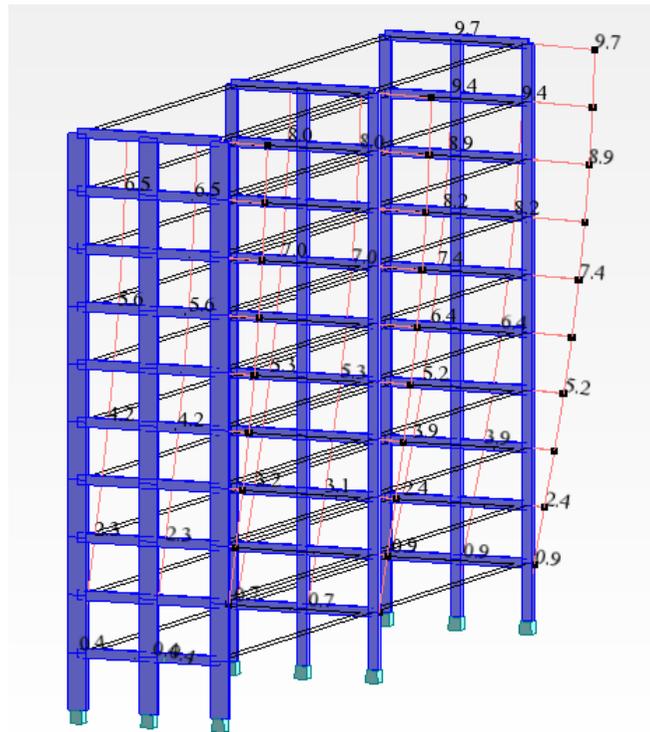


Figura 24- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria



Figura 25- Demonstração da diferença de deslocamentos horizontais com estrutura não simétrica
Fonte: Autoria própria.

7.1.7 Comparação de resultados

Tabela 1 - Deslocamentos horizontais do primeiro exemplo

MODELAGEM	DESLOCAMENTOS (cm)		
	DIAFRAGMA RÍGIDO	CASCA	DIFERENÇA
Planta original	9,3	9,2	1,0753%
Planta com aberturas	9,3	9,2	1,0753%
Planta com pilares enrijecidos	11	9,7	11,8182%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Reação horizontal do pilar do primeiro exemplo

MODELAGEM	REAÇÃO HORIZONTAL (kN)		
	DIAFRAGMA RÍGIDO	CASCA	DIFERENÇA
Planta original	-117,22	-111,82	4,606%
Planta com aberturas	-117,22	-114,42	2,389%
Planta com pilares enrijecidos	-128,78	-124,38	3,417%

Fonte: Autoria própria.

7.1.8 Discussão

Nas plantas originais e com aberturas não foi obtido diferenças maiores que 10%, ao contrário da planta com pilares enrijecidos, ou seja, com sistema de contraventamento assimétrico, que teve uma diferença de 11,8182% entre os deslocamentos dos dois tipos de modelos.

7.2 Segundo exemplo

7.2.1 Modelagem considerando a laje como diafragma rígido

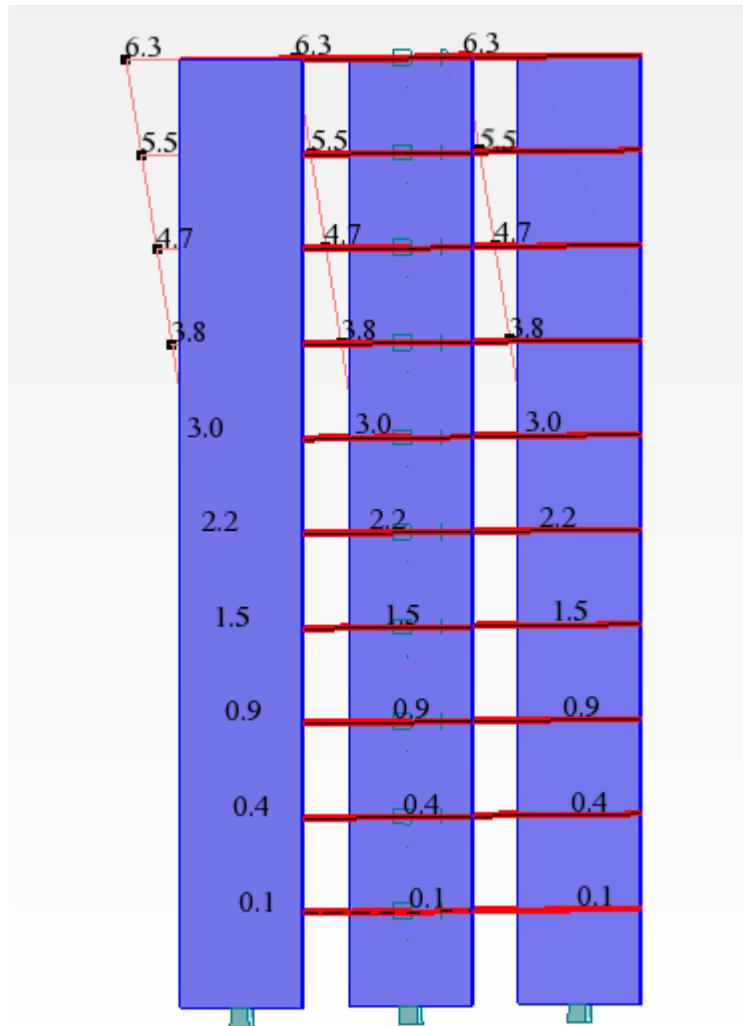


Figura 26- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria Própria.

7.2.2 Modelagem adotando a laje como casca de concreto armado

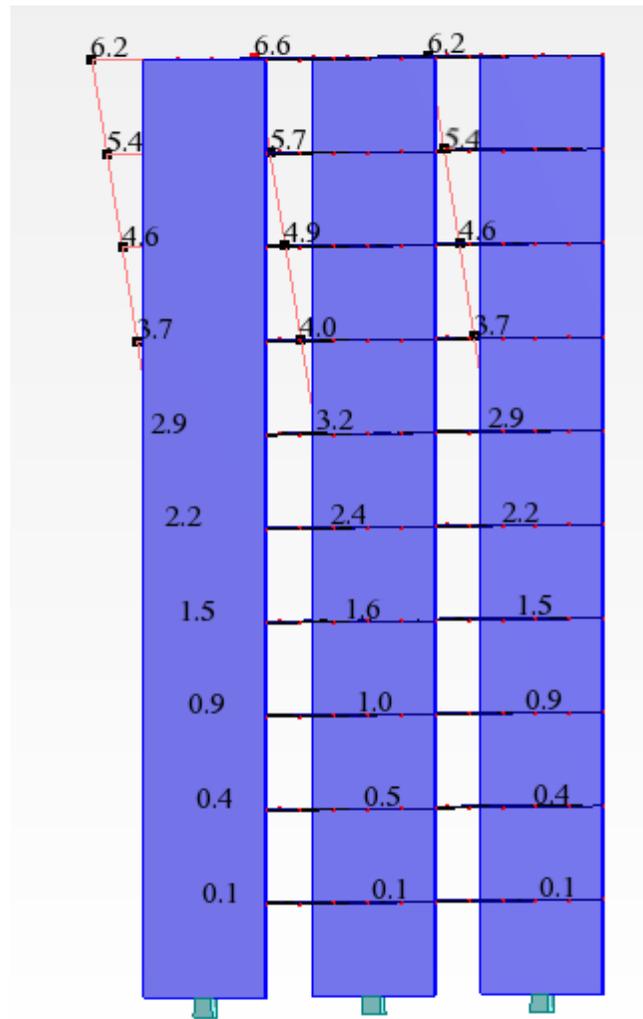


Figura 27- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria Própria.

7.2.3 Modelagem adotando a laje como diafragma rígido e colocando aberturas de 2x5m em todas as lajes do lado direito.

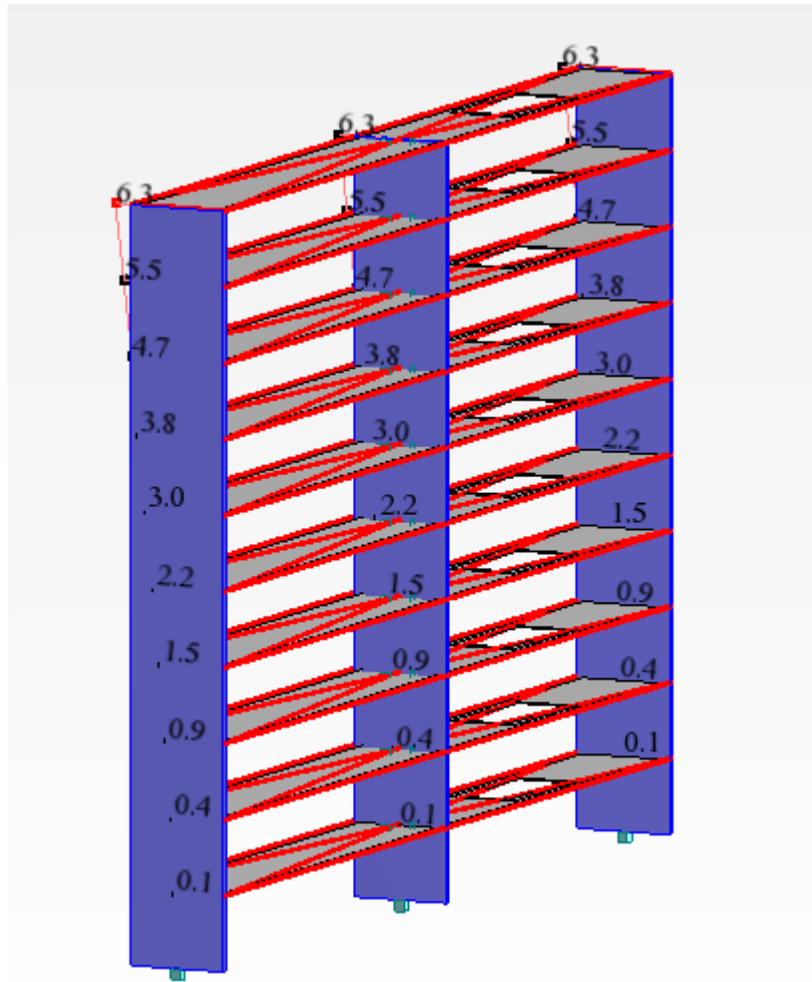


Figura 28- Deslocamentos Horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.2.4 Modelagem adotando a laje como casca de concreto armado e colocando aberturas de 2x5m em todas as lajes do lado direito.

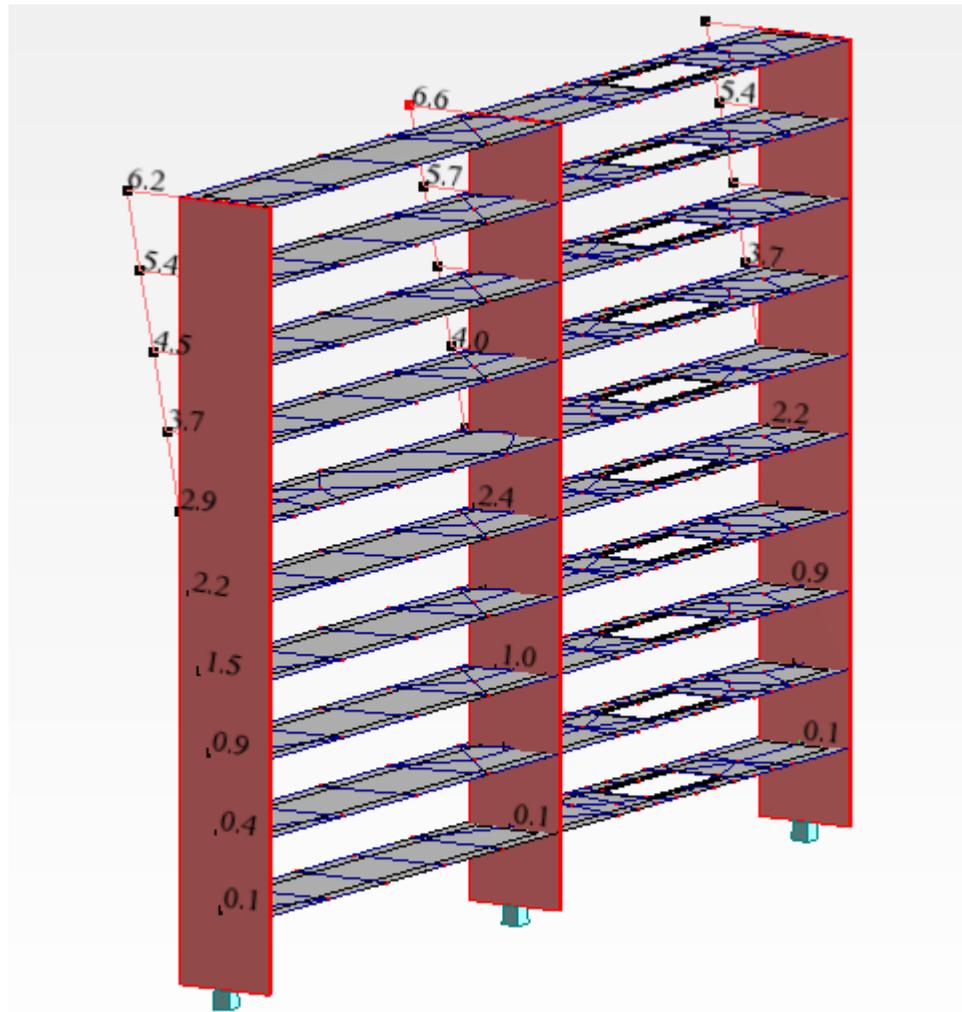


Figura 29- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.2.5 Modelagem aumentando a rigidez do terceiro pilar-parede para 400x30cm, adotando a laje como diafragma rígido.

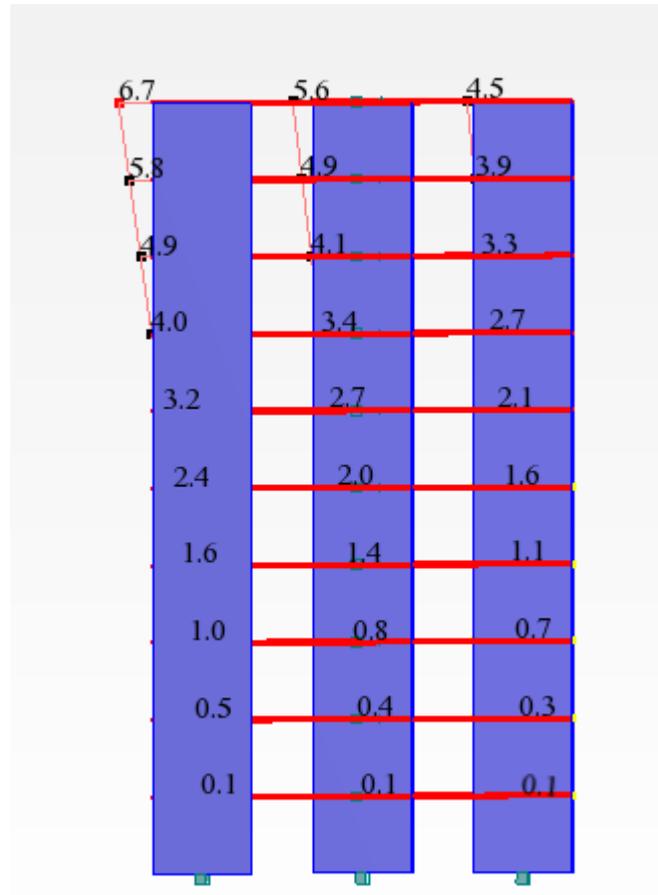


Figura 30- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.2.6 Modelagem aumentando a rigidez do terceiro pilar-parede para 400x30cm, adotando a laje como casca de concreto armado.

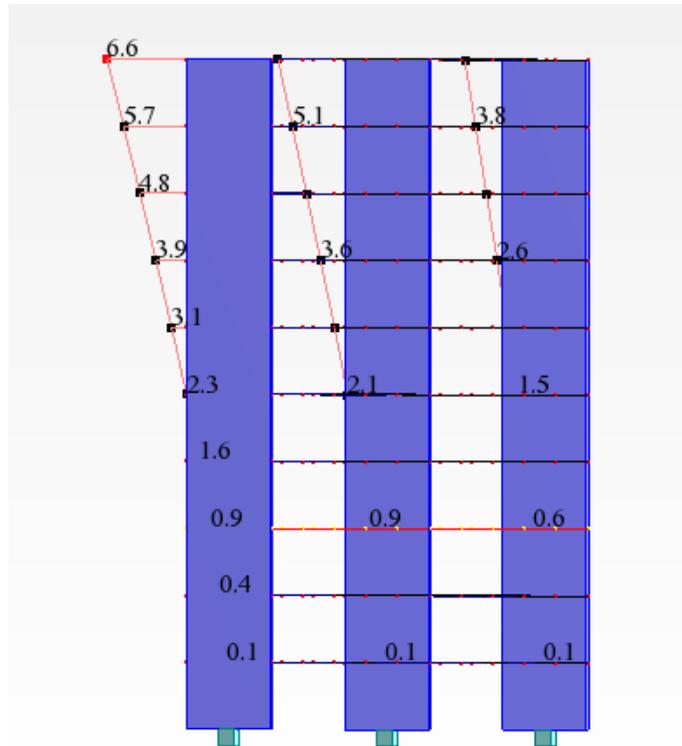


Figura 31- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

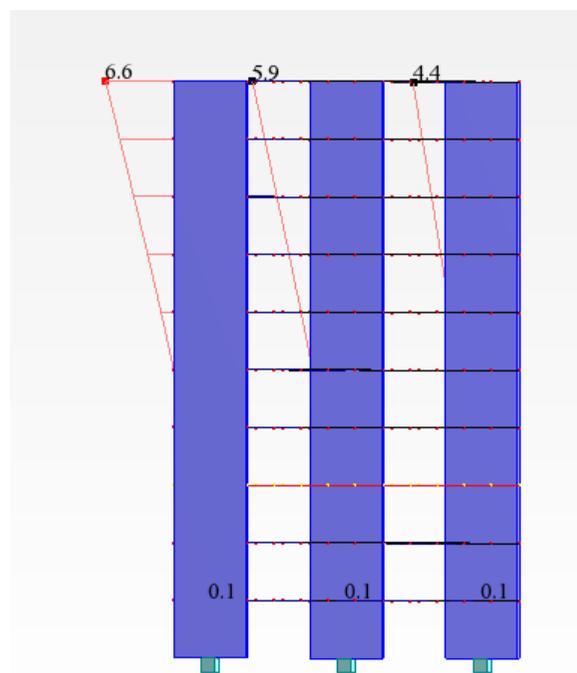


Figura 32- Deslocamentos horizontais máximos e mínimos
Fonte: Autoria própria.

7.2.7 Comparação de resultados

Tabela 3 - Deslocamentos horizontais do segundo exemplo

MODELAGEM	DESLOCAMENTOS(cm)		
	DIAFRAGMA RÍGIDO	CASCA	DIFERENÇA
Planta original	6,3	6,6	-4,7619%
Planta com aberturas	6,3	6,6	-4,7619%
Planta com pilares enrijecidos	6,7	6,6	1,4925%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Reação horizontal do pilar do segundo exemplo

MODELAGEM	REAÇÃO HORIZONTAL (kN)		
	DIAFRAGMA RÍGIDO	CASCA	DIFERENÇA
Planta original	-380	-342,77	9,8%
Planta com aberturas	-380	-341,86	10,03%
Planta com pilares enrijecidos	-402,31	-355,70	11,58%

Fonte: Autoria própria.

7.2.8 Discussão

Neste exemplo obteve-se diferenças maiores que 10% somente nas reações horizontais dos modelos com planta com aberturas e com pilares enrijecidos.

7.3 Terceiro exemplo

7.3.1 Modelagem considerando a laje como diafragma rígido.

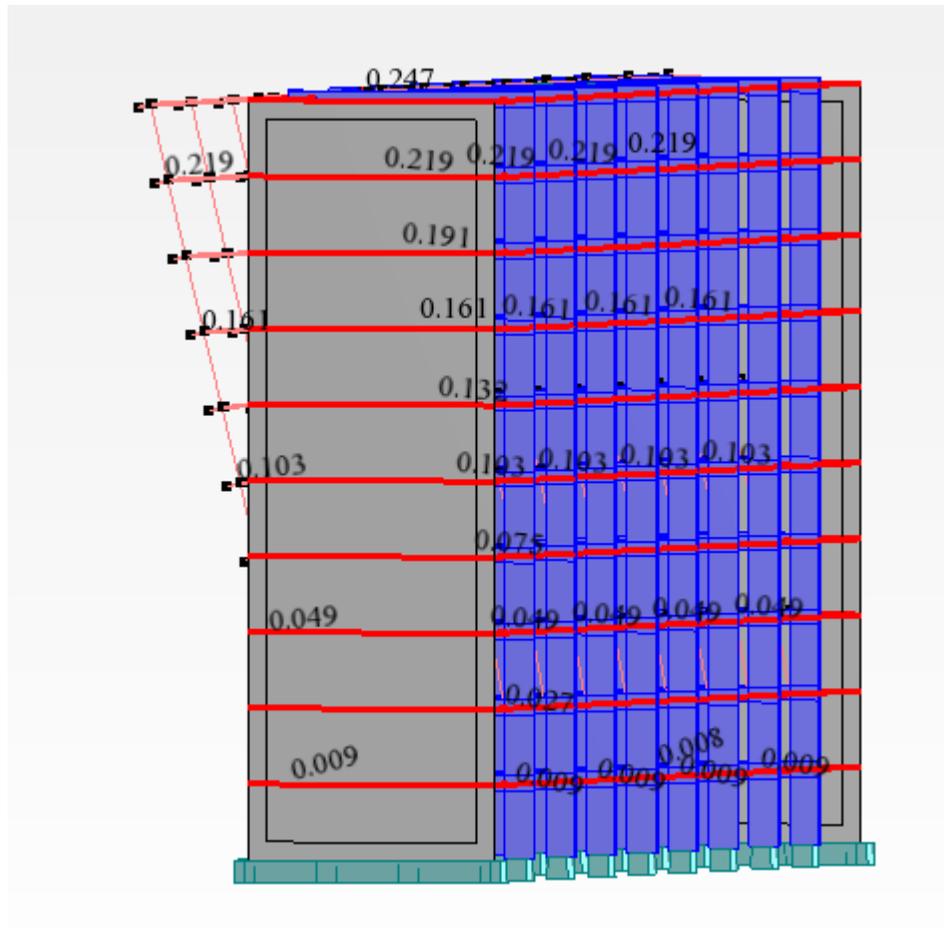


Figura 33- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.3.2 Modelagem adotando a laje como casca de concreto armado

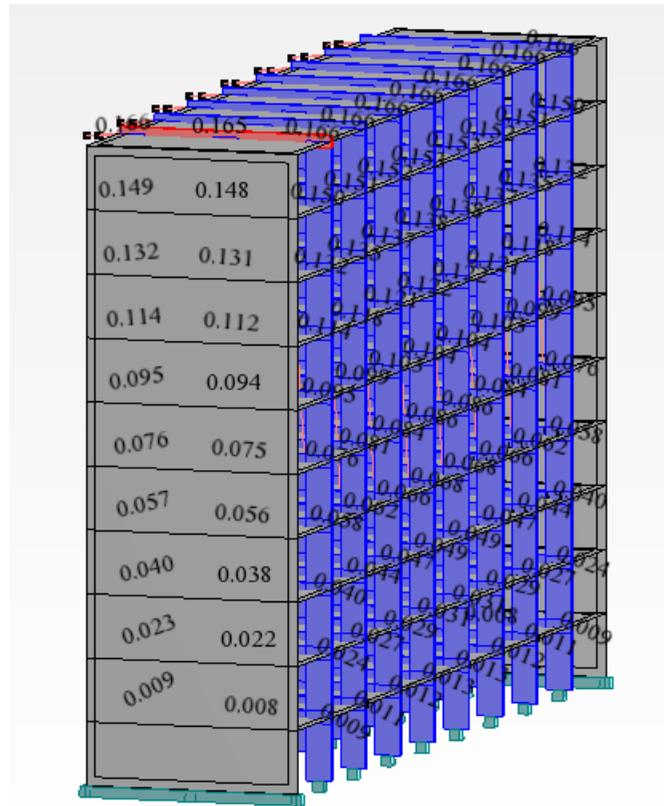


Figura 34- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.3.3 Comparação de resultados

Tabela 5 - Deslocamentos horizontais do terceiro exemplo

MODELAGEM	DESLOCAMENTOS(cm)		
	DIAFRAGMA RÍGIDO	CASCA	DIFERENÇA
Planta original	0,247	0,166	32,7935%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Reação horizontal do pilar do terceiro exemplo

	REAÇÃO HORIZONTAL (kN)		
MODELAGEM	DIAFRAGMA RÍGIDO	CASCA	DIFERENÇA
Planta original	-9,99	-21,14	111,61%

Fonte: Autoria própria.

7.3.4 Discussão

A diferença entre os resultados obtidos neste exemplo foi exorbitante, sendo de 32,7% nos deslocamentos e de 111,61% nas reações horizontais, valores muito maiores que a base de 10%.

7.4 Quarto exemplo

7.4.1 Modelagem considerando a laje como diafragma rígido

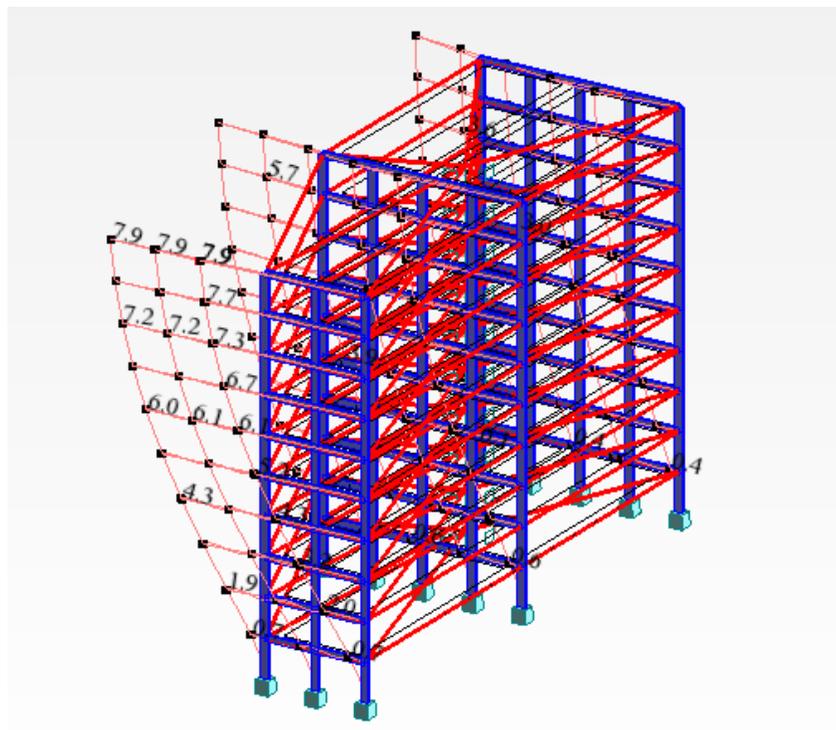


Figura 35- Deslocamentos Horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.4.2 Modelagem considerando a laje como casca de concreto armado

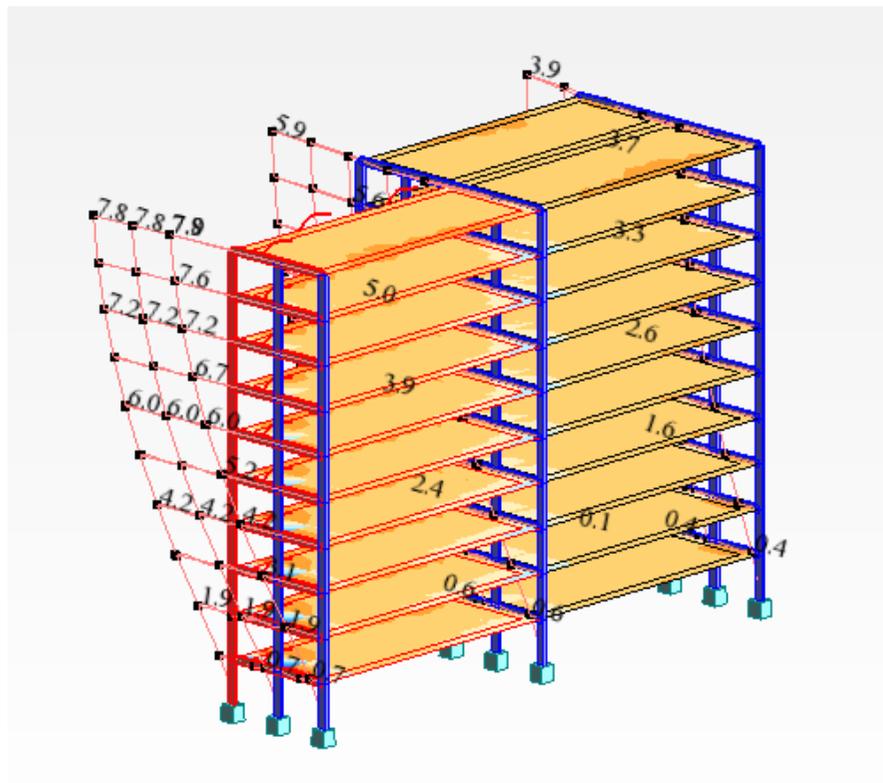


Figura 36- Deslocamentos horizontais
Fonte: Autoria própria.

7.4.3 Comparação de resultados

Tabela 7 - Deslocamentos horizontais do quarto exemplo

MODELAGEM	DESLOCAMENTOS(cm)		
	DIAFRAGMA RÍGIDO	CASCA	DIFERENÇA
Planta original	7,9	7,8	1,27%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Reação horizontal do pilar do quarto exemplo

MODELAGEM	REAÇÃO HORIZONTAL (kN)		
	DIAFRAGMA RÍGIDO	CASCA	DIFERENÇA
Planta original	-117,1	-105,8	9,65%

Fonte: Autoria própria.

7.4.4 Discussão

Não foi obtido diferenças maiores que 10% entre os resultados dos deslocamentos e também das reações horizontais.

8 CONCLUSÃO

Esta pesquisa buscou analisar comparativamente o comportamento de uma estrutura quando solicitada às ações horizontais, principalmente o vento. O foco foi dado na hipótese do diafragma rígido, pois se relaciona com a laje, que tem um papel importante no sistema de contraventamento, pela sua grande rigidez em seu plano. Foram colhidos resultados pelo software *Autodesk Robot Structural Analysis*, para se poder comparar como qual modelo se comportava.

Os exemplos abordados por esta pesquisa buscaram atingir uma variedade entre tipos de estrutura para se poder saber quando é possível e viável adotar a hipótese do diafragma rígido para as lajes. Nas plantas retangulares e mais simples, primeiro, segundo e quarto exemplos, não houveram grandes diferenças entre os modelos, exceto na modelagem com sistemas de contraventamento assimétricos. Já no terceiro exemplo, uma estrutura mais complexa e no quarto que tinha uma planta baixa em formato L, as diferenças foram significativas.

Isso só deixou mais evidente que quando o engenheiro se deparar com estruturas complexas que fogem do padrão, não há outra alternativa senão a modelagem das mesmas para poder ter a certeza dos cálculos executados. Adotar erroneamente a hipótese do diafragma rígido, como mostrado neste trabalho, pode deixar os seus cálculos com parâmetros que não condizem com a realidade. As consequências podem ser desde um dimensionamento não econômico ou insuficiente para a estrutura, e até mesmo a ruína da mesma quando executada.

9 BIBLIOGRAFIA

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

BEZERRA, Dermival P. **Análise de estruturas tridimensionais de edifícios altos considerando a rigidez transversal à flexão das lajes**. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

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**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

AVILLA, Marcelo C.; AVILLA Vinicius C.; CARVALHO R. C.; AVILLA, Jair J. Ligações dos Elementos que Compõem o Diafragma Rígido das Estruturas de Edifícios Altos Executados em Lajes Nervuradas Pré-Fabricadas com Vigotas Treliçadas. **Revista Dom Digital**, São José do Rio Preto, 2 semestre 2014. Disponível em <http://www.dompedro.com.br/ftp/REVISTA/E001/DP_REVISTADOMDIGITAL_E001_A002.pdf> Acesso em: 19 nov. 2016.

GOULART, Mauricio dos S. S. G. **Contribuição da rigidez à flexão das lajes para a estabilidade global de edifícios**. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BRISOT, G. V. et al.. Influência da Rigidez das Lajes de Concreto Armado na Distribuição dos Esforços Laterais, **XIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural**. Brasília, Brasil. 2001.

CARVALHO, Roberto Chust. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003**. São Carlos: EdUFScar, 2012. 368p.

SHIGUEMITSU, Y. **Análise do efeito do vento em estruturas de edifícios com lajes deformáveis**. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

BOTTURA, H. M. **Estudo sobre o efeito da deformabilidade das lajes na distribuição dos esforços horizontais nos painéis de contraventamento.** 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **EUROCODE 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Building**, Bruxelas, 2004, 226p.

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

MONCAYO, W. J. M. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado.** 221f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

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

STAMATO, M.C.; STAFFORD-SMITH, B. **Análise aproximada de estruturas tridimensionais de edifício elevados.** 23f. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.