



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

GABRIEL CUNHA DE FIGUEIREDO LIMA

**AVALIAÇÃO DE MODELOS COMPUTACIONAIS PARA
ANÁLISE DE PAREDES DE CONTRAVENTAMENTO DE
EDIFÍCIOS EM ALVENARIA ESTRUTURAL**

**NATAL-RN
2021**

Gabriel Cunha de Figueiredo Lima

Avaliação de modelos computacionais para análise de paredes de contraventamento de edifícios em alvenaria estrutural

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Lima, Gabriel Cunha de Figueiredo.

Avaliação de modelos computacionais para análise de paredes de contraventamento de edifícios em alvenaria estrutural / Gabriel Cunha de Figueiredo Lima. - 2021.

77 f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Natal, RN, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto.

1. Modelagem computacional - Monografia. 2. Alvenaria estrutural - Monografia. 3. Paredes de contraventamento - Monografia. I. Nascimento Neto, Joel Araújo do. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.012.2

Gabriel Cunha de Figueiredo Lima

Avaliação de modelos computacionais para análise de paredes de contraventamento de edifícios em alvenaria estrutural

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 13 de setembro de 2021:

Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto – Orientador

Prof. Dr. José Neres da Silva Filho – Examinador interno

Prof. M.S. Klaus André de Sousa Medeiros (UFERSA) – Examinador externo

Natal-RN

2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, avós e a minha noiva, que são
minha fonte de apoio, exemplo e inspiração!!

Ao meu Deus, que me deu forças e me susteve
durante toda essa minha caminhada!!

AGRADECIMENTOS

Faz-se necessário agradecer nominalmente àqueles que diretamente ou indiretamente, participaram, de alguma forma, na elaboração desta tese. Desta forma, expresso aqui os meus mais sinceros agradecimentos:

Ao meu Deus, que desde o meu nascimento tem me guiado e dado graça para chegar onde estou. Agradeço infinitamente à bondade, graça e misericórdia dEle, e a Ele rendo toda glória e louvor.

Ao meu orientador Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto, pelas imprescindíveis instruções, pela compreensão e dedicação na elaboração desse trabalho.

Aos meus pais, que desde minha infância têm feito do possível ao impossível para me dar uma educação de qualidade.

Aos meus avós que sempre me incentivaram e me instruíram nas minhas escolhas de vida. Que sempre me aconselhavam e me levavam a enxergar os melhores caminhos a seguir.

À minha linda noiva, que é minha principal referência no que diz respeito à dedicação e esforço.

RESUMO

LIMA, G. C. de F. Avaliação de modelos computacionais para análise de paredes de contraventamento de edifícios em alvenaria estrutural. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2021. 77 p.

Com o avanço tecnológico e afim de otimizar o dimensionamento de paredes estruturais, foram modeladas computacionalmente grupos de paredes de alvenaria estrutural de um edifício real por três métodos principais diferentes. O objetivo deste trabalho foi realizar uma avaliação de diversos métodos de modelagem computacional de paredes de contraventamento em alvenaria estrutural. Para cada um desses métodos, foram realizadas variações com o objetivo de avaliar a capacidade de cada modelo para representar de forma mais adequada o comportamento das paredes de contraventamento. A análise dos resultados baseou-se na comparação dos deslocamentos horizontais ao nível dos pavimentos, assim como dos diagramas de momento fletor e de força cortante nas paredes. Os resultados indicaram que a forma como as flanges são consideradas no modelo altera significativamente não só a rigidez, mas a distribuição interna dos esforços nas paredes de contraventamento.

Palavras-chave: Modelagem computacional. Alvenaria estrutural. Paredes de contraventamento.

ABSTRACT

LIMA, G. C. de F. **Evaluation of computational models for the analysis of bracing walls in structural masonry buildings**. Final Paper. Department of Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2021. 77 p.

The objective of this research program was to evaluate various methods of computational modeling of bracing walls in structural masonry. With the technological advance and in order to optimize the dimensioning of structural walls, groups of structural masonry walls of a real building were computationally modeled by three different main methods. For each of these methods, variations were made with the objective of evaluating the capacity of each model to represent in a more adequate way the behavior of the bracing walls. The analysis of the results were based in the comparison of the horizontal displacements at the floors' level, as well as the diagrams of bending moment and shear force on the walls. The results indicated that the way the flanges are considered in the model significantly alters not only the stiffness, but the internal distribution of the internal forces in the bracing walls.

Keywords: Computational modeling. Structural masonry. Bracing walls.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema estrutural de contraventamento dos edifícios em alvenaria	17
Figura 2 - Ação conjunta do sistema parede-viga	18
Figura 3 - Modelagem com elementos de barra tridimensionais.....	19
Figura 4 - Modelo de Yagui adaptado por Nascimento Neto (1999)	20
Figura 5 - Discretização de uma parede de alvenaria pelo Modelo de Barras Equivalentes considerando as barras dispostas no centro de gravidade dos vazados dos blocos	22
Figura 6 - (a) Discretização pelo modelo híbrido. (b) Detalhe na ligação entre os modelos ...	23
Figura 7 - Planta de fiada do edifício	25
Figura 8 - Notação dos trechos do conjunto 1 de paredes	26
Figura 9 - Notação dos trechos do conjunto 2 de paredes	27
Figura 10 - Planta de primeira fiada do conjunto de paredes modeladas do (a) conjunto 1, e (b) conjunto 2	28
Figura 11 - Aplicação do Modelo de Barras Isoladas na discretização do conjunto 1 de paredes MBI-CT-01: (a) Barras verticais posicionadas no CG de cada seção; (b) Representação da seção transversal das paredes; e (c) Aplicação das forças horizontais nas barras verticais ao nível dos pavimentos.....	30
Figura 12 - (a) Discretização do conjunto 1 e (b) aplicação das forças do vento no modelo MPT-CT-01	32
Figura 13 - (a) Discretização do conjunto 1 e (b) aplicação das forças do vento no modelo MBEq-CT-01	34
Figura 14 - Localização do CR para cada modelo realizado	36
Figura 15 - Nós do 17º pavimento ligados pelo constraint e forças devidas ao vento aplicadas no Centro de Rigidez de cada pavimento	37
Figura 16 - (a) Vista superior do pavimento e (b) vista tridimensional da discretização do modelo MPT-ST-02, ilustrando as articulações adicionais e os vínculos transversais	39
Figura 17 - Vista tridimensional da configuração geométrica e de vinculação das barras que compõe o modelo MBEq-ST-02.....	40
Figura 18 - Orientação dos eixos da seção transversal das barras horizontais que representam as lajes	41
Figura 19 - Vista superior da configuração geométrica e de vinculação das barras que compõe o MBEq-ST-03	42

Figura 20 - Vista tridimensional da configuração geométrica, de vinculação e de solicitação das barras que compõe o MBEq-ST-03	43
Figura 21 - Discretização do conjunto 2 pelos modelos (a) MBI-C2-01, (b) MPT-C2-01 e (c) MBEq-C2-01	44
Figura 22 - Discretização da viga de ligação.....	45
Figura 23 - Vistas da seção transversal do trecho 1 do conjunto 1 submetida às tensões normais	47
Figura 24 - Momentos fletores solicitantes que atuam nas barras representativas das paredes da estrutura, pelo MPT-CT-01	49
Figura 25 - Aparência da distribuição das forças normais nas barras da base do trecho 1 no pavimento térreo, pelo MBEq-CT-01.....	50
Figura 26 - Modelo de cálculo para determinação do momento fletor na base da parede	51
Figura 27 - Procedimento ilustrativo da técnica para tratamento das forças normais na base de uma parede.....	52
Figura 28 - Configuração deformada dos dois primeiros pavimentos da estrutura, pelo MPT-CT-01.....	53
Figura 29 - Distribuição da força normal nas barras verticais até o 4º pavimento: (a) Modelo MBEq-CT-01 com força horizontal aplicada da direita para a esquerda; (b) Modelo MBEq-ST-01 com força horizontal aplicada da esquerda para a direita; (c) Configuração deformada do MBEq-CT-01 e (c) Configuração deformada do MBEq-ST-01.....	56
Figura 30 - Distribuição da força normal nas barras verticais até o 4º pavimento: (a) Modelo MBEq-CT-02; (b) Modelo MBEq-CT-03; (c) Modelo MBEq-ST-04; (d) Modelo MBEq-ST-05 e (e) Modelo MBEq-ST-06.	58
Figura 31 - Tensões normais na seção transversal do conjunto de paredes trabalhando como uma única seção composta	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Forças horizontais aplicadas ao nível de cada pavimento no conjunto 1	26
Tabela 2 - Forças horizontais aplicadas ao nível de cada pavimento no conjunto 2.....	27
Tabela 3 - Dados dos módulos de elasticidade utilizados (continua).....	28
Tabela 4 - Coordenadas do CR de cada modelo, tendo como referência o CG das paredes....	36
Tabela 5 - Forças horizontais resultantes aplicadas no centro de rigidez de cada pavimento..	37
Tabela 6 - Descrição resumida das modelagens elaboradas.....	46
Tabela 7 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 1 nos modelos com torção	62
Tabela 8 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 1 nos modelos sem torção	62
Tabela 9 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 3 nos modelos com torção	63
Tabela 10 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 3 nos modelos sem torção	63
Tabela 11 - Variação percentual dos esforços cortantes do trecho 1 nos modelos com torção	65
Tabela 12 - Variação percentual dos esforços cortantes do trecho 1 nos modelos sem torção	65
Tabela 13 - Variação percentual dos esforços cortantes do trecho 3 nos modelos com torção	66
Tabela 14 - Variação percentual dos esforços cortantes do trecho 3 nos modelos sem torção	67
Tabela 15 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 1 nos modelos com torção	68
Tabela 16 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 1 nos modelos sem torção	69
Tabela 17 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 3 nos modelos com torção	70
Tabela 18 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 3 nos modelos sem torção	70
Tabela 19 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 1	71
Tabela 20 - Variação percentual das forças cortantes do trecho 1	72
Tabela 21 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 1.....	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Deslocamentos horizontais associados ao trecho 1: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção	61
Gráfico 2 - Deslocamentos horizontais associados ao trecho 3: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção	63
Gráfico 3 - Esforços cortantes do trecho 1 ao longo dos pavimentos nos modelos com torção	65
Gráfico 4 - Diagramas de força cortante associados ao trecho 3: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção	66
Gráfico 5 - Diagramas de momento fletor associados ao trecho 1: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção	68
Gráfico 6 - Diagramas de momento fletor associados ao trecho 3: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção	69
Gráfico 7 - Deslocamentos horizontais associados ao trecho 1 do conjunto 2.....	71
Gráfico 8 - Forças cortantes associadas ao trecho 1 do conjunto 2.....	72
Gráfico 9 - Momentos fletores associados ao trecho 1 do conjunto 2.....	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Considerações iniciais.....	15
1.2 Justificativas.....	15
1.3 Objetivos.....	15
1.4 Estrutura do trabalho.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Modelo de Barras Isoladas (MBI).....	18
2.2 Modelo de Pórtico Tridimensional (MPT).....	20
2.3 Modelo de Barras Equivalentes (MBEq).....	21
2.4 Modelo Híbrido (MHbr).....	22
3 MODELAGEM DE PAREDES DE UM EDIFÍCIO.....	24
3.1 Edifício utilizado na modelagem.....	24
3.2 Forças horizontais aplicadas e propriedades elásticas adotadas na modelagem.....	26
3.3 Modelagem computacional realizada.....	29
3.3.1 Descrição das modelagens desenvolvidas para o conjunto 1 de paredes de contraventamento considerando os efeitos de torção.....	29
3.3.1.1 Utilização do Modelo de Barras Isoladas com consideração dos efeitos da torção (MBI-CT-01).....	30
3.3.1.2 Utilização do Modelo de Pórtico Tridimensional com consideração dos efeitos da torção (MPT-CT-01).....	31
3.3.1.3 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes considerando os efeitos de torção (MBEq-CT-01).....	33
3.3.1.4 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes considerando os efeitos de torção - Variações 01 e 02 (MBEq-CT-02 e MBEq-CT-03).....	33
3.3.2 Descrição das modelagens desenvolvidas para o conjunto 1 de paredes de contraventamento desconsiderando os efeitos de torção.....	34

3.3.2.1 Utilização do Modelo de Barras Isoladas desconsiderando os efeitos de torção (MBI-ST-01).....	36
3.3.2.2 Utilização do Modelo de Pórtico Tridimensional desconsiderando os efeitos de torção (MPT-ST-01).....	38
3.3.2.3 Utilização do Modelo de Pórtico Tridimensional desconsiderando os efeitos de torção - Variação 01 (MPT-ST-02).....	38
3.3.2.4 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes desconsiderando os efeitos de torção - (MBEq-ST-01).....	39
3.3.2.5 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes desconsiderando os efeitos de torção - Variação 01 (MBEq-ST-02).....	39
3.3.2.6 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes desconsiderando os efeitos de torção - Variação 02 (MBEq-ST-03).....	41
3.3.2.7 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes desconsiderando os efeitos de torção - Variações 03, 04 e 05 (MBEq-ST-04, MBEq-ST-05 e MBEq-ST-06).....	42
3.3.3 Descrição das modelagens desenvolvidas para o conjunto 2 de paredes de contraventamento desconsiderando os efeitos de torção.....	43
3.3.4 Descrição resumida das modelagens elaboradas.....	45
3.4 Obtenção dos esforços atuantes nas paredes de contraventamento.....	46
3.4.1 Modelo de Barras Isoladas.....	46
3.4.1.1 Momentos fletores.....	46
3.4.1.2 Esforços cortantes.....	48
3.4.2 Modelo de Pórticos Tridimensionais.....	48
3.4.3 Modelo de Barras Equivalentes.....	49
3.4.3.1 Momentos fletores.....	49
3.4.3.2 Esforços cortantes.....	52
3.5 Obtenção dos deslocamentos dos nós da estrutura.....	53
3.5.1 Modelo de Barras Isoladas e Pórticos Tridimensionais.....	53
3.5.2 Modelo de Barras Equivalentes.....	54
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	55
4.1 Análise dos resultados do conjunto 1 de paredes.....	55
4.1.1 Análise dos resultados preliminares.....	55
4.1.2 Resultados completos das modelagens realizadas.....	60
4.2 Análise dos resultados do conjunto 2 de paredes.....	70

4.2.1 Resultados completos das modelagens realizadas	70
5 CONCLUSÕES	74
6 REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A alvenaria estrutural é sistema construtivo, onde toda alvenaria está envolvida diretamente na sustentação de uma obra (RODRIGUES, 2018). Nesse sistema, as paredes apresentam tanto função de vedação, quanto estrutural.

Esse, na realidade, é um sistema construtivo muito antigo. Desde a antiguidade, há registros do uso dessa técnica e algumas dessas obras ainda permanecem de pé até hoje. Mesmo sendo uma técnica já utilizada há milênios, o comportamento estrutural dela ainda carece de muitos estudos e pesquisas. Isso se dá, pois esse sistema envolve fenômenos muito complexos, que modelos e análises simplificadas não conseguem captar.

Somente nos últimos anos, a partir da década de 50, que esse sistema começou a ser visto e pensado com princípios mais racionais, deixando de ser algo empírico (MEDEIROS, 2015). Nesse cenário, a modelagem computacional ocupa um lugar importante, uma vez que permite estudos e análises mais robustos dos elementos estruturais avaliados, e comparação com resultados experimentais.

1.2 Justificativas

Uma vez que a utilização desse sistema estrutural apresenta crescimento numérico nos canteiros de obra ao redor do país, o estudo do comportamento dele faz-se imprescindível. A elaboração e otimização de modelos que capturem os fenômenos existentes nesse sistema permitem a produção de projetos mais seguros. Além disso, possibilitam um dimensionamento otimizado, e mais econômico.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as diferenças de resultados relativos à rigidez e aos esforços internos em paredes de contraventamento ao adotar diferentes estratégias para a modelagem computacional de paredes de contraventamento de edifícios de alvenaria estrutural.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar os esforços internos nas paredes de contraventamento obtidos a partir de quatro tipos de modelagem computacional e suas variações;
- Análise da variação do comprimento da flange
- Identificar os principais aspectos que justificam as diferenças entre os modelos computacionais;

- Sugerir procedimentos para emprego desses modelos na elaboração de projetos estruturais;

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos.

O *Capítulo 1* compreende os aspectos introdutórios dessa pesquisa.

O *Capítulo 2* compreende um resumo teórico de fenômenos que ocorrem no sistema de alvenaria estrutural, bem como a descrição dos modelos principais que serão analisados nessa pesquisa.

O *Capítulo 3* compreende a descrição técnica de alguns detalhes dos modelos computacionais elaborados e suas variações.

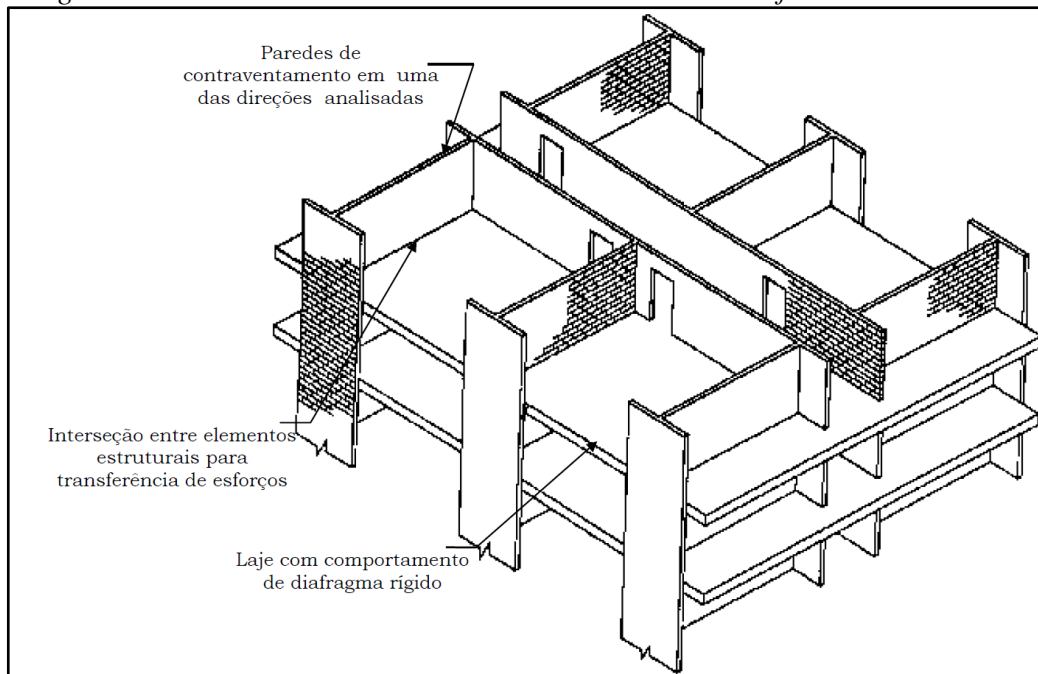
O *Capítulo 4* compreende toda parte de resultados obtidos a partir dos modelos, bem como suas análises e discussões.

O *Capítulo 5* compreende todas as conclusões obtidas a partir dos resultados encontrados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo em que os elementos estruturais possuem tanto função estrutural como de vedação. Nesse sistema, os elementos estruturais responsáveis por transferir as cargas verticais da edificação para as fundações são as paredes estruturais, núcleos estruturais, bem como combinação de ambos (NASCIMENTO NETO, 1999). Quanto à distribuição horizontal das ações, os elementos responsáveis por isso são as lajes, que atuam como diafragmas horizontais rígidos, e os pórticos de contraventamento, como pode ser visto na Figura 1.

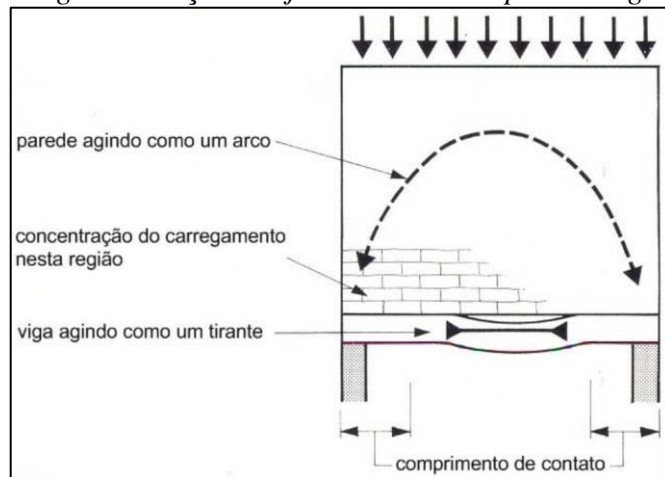
Figura 1 - Sistema estrutural de contraventamento dos edifícios em alvenaria



Fonte: NASCIMENTO NETO (1999 apud DRYSDALE et al, 1994)

Para casos em que há paredes de alvenaria estrutural apoiadas sobre vigas, há a necessidade de avaliar o fenômeno do efeito arco, estudado por Paes (2008) e outros pesquisadores. Conforme amplamente divulgado pela literatura, Paes (2008) comenta que no sistema parede-viga a parede funciona como arco atirantado, conforme ilustrado pela *Figura 2*, direcionando o carregamento para as proximidades do apoio com conseqüente alívio na região central do vão da viga. Vale destacar a importância de avaliar a necessidade de emprego de armadura nos locais com surgimento de tensões de tração na base da parede.

Figura 2 - Ação conjunta do sistema parede-viga



Fonte: PAES (2008 apud HASELTINE; MOORE, 1981)

Esse é um fenômeno muito complexo que chamou a atenção de vários pesquisadores, podendo-se citar: Wood (1952), Rosenhaupt (1962), Burhouse (1969), Stafford Smith et al. (1977), Navaratnarajah (1981), Stafford Smith e Riddington (1973), Davies e Ahmed (1977), Riddington e Stafford Smith (1978). Os principais objetivos das pesquisas desenvolvidas consistiram no desenvolvimento de um modelo simplificado de cálculo manual, para a avaliação do fenômeno da interação parede-viga. Apesar desses vários estudos, pesquisas mais recentes, como aquelas desenvolvidas por Barbosa (2000) e Silva (2005), não recomendam a aplicação de modelos matemáticos simplificados para esse tipo de análise (MEDEIROS, 2015).

Atualmente, usam-se diversos modelos para análise e dimensionamento de estruturas em alvenaria estrutural, como por exemplo, modelos de bielas e tirantes, analogias de treliça, uso de elementos finitos lineares e modelos de barras equivalentes (MEDEIROS, 2015). Cada método destes proporcionam uma compreensão do comportamento estrutural e auxiliam no desenvolvimento de formulações eficientes que aperfeiçoam o projeto.

Os objetos de avaliação para esse trabalho foram quatro tipos de modelagem diferentes. Foram usados, em essência, quatro métodos distintos de modelagem de paredes de alvenaria estrutural, sendo eles o Modelo de Barras Equivalentes, o Modelo de Pórticos Tridimensionais, o Modelo de Barras Isoladas e o Modelo Híbrido.

2.1 Modelo de Barras Isoladas (MBI)

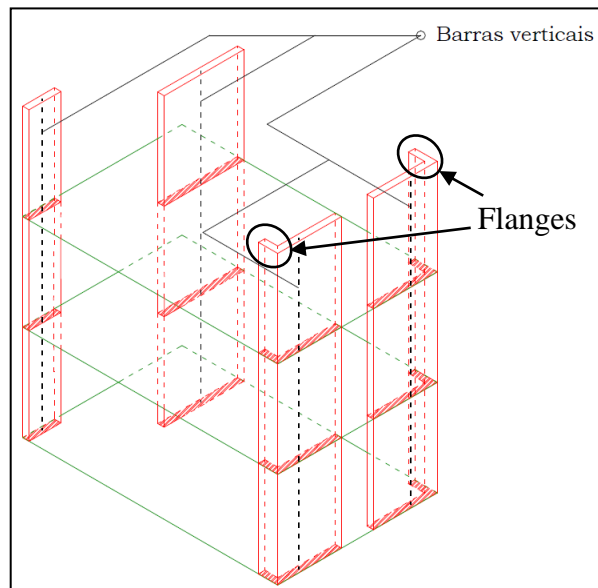
Considerando-se a possibilidade de modelos computacionais que podem ser utilizados, o Modelo de Barras Isoladas (MBI) é o mais simples entre todos. Esse método considera as paredes de contraventamento agindo isoladamente umas das outras, em que sua seção transversal leva em consideração os efeitos de eventuais flanges, isto é, a própria seção transversal já é modelada junto

com a sua respectiva flange, gerando, por exemplo, uma seção L, conforme ilustrado pela *Figura 3*. O modelo consiste basicamente de barras verticais que não apresentam interação entre si, sendo submetidas ao carregamento horizontal no nível dos pavimentos provenientes da distribuição da força do vento oriunda da ação de diafragma rígido da laje. Dessa forma, o efeito do diafragma rígido foi simulado na modelagem realizada por meio da consideração do nó mestre em cada pavimento para compatibilizar os deslocamentos ao nível das lajes.

O artifício utilizado para simular efeito de diafragma rígido foi a compatibilização dos deslocamentos lineares longitudinais e transversais dos nós a ele associado, bem como a rotação em torno da direção vertical, conforme será apresentado mais a frente.

Com relação às flanges, no item 10.1.3 da NBR 16868-1:2020, recomenda-se sua consideração quando forem provenientes de paredes que interceptem com amarração realizada com intertravamento entre as fiadas, sendo seu comprimento limitado a $6 \cdot t$, em que t representa a espessura da parede.

Figura 3 - Modelagem com elementos de barra tridimensionais



Fonte: Nascimento Neto (1999)

Uma vez que as barras são dispostas na posição em planta dos correspondentes centros de gravidade, os efeitos de translação e rotação do diafragma rígido ficam automaticamente incorporados, não requerendo, portanto, que a distribuição de rigidez seja simétrica, procedimento comum em modelos de cálculo manual.

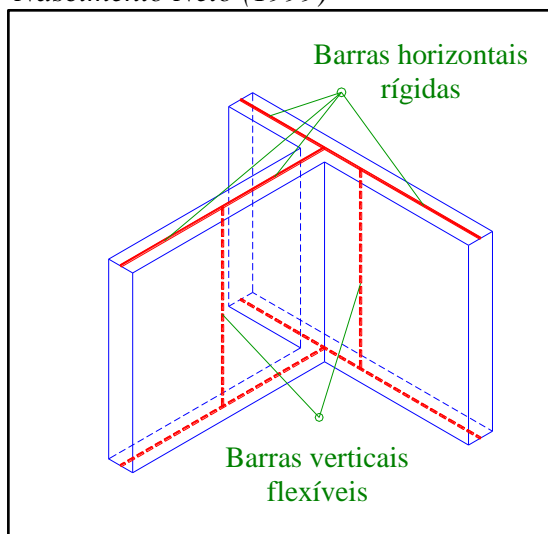
Um aspecto que deve ser mencionado diz respeito às propriedades geométricas das barras que podem estar referidas à seção bruta da parede, na qual não se considera a presença dos vazados dos blocos, tornando menos precisa a avaliação do acréscimo de rigidez

proporcionado por um eventual grauteamento vertical. Tal aspecto de menor precisão pode ser evitado ao se considerar a seção líquida da parede, cujas propriedades geométricas podem ter o cálculo facilmente implementado. Seja qual for a seção de referência adotada no modelo, é muito importante que as propriedades elásticas estejam referidas ao mesmo tipo de seção para que sejam válidos os resultados obtidos. Para essa pesquisa, a seção adotada considerou a área bruta do bloco.

2.2 Modelo de Pórtico Tridimensional (MPT)

Assim como o modelo de barras isoladas, o modelo de pórtico tridimensional faz uso de barras verticais para simular as paredes de contraventamento, a grande diferença reside na incorporação de barras horizontais rígidas para simular a extensão das paredes em planta e as eventuais amarrações nas extremidades. Por essa razão, o efeito das flanges fica automaticamente incorporado na modelagem, de modo que as barras verticais devem representar seções transversais retangulares sem a incorporação das flanges. Esse modelo corresponde a uma aplicação do Modelo de Yagui idealizado para discretizar núcleos estruturais de concreto armado, conforme descrito por Nascimento Neto (1999). A *Figura 4* ilustra duas paredes que se interceptam e a disposição das barras verticais flexíveis e horizontais rígidas. Assim como no caso do MBI, faz-se necessário utilizar o recurso do nó mestre ao nível dos pavimentos para simular o efeito de diafragma rígido da laje. Informações mais detalhadas acerca da geração do modelo podem ser encontradas em Nascimento Neto (1999).

Figura 4 - Modelo de Yagui adaptado por Nascimento Neto (1999)



Fonte: Nascimento Neto (1999)

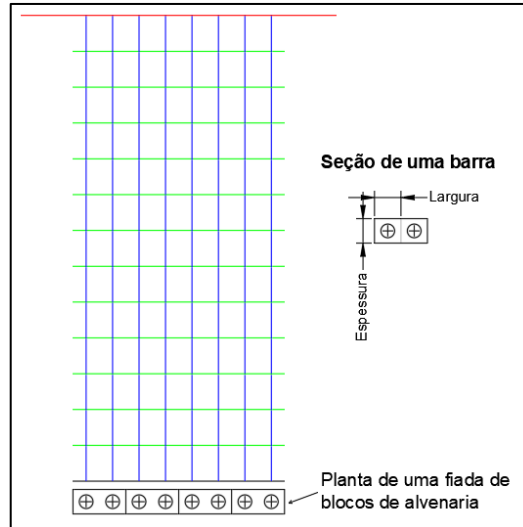
2.3 Modelo de Barras Equivalentes (MBEq)

O modelo de barras equivalentes pode ser interpretado como uma extensão do modelo de pórtico tridimensional, uma vez que a discretização das paredes se dá com o emprego de várias barras flexíveis verticais e horizontais. De acordo com Nascimento Neto et al (2014, apud Oliveira, 2021), as barras verticais são posicionadas no centro de gravidade de cada vazado dos blocos, representando, portanto, a seção transversal de meio bloco, assim como no centro de gravidade do bloco, representando a seção transversal de um bloco inteiro. É importante mencionar que, no caso de haver estrutura de transição, as barras verticais que fizerem interseção com essa estrutura precisam ter sua extremidade articulada. No caso das barras horizontais, seu posicionamento se dá ao nível de cada fiada. Da mesma forma que nos modelos anteriores, as barras podem ter a seção transversal referidas à seção bruta ou líquida, sendo importante, entretanto, que às barras horizontais seja associado módulo de deformação longitudinal com valor igual à metade daquele das barras verticais, de modo a simular o efeito de ortotropia da alvenaria.

Em estudo desenvolvido por Barbosa (2017), verificou-se que, em função da discretização realizada, a deformação por cisalhamento já fica automaticamente incorporada ao se utilizar o MBEq, de modo que se faz necessário desconsiderar tal aspecto na formulação do elemento barra, caso esteja implementada. Caso esse aspecto não seja observado, os efeitos da deformação por cisalhamento ficarão duplicados nos resultados obtidos. No caso específico do programa de análise estrutural SAP2000, o efeito da deformação por cisalhamento está incorporado na formulação de elementos do tipo barra, e sua desconsideração é feita ao se adotar um valor elevado para o coeficiente denominado *shear area*. O mesmo autor identificou que valores acima de 50 para esse coeficiente já são suficientes para que os efeitos mencionados sejam minimizados.

A *Figura 5* ilustra a discretização de uma parede com o MBEq com as barras verticais dispostas nos vazados dos blocos representando, portanto, a seção transversal de meio bloco. Uma das vantagens dessa modelagem é a possibilidade de considerar o acréscimo de rigidez proporcionado pela presença de grauteamento vertical nas paredes, bastando atribuir as devidas propriedades elásticas às correspondentes barras, sejam verticais e/ou horizontais.

Figura 5 - Discretização de uma parede de alvenaria pelo Modelo de Barras Equivalentes considerando as barras dispostas no centro de gravidade dos vazados dos blocos

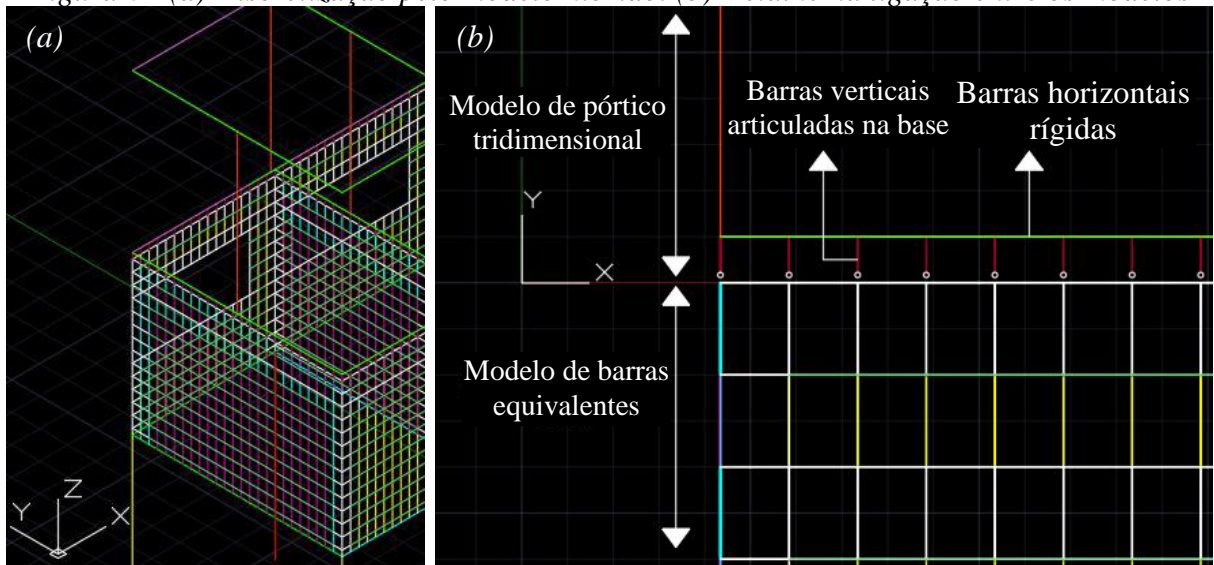


Fonte: Oliveira (2021)

2.4 Modelo Híbrido (MHbr)

Esse modelo foi utilizado inicialmente por Nunes (2011) na simulação computacional de edifícios de parede de concreto, tendo sido aplicado na modelagem de edifícios de alvenaria por Lopes (2019). Ele se consiste no emprego simultâneo do Modelo de Pórtico Tridimensional e do Modelo de Barras Equivalentes. No estudo desenvolvido por Lopes (2019) para avaliar os efeitos construtivos e a interação solo-estrutura em edifícios de alvenaria sobre estrutura de transição em concreto armado, as paredes de alvenaria do primeiro pavimento foram discretizadas com o MBEq, sendo os demais pavimentos de alvenaria discretizados com o MPT, conforme ilustrado pela *Figura 6*. O aspecto mais crítico dessa modelagem consiste na adequada simulação da interface entre os dois modelos. A *Figura 6(b)* ilustra o procedimento adotado por Lopes (2019), no qual foi utilizada uma barra horizontal rígida na base da barra vertical do MPT que, por sua vez, foi vinculada à barras verticais de pequeno comprimento e articuladas na base as quais foram vinculadas às barras verticais do MBEq.

Figura 6 - (a) Discretização pelo modelo híbrido. (b) Detalhe na ligação entre os modelos



Fonte: Adaptado de LOPES (2019)

O procedimento utilizado por Lopes (2019) na interface entre o MBEq e o MPT foi reproduzido na modelagem realizado neste trabalho.

3 MODELAGEM DE PAREDES DE UM EDIFÍCIO

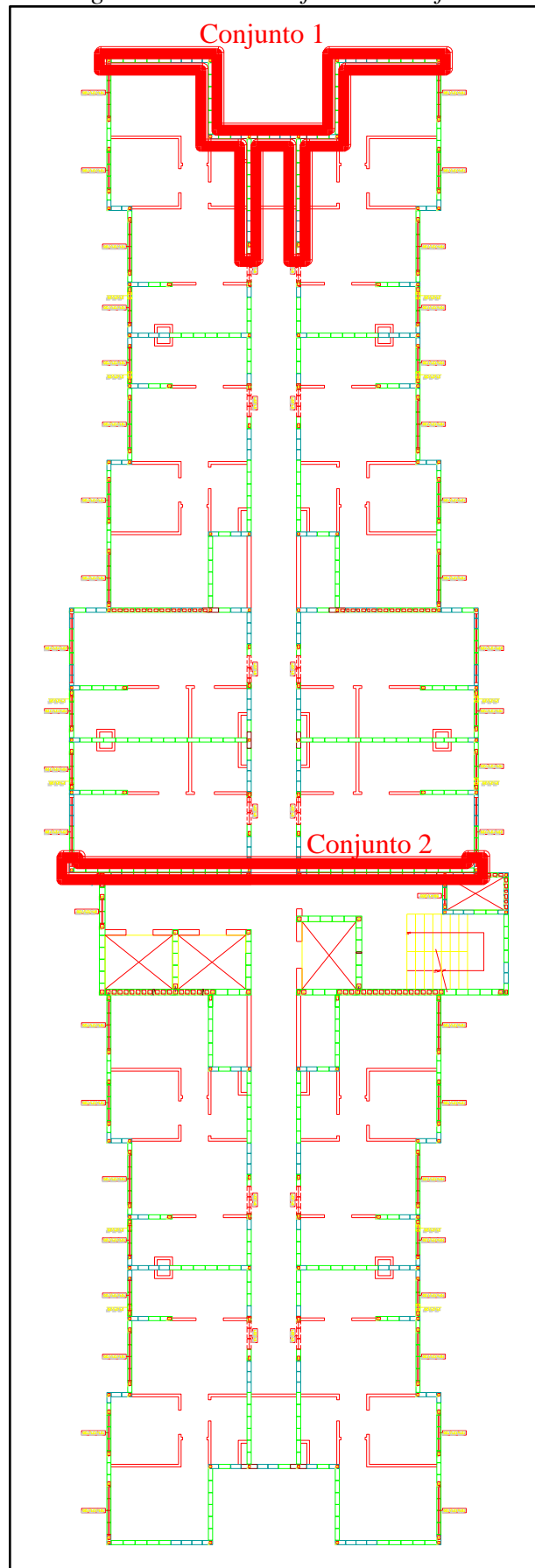
O trabalho foi desenvolvido com base em uma pesquisa exploratória através do desenvolvimento de modelos computacionais de paredes de um edifício real de alvenaria estrutural. Utilizando-se os modelos descritos anteriormente, foram realizadas análises sob diferentes condições de aplicação de forças horizontais nas paredes com o intuito de realizar uma interpretação mais consistente dos resultados obtidos.

3.1 Edifício utilizado na modelagem

A planta de fiada ilustrada pela *Figura 7* representa o pavimento tipo da edificação com 19 pavimentos utilizada no estudo. Os trechos de parede sem representação de bloco correspondem a alvenarias não estruturais nos apartamentos. Em função de sua grande dimensão em planta, optou-se por utilizar uma junta de dilatação na região central com a disposição de duas paredes duplas sem amarração entre si. A parte da edificação modelada neste estudo correspondeu àquela que não contém as paredes da escada e dos poços dos elevadores, disposta acima da junta de dilatação na planta de fiada (Conjunto 2). Das paredes que fazem parte do sistema de contraventamento do edifício, foram escolhidas para a elaboração das análises aquelas destacadas na planta de fiada (Conjunto 1). Vale destacar a particularidade do conjunto de paredes dispostas na fachada do edifício, conferindo maior grau de complexidade para a simulação do seu comportamento e para a análise dos resultados. O outro conjunto de paredes foi escolhido por ser constituído de duas paredes acopladas por uma viga de concreto armado.

Essa edificação teve o projeto estrutural original desenvolvido pelo escritório Cláudio Puga e Engenheiros Associados situado na cidade de São Paulo/SP que, na pessoa do Engenheiro Fernando Lopes de Moraes, gentilmente forneceu todos os dados necessários para a elaboração da modelagem computacional.

Figura 7 - Planta de fiada do edifício

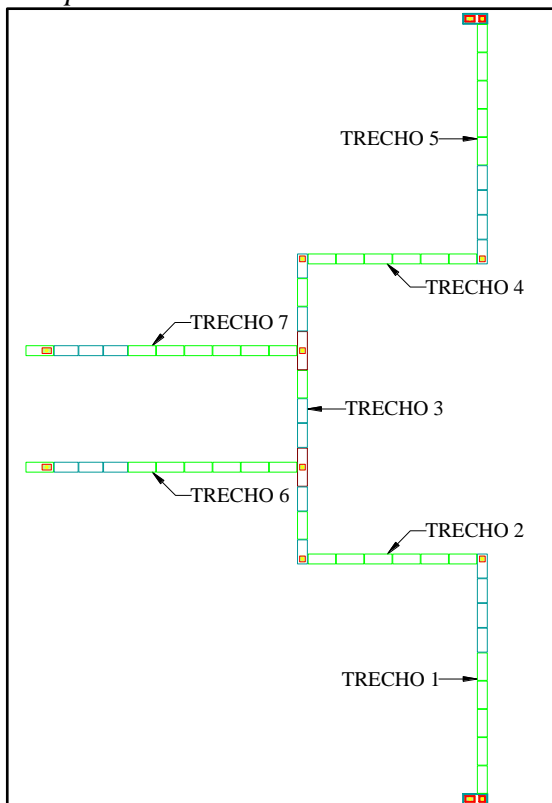


Fonte: Autor (2021)

3.2 Forças horizontais aplicadas e propriedades elásticas adotadas na modelagem

As forças horizontais consideradas nas paredes foram obtidas a partir de um processamento preliminar da estrutura completa do edifício considerando a atuação do vento. Nessa análise inicial foi utilizado o MPT na discretização de todas as paredes de contraventamento. Para o conjunto 1 de paredes, as forças do vento aplicadas na estrutura estão apresentadas na *Tabela 1*, conforme a notação dos trechos apresentada na *Figura 8*.

Figura 8 - Notação dos trechos do conjunto 1 de paredes



Fonte: Autor (2021)

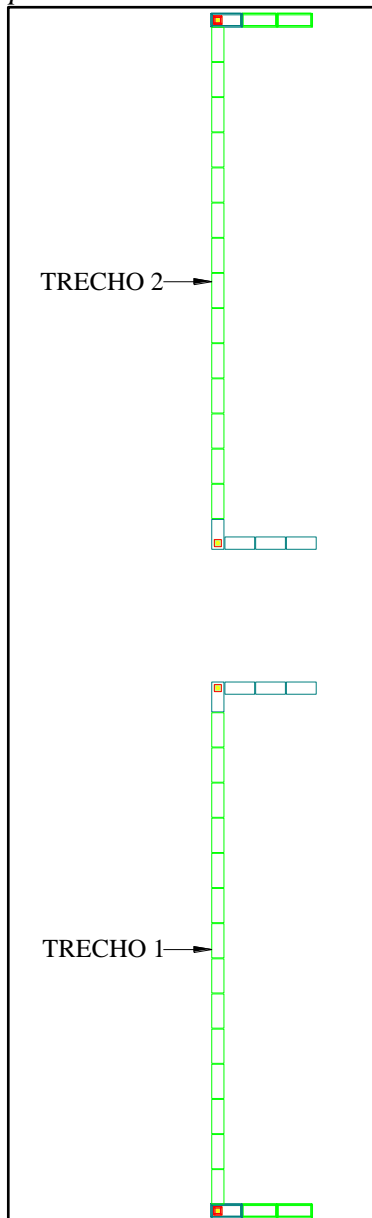
Tabela 1 - Forças horizontais aplicadas ao nível de cada pavimento no conjunto 1

Nível	Forças (kN)	
	Trechos 1 e 5	Trecho 3
20	5,0	19,0
19	10,0	19,0
18	8,0	19,0
17	6,0	27,0
16	6,0	24,2
15	6,0	23,1
14	6,0	20,0
13	5,0	17,8
12	6,0	14,0
11	6,0	13,7
10	4,7	13,0
9	4,4	11,0
8	3,8	9,5
7	3,1	13,0
6	3,0	14,5
5	3,0	13,3
4	2,0	13,6
3	3,0	13,1
2	7,0	14,1
1	20,0	17,7

Fonte: Autor (2021)

Já para o conjunto 2 de paredes, as forças aplicadas e a notação dos trechos estão respectivamente apresentadas na *Figura 9* e *Tabela 2*.

Figura 9 - Notação dos trechos do conjunto 2 de paredes



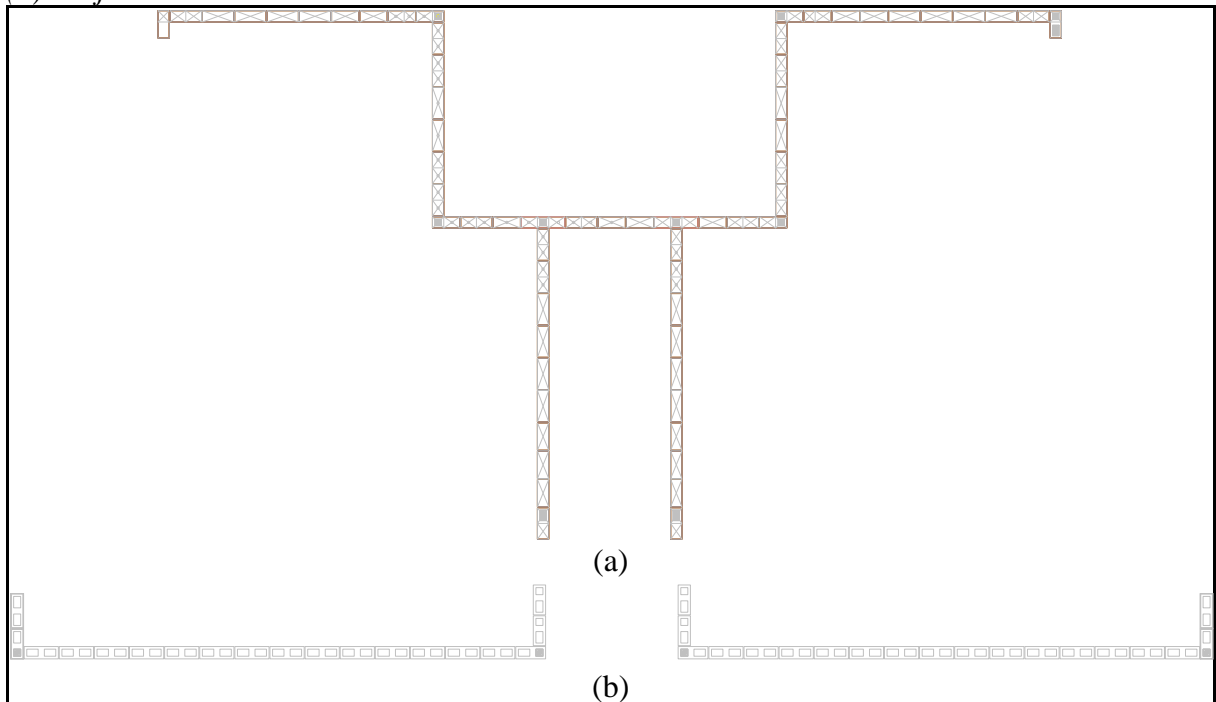
Fonte: Autor (2021)

Tabela 2 - Forças horizontais aplicadas ao nível de cada pavimento no conjunto 2

Nível	Forças (kN)
	Trechos 1 e 2
20	9,5
19	9,5
18	9,5
17	13,5
16	12,1
15	11,6
14	10,0
13	8,9
12	7,0
11	6,8
10	6,5
9	5,5
8	4,7
7	6,5
6	7,3
5	6,7
4	6,8
3	6,6
2	7,0
1	8,9

Fonte: Autor (2021)

Figura 10 - Planta de primeira fiada do conjunto de paredes modeladas do (a) conjunto 1, e (b) conjunto 2



Fonte: Autor (2021)

Os módulos de elasticidade adotados para as barras que compõe os modelos estão indicados na *Tabela 3*, cujas colunas correspondem a:

- E_v : barra vertical associada a alvenaria não grauteada;
- $E_{v,g}$: barra vertical associada a alvenaria grauteada;
- E_h : barra horizontal associada a alvenaria não grauteada;
- $E_{h,g}$: barra horizontal associada a alvenaria grauteada.

Tabela 3 - Dados dos módulos de elasticidade utilizados (continua)

Nível	E_v (MPa)	$E_{v,g}$ (MPa)	E_h (MPa)	$E_{h,g}$ (MPa)
20	2816	5280	1408	2640
19	2816	5280	1408	2640
18	2816	5280	1408	2640
17	2816	5280	1408	2640
16	3784	7040	1892	3520
15	3784	7040	1892	3520
14	4488	8448	2244	4224
13	4488	8448	2244	4224
12	5632	10560	2816	5280
11	5632	10560	2816	5280

Tabela 3 - Dados dos módulos de elasticidade utilizados (continuação)

Nível	E_v (MPa)	$E_{v,g}$ (MPa)	E_h (MPa)	$E_{h,g}$ (MPa)
10	6776	12672	3388	6336
9	6776	12672	3388	6336
8	6776	12672	3388	6336
7	7920	14784	3960	7392
6	7920	14784	3960	7392
5	9060	16000	4532	8000
4	906	16000	4532	8000
3	10208	16000	5104	8000
2	10208	16000	5104	8000
1	11264	16000	5632	8000
Térreo	11264	16000	5632	8000

Fonte: Autor (2021)

3.3 Modelagem computacional realizada

Em função da assimetria de rigidez na direção de aplicação das forças horizontais, as modelagens realizadas para o conjunto 1 de paredes foram classificadas em duas categorias:

- Modelos com aplicação da força horizontal nas barras verticais que simulam as paredes, ocasionando efeitos de torção do conjunto proveniente da rotação do plano de cada pavimento em torno do eixo vertical;
- Modelos com força horizontal aplicada no centro de rigidez do conjunto de paredes, eliminando, dessa forma, o surgimento da torção anteriormente mencionada.

No caso do conjunto 2, verificou-se uma sutil torção com a aplicação das forças horizontais nas barras verticais que simulam as paredes. A presença da flange em uma das extremidades de cada parede implicou num pequeno deslocamento do centro de rigidez/torção em relação à direção do seu comprimento em planta que, por sua vez, coincide com a direção de aplicação da força horizontal. Os resultados iniciais obtidos indicaram a ocorrência de rotações no plano dos pavimentos muito pequenas, tornando possível desconsiderar seus efeitos nas análises realizadas para esse conjunto.

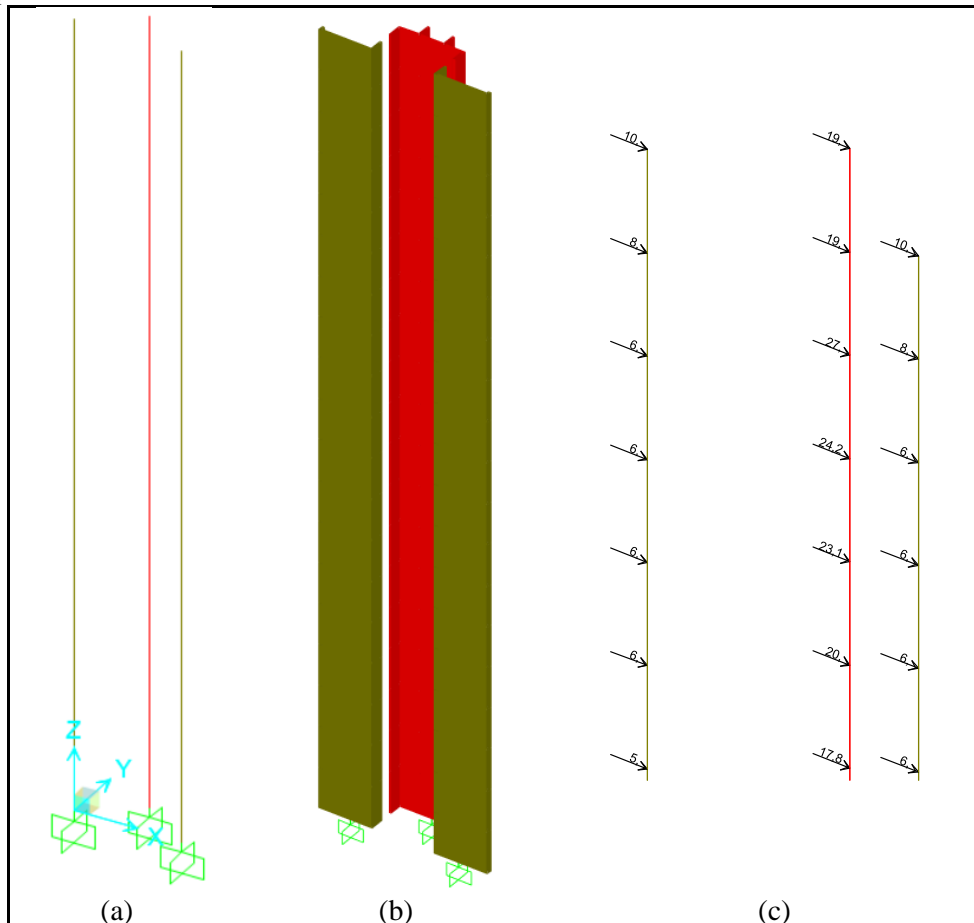
3.3.1 Descrição das modelagens desenvolvidas para o conjunto 1 de paredes de contraventamento considerando os efeitos de torção

A modelagem computacional foi desenvolvida com emprego de todos modelos anteriormente descritos: MBI, MPT, MBEq e MHbr. Em função da maior complexidade desse conjunto de paredes, foram definidas variações na modelagem com MPT e MBEq de modo a avaliar mais criteriosamente a simulação do comportamento do conjunto.

3.3.1.1 Utilização do Modelo de Barras Isoladas com consideração dos efeitos da torção (MBI-CT-01)

Essa primeira modelagem foi elaborada de acordo com a descrição apresentada no item 2.1. A *Figura 11* ilustra a discretização do conjunto de paredes com indicação do posicionamento e da seção transversal para as barras verticais, e da aplicação das forças horizontais. Observa-se na figura a presença das flanges com comprimento $6t$ característico para esse tipo de modelagem.

Figura 11 - Aplicação do Modelo de Barras Isoladas na discretização do conjunto 1 de paredes MBI-CT-01: (a) Barras verticais posicionadas no CG de cada seção; (b) Representação da seção transversal das paredes; e (c) Aplicação das forças horizontais nas barras verticais ao nível dos pavimentos.



Com relação ao efeito de diafragma rígido, o software utilizado (SAP2000) tem implementado um comando denominado “*constraint*” que considera a compatibilização dos deslocamentos em cada nível dos pavimentos. Ao acionar esse comando, é solicitado que sejam selecionados nós no correspondente pavimento que terão os deslocamentos compatibilizados. Uma vez que os nós selecionados estejam associados às barras verticais, o software calcula automaticamente a posição do centro de rigidez/torção daquele conjunto de paredes, associando-o ao nó mestre do correspondente pavimento. Dessa forma, os deslocamentos dos nós selecionados são, também, automaticamente compatibilizados com os deslocamentos ocorridos no nó mestre. Esse procedimento foi realizado em todas as modelagens adiante realizadas pelo MBI e em alguns modelos realizados pelo MPT e MBEq, tendo sido compatibilizados os deslocamentos associados às duas translações no plano do pavimento e à rotação em torno do eixo perpendicular a esse plano, simulando, dessa forma, o efeito de diafragma rígido das várias lajes.

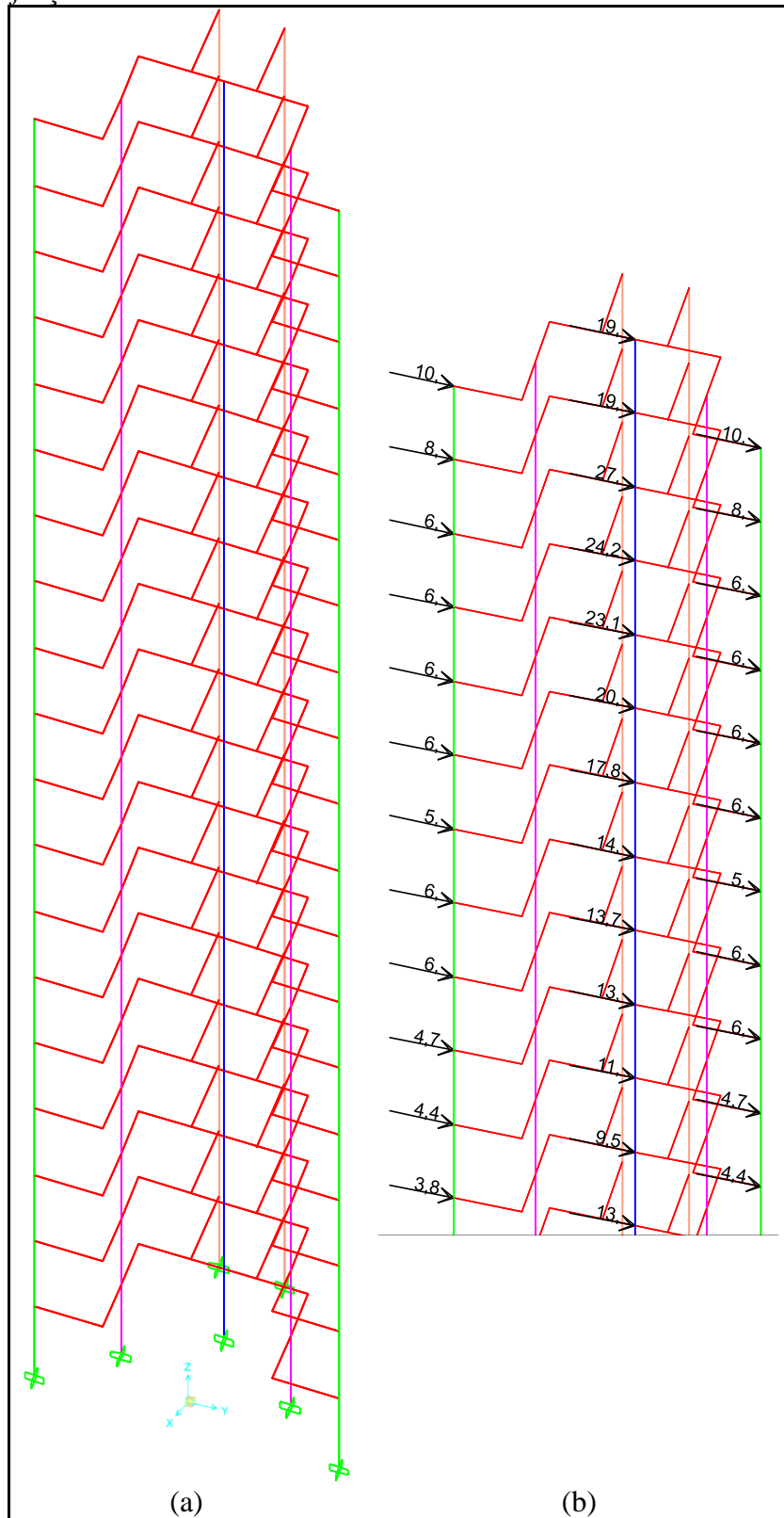
Ao adotar esse procedimento na simulação do diafragma rígido, qualquer efeito de torção fica automaticamente considerado na modelagem. Nos casos em que a direção da resultante das forças horizontais aplicadas no pavimento não passar pelo centro de rigidez, ocorrerá translação e rotação dos pavimentos surgindo torção no conjunto de paredes ao longo da altura da edificação. Uma vez que as forças horizontais foram aplicadas nas barras verticais, caracteriza-se a excentricidade da resultante em relação ao centro de rigidez, ocorrendo, dessa forma, a torção do conjunto de paredes com o emprego do MBI.

3.3.1.2 Utilização do Modelo de Pórtico Tridimensional com consideração dos efeitos da torção (MPT-CT-01)

A modelagem foi elaborada de acordo com a descrição apresentada no item 2.2, em que a *Figura 12(a)* ilustra a disposição final das barras verticais flexíveis e horizontais rígidas para o conjunto 1 de paredes de contraventamento.

Para a simulação do efeito de diafragma rígido, foi utilizado o comando “*constraint*” anteriormente descrito. Conforme ilustrado pela *Figura 12(b)*, as forças horizontais foram aplicadas diretamente nas barras verticais, ficando, portanto, definida a excentricidade entre a resultante dessas forças em cada pavimento e o centro de rigidez do conjunto de paredes, ocasionando o surgimento de efeitos de torção ao longo da altura do edifício.

Figura 12 - (a) Discretização do conjunto 1 e (b) aplicação das forças do vento no modelo MPT-CT-01



Fonte: Autor (2021)

3.3.1.3 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes considerando os efeitos de torção (MBEq-CT-01)

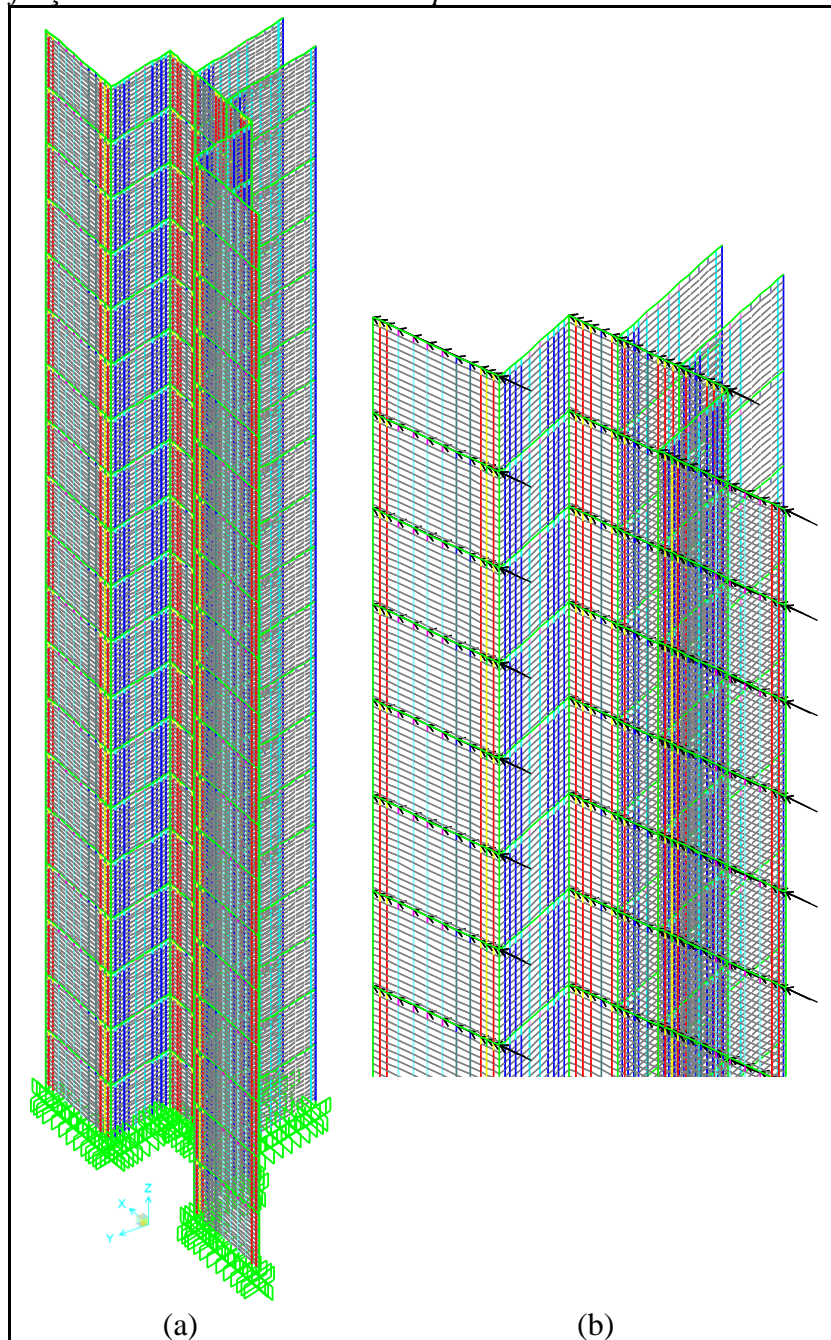
A modelagem foi elaborada de acordo com a descrição apresentada no item 2.3. A *Figura 13* ilustra a discretização do conjunto 1 de paredes e a forma de aplicação das forças horizontais nos pavimentos. O emprego desse modelo facilitou a incorporação do acréscimo de rigidez ocasionado pelo grauteamento, tendo sido atribuídas adequadas propriedades elásticas às barras verticais e horizontais, cujos valores utilizados constam na *Tabela 3*. Esse aspecto pode ser observado na *Figura 13* pela diferenciação na coloração das barras. Da mesma forma, fica facilitada a consideração da ortotropia com a atribuição de propriedades elásticas diferentes para as barras horizontais, com valores adotados também constantes na *Tabela 3*.

É importante enfatizar que a discretização foi refinada nas proximidades das extremidades de cada parede com o posicionamento de barras verticais em cada vazado dos blocos, resultando no espaçamento horizontal igual a 20 cm, enquanto que na porção central das paredes essas barras foram posicionadas no centro de gravidade dos blocos, resultando em espaçamento igual a 40 cm. Esse procedimento foi adotado para minimizar o esforço computacional necessário ao processamento. As forças horizontais em cada pavimento também foram aplicadas diretamente nas paredes, considerando seus valores distribuídos entre as barras verticais dos correspondentes trechos, conforme ilustrado pela *Figura 13(b)*. Semelhantemente às modelagens anteriores, os efeitos de torção ao longo da altura dos pavimentos se farão presentes nos resultados a serem obtidos.

3.3.1.4 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes considerando os efeitos de torção - Variações 01 e 02 (MBEq-CT-02 e MBEq-CT-03)

Essas novas variações foram idealizadas com o intuito de avaliar um possível efeito de sobreposição de flanges no comportamento do conjunto de paredes, cuja discussão foi realizada nos itens seguintes. Dessa forma, o MBEq-CT-02 corresponde à discretização de todo o conjunto de paredes com aplicação da força horizontal apenas nos trechos 1 e 5, enquanto que o modelo MBEq-CT-03 corresponde à discretização de todo o conjunto de paredes com aplicação da força apenas no trecho 3.

Figura 13 - (a) Discretização do conjunto 1 e (b) aplicação das forças do vento no modelo MBEq-CT-01



Fonte: Autor (2021)

3.3.2 Descrição das modelagens desenvolvidas para o conjunto 1 de paredes de contraventamento desconsiderando os efeitos de torção

Com o intuito de avaliar se os efeitos de torção apresentam influência significativa na distribuição de esforços entre os trechos do conjunto 1 de paredes, foram elaboradas novas modelagens com a inclusão de procedimentos para suprimir a rotação ao nível dos pavimentos. Julga-se pertinente essa nova avaliação, uma vez que o efeito de diafragma rígido das lajes em

edifícios mobiliza simultaneamente todas as paredes e/ou conjuntos de paredes que constituem o sistema de contraventamento. Dessa forma, é possível considerar que a mobilização simultânea de todas as paredes de contraventamento minimiza consideravelmente a rotação do pavimento, podendo alterar a distribuição de esforços quando comparado à situação de livre rotação avaliada no item 3.3.1.

Conforme descrito no item 3.3.1.1, o SAP2000 determina automaticamente a posição do centro de rigidez/torção (CR) para um conjunto de barras, considerando a seção transversal e a rigidez de cada uma dessas barras. Esse procedimento pode ser realizado manualmente considerando as *Equações (1) e (2)* seguintes:

$$\bar{x} = \frac{\sum R_{yi} x_{ref,i}}{\sum R_{yi}} \quad (1)$$

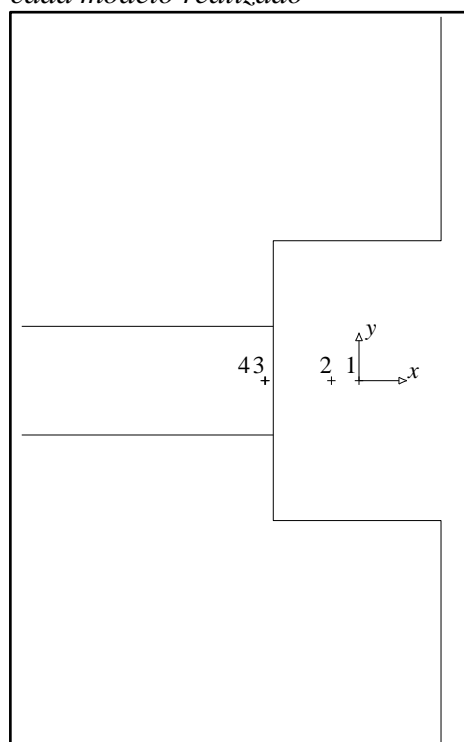
$$\bar{y} = \frac{\sum R_{xi} y_{ref,i}}{\sum R_{xi}} \quad (2)$$

Em que:

- R_{xi} , R_{yi} são as rigidezes da parede i à flexão na direção x e y , respectivamente;
- $x_{ref,i}$, $y_{ref,i}$ são as distâncias na direção x e y , respectivamente, de um ponto de referência à parede i ;
- \bar{x} , \bar{y} são as distâncias do Centro de Rigidez de uma edificação a partir de um ponto de referência.

Para o caso do MBI, foi realizado o cálculo manual que, constatou-se não coincidir com a posição obtida computacionalmente. No caso dos modelos MPT e MBEq, não foi realizado o cálculo manual, considerando-se apenas a posição obtida computacionalmente por tentativas. Constatou-se, entretanto, que as correspondentes posições foram diferentes para os três modelos utilizados, conforme ilustrado pela *Figura 14*, cujos valores obtidos são referentes ao centro de gravidade (CG) e constam na *Tabela 4*. A explicação para a obtenção de diferentes coordenadas para o centro de rigidez pode estar relacionada às diferentes formas de consideração das flanges nos modelos. O MBI adota flanges de comprimento máximo igual a $6t$ e incorporadas à seção transversal da barra vertical, o MPT tem as flanges simuladas pelas barras horizontais rígidas vinculadas às barras verticais flexíveis, enquanto que o MBEq tem a simulação da flange realizada pela distribuição das barras verticais e horizontais, ambas flexíveis. Nessa mesma sequência descrita, pode-se considerar que fica caracterizada uma tendência de refinamento na representação das flanges na modelagem.

Figura 14 - Localização do CR para cada modelo realizado



Fonte: Autor (2021)

Tabela 4 - Coordenadas do CR de cada modelo, tendo como referência o CG das paredes

Ponto	Modelo	\bar{x} (cm)	\bar{y} (cm)
--	Cálculo manual	-56,29	0,0000
1	Centro de Gravidade	0,0000	0,0000
2	MBI	-41,94	0,0000
3	MBEq	-142,06	0,0000
4	MPT	-143,31	0,0000

Fonte: Autor (2021)

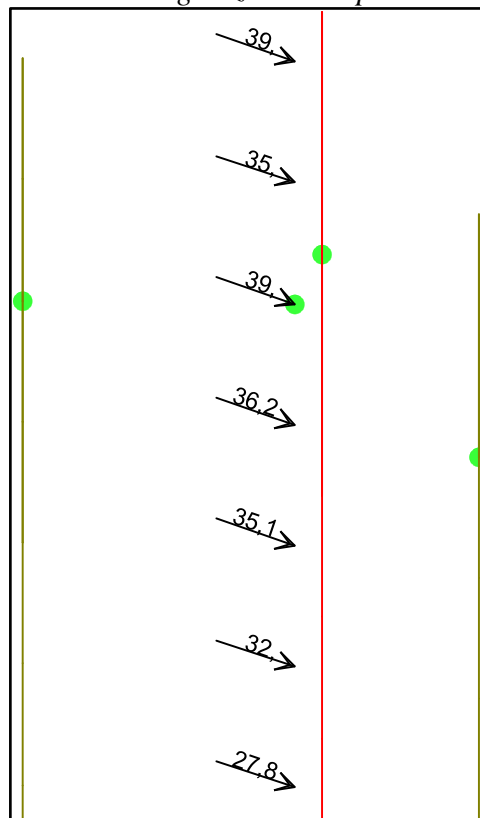
3.3.2.1 Utilização do Modelo de Barras Isoladas desconsiderando os efeitos de torção (MBI-ST-01)

Essa modelagem é idêntica àquela descrita para o MBI-CT-01, distinguindo-se pela substituição das forças horizontais em cada parede por sua resultante aplicada na posição do centro de rigidez (CR) do conjunto de paredes. Vale ressaltar que os procedimentos adotados para consideração dos efeitos de diafragma rígido também continuaram idênticos. A Figura 15 ilustra parte das 3 barras do conjunto 1 de paredes, destacando-se as forças resultantes em cada pavimento e os nós das barras e do CR no 17º pavimento, cujo valor foi obtido pela soma das forças consideradas em cada uma das três barras verticais:

$$F_{H,CR,17} = 10 \text{ kN} + 19 \text{ kN} + 10 \text{ kN} = 39 \text{ kN}$$

A Tabela 5 contém os valores das forças resultantes aplicadas em cada um dos pavimentos do modelo.

Figura 15 - Nós do 17º pavimento ligados pelo constraint e forças devidas ao vento aplicadas no Centro de Rigidez de cada pavimento



Fonte: Autor (2021)

Tabela 5 - Forças horizontais resultantes aplicadas no centro de rigidez de cada pavimento

Nível	Força resultante (kN)	Nível	Força resultante (kN)	Nível	Força resultante (kN)
20	29,00	13	27,78	6	20,54
19	39,00	12	26,00	5	19,34
18	35,00	11	25,61	4	17,62
17	39,01	10	22,49	3	19,11
16	36,21	9	19,79	2	28,07
15	35,13	8	17,04	1	57,71
14	32,02	7	19,20		

Fonte: Autor (2021)

3.3.2.2 Utilização do Modelo de Pórtico Tridimensional desconsiderando os efeitos de torção (MPT-ST-01)

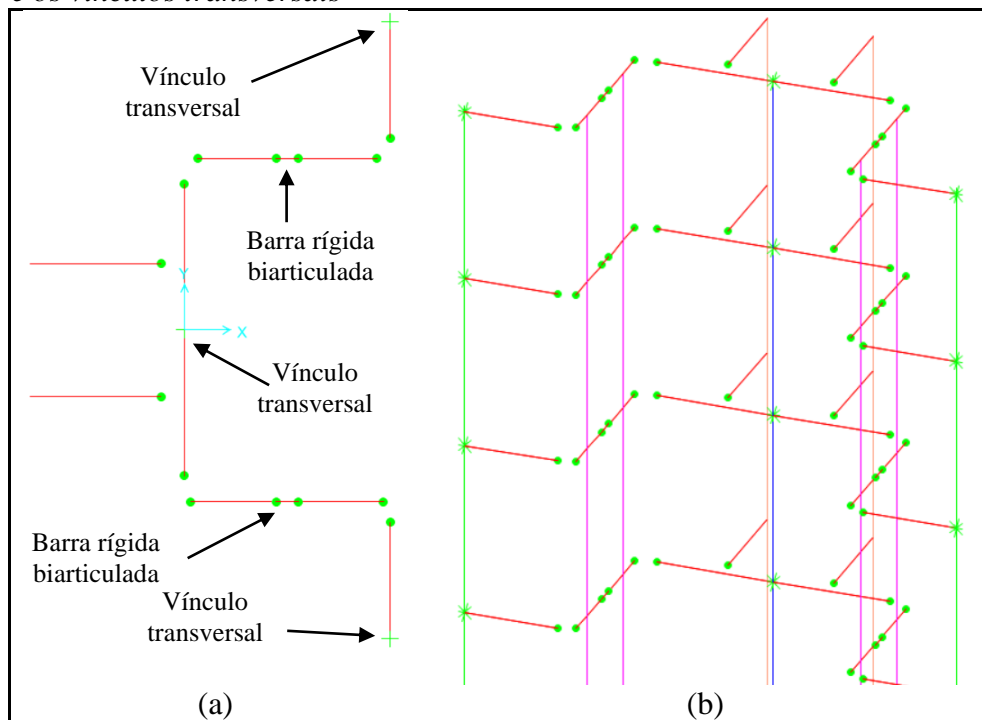
Da mesma forma que no caso anterior, o modelo MPT-ST-01 é idêntico ao modelo MPT-CT-01 distinguindo-se pela aplicação no CR da resultante das forças atuantes em cada uma das três paredes do conjunto 1.

Conforme comentado anteriormente, as *Equações (1) e (2)* não resultam em valores consistentes para as coordenadas do CR no caso desse modelo. Ao modo peculiar de representação dos efeitos das flanges no MPT, adicione-se a articulação nas extremidades das barras horizontais rígidas, aspectos estes que não estão contemplados nas equações apresentadas. Dessa forma, e conforme comentado anteriormente, a posição do CR foi determinada computacionalmente por tentativas, isto é, a posição do CR foi alterada a cada processamento do edifício até ele apresentar baixíssima rotação.

3.3.2.3 Utilização do Modelo de Pórtico Tridimensional desconsiderando os efeitos de torção - Variação 01 (MPT-ST-02)

Em razão dos resultados preliminares obtidos com os modelos MBEq-CT-01, MPT-ST-01 e MBEq-ST-01, idealizou-se essa 1ª variação do MPT-ST-01 denominada MPT-ST-02. Nesta variação, as forças horizontais voltaram a ser aplicadas nas barras verticais representativas das paredes. Com o objetivo de eliminar o provável efeito de sobreposição de flanges identificado nos resultados preliminares, os trechos de parede que representam as flanges foram divididos em dois. Para tornar efetiva a divisão da flange em duas partes, além da consideração de duas barras verticais flexíveis, ao invés de apenas uma, foi necessário também promover a ligação entre essas barras com barras horizontais rígidas articuladas nas extremidades (biarticulada), conforme ilustrado pela *Figura 16*. Finalmente, para eliminação dos efeitos de torção do conjunto, foram utilizados vínculos ao nível dos pavimentos com impedimento dos deslocamentos na direção ortogonal à direção de aplicação das forças horizontais (direção do eixo x na *Figura 16*). Para a simulação do efeito de diafragma rígido continuaram sendo utilizados os recursos do software para garantir a compatibilização dos deslocamentos ao nível dos pavimentos.

Figura 16 - (a) Vista superior do pavimento e (b) vista tridimensional da discretização do modelo MPT-ST-02, ilustrando as articulações adicionais e os vínculos transversais



Fonte: Autor (2021)

3.3.2.4 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes desconsiderando os efeitos de torção - (MBEq-ST-01)

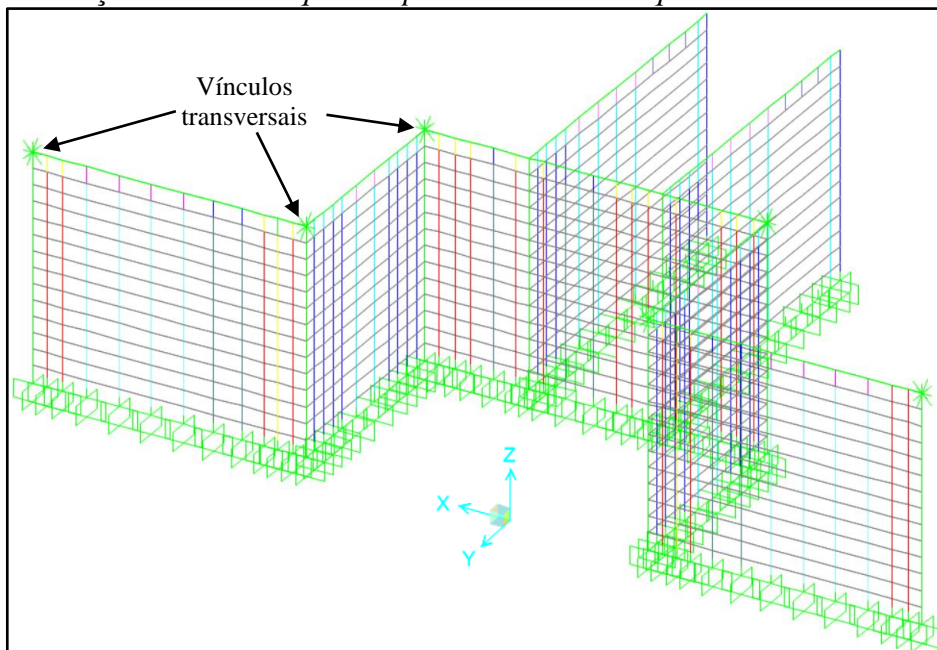
Comparando-se esse modelo ao MBEq-CT-01, a diferença consiste na forma de aplicação das forças horizontais, que agora foram introduzidas na posição do centro de rigidez do conjunto. Tal como no caso do MPT-ST-01, as *Equações (1) e (2)* não se mostraram adequadas para determinação do CR, sendo uma das possíveis justificativas a presença da articulação das barras horizontais na interseção entre as paredes. Assim sendo, a posição do CR foi determinada computacional por tentativas cujo resultado obtido consta na *Tabela 4*, e está ilustrado pela *Figura 14*.

3.3.2.5 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes desconsiderando os efeitos de torção - Variação 01 (MBEq-ST-02)

De modo a avaliar a real situação de solicitação das paredes de um edifício, no qual as forças horizontais são transmitidas a partir da interação entre a laje e as paredes, idealizou-se essa variação na modelagem denominada MBEq-ST-02. Dessa forma, as forças horizontais foram aplicadas no nível dos pavimentos e ao longo do comprimento das paredes. Para simular

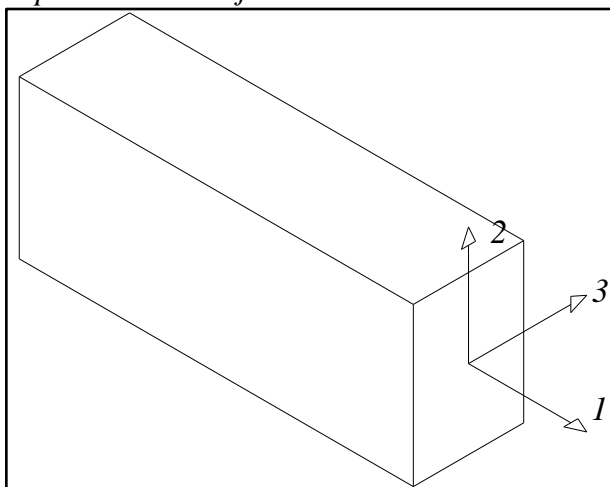
a rigidez da laje, que reduz consideravelmente os efeitos de torção do conjunto de paredes, foram introduzidos vínculos transversais impedindo os deslocamentos na direção do eixo y , ilustrado pela *Figura 17*. A compatibilização dos deslocamentos ao nível dos pavimentos foi simulada, dessa vez, pelo enrijecimento das barras horizontais que representam as cintas no topo das paredes. Essas barras apresentam dimensões da seção transversal iguais $14\text{ cm} \times 20\text{ cm}$, e tiveram a inércia relativa ao eixo 2, ilustrado pela *Figura 18*, multiplicada pelo fator 100.000. Dessa forma, o efeito de diafragma rígido na minimização dos efeitos de torção e na compatibilização dos deslocamentos ao nível dos pavimentos, foi simulado com a introdução dos vínculos transversais e do enrijecimento das barras horizontais no topo das paredes. Tal procedimento foi adotado, pois, uma vez que as forças horizontais foram aplicadas no topo das paredes, não seria suficiente o uso exclusivo dos recursos do software, na simulação do diafragma rígido, para eliminar os efeitos de torção do conjunto de paredes.

Figura 17 - Vista tridimensional da configuração geométrica e de vinculação das barras que compõe o modelo MBEq-ST-02



Fonte: Autor (2021)

Figura 18 - Orientação dos eixos da seção transversal das barras horizontais que representam as lajes



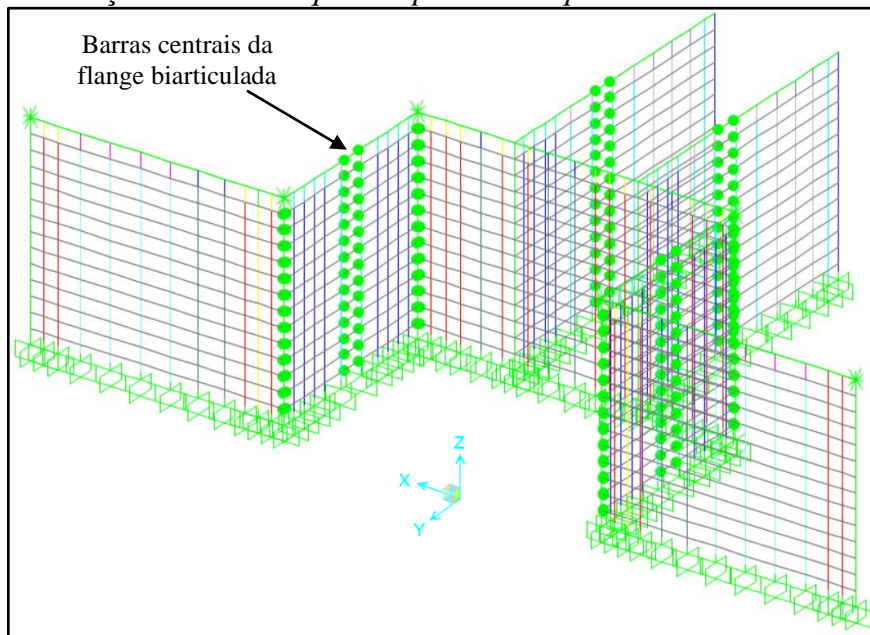
Fonte: Autor (2021)

3.3.2.6 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes desconsiderando os efeitos de torção - Variação 02 (MBEq-ST-03)

Essa nova variação na modelagem, denominada MBEq-ST-03, também teve a aplicação das forças horizontais nas paredes ao nível de cada pavimento, a consideração dos vínculos transversais e o enrijecimento das barras horizontais das paredes ao nível de cada pavimento. A variação consistiu na introdução de articulações nas extremidades das barras horizontais posicionadas na parte central das paredes que simulam as flanges, trechos 2 e 4 do conjunto 1 de paredes. Esse procedimento foi definido com o intuito de eliminar um possível efeito de sobreposição de flanges, conforme mencionado na descrição do modelo MPT-ST-02 e MPT-ST-03.

Uma vez articulada a laje, o diafragma rígido foi simulado com a utilização do recurso do software de compatibilização dos deslocamentos. Nesse modelo, somente o deslocamento na direção da alma das paredes foi compatibilizado. Isso é justificado, pois os vínculos transversais garantem a compatibilização dos deslocamentos na direção paralela à direção da alma. A ilustração desse modelo segue na *Figura 19*.

Figura 19 - Vista superior da configuração geométrica e de vinculação das barras que compõe o MBEq-ST-03



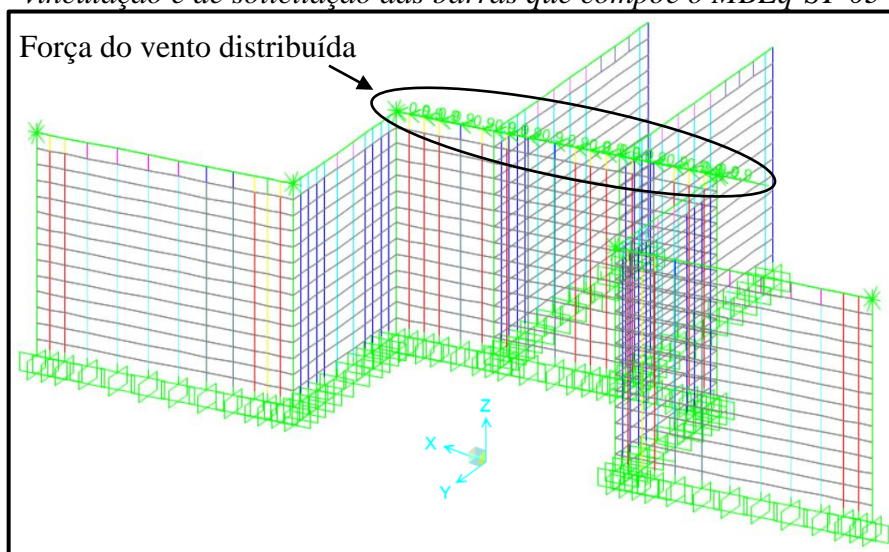
Fonte: Autor (2021)

3.3.2.7 Utilização do Modelo de Barras Equivalentes desconsiderando os efeitos de torção - Variações 03, 04 e 05 (MBEq-ST-04, MBEq-ST-05 e MBEq-ST-06)

Essas novas variações foram idealizadas com o intuito de avaliar um possível efeito de sobreposição de flanges no comportamento do conjunto de paredes. Dessa forma, o MBEq-ST-04 corresponde à discretização de todo o conjunto de paredes com aplicação da força horizontal apenas nos trechos 1 e 5, enquanto que o modelo MBEq-ST-05 corresponde à discretização de todo o conjunto de paredes com aplicação da força apenas no trecho 3. Para o modelo MBEq-ST-06, todo o conjunto 1 de paredes foi discretizado, mas as forças foram aplicadas somente no trecho 1.

Foram utilizados os vínculos transversais e o procedimento de enrijecimento das barras horizontais das paredes ao nível de cada pavimento. A *Figura 20* ilustra o modelo MBEq-ST-05, com destaque para as forças horizontais aplicadas somente no trecho 3.

Figura 20 - Vista tridimensional da configuração geométrica, de vinculação e de solicitação das barras que compõe o MBEq-ST-03



Fonte: Autor (2021)

3.3.3 Descrição das modelagens desenvolvidas para o conjunto 2 de paredes de contraventamento desconsiderando os efeitos de torção

Para o conjunto 2 de paredes de contraventamento, foram somente realizadas modelagens desconsiderando os efeitos de torção. Para todos esses modelos, as forças provenientes da ação do vento foram aplicadas nas barras representativas de cada parede. Esse conjunto de paredes foi discretizado segundo os modelos MBI, MPT e MBEq, conforme pode ser visto na *Figura 21*.

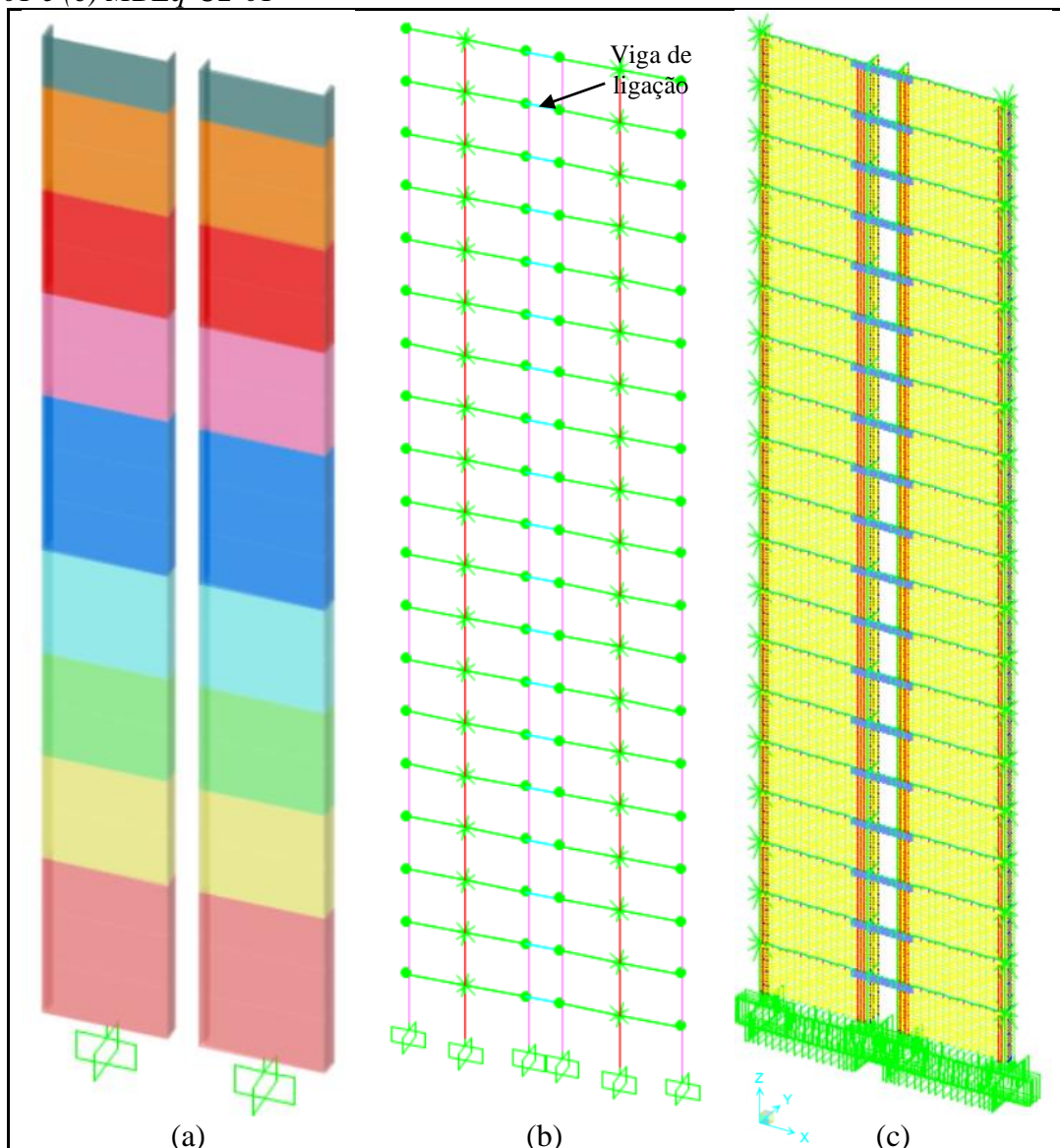
Quanto à discretização pelo MBI, o modelo MBI-C2-01 foi modelado de forma análoga ao MBI-CT-01, mas segundo a planta de fiada mostrada na *Figura 10(b)*. A simulação do diafragma rígido se deu com a utilização do recurso do software de compatibilização dos deslocamentos.

A discretização pelo MPT se deu de modo análogo ao realizado no MPT-ST-02. Nele, o diafragma rígido foi simulado com a utilização do recurso do software de compatibilização dos deslocamentos. Foram usados, também, vínculos transversais nas barras verticais ao nível de cada pavimento, para evitar a torção. A ligação entre os trechos 1 e 2 foi feita com a utilização de uma barra representando o lintel/viga de ligação.

Por fim, quanto ao MBEq, a estrutura foi travada transversalmente com a inserção de vínculos ao nível de cada pavimento. As barras ao nível da laje não foram enrijecidas, de modo que a simulação do diafragma rígido foi garantida pelo recurso do software de compatibilização de deslocamentos. A viga de ligação entre as paredes foi minuciosamente discretizada, pois,

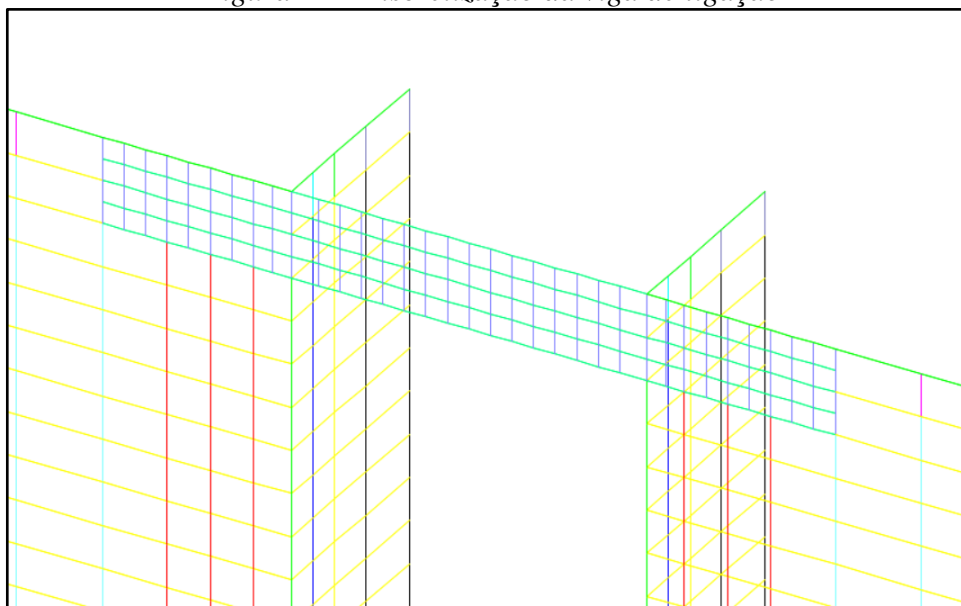
segundo Barbosa (2017), a discretização dessa viga como uma única barra é uma forma inadequada de representá-la. Essa viga apresenta seção transversal de dimensões 14×40 cm, e sua discretização foi feita com cinco barras horizontais, de seção transversal 14×8 cm espaçadas verticalmente a cada 10 cm. Além disso, foram consideradas barras verticais com seção transversal 14×10 cm distribuídas ao longo do comprimento da viga e com espaçamento horizontal de 10 cm. O detalhe dessa discretização pode ser vista na Figura 22.

Figura 21 - Discretização do conjunto 2 pelos modelos (a) MBI-C2-01, (b) MPT-C2-01 e (c) MBEq-C2-01



Fonte: Autor (2021)

Figura 22 - Discretização da viga de ligação



Fonte: Autor (2021)

3.3.4 Descrição resumida das modelagens elaboradas

A *Tabela 6* representa a descrição resumida das várias modelagens elaboradas. A coluna intitulada “Aplicação da força horizontal” distingue a forma de aplicação das forças horizontais ao nível dos pavimentos, se no Centro de Rigidez (C.R.) ou nas barras verticais que simulam as paredes.

A coluna “Simulação do diafragma rígido” retrata a forma como essa simulação foi realizada, se utilizando prontamente os recursos computacionais do software de compatibilização dos deslocamentos ou se fazendo uso de algum dos seguintes artifícios de modelagem: (1) vínculos transversais ao nível de cada pavimento, e (2) enrijecimento das barras horizontais das paredes (cintas) ao nível dos pavimentos.

A coluna “Trechos com aplicação das forças horizontais” indicada em quais trechos do conjunto 1 foram inseridas as forças provenientes do vento.

A coluna “Divisão das flanges” identifica se foi adotado o procedimento de divisão das flanges em duas partes, conforme descrito nos itens anteriores.

Tabela 6 - Descrição resumida das modelagens elaboradas

Denominação	Aplicação da força horizontal		Simulação do diafragma rígido		Trechos com aplicação das forças horizontais	Divisão das flanges	
	C.R.	Paredes	Recurso software	Artifício modelagem		Sim	Não
MBI-CT-01	--	×	×	--	1, 3, 5	--	×
MPT-CT-01	--	×	×	--	1, 3, 5	--	×
MBEq-CT-01	--	×	--	(2)	1, 3, 5	--	×
MBEq-CT-02	--	×	--	(2)	1, 5	--	×
MBEq-CT-03	--	×	--	(2)	3	--	×
MBI-ST-01	×	--	×	--	1, 3, 5	--	×
MPT-ST-01	×	--	×	--	1, 3, 5	--	×
MPT-ST-02	--	×	×	(1)	1, 3, 5	×	--
MBEq-ST-01	×	--	×	--	1, 3, 5	--	×
MBEq-ST-02	--	×	--	(1), (2)	1, 3, 5	--	×
MBEq-ST-03	--	×	×	(1), (2)	1, 3, 5	×	--
MBEq-ST-04	--	×	--	(1), (2)	1, 5	--	×
MBEq-ST-05	--	×	--	(1), (2)	3	--	×
MBEq-ST-06	--	×	--	(1), (2)	1	--	×
MBI-C2-01	--	×	×	--	1, 2	--	×
MPT-C2-01	--	×	×	(1)	1, 2	--	×
MBEq-C2-01	--	×	×	(1)	1, 2	--	×

Fonte: Autor (2021)

3.4 Obtenção dos esforços atuantes nas paredes de contraventamento

Uma vez completamente processados os modelos descritos no item 3.3, seguiu-se para a obtenção dos resultados inerentes a cada um.

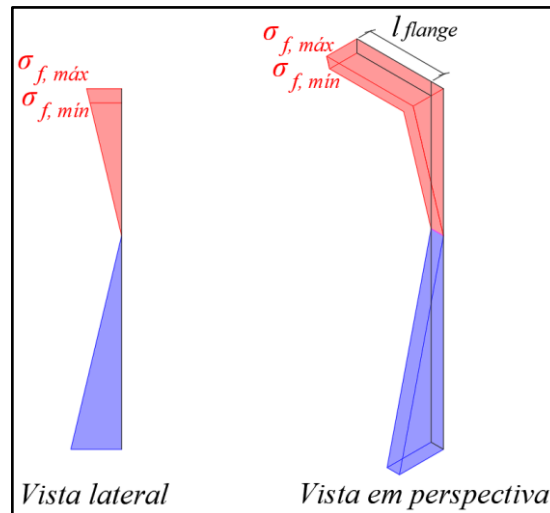
3.4.1 Modelo de Barras Isoladas

3.4.1.1 Momentos fletores

Os esforços obtidos pelo Modelo de Barras Isoladas precisam sofrer um tratamento. Isso porque, nesse método de modelagem, a seção transversal da parede apresenta flanges. A parcela de momento gerada por essas flanges deve ser desconsiderada. Desse modo, é possível comparar esse resultado com o MPT, cuja seção é retangular.

Analisando a *Figura 23*, observa-se que a parcela das tensões normais que deve ser desconsiderada do cálculo do momento fletor solicitante da parede é o trecho de comprimento l_{flange} .

Figura 23 - Vistas da seção transversal do trecho 1 do conjunto 1 submetida às tensões normais



Fonte: Autor (2021)

Na *Figura 23*, o volume azulado corresponde ao bloco de tensões normais de tração; e o avermelhado, ao bloco de tensões normais de compressão.

A *Figura 23* exemplifica a seção transversal do trecho 1, porém esse mesmo procedimento é válido para o trecho 3. A ressalva que se faz é que o trecho 3 apresenta quatro flanges. A parcela de momento gerada pelas tensões normais em cada uma dessas flanges deve ser desconsiderada.

O equacionamento matemático que representa esse desconto está expresso na *Equação (3)*.

$$\Delta M_j = \sum_{i=1}^n F_{R,ji} d_{ji} \quad (3)$$

Em que:

- ΔM_j : momento fletor a ser descontado proveniente das flanges no j-ésimo pavimento;
- $F_{R,ji}$: força resultante equivalente da integração do bloco de tensão correspondente à i-ésima flange da seção transversal analisada do j-ésimo pavimento. Calculada a partir da *Equação (4)* e *Figura 23*;

• d_{ji} : distância entre o ponto de aplicação da $F_{R,i}$ e a Linha Neutra da seção transversal do j-ésimo pavimento.

$$F_{R,ji} = \frac{(\sigma_{f,mín,ji} + \sigma_{f,máx,ji})e_{par}l_{flange,ji}}{2} \quad (4)$$

Em que:

- $\sigma_{f,mín,ji}$: mínima tensão normal que atua sobre a i-ésima flange do j-ésimo pavimento;
- $\sigma_{f,máx,ji}$: máxima tensão normal que atua sobre a i-ésima flange do j-ésimo pavimento;
- e_{par} : espessura da parede;
- $l_{flange,ji}$: comprimento da i-ésima flange do j-ésimo pavimento.

3.4.1.2 Esforços cortantes

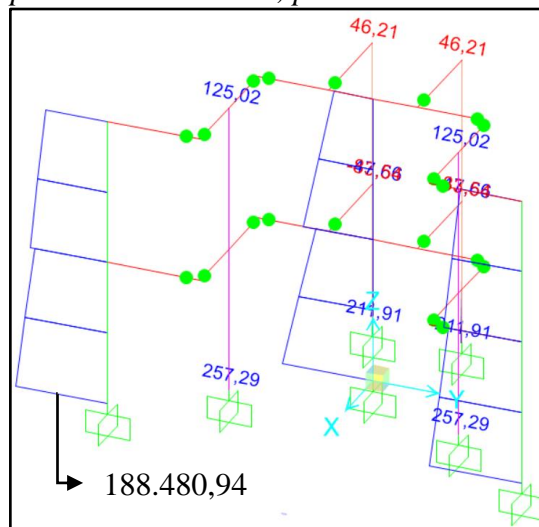
Os esforços cortantes foram mais simples. Foram obtidos diretamente dos resultados fornecidos pelo software

3.4.2 Modelo de Pórticos Tridimensionais

Uma vez que a parede toda é basicamente discretizada somente como uma única barra, o esforço na base dessa barra corresponde ao valor procurado. Como a barra que representa a parede apresenta seção transversal retangular, não há necessidade de tratamento dos esforços encontrados.

De maneira exemplificativa, a *Figura 24* representa os esforços solicitantes nos dois primeiros pavimentos da estrutura, pelo MPT-CT-01.

Figura 24 - Momentos fletores solicitantes que atuam nas barras representativas das paredes da estrutura, pelo MPT-CT-01



Fonte: Autor (2021)

A partir da *Figura 24*, e usando a notação dos trechos mostrada na *Figura 8*, observa-se que o momento fletor solicitante, no plano yz , na base da barra representativa do trecho 1 no térreo é $188.480,94 \text{ kNcm}$.

Quanto aos esforços cisalhantes, elas são adquiridas de maneira análoga aos esforços à flexão. O software gera o diagrama de esforço cortante de cada barra. O valor é obtido de forma direta.

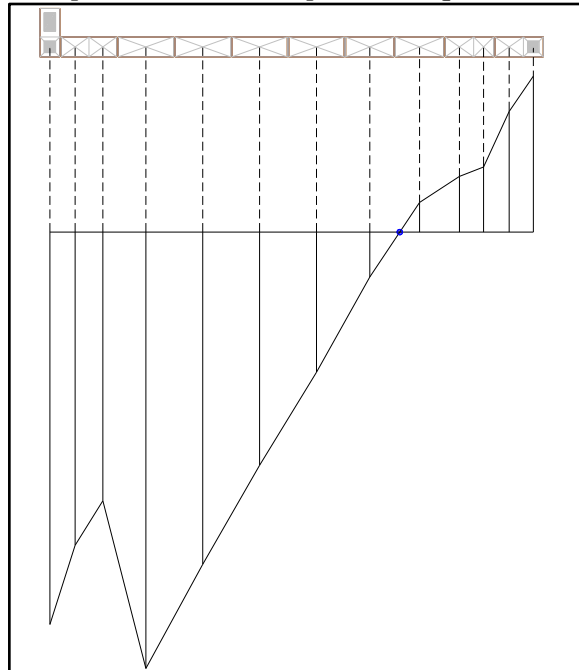
3.4.3 Modelo de Barras Equivalentes

Uma vez que, por esse modelo, as paredes são discretizadas por várias barras, os resultados obtidos a partir do software devem sofrer um tratamento antes.

3.4.3.1 Momentos fletores

Os momentos fletores são obtidos a partir da distribuição das forças normais em cada barra da parede. De maneira ilustrativa, a *Figura 25* mostra como é a aparência da distribuição das forças normais em cada barra que constitui o trecho 1 no nível do pavimento térreo.

Figura 25 - Aparência da distribuição das forças normais nas barras da base do trecho 1 no pavimento térreo, pelo MBEq-CT-01



Fonte: Autor (2021)

A partir da distribuição apresentada na figura anterior, calcula-se o momento na base da parede realizando a somatória do produto entre a força em cada barra pela distância até o ponto em que a força normal é nula, destacado na *Figura 25* em azul. Esse ponto representa o ponto de transição entre esforços de tração e compressão na base. A representação matemática do cálculo desse momento está exposto na *Equação (5)*.

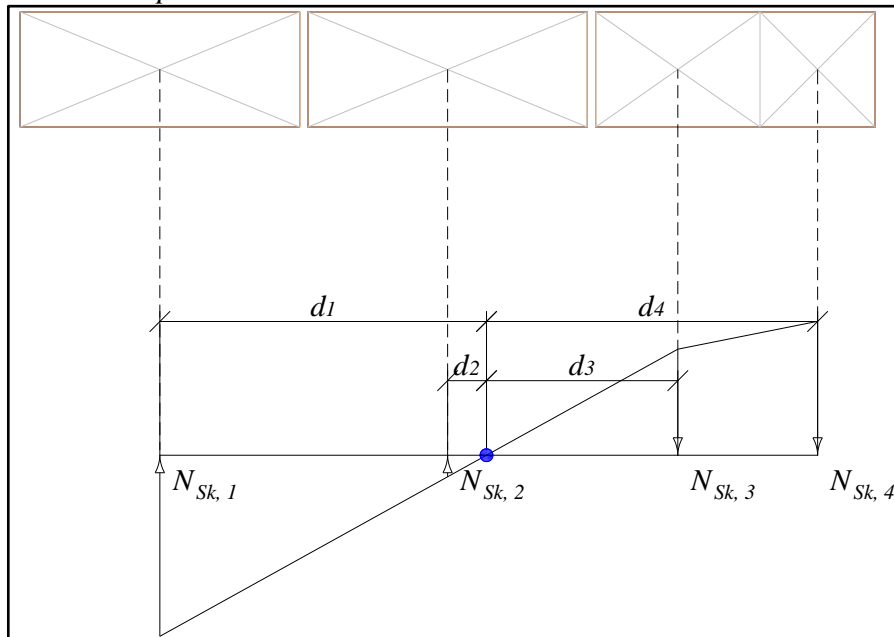
$$M_{Sk,j} = \sum_{i=1}^n N_{Sk,ji} x_{ji} \quad (5)$$

Em que:

- $M_{Sk,j}$: momento fletor solicitante característico na base do j-ésimo pavimento da parede;
- $N_{Sk,ji}$: força normal característica da i-ésima barra que compõe a parede, no nível do j-ésimo pavimento;
- x_{ji} : distância entre a i-ésima barra que compõe a parede e o ponto de transição entre compressão e tração da parede do j-ésimo pavimento.

O exemplo ilustrativo da *Figura 26* esclarece melhor essas grandezas.

Figura 26 - Modelo de cálculo para determinação do momento fletor na base da parede



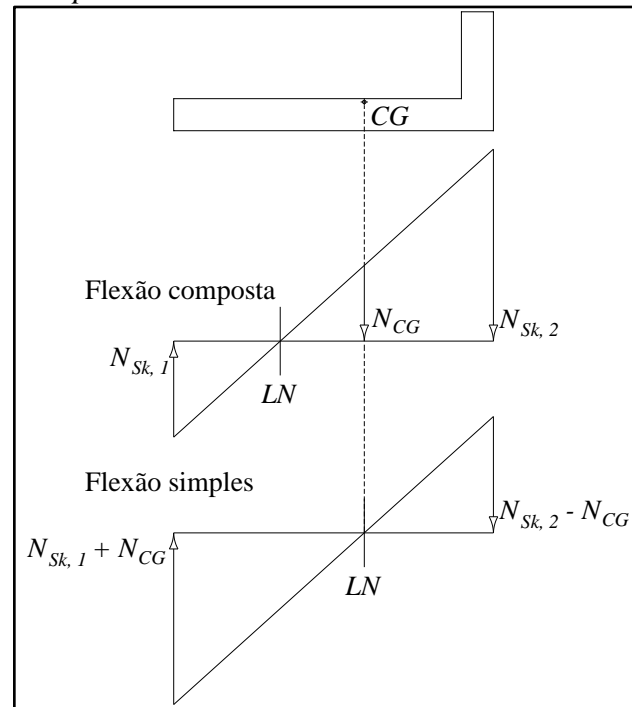
Fonte: Autor (2021)

Com relação a esse modelo, da forma como a parede é discretizada, as tensões normais na seção transversal da parede são oriundas tanto da flexão, como da compressão da parede. Ou seja, esse não é um caso de flexão simples, mas sim composta. Chegou-se a essa conclusão observando a existência de tensão normal não nula na posição do CG.

Para que o momento calculado pelo MBEq possa ser comparado com os demais, cujos momento são devido somente à flexão, essa tensão normal de compressão deve ser subtraído de cada barra antes de calcular o momento resultante da parede.

Para casos de flexão simples, a tensão na Linha Neutra, que passa pelo Centro de Gravidade, deve ser nula. Desse modo, determinando-se a tensão de compressão no Centro de Gravidade e subtraindo-a das demais barras, é possível calcular o momento devido à flexão simples para a parede. O procedimento está ilustrado na *Figura 27*.

Figura 27 - Procedimento ilustrativo da técnica para tratamento das forças normais na base de uma parede



Fonte: Autor (2021)

Portanto, as forças normais na base foram ajustadas conforme a técnica descrita anteriormente, e os momentos fletores nas bases das paredes foram, enfim, calculados conforme a *Equação (5)*.

3.4.3.2 Esforços cortantes

Para o cálculo dos esforços cortantes, o procedimento foi mais simples. Os esforços cortantes na base de cada barra, de cada pavimento, de cada parede, foram somados. A equacionamento matemático pode ser visto na *Equação (6)*.

$$V_{Sk,j} = \sum_{i=1}^n V_{Sk,ji} \quad (6)$$

Em que:

- $V_{Sk,j}$: esforço normal solicitante característico na base do j-ésimo pavimento da parede;
- $V_{Sk,ji}$: esforço cortante característico da i-ésima barra que compõe a parede, no nível do j-ésimo pavimento;

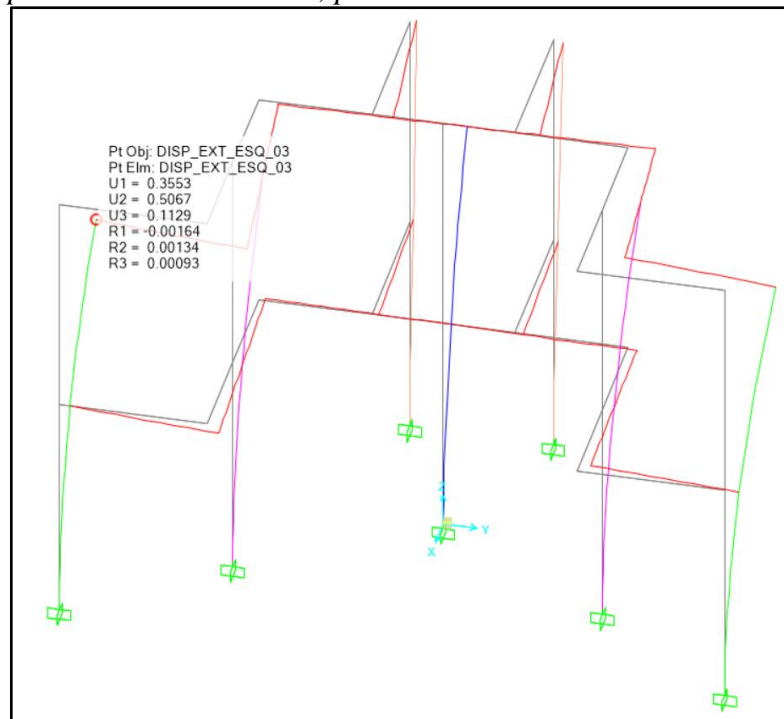
3.5 Obtenção dos deslocamentos dos nós da estrutura

3.5.1 Modelo de Barras Isoladas e Pórticos Tridimensionais

Diferente da obtenção dos esforços, os deslocamentos são obtidos de forma direta. O software fornece os deslocamentos tanto lineares, como angulares dos nós da estrutura.

De maneira exemplificativa, tem-se na *Figura 28* os dois primeiros pavimentos do modelo MPT-CT-01 discretizados. Observam-se os deslocamentos do nó do trecho 1 ao nível do segundo pavimento.

Figura 28 - Configuração deformada dos dois primeiros pavimentos da estrutura, pelo MPT-CT-01



Fonte: Autor (2021)

A notação utilizada pelo software com relação à direção dos deslocamentos é a seguinte:

- U1: deslocamento linear segundo a direção x , em cm;
- U2: deslocamento linear segundo a direção y , em cm;
- U3: deslocamento linear segundo a direção z , em cm;
- R1: deslocamento angular em torno da direção x , em radianos;
- R2: deslocamento angular em torno da direção y , em radianos;
- R3: deslocamento angular em torno da direção z , em radianos.

3.5.2 Modelo de Barras Equivalentes

Para determinar o deslocamento na estrutura, tem-se primeiramente que verificar se a parede, no nível do pavimento, deformou como diafragma rígido. Em outras palavras, para cada parede, os deslocamentos longitudinais em suas extremidades devem necessariamente ser iguais.

Uma vez observado o comportamento anteriormente descrito, pode-se escolher alguma extremidade e proceder com a anotação direta dos deslocamentos encontrados.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

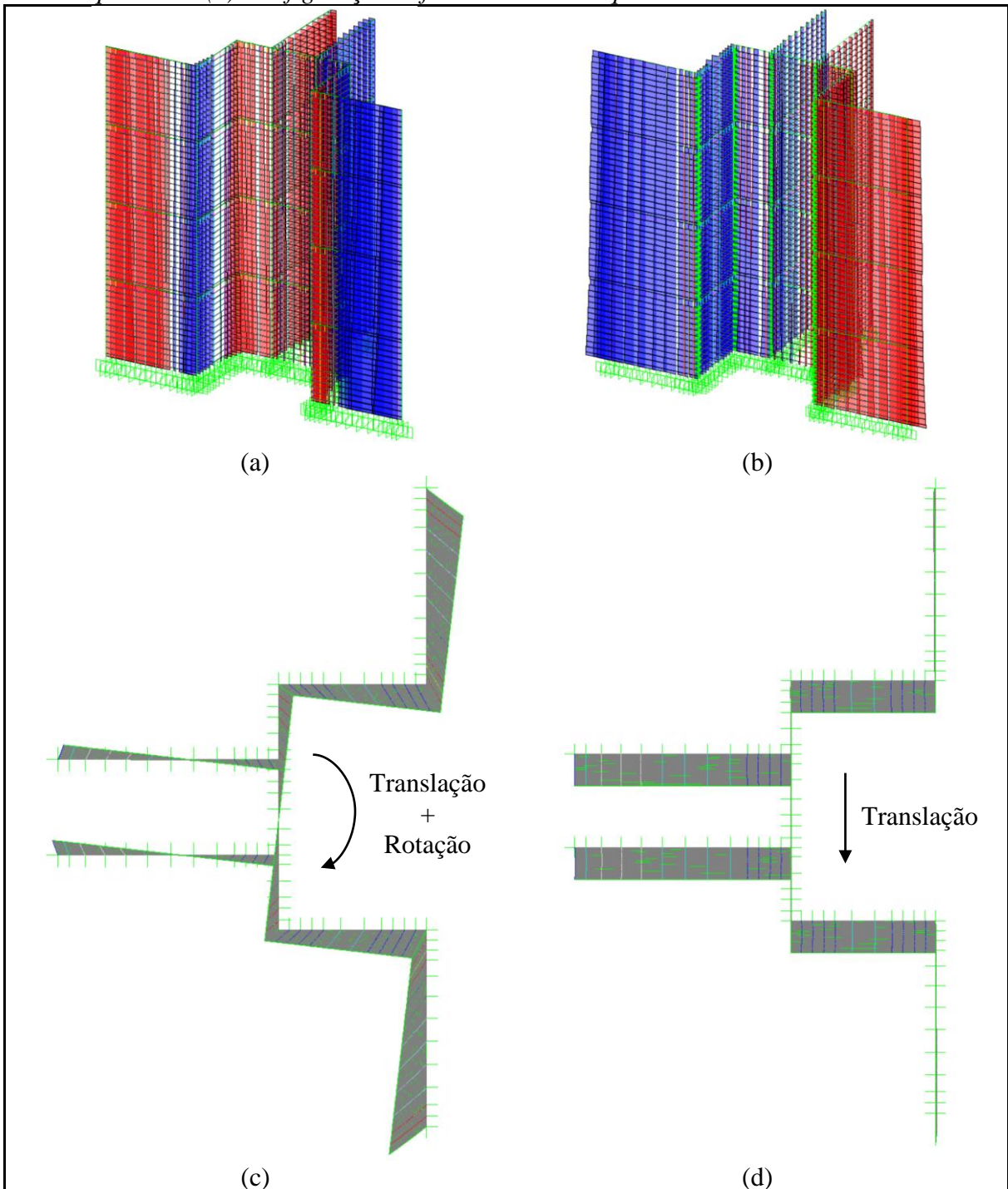
Esse tópico foi organizado iniciando-se pelas análises com o conjunto 1 de paredes e na sequência o conjunto 2. No caso do conjunto 1, foram avaliados primeiramente os resultados preliminares que motivaram a elaboração de algumas das variações nas modelagens e em seguida os resultados de todos os modelos elaborados.

4.1 Análise dos resultados do conjunto 1 de paredes

4.1.1 Análise dos resultados preliminares

As primeiras modelagens do estudo foram realizadas com o modelo de barras equivalentes. Quando da obtenção de resultados, as verificações iniciais consistiram-se na avaliação da distribuição da força normal nas barras verticais do modelo. A *Figura 29(a)* ilustra essa distribuição no caso do modelo MBEq-CT-01 a partir da qual se percebe que os trechos 1, 3 e 5 apresentaram configuração que sugere o típico comportamento de flexão com a linha neutra passando por esses trechos e com a mobilização das respectivas flanges. Essa tendência de comportamento também pode ser interpretada como a mobilização do conjunto de paredes como se fosse uma única seção composta solicitada à flexo-torção, cuja torção pode ser verificada na configuração deformada ilustrada pela *Figura 29(c)*. Verifica-se também que ficou caracterizada uma flexão oblíqua, considerando individualmente cada parede de contraventamento com sua respectiva flange. No entanto, os resultados obtidos com o modelo MBEq-ST-01 indicaram distribuição bastante diferente em relação ao modelo com torção, conforme ilustrado pela *Figura 29(b)*. Percebe-se que não ficou caracterizado o típico comportamento de flexão nos trechos 1 e 5, uma vez que não se constata a passagem da linha neutra nesses trechos. Essa tendência no comportamento é, de certa forma, considerada inesperada, uma vez que longos trechos submetidos à tração não poderiam ocorrer em virtude da própria rigidez e do tipo de ligação entre as paredes. É importante enfatizar que a torção do conjunto foi eliminada com a aplicação, na posição do CR, da resultante das forças atuantes nas três paredes de contraventamento.

Figura 29 - Distribuição da força normal nas barras verticais até o 4º pavimento: (a) Modelo MBEq-CT-01 com força horizontal aplicada da direita para a esquerda; (b) Modelo MBEq-ST-01 com força horizontal aplicada da esquerda para a direita; (c) Configuração deformada do MBEq-CT-01 e (d) Configuração deformada do MBEq-ST-01



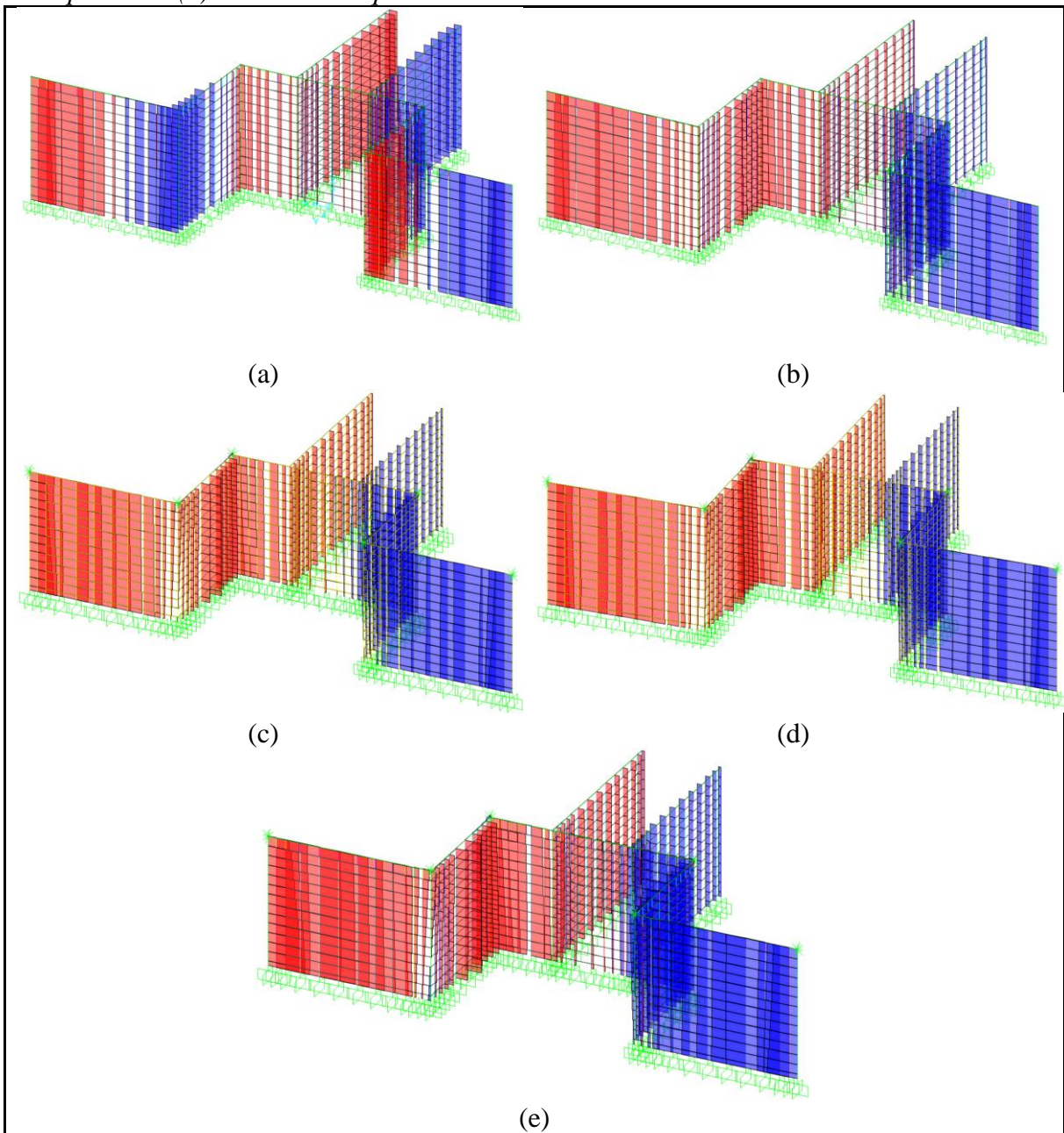
Fonte: Autor (2021)

Para se avaliar mais cuidadosamente esses resultados, foram idealizados modelos com o intuito de verificar o comportamento sob a atuação de uma parte das forças horizontais. Dessa forma, foram definidos os modelos MBEq-CT-02 e 03 e os modelos MBEq-ST-04, 05 e 06 que, conforme descrito anteriormente, os modelos 02 e 04 tiveram aplicação das forças horizontais

nos trechos 1 e 5 apenas, os modelos 03 e 05 no trecho 03 apenas, e o modelo 06 no trecho 1 apenas.

Os resultados ilustrados pela *Figura 30(a)* podem ser interpretados como aqueles que representam a maior intensidade dos efeitos do momento de torção, uma vez que os trechos 1 e 5 estão dispostos mais distantes do CR. É perceptível a ocorrência de flexão oblíqua na composição dos trechos 1 e 2, e dos trechos 4 e 5, o que já seria de esperar uma vez que as forças foram aplicadas nos trechos 1 e 5. Entretanto, percebe-se também a mobilização de trechos distantes daqueles onde as forças foram aplicadas, notadamente a compressão no trecho 6 e a tração no trecho 7, o que só seria possível pela ocorrência de uma solicitação à flexo-torção de todo o conjunto de paredes. Os resultados ilustrados pela *Figura 30(b)* podem ser associados a um efeito menos intenso do momento de torção, uma vez que o trecho 3, no qual foram aplicadas forças horizontais, está mais próximo do CR. Verifica-se que os trechos 6 e 7 foram menos mobilizados e que os trechos 1 e 5 foram intensamente solicitados, mesmo que estejam posicionados distantes do trecho de aplicação das forças horizontais. Mais uma vez, tal aspecto só é possível no caso de ocorrência de solicitação à flexo-torção, onde os trechos 1 e 5 estariam sendo mobilizados pelo empenamento da seção composta formada pelo conjunto de paredes. Vale destacar também que cada um desses trechos apresentam um único tipo de tensão, entretanto, com intensidade variável ao longo do comprimento do correspondente trecho.

Figura 30 - Distribuição da força normal nas barras verticais até o 4º pavimento: (a) Modelo MBEq-CT-02; (b) Modelo MBEq-CT-03; (c) Modelo MBEq-ST-04; (d) Modelo MBEq-ST-05 e (e) Modelo MBEq-ST-06.



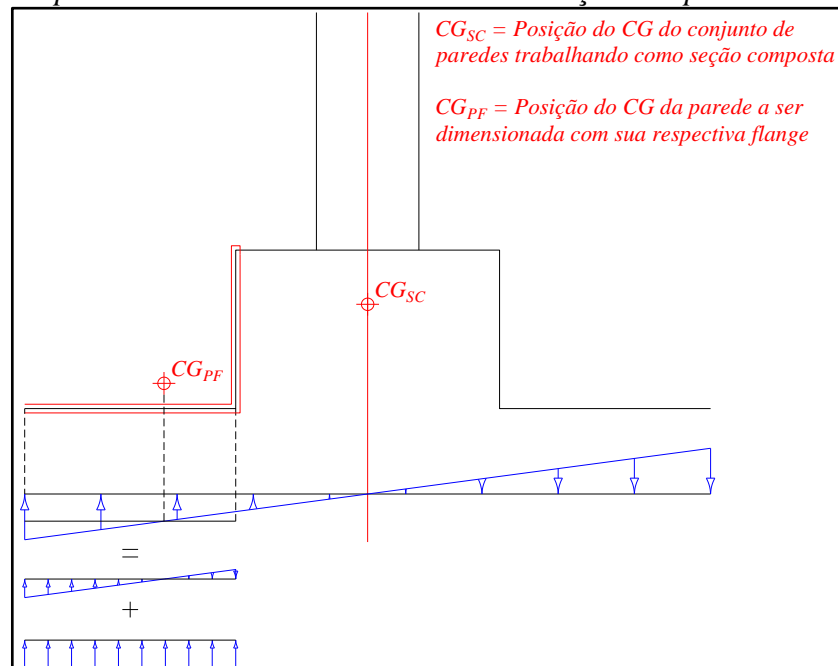
Fonte: Autor (2021)

Observando as demais figuras, nas quais os efeitos da torção foram suprimidos, verifica-se semelhança com a tendência de comportamento observada na *Figura 30(b)*, a qual se refere à condição de efeitos de torção minimizados, independentemente de a aplicação das forças horizontais ter sido mais ou menos distante do CR, *Figura 30(c)* e *(d)*. É importante mencionar que, mesmo na condição das forças serem aplicadas apenas no trecho 01, *Figura 30(e)*, o trecho 5 é solicitado, o que enaltece a situação de mobilização do conjunto de paredes. Dessa forma, pode-se concluir que a tendência de comportamento observada ao se impedir totalmente a

rotação dos pavimentos, mobilizando, assim, o conjunto de paredes, estaria em conformidade ao observado no modelo com os efeitos de torção. Tal aspecto não significa, entretanto, que é possível atestar a tendência de mobilização de todo o conjunto como se fosse um único elemento de contraventamento. A grande diferença conceitual entre os modelos é a forma de considerar a mobilização das flanges, que no caso do modelo MBI está limitado ao máximo de $6 \cdot t$, sendo t a espessura da parede, enquanto que nos modelos MPT e MBEq estaria automaticamente considerado na modelagem e, em princípio, não haveria um limite para sua extensão. Por essa razão, na tentativa de avaliar se as flanges estariam sendo superestimadas em seu comprimento, foram idealizados os modelos MPT-ST-02 e MBEq-ST-03. A questão que deve ser discutida em análises futuras é a capacidade que a alvenaria estrutural teria ou não de garantir esse comportamento identificado, sendo necessário, dessa forma, a realização de modelagens que considerem o comportamento não linear do material e os efeitos provocados pela fissura das paredes.

Apesar dos aspectos mencionados anteriormente, no âmbito das modelagens lineares aqui elaboradas, decidiu-se por adotar os resultados obtidos para possibilitar a comparação com os modelos MBI e MPT, uma vez que também foram adotados modelos lineares. Dessa forma, os resultados ora apresentados podem ser considerados como as justificativas do procedimento descrito no item 3.4.3.1 para determinação dos momentos fletores associados ao trecho 1. Em função da mobilização do conjunto de paredes ter sido estabelecida, todos os trechos fariam parte de uma única seção composta, sendo solicitados, portanto, por uma flexão simples relativa ao CG dessa seção composta. O procedimento estabelecido no item 3.4.3.1, ilustrado pela *Figura 31*, corresponderia a um artifício para determinar o momento fletor em relação aos eixos que passam pelo centro de gravidade da seção utilizada para o dimensionamento, constituída pelo trecho 1 e pela flange correspondente ao trecho 2. Além disso, os momentos fletores assim obtidos, podem ser comparados diretamente com os resultados obtidos pelos modelos MBI e MPT. É importante mencionar também que foram desconsideradas as contribuições das flanges no cômputo desses momentos para tornar possível a comparação direta com os resultados do MPT, uma vez que nesse modelo as barras verticais apresentam seção transversal retangular, sendo os efeitos das flanges representados pelas barras horizontais rígidas.

Figura 31 - Tensões normais na seção transversal do conjunto de paredes trabalhando como uma única seção composta



Fonte: Autor (2021)

4.1.2 Resultados completos das modelagens realizadas

Os resultados referentes aos deslocamentos horizontais ao nível dos pavimentos estão representados no *Gráfico 1* e *Gráfico 2*, e os correspondentes valores numéricos na *Tabela 7* e *Tabela 8*. Avaliando-se os resultados associados aos modelos sem consideração dos efeitos de torção ST-01, confirma-se, como era de se esperar, a menor rigidez do modelo MBI, e a maior rigidez e proximidade dos resultados obtidos com os modelos MPT e MBEq, concluindo-se que esses dois são equivalentes na simulação da rigidez do conjunto de paredes. Com relação aos modelos MBEq-ST-01 e MBEq-ST-02, verifica-se a quase igualdade entre os resultados, atestando, dessa forma, a eficiência dos procedimentos computacionais adotados no modelo 2 para simular a eliminação dos efeitos de torção.

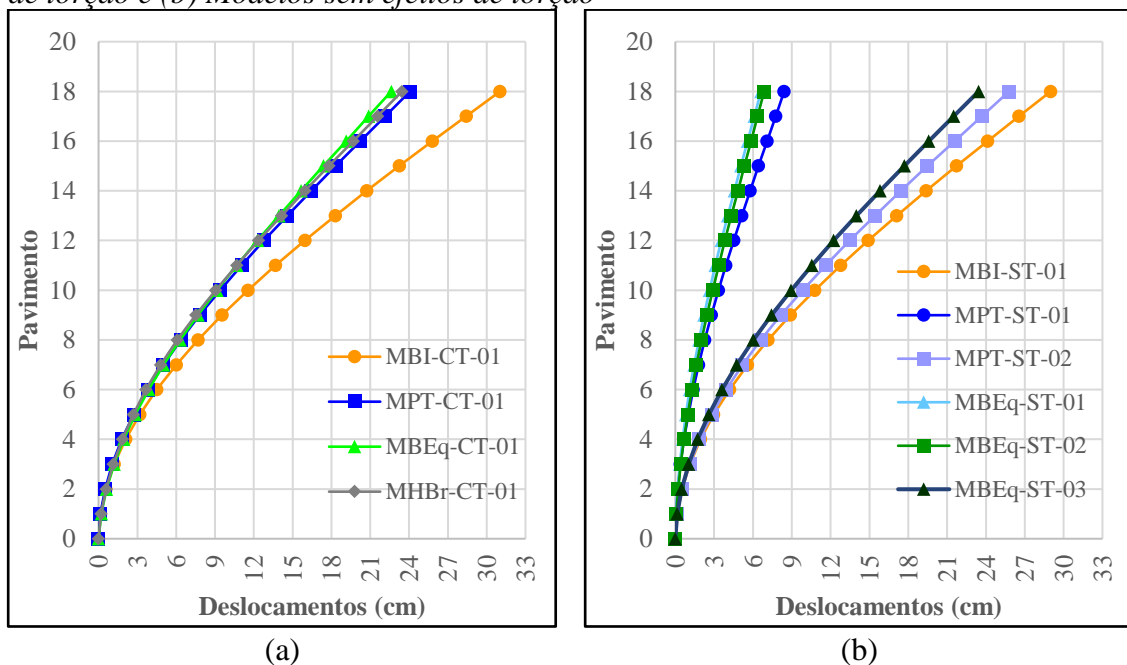
Ao dividir a flange em duas partes e articular a ligação entre as barras horizontais que a simulam, modelos MPT-ST-02 e MBEq-ST-03, verifica-se que os resultados se aproximaram daqueles do modelo MBI, indicando que a forma de simulação das paredes transversais que representam as flanges, como seria de se esperar, alteram significativamente a rigidez das paredes. Com relação a esse aspecto, deve-se mencionar que as normas recomendam que os modelos de cálculo adotados eliminem qualquer possibilidade de sobreposição de flanges oriundas de distintas paredes de contraventamento. De certa forma, os resultados ilustrados pela *Figura 30(a)* e *(b)*, e pela *Figura 30(c)* e *(d)*, com aplicação das forças isoladamente em cada

trecho, indicam ter ocorrido essa sobreposição. Assim, a divisão das paredes transversais, promovida pela articulação das barras horizontais na parte central, acaba por eliminar essa possibilidade de sobreposição. Conforme comentando anteriormente, os resultados aqui apresentados indicam a necessidade de elaboração de novos estudos para avaliar mais criteriosamente os aspectos relacionados aos efeitos e à forma da consideração das flanges na modelagem computacional.

Observando-se o *Gráfico 1(a)*, verifica-se que os efeitos da torção se apresentaram de forma menos intensa no modelo MBI, o que pode ser justificado pela ausência de simulação da interação entre as paredes, representada nos modelos MPT e MBEq pelas barras horizontais.

Por fim, comenta-se sobre os resultados obtidos com o modelo MHbr, constituído pela associação dos modelos MBEq e MPT com o intuito de reduzir o esforço computacional demandado ao se utilizar unicamente o modelo MBEq. Fica evidente a eficiência desse modelo e a adequação do procedimento utilizado para promover a ligação entre os dois tipos de modelagem, uma vez que os resultados obtidos se situaram exatamente entre os resultados dos modelos associados.

Gráfico 1 - Deslocamentos horizontais associados ao trecho 1: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção



Fonte: Autor (2021)

Tabela 7 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 1 nos modelos com torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)
MBI-CT-01	0,15	--	9,5350	--	31,03	--
MPT-CT-01	0,14	-6,3%	7,82	-18,0%	24,08	-22,4%
MBEq-CT-01	0,21	37,0%	7,68	-19,5%	22,62	-27,1%
MHBr-CT-01	0,20	29,3%	7,52	-21,2%	23,46	-24,4%

Fonte: Autor (2021)

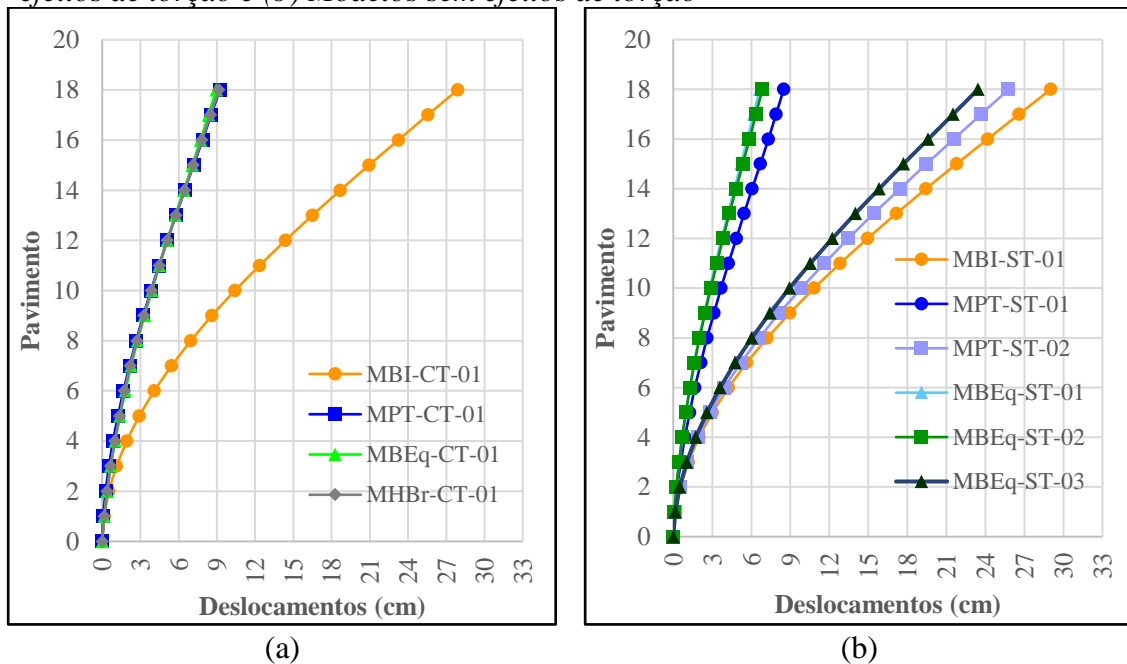
Tabela 8 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 1 nos modelos sem torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)
MBI-ST-01	0,14	--	8,90	--	29,01	--
MPT-ST-01	0,06	-58,3%	2,79	-68,7%	8,41	-71,0%
MPT-ST-02	0,15	5,2%	8,16	-8,3%	25,79	-11,1%
MBEq-ST-01	0,10	-31,7%	4,81	-46,0%	14,15	-51,2%
MBEq-ST-02	0,05	-61,9%	2,22	-75,1%	6,62	-77,2%
MBEq-ST-03	0,08	-43,7%	2,45	-72,5%	6,86	-76,3%

Fonte: Autor (2021)

Os resultados ilustrados pelo *Gráfico 2*, correspondentes ao trecho 3, indicam as mesmas tendências observadas para os resultados do trecho 1. A maior rigidez dos modelos MPT e MBEq, quando comparados ao modelo MBI, e a aproximação entre esses resultados ao se promover a divisão das paredes transversais por meio da articulação das barras horizontais nos modelos MPT e MBEq, repetiu-se também no caso do trecho 3. Igualmente, verifica-se a representatividade dos resultados do modelo MHbr cujos valores obtidos, mais uma vez, ficaram situados entre aqueles dos modelos MPT e MBEq, conforme pode ser constatado na *Tabela 9*. Ao contrário do ocorrido com o trecho 1, observa-se que os efeitos da torção não alteraram significativamente os resultados dos modelos MPT e MBEq, o que é justificado pela proximidade desse trecho com a posição do CR.

Gráfico 2 - Deslocamentos horizontais associados ao trecho 3: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção



Fonte: Autor (2021)

Tabela 9 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 3 nos modelos com torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)
MBI-CT-01	0,15	--	8,60	--	27,89	--
MPT-CT-01	0,09	-39,5%	3,23	-62,5%	9,21	-67,0%
MBEq-CT-01	0,15	5,3%	3,33	-61,3%	8,95	-67,9%
MHbr-CT-01	0,16	6,3%	3,27	-62,0%	9,16	-67,2%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 10 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 3 nos modelos sem torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)
MBI-ST-01	0,15	--	8,96	--	29,03	--
MPT-ST-01	0,10	-32,3%	3,13	-65,1%	8,49	-70,8%
MPT-ST-02	0,15	-2,7%	8,16	-8,9%	25,79	-11,2%
MBEq-ST-01	0,12	-22,9%	4,79	-46,5%	13,43	-53,7%
MBEq-ST-02	0,10	-37,7%	2,39	-73,3%	6,65	-77,1%
MBEq-ST-03	0,09	-46,3%	2,44	-72,7%	6,85	-76,4%

Fonte: Autor (2021)

O Gráfico 3 e Gráfico 4 e a Tabela 11 e Tabela 12 ilustram os diagramas de força cortante nos trechos 1 e 3 do conjunto de paredes. A partir dos resultados associados ao trecho 1 e correspondentes ao modelo sem os efeitos de torção, verificam-se diferenças na tendência

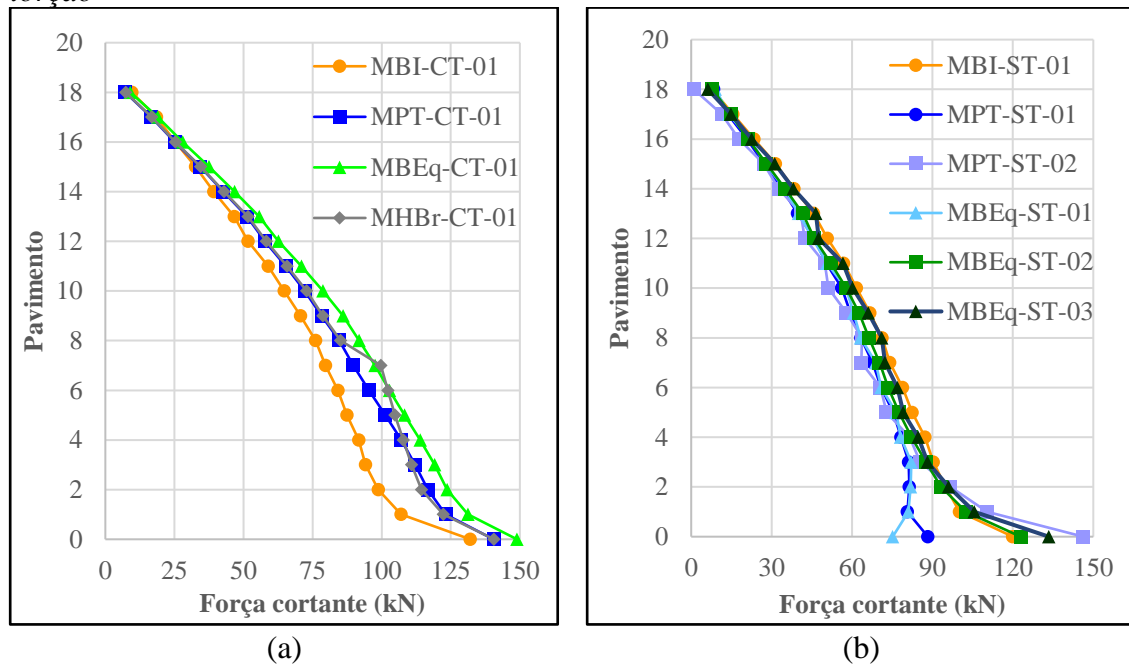
de distribuição apenas nos pavimentos inferiores, em que os modelos MPT-ST-01 e MBEq-ST-01 apresentaram reduções para força cortante. Esse resultado deve ser interpretado em conjunto com aqueles correspondentes ao trecho 3, nos quais verifica-se que apenas os modelos MPT-ST-01 e MBEq-ST-01 apresentaram tendência de maior acréscimo da força cortante nos pavimentos inferiores. Esse comportamento pode ser explicado pela maior rigidez associada a esses dois modelos aliado ao fato dos efeitos da deformação por cisalhamento serem mais pronunciados nos pavimentos inferiores. Nessas condições, ocorre que os trechos de parede com maior rigidez apresentam maiores deformações por cisalhamento nos pavimentos inferiores, tornando-se mais flexíveis nessa região. Dessa forma, ocorre uma redistribuição interna de esforços, em que os trechos com menores deformações por cisalhamento tendem a apresentar considerável acréscimo da força cortante, aliviando a força cortante nos demais trechos de parede.

Considerando os resultados dos modelos MPT-ST-02 e MBEq-ST-03, caracterizados pela divisão das flanges por meio da articulação das barras horizontais, verifica-se a inversão na tendência observada nos resultados dos modelos MPT-ST-01 e MBEq-ST-01. Essa inversão na tendência de distribuição também se verifica para o trecho 3. Tal resultado indica que a eliminação da eventual sobreposição de flanges altera não apenas a rigidez global do conjunto, mas também a distribuição interna de rigidez entre os trechos de parede.

Em relação aos efeitos da torção, verifica-se a mesma tendência ocorrida com os deslocamentos, caracterizada pela ocorrência de pequenos acréscimos na intensidade dos esforços obtidos com o modelo MBI e acréscimos mais significativos nos esforços obtidos com os modelos MPT-CT-01 e MBEq-CT-01, justificados pela simulação da interação entre as paredes promovida pelas barras horizontais. Mais do que acréscimos significativos, os modelos MPT e MBEq apresentaram alteração na tendência de comportamento nos pavimentos inferiores.

Por fim, destaca-se, assim como no caso dos deslocamentos, a coerência dos resultados obtidos com o modelo MHbr, cujas intensidades das forças cortantes situaram-se na faixa de valores definida pelos modelos MPT e MBEq utilizados na associação.

Gráfico 3 - Esforços cortantes do trecho 1 ao longo dos pavimentos nos modelos com torção



Fonte: Autor (2021)

Tabela 11 - Variação percentual dos esforços cortantes do trecho 1 nos modelos com torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)
MBI-CT-01	107,05	--	70,62	--	9,55	--
MPT-CT-01	123,14	15,03%	78,26	10,81%	7,23	-24,29%
MBEq-CT-01	131,17	22,53%	86,00	21,78%	9,05	-5,22%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 12 - Variação percentual dos esforços cortantes do trecho 1 nos modelos sem torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)
MBI-ST-01	100,13	--	66,73	--	7,88	--
MPT-ST-01	80,66	-19,4%	59,44	-10,9%	8,37	6,2%
MPT-ST-02	110,35	10,2%	58,02	-13,1%	1,01	-87,3%
MBEq-ST-01	80,9940	-19,11%	60,5860	-9,21%	9,0690	15,05%
MBEq-ST-02	102,5050	2,38%	62,6380	-6,14%	7,9600	0,98%
MBEq-ST-03	105,6940	5,56%	66,0140	-1,08%	8,3130	5,45%

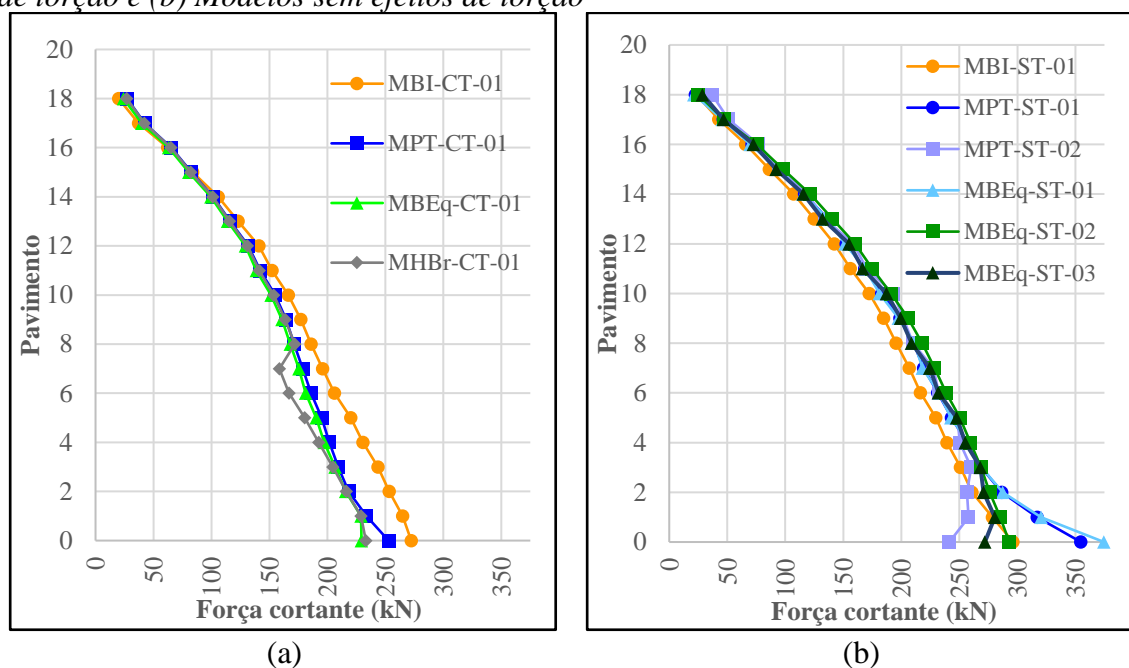
Fonte: Autor (2021)

Os resultados apresentados pelo Gráfico 4, correspondentes ao trecho 3, indicam a mesma tendência de comportamento observada para o trecho 1, com as diferenças mais significativas ocorridas nos pavimentos inferiores. Conforme mencionado na análise do trecho 1, constata-se a redistribuição interna de esforços, em que modelos que resultaram em

acréscimo da força cortante no trecho 3, resultaram em decréscimo da força cortante no trecho 1. Tal tendência é mantida quando ocorre o contrário.

Com relação aos efeitos causados pela torção, verifica-se a ocorrência de decréscimos ao invés de acréscimos, o que é explicado pela posição oposta desse trecho em relação ao CR quando comparada ao trecho 1. Dessa forma, em função do sentido de rotação do pavimento ficam caracterizados acréscimos da força cortante para o trecho 1 e decréscimos para o trecho 3, com variações mais significativas para os modelos MPT e MBEq.

Gráfico 4 - Diagramas de força cortante associados ao trecho 3: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção



Fonte: Autor (2021)

Tabela 13 - Variação percentual dos esforços cortantes do trecho 3 nos modelos com torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)
MBI-CT-01	264,77	--	176,95	--	19,90	--
MPT-CT-01	233,65	-11,8%	164,51	-7,0%	27,24	36,8%
MBEq-CT-01	229,00	-13,5%	160,85	-9,1%	24,11	21,2%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 14 - Variação percentual dos esforços cortantes do trecho 3 nos modelos sem torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)
MBI-ST-01	278,53	- -	184,73	- -	23,24	- -
MPT-ST-01	317,28	13,9%	198,83	7,6%	22,53	-3,1%
MPT-ST-02	257,87	-20,6%	201,60	9,1%	36,94	58,9%
MBEq-ST-01	294,58	16,0%	199,98	8,3%	23,84	2,6%
MBEq-ST-02	320,54	42,0%	197,59	7,0%	21,38	-8,0%
MBEq-ST-03	285,32	6,8%	205,87	11,4%	25,17	8,3%

Fonte: Autor (2021)

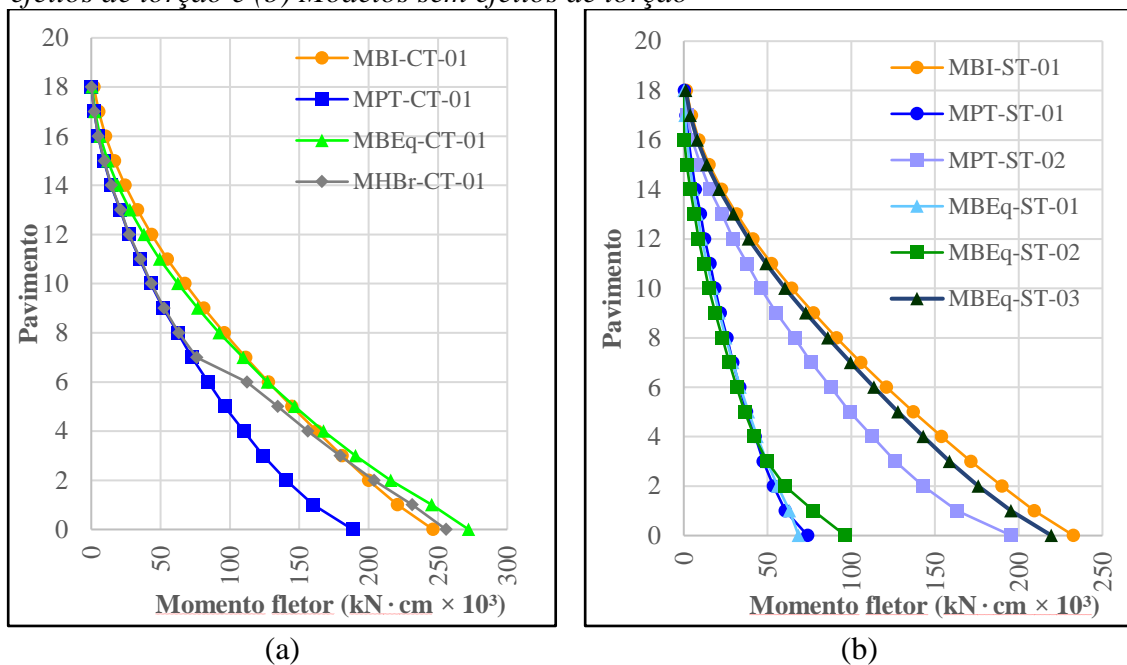
Como última análise para esse conjunto de paredes, foram avaliados os diagramas de momento fletor, ilustrados pelo *Gráfico 5* e *Gráfico 6*, cujos valores numéricos constam na *Tabela 15* e *Tabela 16*. Analisando os resultados associados ao trecho 1 sem os efeitos de torção, *Gráfico 5(b)*, verifica-se que as diferenças foram maiores do que as obtidas no caso da força cortante. Tal aspecto pode ser atribuído ao efeito das flanges no que se refere a forma de sua consideração em cada modelo. Conforme comentado anteriormente, nos modelos MPT-ST-01, MBEq-ST-01 e MBEq-ST-02 podem estar ocorrendo uma eventual sobreposição de flanges, efeito que merece discussão mais aprofundada em futuros estudos, o que resultaria em maior rigidez para cada parede de contraventamento. Como os valores dos momentos fletores foram obtidos descontando-se a parcela associada a cada flange, procedimento adotado para permitir a adequada comparação com o modelo MPT, a parcela associada às flanges nos três modelos anteriormente citados é bem maior que aquela do modelo MBI. Dessa forma, a parcela associada aos trechos da seção fora da flange (trechos associados a alma da seção composta) resulta em valores menores nos modelos MPT e MBEq mencionados anteriormente. Ao se promover a divisão dos trechos de paredes transversais (flanges) em duas partes, procedimento realizado na tentativa de eliminar a possível sobreposição de flanges, verifica-se a aproximação entre os resultados obtidos com os modelos MPT-ST-02 e MBEq-ST-03 com aqueles do modelo MBI, em que esse ajuste nas modelagens teve maior impacto no modelo MBEq-ST-02 pela ocorrência dos maiores acréscimos. Tal resultado é coerente, uma vez que a divisão da flange em duas partes reduz sua contribuição na intensidade do momento fletor, redistribuindo para o trecho da alma.

Observando os resultados dos modelos considerando os efeitos da torção, verifica-se que, assim como ocorrido no caso das forças cortantes, ocorrem acréscimos expressivos para os modelos MPT-CT-01 e MBEq-CT-01, mais intenso nesse último. Tal como no caso das forças cortantes, essa tendência pode ser justificada pela presença das barras horizontais na

modelagem, simulando a interação entre as paredes de contraventamento, aspecto não contemplado no modelo MBI.

Por fim, destaca-se, também como ocorrido no caso das forças cortantes, a coerência dos resultados obtidos com o modelo MHBr, cujas intensidades situaram-se na faixa de valores definida pelos modelos MPT e MBEq utilizados na associação. É interessante perceber que até o 5º pavimento os valores são mais próximos daqueles do modelo MBEq, e praticamente igualando-se aos valores do modelo MPT a partir do 7º pavimento. Ressalta-se que a transição entre os dois modelos ocorre no 6º pavimento.

Gráfico 5 - Diagramas de momento fletor associados ao trecho 1: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção



Fonte: Autor (2021)

Tabela 15 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 1 nos modelos com torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)
MBI-CT-01	220822,40	--	81161,84	--	1856,12	--
MPT-CT-01	160064,75	-27,5%	51809,25	-36,2%	156,22	-91,6%
MBEq-CT-01	245379,78	11,1%	76827,89	-5,3%	694,23	-62,6%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 16 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 1 nos modelos sem torção

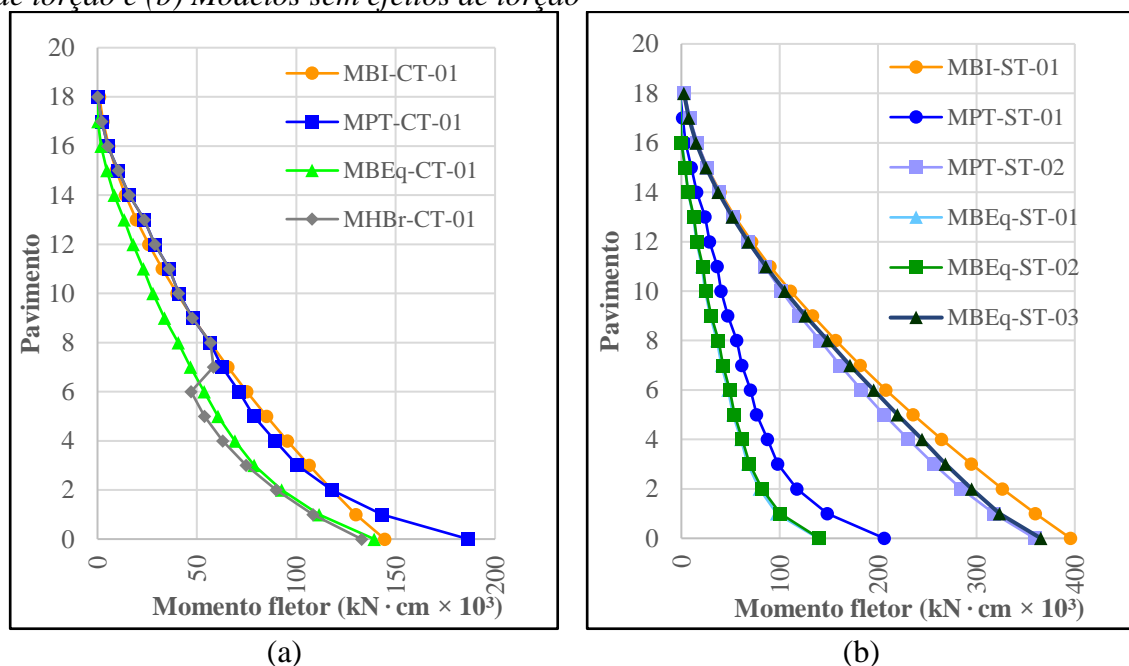
Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)
MBI-ST-01	209437,51	--	77468,21	--	1531,65	--
MPT-ST-01	60664,69	-71,0%	21833,84	-71,8%	376,48	-75,4%
MPT-ST-02	163406,62	-22,0%	55388,82	-28,5%	-218,17	-114,2%
MBEq-ST-01	102242,32	-51,2%	28651,34	-63,0%	501,82	-67,2%
MBEq-ST-02	63074,97	-69,9%	21127,49	-72,7%	207,90	-86,4%
MBEq-ST-03	77461,36	-63,0%	18746,16	-75,8%	-452,28	-129,5%

Fonte: Autor (2021)

Em relação aos resultados associados ao trecho 3, verificam-se as mesmas tendências para os resultados obtidos com os vários modelos, com a diferença de que o MPT-ST-01 apresentou valores mais próximos aos do modelo MBI.

Avaliando-se os efeitos causados pela torção, verifica-se, assim como no caso das forças cortantes, a ocorrência de decréscimos ao invés de acréscimos, cuja explicação fundamenta-se na posição desse trecho em relação ao CR e no sentido de rotação do pavimento. Entretanto, diferentemente do ocorrido com as forças cortantes, verifica-se que as variações mais significativas foram associadas ao modelo MBI. Em relação aos resultados do modelo MHbr, verifica-se, mais uma vez, sua representatividade com os resultados praticamente coincidentes com aqueles do modelo utilizado na discretização do pavimento.

Gráfico 6 - Diagramas de momento fletor associados ao trecho 3: (a) Modelos com efeitos de torção e (b) Modelos sem efeitos de torção



Fonte: Autor (2021)

Tabela 17 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 3 nos modelos com torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)
MBI-CT-01	129991,60	--	48082,20	--	950,65	--
MPT-CT-01	143260,76	10,2%	47843,04	-0,5%	40,84	-95,7%
MBEq-CT-01	111514,80	-14,2%	33753,82	-29,8%	-439,20	-146,2%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 18 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 3 nos modelos sem torção

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)
MBI-ST-01	359960,04	--	133429,83	--	2802,82	--
MPT-ST-01	148609,05	-58,7%	47136,19	-64,7%	-1306,37	-146,6%
MPT-ST-02	318013,41	-20,0%	120311,85	-9,8%	3413,98	21,8%
MBEq-ST-01	211457,15	-70,9%	61815,77	-53,7%	-831,05	-129,7%
MBEq-ST-02	97028,75	-125,5%	29216,63	-78,1%	-1356,84	-148,4%
MBEq-ST-03	100732,33	-123,8%	30329,80	-77,3%	-1654,90	-159,0%

Fonte: Autor (2021)

Como último comentário em relação às análises dos momentos fletores, ressalta-se que os valores utilizados nas verificações não correspondem àqueles a serem adotados no dimensionamento, uma vez que não foram consideradas as contribuições das flanges. Conforme já comentado em parágrafos anteriores, esse procedimento foi adotada para tornar possível a realização de comparações coerentes com o modelo MPT que adota seção retangular para as barras verticais que simulam as paredes de contraventamento, diferentemente do modelo MBI que adota seção com composição de flanges. Em face dos resultados apresentados, esse procedimento mostrou-se adequado para a discussão, tornando possível interpretar adequadamente a tendência de comportamento para cada modelo e justificar as diferenças observadas entre cada um deles. Evidentemente, deve-se acrescentar a contribuição das flanges no valor do momento solicitante quando da elaboração do dimensionamento das paredes de contraventamento.

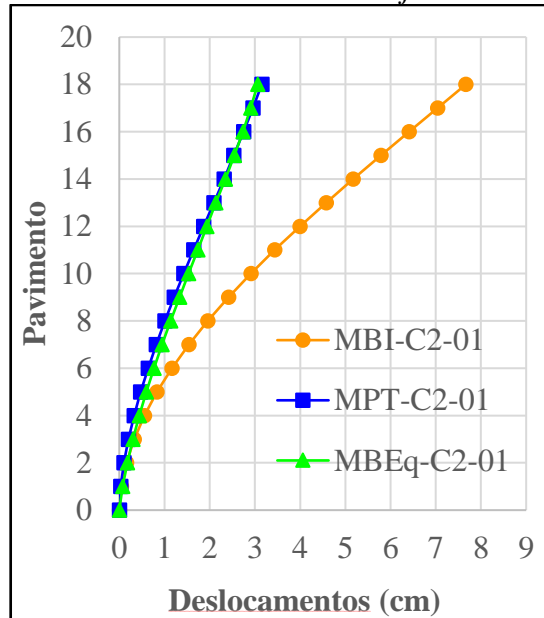
4.2 Análise dos resultados do conjunto 2 de paredes

4.2.1 Resultados completos das modelagens realizadas

Os resultados referentes aos deslocamentos horizontais ao nível dos pavimentos estão representados no *Gráfico 7*, e os correspondentes valores numéricos na *Tabela 19*.

O modelo MBI, como já era de se esperar, mostrou-se ser o modelo menos rígido, pelas justificativas anteriormente discutidas. Novamente, a análise dos deslocamentos do MPT e MBEq mostrou a equivalência na simulação da rigidez relativa a esses dois modelos.

Gráfico 7 - Deslocamentos horizontais associados ao trecho 1 do conjunto 2



Fonte: Autor (2021)

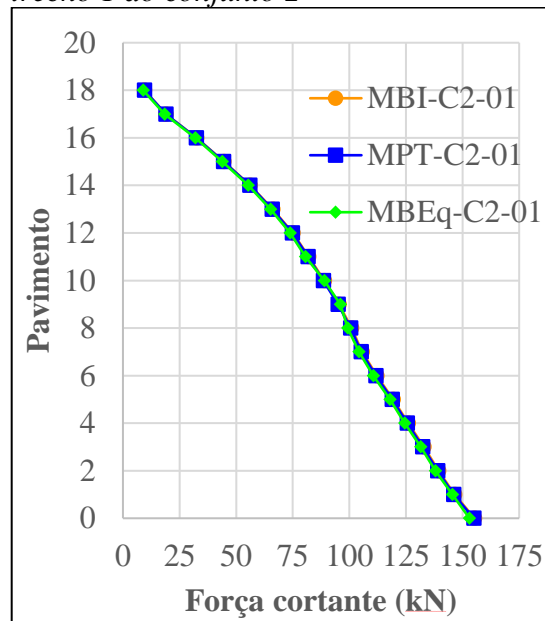
Tabela 19 - Variação percentual dos deslocamentos do trecho 1

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)	Valor absoluto (cm)	Variação (%)
MBI-CT-01	0,05	--	2,41	--	7,67	--
MPT-CT-01	0,03	-26,1%	1,22	-49,6%	3,15	-58,9%
MBEq-CT-01	0,08	62,0%	1,33	-44,8%	3,06	-60,1%

Fonte: Autor (2021)

O Gráfico 8 e a Tabela 20 ilustram os diagramas de força cortante nos trechos 1 do conjunto de paredes. Observa-se que para ambos os modelos, os valores da força cortante foram, em termos práticos, iguais.

Gráfico 8 - Forças cortantes associadas ao trecho 1 do conjunto 2



Fonte: Autor (2021)

Tabela 20 - Variação percentual das forças cortantes do trecho 1

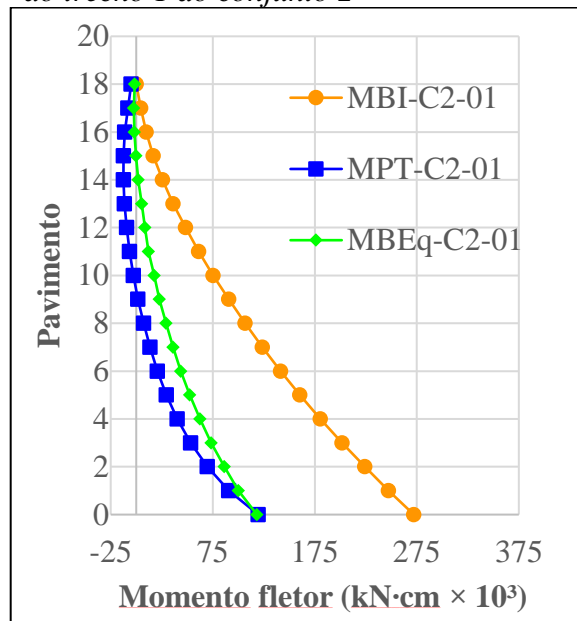
Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)	Valor absoluto (kN)	Variação (%)
MBI-CT-01	146,45	--	95,40	--	9,50	--
MPT-CT-01	145,99	-0,3%	95,01	-0,4%	9,45	-0,5%
MBEq-CT-01	145,54	-0,6%	95,99	0,6%	8,90	-6,3%

Fonte: Autor (2021)

Por fim, foram avaliados os diagramas de momento fletor por pavimento, ilustrados pelo Gráfico 9 e Tabela 21.

Com relação aos momentos, observa-se que, nos modelos MPT e MBEq, houve inversão dos valores deles na parte superior das paredes, ou seja, eles ficaram negativos. Essa observação remete-se ao efeito de pórtico gerado pela presença da viga. Isso pode ocorrer nos pórticos de concreto armado. Essa justificativa é reforçada pelo fato do MBI não ter apresentado esse comportamento, uma vez que este modelo não forma pórticos.

Gráfico 9 - Momentos fletores associados ao trecho 1 do conjunto 2



Fonte: Autor (2021)

Tabela 21 - Variação percentual dos momentos fletores do trecho 1

Modelos	Pavimento 1		Pavimento 9		Pavimento 18	
	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)	Valor absoluto (kN·cm)	Variação (%)
MBI-CT-01	247332,80	--	90731,78	--	0,00	--
MPT-CT-01	90745,97	-63,3%	1692,28	-98,1%	-4927,23	--
MBEq-CT-01	0,00	-100,0%	22787,65	-74,9%	-1418,52	--

Fonte: Autor (2021)

5 CONCLUSÕES

O estudo elaborado nesse trabalho consistiu-se na análise de algumas paredes de contraventamento de um edifício real de 18 pavimentos de alvenaria estrutural de blocos. Do edifício exemplo, foram escolhidos dois conjuntos de paredes de contraventamento para serem elaborados vários modelos computacionais distintos a fim de avaliar seu comportamento sob a ação exclusiva de forças horizontais, não se considerando, portanto, a atuação das cargas verticais. Foi elaborada quantidade razoável de modelos computacionais e uma extensa análise de resultados, cujas conclusões principais estão descritas nos parágrafos seguintes.

O primeiro conjunto de paredes avaliado é bastante peculiar, contendo 7 trechos de parede constituindo um conjunto bastante longo e que demandou um esforço maior tanto na elaboração dos modelos, quanto na análise dos resultados. Em função de sua geometria foram elaborados modelos que permitiram o surgimento de efeitos de torção e modelos nos quais esses efeitos foram suprimidos, considerando-se esses últimos mais representativos da estrutura real em decorrência da existência da laje nos pavimentos.

Entre os tipos de modelagens realizadas, aquelas que fazem uso da discretização das paredes por meio de um conjunto de barras verticais e horizontais (MBEq) mostraram-se bastante eficientes na avaliação do comportamento, uma vez que se tornou possível observar a distribuição de forças ao longo do comprimento da parede.

No que diz respeito aos resultados dos modelos considerando os efeitos da torção, a partir dos modelos MBEq foi possível identificar o típico comportamento de flexão nos trechos de parede com trechos comprimidos e trechos tracionados. Além disso, ao se verificar com rigor maior esses resultados, verificou-se que ficou caracterizada a flexão oblíqua na associação das paredes com as flanges.

Ao contrário, quanto aos resultados associados aos modelos eliminando os efeitos de torção, não foi verificada distribuição de forças normais que sugere o típico comportamento de flexão. A elaboração dos modelos com aplicação da força horizontal isoladamente nas paredes de contraventamento contribuiu para esclarecer esse comportamento inesperado. A partir dos novos resultados obtidos, percebeu-se que no caso das forças horizontais estarem aplicadas mais distantes do centro de rigidez (CR) do conjunto de paredes, a tendência é de que a torção seja potencializada, como seria de esperar, ocorrendo a flexão oblíqua em cada parede de contraventamento. Em contrapartida, no caso das forças horizontais estarem atuando nas proximidades do CR do conjunto de paredes, não se verificou o comportamento típico de flexão, com ocorrência de tração e compressão, nas paredes de contraventamento mais distantes do

CR. Essas tendências sugerem que, no caso da torção ser potencializada, ocorrerá empenamento também intenso na mobilização do conjunto de paredes, fazendo surgir a flexão oblíqua nas paredes. No caso da torção ser minimizada ou eliminada, o empenamento será suave o suficiente para não mobilizar a flexão oblíqua das paredes. Tudo ocorreria como se o conjunto de paredes constituísse uma única seção transversal submetida à flexão. Tal comportamento parece ser muito improvável de ocorrer em paredes de alvenaria estrutural, pois a quantidade de armadura empregada seria insuficiente para garantir a redistribuição interna de tensões e a mobilização de todo o conjunto de paredes como um único elemento de contraventamento. Esse fato já impõe a necessidade de realização de novas pesquisas considerando, entre outros aspectos, a ocorrência da fissuração e sua propagação nas paredes.

Ainda em relação aos modelos com efeito de torção suprimido, o comportamento observado mostrou-se adequado no âmbito de uma análise elástico-linear. O modelo MBI mostrou-se ser o menos rígido, apresentando deslocamentos consideravelmente superiores aos demais. No caso dos modelos MPT e MBEq, pode-se dizer que são equivalentes entre si, uma vez que todos os resultados obtidos, para os deslocamentos e os esforços, foram muito próximos.

A maior rigidez dos modelos MPT e MBEq pode estar associada ao modo como as flanges são simuladas, onde se identificou uma possível sobreposição de flanges correspondentes a paredes distintas. Por essa razão, foram elaborados modelos em que as flanges foram divididas em duas partes, na tentativa de eliminar a possível sobreposição. Os novos resultados obtidos se aproximaram bastante daqueles do modelo MBI, reforçando a influência da forma de simulação das flanges no comportamento do conjunto peculiar de paredes de contraventamento. Tal aspecto, conforme comentado anteriormente, reforça a necessidade da realização de novos estudos para avaliar mais criteriosamente os aspectos relacionados aos efeitos e à forma da consideração das flanges na modelagem computacional.

Com o objetivo de minimizar o esforço computacional demandado na modelagem de um edifício completo, foi avaliado outro tipo de modelagem que fez uso da associação dos modelos MBEq e MPT. Essa associação, ou modelo híbrido (MHbr), mostrou-se bastante consistente, uma vez que todos os resultados obtidos situaram-se entre aqueles dos modelos utilizados na associação.

Por fim, ressalta-se que os valores de esforços obtidos na comparação dos resultados entre os modelos não correspondem àqueles a serem adotados no dimensionamento. Os procedimentos de ajuste adotados para a determinação dos momentos fletores, descritos no item 3.4, foram utilizados para permitirem a comparação com o MPT, cuja seção das barras verticais

que simulam as paredes é retangular. Portanto, no dimensionamento das paredes de contraventamento, as parcelas de momento oriundas das flanges devem ser reconsideradas nos modelos MBEq.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1: Alvenaria Estrutural: Parte 1: Projeto**. Rio de Janeiro, p. 70. 2020.

BARBOSA, Matheus Pereira. **Estudo da interação entre grupos de paredes na distribuição das cargas verticais em edifícios de alvenaria estrutural**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2017. 80 f.

LIU, Y. P. et al. **Second-order analysis and design of wall-framed structures allowing for imperfections**. Advances in Structural Engineering, Hong Kong, v.13, n. 3, p.513-524, 2010.

MEDEIROS, K. A. S. **Modelagem Computacional para Avaliação da Interação entre Painéis de Alvenaria e Estrutura de Suporte em Concreto Armado**. Natal: Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

NASCIMENTO NETO, J. A. **Investigação das solicitações de cisalhamento em edifícios de alvenaria estrutural submetidos a ações horizontais**. São Carlos: Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

NASCIMENTO NETO, J. A.; MEDEIROS, K. A. S.; QUIM, F. **Nova modelagem para análise da interação entre painéis de alvenaria e estrutura de suporte**. Caderno Técnico Alvenaria Estrutural. v. 3, p. 38, 2014.

NUNES, Valmiro Quéfren Gameleira. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto armado**. 2011. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.

OLIVEIRA, N. N. S. de. **Analysis of structural masonry shear walls taking into account the cracking effects**. IBRACON, Natal, 2021.

PAES, M. S. **Interação entre edifício de alvenaria estrutural e pavimento em concreto armado considerando - se o efeito arco com a atuação de cargas verticais e ações horizontais**. São Carlos: Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

RODRIGUES, J. C. **“Alvenaria estrutural e sistema construtivo”**. Extrema: Monografia (Bacharelado) – Faculdade de Ciências Aplicadas de Extrema, 2018.