



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**KAIO GEOVANNE DE MEDEIROS DANTAS**

**ESTUDO DOS EFEITOS LOCALIZADOS DE SEGUNDA ORDEM EM PAREDES  
DE CONTRAVENTAMENTO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

**NATAL/RN**

**2020**

KAIO GEOVANNE DE MEDEIROS DANTAS

ESTUDO DOS EFEITOS LOCALIZADOS DE SEGUNDA ORDEM EM PAREDES DE  
CONTRAVENTAMENTO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

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

NATAL/RN

2020

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

Dantas, Kaio Geovanne de Medeiros.

Estudo dos efeitos localizados de segunda ordem em paredes de contraventamento de edifícios de alvenaria estrutural / Kaio Geovanne de Medeiros Dantas. - 2020.

157f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2020.

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

1. Alvenaria estrutural - Dissertação. 2. Paredes de contraventamento - Dissertação. 3. Não linearidade geométrica - Dissertação. 4. Efeitos localizados de segunda ordem - Dissertação. 5. Modelagem numérica. I. Nascimento Neto, Joel Araújo do. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

ESTUDO DOS EFEITOS LOCALIZADOS DE SEGUNDA ORDEM EM PAREDES DE  
CONTRAVENTAMENTO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto – Orientador (UFRN)

---

Prof. Dr. Daniel Nelson Maciel – Examinador Interno (UFRN)

---

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian – Examinador Externo (UFSCar)

**Natal, 23 de outubro de 2020.**

À minha família, que tanto me apoia,  
Dedico este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais uma conquista tão importante alcançada e por sempre estar ao meu lado, me guiando e me dando forças mesmo quando elas pareciam ter acabado.

Ao meu pai, Francisco de Assis, e em especial à minha mãe, Maria das Vitórias, por toda a educação e suporte que me proporcionaram na minha caminhada acadêmica, por todo amor e confiança irrestritos depositados em mim ao longo da minha vida.

Aos meus avós Maria do Carmo e João Capistrano, minha irmã Anna Karla, minha tia Ana Raquel, minha sobrinha Thalyta, meus primos João Antônio e Ayrila, e demais familiares, pela paciência e por todo o apoio que me dão em todas as etapas da minha vida.

Ao meu orientador, professor e amigo Joel Araújo, pela confiança, pelo apoio e pelos ensinamentos que me foram repassados não somente durante o mestrado, mas em toda a minha passagem pela UFRN, os quais levarei por toda a vida.

À minha bisavó Patrocínia Costa (*in memoriam*) por todos os ensinamentos e pelo amor que me dedicou em sua vida.

Aos professores da UFRN, que tanto me ensinaram e me repassaram conhecimentos valiosos, em especial à Fernanda Mittelbach, Daniel Nelson Maciel e Rodrigo Barros.

Aos tantos amigos que fiz na UFRN, seja na graduação ou no mestrado, por se fazerem presentes na minha vida e ajudarem a tornar as coisas mais fáceis. Em especial à Adryano, Amanda, Ana Isa, Ewerton, Gustavo, Izabella, Lisyane, Nicole e Yana.

Aos Eng. Guilherme Martins Lopes, Diego Lima e Pedro Mitzcun pelas contribuições nas diversas fases da pesquisa.

Aos amigos do IGARN (Ana Vitória, André Viana, Ivanca, Luana, Lucymara, Radimilla e Telma) pela companhia e por todo o incentivo que me deram durante o último ano.

# **ESTUDO DOS EFEITOS LOCALIZADOS DE SEGUNDA ORDEM EM PAREDES DE CONTRAVENTAMENTO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

Kaio Geovanne de Medeiros Dantas

Orientador: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto

## **RESUMO**

O presente estudo consiste na avaliação dos efeitos localizados de segunda ordem em paredes de contraventamento não armadas de alvenaria estrutural através de uma abordagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos. Para isso foi realizada uma adequação no modelo de barras equivalentes para simular a resposta fora do plano de paredes selecionadas em pavimentos tipo de um edifício. A validação do novo modelo foi realizada através da comparação de seus resultados com os resultados de um modelo experimental para paredes esbeltas nos quais a flexão fora do plano das paredes foi mobilizada. As paredes foram modeladas sob três configurações: paredes modeladas completamente com carregamentos aplicados de forma integral; faixas isoladas, e paredes modeladas completamente com aplicação dos carregamentos de forma isolada em cada faixa. As análises consideraram as magnitudes dos deslocamentos das paredes, a mobilização causada pelas faixas, bem como os momentos de segunda ordem originados pela não linearidade geométrica dos modelos. Por fim, foram realizadas verificações do dimensionamento das paredes e das faixas isoladas através das metodologias prescritas na NBR 15961-1:2011, NBR 16868-1:2020 e no Eurocode 6 - PD 6697:2019, com posterior comparação com os resultados obtidos através da modelagem numérica. As análises dos resultados mostraram a influência dos travamentos laterais, proporcionados pelas paredes transversais, na rigidez das paredes e evidenciaram a importância da consideração dos efeitos localizados de segunda ordem no seu dimensionamento, cujos valores de resistências à compressão requeridas elevaram-se substancialmente com a consideração desses efeitos. Também foi possível observar a eficiência do modelo desenvolvido na modelagem proposta, em razão de apresentar resultados próximos aos obtidos através das prescrições da NBR 16868 - 1.

Palavras-chave: alvenaria estrutural; paredes de contraventamento; não linearidade geométrica; efeitos localizados de segunda ordem; modelagem numérica.

# **STUDY OF LOCAL SECOND ORDER EFFECTS ON SHEAR WALLS OF STRUCTURAL MASONRY BUILDINGS**

Kaio Geovanne de Medeiros Dantas

Supervisor: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto

## **ABSTRACT**

The present study consists of the evaluation of local second order effects on unreinforced shear walls in structural masonry through a numerical approach using the Finite Element Method. For this purpose, an adaptation was made to the equivalent frame model to simulate the out-of-plane response of selected shear walls on storeys of a building. The validation of the new model was performed by comparing its results with those obtained from an experimental model for slender walls in which a flexion out-of-plane of the walls was mobilized. The shear walls were modeled in three configurations: completely modeled shear walls under loads applied in full extension; isolated columns; and completely modeled shear walls under the application of loads separately in each column. The analysis considered the magnitudes of the displacements of the walls, the mobilization of the columns, as well as the second order moments caused by the model's geometric nonlinearity. Finally, verifications in the design of walls and isolated columns were carried out using the methodologies prescribed in the Brazilian standards NBR 15961-1:2011, NBR 16868-1:2020, and in the Eurocode 6 - PD 6697:2019, with subsequent comparison with the results obtained from numerical modeling. The analysis of the results showed the influence of the lateral support, provide by the transversal walls, on the shear walls' stiffness, and highlighted the importance of considering the local second order effects in shear walls' design, whose the required values of compressive strength increased substantially when considering these effects. In addition, it was possible to observe the efficiency of the model developed in the proposed approach, since it presented similar results to those resulting from the prescriptions of NBR 16868-1.

**Keywords:** structural masonry; shear walls; geometric nonlinearity; local second order effects; numerical modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo do sistema de contraventamento em edifícios de alvenaria estrutural. ....	23
Figura 2 - Efeito de segunda ordem localizado em pilar parede. ....	25
Figura 3 - Método do Coeficiente Amplificado de Momento. ....	26
Figura 4 - Cálculo do comprimento equivalente dos pilares-parede. ....	27
Figura 5 - Subdivisão de pilar-parede em faixas. ....	28
Figura 6 - Parâmetros para cálculo das espessuras efetivas. ....	30
Figura 7 - Momento de segunda ordem. ....	30
Figura 8 - Características do painel para cálculo da altura efetiva das faixas intermediárias. .	33
Figura 9 – Excentricidades de acordo com as formas de apoio. ....	35
Figura 10 – Diagrama de excentricidades. ....	36
Figura 11 - Distribuição das tensões de compressão na seção genérica. ....	39
Figura 12 – Esquema de disposição das barras no modelo de barras equivalentes. ....	41
Figura 13 – Sistema de eixos locais do elemento FRAME. ....	46
Figura 14 – Dimensões das paredes dos blocos de concreto. ....	48
Figura 15 – Ensaio de prisma. ....	50
Figura 16 – Configurações e dimensões das paredes ensaiadas do Grupo I. ....	51
Figura 17 – Preparação dos ensaios. ....	52
Figura 18 – Ensaio das paredes esbeltas. ....	52
Figura 19 – Deslocamentos laterais da parede CP II. ....	53
Figura 20 - Deslocamentos laterais da parede CP III. ....	54
Figura 21 – Deslocamentos laterais médios na linha central das paredes ensaiadas. ....	55
Figura 22 – Seções das barras verticais e horizontais do modelo de referência. ....	57
Figura 23 – Esquema de aplicação do carregamento no modelo numérico de referência. ....	60
Figura 24 – Seção genérica de um trecho da parede ensaiada por Lopes (2014), considerando apenas as paredes longitudinais dos blocos. ....	61
Figura 25 - Modelo numérico de referência. ....	62
Figura 26 - Comparação entre os deslocamentos transversais do Modelo Experimental e do Modelo Numérico. ....	63
Figura 27 – Posicionamento dos elementos do tipo casca nas paredes de um bloco padrão. .	65
Figura 28 – Esquema da malha de elementos finitos utilizada no Modelo 2. ....	67

Figura 29 – Parede discretizada no Modelo 2. ....	68
Figura 30 – Discretização da malha para o modelo numérico 3. ....	69
Figura 31 – Vista tridimensional do modelo numérico 3. ....	69
Figura 32 – Coeficientes de rigidez local em barra bi-engastada.....	71
Figura 33 – Seções das barras verticais e suas disposições em um bloco do modelo preliminar 6. ....	73
Figura 34 -Vistas do modelo numérico preliminar 6.....	74
Figura 35 – Localização das paredes em estudo na planta baixa do edifício. ....	77
Figura 36 – Grupos de paredes e divisão das faixas analisadas. ....	78
Figura 37 – Características geométricas das seções das faixas. ....	79
Figura 38 – Seções das barras verticais e horizontais aplicadas na modelagem das paredes do edifício. ....	81
Figura 39 – Modelos numéricos das paredes.....	84
Figura 40 – Modelos numéricos das faixas isoladas das paredes.....	85
Figura 41 - Aplicação do carregamento apenas na Faixa 02 da parede do Grupo 01 completa. ....	86
Figura 42 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 01 no pavimento térreo, com carregamento aplicado de forma integral. ....	88
Figura 43 – Indicação da localização das faixas na parede do Grupo 01.....	89
Figura 44 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 01 no 9º pavimento, com carregamento aplicado de forma integral. ....	90
Figura 45 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 02 no pavimento térreo, com carregamento aplicado de forma integral. ....	91
Figura 46 - Indicação da localização das faixas na parede do Grupo 02.....	92
Figura 47 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 02 no 9º pavimento, com carregamento aplicado de forma integral. ....	93
Figura 48 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 03 no pavimento térreo, com carregamento aplicado de forma integral. ....	94
Figura 49 - Indicação da localização das faixas na parede do Grupo 03.....	95
Figura 50 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 03 no 9º pavimento, com carregamento aplicado de forma integral. ....	95
Figura 51 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 01 no pavimento térreo ..	97
Figura 52 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 01 no 9º pavimento...98	
Figura 53 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 01 no 9º pavimento...99	

Figura 54 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 02 no 9º pavimento.	100
Figura 55 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 02 no 9º pavimento.	100
Figura 56 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 03 no 9º pavimento.	101
Figura 57 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 03 no 9º pavimento.	102
Figura 58 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 01 com carregamento aplicado de forma isolada. ....	103
Figura 59 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 02 com carregamento aplicado de forma isolada. ....	105
Figura 60 – Obtenção dos momentos de segunda ordem no modelo numérico. ....	107
Figura 61 - Diagramas de tensões normais para a parede do Grupo 01 no pavimento térreo	113
Figura 62 - Diagramas de tensões normais para a parede do Grupo 01 no 9º pavimento. ....	114
Figura 63 - Dimensões dos trechos da parede do Grupo 01 para cálculo da altura efetiva das faixas.....	123
Figura 64 - Tabela do PD 6697:2019 para obtenção da resistência característica à compressão das paredes.....	133

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do coeficiente $\delta$ para cálculo da espessura efetiva.....	29
Tabela 2 - Resultados dos ensaios dimensionais dos blocos de concreto .....	48
Tabela 3 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos blocos.....	49
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de compressão e flexão das argamassas. ....	49
Tabela 5 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos prismas.....	50
Tabela 6 - Cargas de ruptura e resistência à compressão das paredes ensaiadas. ....	53
Tabela 7 - Propriedades mecânicas obtidas por Lopes (2014). ....	57
Tabela 8 – Resultados e relações entre os módulos de elasticidades dos estudos considerados. .....	58
Tabela 9 – Propriedades físico-mecânicas utilizadas na discretização do modelo de referência. .....	59
Tabela 10 – Comparação entre os deslocamentos transversais máximos numéricos e experimentais.....	64
Tabela 11 – Propriedades dos materiais utilizadas na modelagem numérica.....	66
Tabela 12 – Cálculo do fator de forma para diferentes formatos de seções transversais. ....	72
Tabela 13 – Dimensões e características geométricas das seções analisadas.....	79
Tabela 14 – Seções correspondentes a cada uma das faixas das paredes.....	80
Tabela 15 – Cargas verticais e características geométricas das paredes por pavimento. ....	80
Tabela 16 - Características físico-mecânicas dos materiais utilizados na modelagem das paredes. ....	82
Tabela 17 – Momentos gerados pela excentricidade de carga adotada nas análises. ....	83
Tabela 18 – Valores e comparações entre os momentos de segunda ordem para o pavimento térreo. ....	109
Tabela 19 - Valores e comparações entre os momentos de segunda ordem para o 9º pavimento. .....	110
Tabela 20 - Fatores de eficiência para especificação das resistências de prisma e bloco .....	118
Tabela 21 - Resistências características à compressão para as faixas das paredes no pavimento térreo e 9º pavimento (NBR 15961-1).....	119
Tabela 22 - Resistências requeridas para alvenaria, prisma e bloco para as faixas dos grupos de paredes no pavimento térreo (NBR 15961-1).....	120
Tabela 23 - Resistências requeridas para alvenaria, prisma e bloco para as faixas dos grupos de paredes no 9º pavimento (NBR 15961-1).....	120

Tabela 24 – Comparação entre as resistências requeridas à compressão, relativas à área bruta da seção, para o pavimento térreo (NBR 15961-1). .....	121
Tabela 25 - Resistências características à compressão para as faixas das paredes no pavimento térreo e 9º pavimento (NBR 16868-1).....	126
Tabela 26 - Resistências requeridas para alvenaria, prisma e bloco para as faixas dos grupos de paredes no pavimento térreo (NBR16868-1).....	128
Tabela 27 - Resistências requeridas para alvenaria, prisma e bloco para as faixas dos grupos de paredes no 9º pavimento (NBR16868-1).....	128
Tabela 28 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão, relativas à área bruta da seção, para o pavimento térreo (NBR 16868-1). .....	129
Tabela 29 - Excentricidades de projeto para as seções de acordo com o Eurocode 6 - PD 6697:2019. ....	131
Tabela 30 - Valores dos Capacity Reduction Factors para a seção 01. ....	132
Tabela 31 - Resistências características à compressão, considerando a área líquida, para as faixas das paredes no pavimento térreo e 9º pavimento - (Eurocode 6 - PD 6697:2019). ....	134
Tabela 32 - Resistências características à compressão, considerando a área líquida, para as faixas das paredes no pavimento térreo e 9º pavimento considerando extremidades articuladas (Eurocode 6 - PD 6697:2019).....	134
Tabela 33 - Resistências características à compressão obtidas através do modelo numérico para as faixas das paredes no pavimento térreo.....	135
Tabela 34 - Resistências características à compressão obtidas através do modelo numérico para as faixas das paredes no 9º pavimento.....	136
Tabela 35 - Resistências características à compressão das paredes do pavimento térreo para cada método de análise. ....	137
Tabela 36 - Resistências características à compressão das paredes do 9º pavimento para cada método de análise. ....	137
Tabela 37 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir NBR 15961-1 e da NBR 16868-1.....	138
Tabela 38 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir da NBR 16868-1 e do Eurocode 6 - PD 6697:2019.....	139
Tabela 39 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir da NBR 15961-1 e do Eurocode 6 - PD 6697:2019 considerando extremidades articuladas.....	140

Tabela 40 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir da NBR 16868-1 e do modelo numérico para o pavimento térreo. ....	141
Tabela 41 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir da NBR 16868-1 e do modelo numérico para o 9º pavimento. ....	142
Tabela 42 - Resistências características à compressão dos prismas para as paredes do pavimento térreo de acordo com cada método de análise. ....	143
Tabela 43 - Resistências características à compressão dos prismas para as paredes do 9º pavimento de acordo com cada método de análise.....	143
Tabela 44 – Verificação das tensões máximas de tração nas paredes do pavimento térreo pelo método da excentricidade. ....	144
Tabela 45 - Verificação das tensões máximas de tração nas paredes do pavimento térreo pelo método da combinação linear de ações. ....	144

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área da seção transversal da barra
$A_c$	Área da zona plástica comprimida
$A_t$	Área da seção transversal para determinar o CRF
$a_i$	Largura da faixa de parede
$b$	Comprimento das seções
$D$	Espessura da seção
$D_{eq}$	Espessura equivalente
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal
$E_p$	Módulo de elasticidade longitudinal da alvenaria
$E_a$	Módulo de elasticidade da argamassa
$e_a$	Excentricidade adicional
$e_d$	Excentricidade de projeto
$e_k$	Excentricidade limite do núcleo central de inércia
$e_x$	Excentricidade no topo da parede
$e_t$	Excentricidade total
$f_{am}$	Resistência à compressão da argamassa
$f_{bk}$	Resistência à compressão do bloco
$f_d$	Resistência à compressão de cálculo da alvenaria
$f_k$	Resistência característica à compressão da alvenaria
$f_{pk}$	Resistência à compressão de prisma
$f_{tk}$	Resistência à tração da alvenaria
$F$	Faixas da parede
$h$	Espessura do pilar-parede
$h_b$	Altura do bloco para cálculo do módulo de elasticidade da alvenaria
$h_a$	Altura da junta de argamassa para cálculo do módulo de elasticidade da alvenaria
$I$	Momento de inércia
$K$	Fator de ajuste da resistência à compressão na flexão
$L$	Comprimento da barra;
$l_e$	Comprimento equivalente de flambagem
$M_d$	Momento fletor de cálculo
$M_{2d}$	Momento de segunda ordem

$N_d$	Força Normal de cálculo
$N_p$	Capacidade de suporte da alvenaria (PD 6697:2019)
$N_{rd}$	Força Normal resistente
$N_t$	Capacidade da alvenaria plenamente comprimida (PD 6697:2019)
$r$	Raio de giração da seção
$R$	Coefficiente redutor de esbeltez
$t$	Espessura da seção
$t_e$	Espessura equivalente da seção
$W$	Módulo de resistência à flexão da seção
$x$	Profundidade da linha neutra da seção
$y$	Distância entre o centroide da zona comprimida até o bordo tracionado
$\alpha_v$	Fator para consideração das restrições verticais
$\alpha_h$	Fator para consideração das restrições horizontais
$\omega$	Fator de forma da seção ( <i>shear correction factor</i> ).
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\lambda$	Índice de esbeltez
$\gamma_g$	Coefficiente de ponderação de ações permanentes
$\gamma_q$	Coefficiente de ponderação de ações variáveis
$\gamma_m$	Coefficiente de segurança do material
$\psi$	Fator de redução de combinações
$\beta$	Capacity Reduction Factor (CRF)

## SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	18
1.1.Objetivos.....	19
1.1.1.Objetivo geral.....	19
1.1.2.Objetivos específicos .....	19
1.2.Justificativa .....	20
1.3.Metodologia.....	21
2.REVISÃO DE LITERATURA .....	23
2.1.Paredes de contraventamento .....	23
2.2.Consideração da não linearidade geométrica.....	24
2.3.Considerações normativas dos efeitos localizados de segunda ordem .....	27
2.3.1.Considerações prescritas na NBR 6118:2014.....	27
2.3.2.Considerações prescritas na NBR 15961-1:2011 .....	28
2.3.3.Considerações prescritas na NBR 16868-1:2020 .....	30
2.3.4.Considerações prescritas no Eurocode 6 - PD 6697:2019 .....	34
2.4.Dimensionamento de paredes .....	37
2.4.1.Dimensionamento de acordo com a NBR 16868-1:2020 .....	37
2.4.2.Dimensionamento de acordo com o Eurocode 6 - PD 6697:2019.....	39
2.5.Modelo de barras equivalentes .....	40
2.6.Trabalhos sobre elementos esbeltos em alvenaria encontrados na literatura.....	42
3.CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO .....	45
3.1.Software de análise .....	45
3.2.Calibração do modelo numérico .....	47
3.2.1.Modelo experimental de referência – Lopes (2014).....	47
3.2.1.1.Ensaio de caracterização dos blocos de concreto .....	47
3.2.1.2.Ensaio de caracterização da argamassa .....	49
3.2.1.3.Ensaio de prisma.....	50
3.2.1.4.Ensaio das paredes esbeltas não armadas de bloco de concreto.....	50
3.2.2.Metodologia para calibração dos modelos numéricos .....	55
3.2.3.Modelo numérico de referência .....	56
3.2.4.Modelos numéricos preliminares .....	64
3.2.4.1.Descrição do Modelo 2 .....	65
3.2.4.2.Descrição do Modelo 3 .....	68

3.2.4.3.Descrição do Modelo 4 .....	70
3.2.4.4.Descrição do Modelo 5 .....	72
3.2.4.5.Descrição do Modelo 6 .....	73
4.MODELAGEM DAS PAREDES DO EDIFÍCIO .....	76
4.1.Edifício analisado e divisão das paredes em faixas .....	76
4.2.Elaboração dos modelos numéricos das paredes e faixas.....	80
4.3.Resultados obtidos através da modelagem numérica .....	87
4.3.1.Deslocamentos transversais .....	87
4.3.1.1.Paredes completas com carregamento aplicado de forma integral .....	87
4.3.1.2.Faixas isoladas .....	96
4.3.1.3.Paredes completas com carregamento aplicado isoladamente em cada faixa ....	102
4.3.2.Avaliação dos momentos de segunda ordem nas faixas .....	106
4.4.Comentários .....	111
5.EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO .....	113
5.1.Diagramas de tensões normais.....	113
5.2.Dimensionamento de acordo com as prescrições da NBR 15961-1 .....	114
5.3.Dimensionamento de acordo com as prescrições da NBR 16868-1 .....	122
5.4.Dimensionamento de acordo com as prescrições do Eurocode 6 - PD 6697:2019 .....	129
5.5.Dimensionamento através dos resultados da modelagem numérica.....	135
5.6.Comparações entre os resultados .....	136
5.6.1.Resistência característica à compressão das paredes ( $f_k$ ).....	137
5.6.2.Resistência característica à compressão dos prismas ( $f_{pk}$ ) .....	142
5.6.3.Verificação das tensões de tração .....	143
5.7.Comentários .....	144
6.CONCLUSÕES .....	146
6.1.Definição do modelo computacional .....	146
6.2.Verificação do comportamento das paredes .....	147
6.3.Dimensionamento das faixas das paredes.....	148
6.4.Continuidade da pesquisa .....	149
REFERÊNCIAS .....	150
ANEXO A – TABELAS DE DIMENSIONAMENTO PARA O EUROCODE 6 – PD 6697:2019.....	153

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da alvenaria como técnica de construção remonta à antiguidade, sendo possível encontrar edificações em alvenaria com mais de dez mil anos de idade, muitas ainda hoje em pleno funcionamento. Ao longo de milhares de anos diversos monumentos históricos, até hoje reconhecidos e admirados, foram construídos através desta técnica, como por exemplo a Muralha da China – construída entre 200 a.C. e 220 d.C., empregando-se pedras e tijolos – e o Parthenon Grego, construído entre 480 a.C. e 323 a.C.

Apesar do longo histórico de utilização da alvenaria, foi apenas em meados do século XX que esse sistema estrutural passou a deixar de lado o empirismo que predominava nos projetos até então desenvolvidos. Grande parte dos edifícios antigos em alvenaria foram projetados para trabalharem usando o peso dos pavimentos como garantia da estabilidade, fazendo-se uso de paredes extremamente espessas para evitar esforços advindos de possíveis excentricidades de carregamento ou ações laterais, o que explica o fato de que durante muito tempo deu-se preferência ao uso de estruturas em concreto armado e metálicas para construções mais arrojadas, como prédios de múltiplos pavimentos. Isso levou os projetistas a buscarem soluções técnicas, baseadas em estudos científicos e experimentos laboratoriais, que permitissem reduzir a espessura das paredes sem comprometer a estabilidade da estrutura, permitindo também o uso mais racional do material. Na década de 1950, com o impulso causado pelos experimentos e a introdução das primeiras normas de cálculo estrutural, diversos edifícios de múltiplos pavimentos em alvenaria estrutural passaram a ser construídos em países como Inglaterra, Estados Unidos e Alemanha, fazendo-se uso de paredes não-armadas mais esbeltas (JOAQUIM, 1999; PARSEKIAN et. al., 2012).

No Brasil é possível encontrar construções em alvenaria que datam do século XVI – como por exemplo a Igreja de Nossa Senhora da Graça, em Olinda – PE, e a Igreja Matriz de São Cosme e São Damião, em Recife-PE –, mas foi a partir de meados da década de 1960 que teve início a utilização de blocos de concreto em alvenaria estrutural. Entretanto, como relata Joaquim (1999), o desenvolvimento desse sistema se deu de forma lenta e reservada, devido, entre outros fatores, ao domínio de outros sistemas construtivos mais difundidos na construção civil do país (concreto armado e estruturas metálicas) e a falta de divulgação dos avanços obtidos com os estudos em alvenaria estrutural. Atualmente a construção civil brasileira apresenta crescente interesse no uso da alvenaria estrutural como uma alternativa ao uso tradicional do concreto armado, devido às diversas vantagens constatadas.

Nascimento Neto (1999) cita que esse sistema construtivo se mostra vantajoso ao permitir que o mesmo elemento atue como estrutura, divisor do espaço físico, isolante térmico e acústico, e protetor contra incêndios e intempéries. Também pode-se citar como vantagens a redução da utilização de fôrmas e dos desperdícios, redução do tempo de execução das obras, além da menor demanda do consumo de aço e revestimentos.

Nos edifícios de alvenaria estrutural as ações oriundas do vento e do desaprumo são resistidas pelas paredes de contraventamento, sendo estas também responsáveis por suportar as ações verticais (centradas ou excêntricas) provenientes do peso próprio dos pavimentos que nelas se apoiam. As ações laterais e as ações verticais que atuam nessas paredes podem produzir esforços de flexo-compressão, influenciando diretamente no seu comportamento e dimensionamento. Não obstante, o aumento do índice de esbeltez desses elementos – compreendido como a razão entre a altura e a espessura efetivas – associado à ação simultânea dessas ações, causa efeitos de segunda ordem nestes, aumentando assim a intensidade dos esforços solicitantes. Dessa forma, faz-se necessário realizar uma análise estrutural levando em consideração os efeitos de segunda ordem localizados nessas estruturas, que muitas vezes não são considerados nos projetos usuais de edifícios em alvenaria estrutural ou são considerados de forma simplificada.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

A pesquisa tem como objetivo geral a análise dos efeitos da não linearidade geométrica, associados aos efeitos localizados de segunda ordem, no comportamento e no dimensionamento de paredes de contraventamento de edifícios de alvenaria estrutural através de uma abordagem numérica e da comparação entre as metodologias de dimensionamento encontradas em normas que tratam do projeto de elementos de alvenaria estrutural.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

Os objetivos específicos podem ser descritos da seguinte forma:

- I. Adequar o modelo numérico de barras equivalentes, desenvolvido por Nascimento Neto *et. al.* (2014) e fundamentado no Método dos Elementos Finitos, a fim de analisar o comportamento de paredes de contraventamento de alvenaria estrutural não armada quando submetidas a flexão fora do plano, calibrando-o com base em resultados dos ensaios experimentais obtidos por Lopes (2014);
- II. Avaliação dos métodos para consideração dos efeitos localizados de segunda ordem e da influência do travamento lateral no comportamento e dimensionamento das faixas verticais das paredes de contraventamento conforme prescrições das normas brasileiras NBR 15961-1:2011 e NBR 16868-1:2020 e do Eurocode 6 – PD 6697:2019;
- III. Verificação das resistências requeridas à compressão das faixas das paredes de contraventamento de um edifício de alvenaria estrutural, em pavimentos submetidos a diferentes intensidades de pré-compressão e de esforços laterais associados ao vento;
- IV. Verificar a extensão das paredes que é mobilizada quando da aplicação dos carregamentos verticais de forma isolada em cada faixa.

## 1.2. Justificativa

Durante muito tempo o empirismo predominou nos projetos de edificações em alvenaria estrutural. Parsekian *et. al.* (2012) relata que o processo de tentativas e erros ao longo dos anos resultou na criação de regras de construção antigas que levavam às construções a serem pouco econômicas. Com o passar dos anos, devido à necessidade pela busca de sistemas construtivos alternativos ao concreto armado e estruturas metálicas, diversos estudos levaram ao desenvolvimento dos projetos de alvenaria, com a implantação de normas e maior divulgação de publicações sobre o tema. Entretanto, ainda hoje as normas nacionais e internacionais que tratam dos projetos de alvenaria estrutural incorporam alguns procedimentos simplificados.

A norma brasileira NBR 15961-1:2011, que tratava dos projetos de alvenaria estrutural em blocos de concreto, vigente até o ano de 2019, fornecia considerações muito simplificadas sobre os efeitos localizados de segunda ordem nesses projetos. Araújo (2016) realizou um estudo sobre os efeitos localizados de segunda ordem em paredes de contraventamento de um edifício em alvenaria estrutural de acordo com as prescrições da norma britânica BS 5628 - 1:2005 e da norma brasileira NBR 15961-1:2011. Para isso, realizou a análise das

paredes através da subdivisão em faixas verticais, adaptando o procedimento descrito na NBR 6118:2014 para pilares-parede. Seu estudo mostrou que as resistências requeridas de parede, prisma e bloco se elevaram substancialmente com a consideração dos efeitos localizados de segunda ordem, mostrando assim a importância da realização de uma análise de esforços mais aprimorada e do aprofundamento do estudo já desenvolvido. A norma brasileira para dimensionamento de alvenaria estrutural em vigor (NBR 16868-1:2020) contempla uma consideração mais detalhada dos efeitos localizados de segunda ordem em elementos submetidos à flexo-compressão, porém ainda simplista.

Nesse contexto, esta pesquisa visa colaborar no sentido de realizar um estudo numérico sobre a influência dos efeitos localizados de segunda ordem no comportamento e no dimensionamento dessas estruturas, bem como determinar a influência do seu travamento lateral, de forma a aprimorar a análise estrutural dos edifícios em alvenaria estrutural.

### **1.3. Metodologia**

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi realizada uma ampla revisão bibliográfica acerca de como as normas nacionais e internacionais tratam os efeitos localizados de segunda ordem em paredes de alvenaria estrutural. Foram estudadas as normas brasileiras NBR15961- 1:2011 e NBR 16868-1:2020, além da norma europeia Eurocode 6 – PD 6697:2019. Além disso, também foram pesquisadas e estudadas técnicas de modelagens numéricas para elementos esbeltos de alvenaria estrutural, a fim de se obter um modelo numérico capaz de representar o comportamento dessas estruturas.

No que se refere à modelagem numérica, foram desenvolvidas simulações de paredes de contraventamento de um edifício em alvenaria estrutural pelo Método dos Elementos Finitos, através do pacote de programas computacionais SAP2000® (versão 14), com a utilização do modelo de barras equivalentes, desenvolvido por Nascimento Neto *et. al.* (2014). O modelo de barras equivalentes faz uso de elementos de barras verticais e horizontais que simulam a rigidez das paredes no seu próprio plano. Como as paredes analisadas neste trabalho estarão solicitadas à flexão fora do plano, devido aos efeitos localizados de segunda ordem, foi necessário realizar uma adequação deste modelo: as paredes foram discretizadas de forma a representar os vazados dos blocos, visto que na flexão fora do plano em seções vazadas a seção resistente é composta apenas pela espessura das paredes longitudinais do bloco, desconsiderando qualquer parede transversal que esteja desalinhada ao longo das fiadas, conforme recomenda

Parsekian *et. al.* (2012). Também foi alterada a disposição das barras. Para a validação do novo modelo, foi realizada a calibração com base nos resultados dos ensaios experimentais desenvolvidos por Lopes (2014).

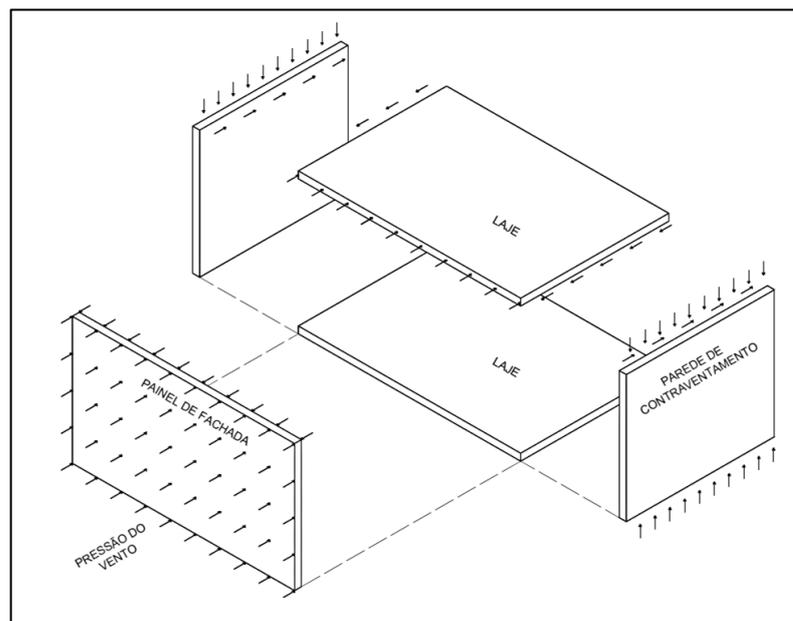
Com o modelo validado, foram modeladas e analisadas paredes de contraventamento de um edifício, submetidas à flexo-compressão, considerando os efeitos localizados de segunda ordem. Neste caso, as paredes foram divididas em faixas verticais, conforme metodologia de análise apresentada na NBR 16868-1:2020, e os efeitos de segunda ordem foram considerados de acordo com as prescrições das normas nacionais e internacionais já citadas. Os resultados obtidos a partir das normas, tais como momentos de segunda ordem e as resistências requeridas à compressão das paredes e prismas, foram confrontados com aqueles obtidos por meio das modelagens computacionais.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Paredes de contraventamento

Em edifícios de alvenaria estrutural são quatro os elementos essenciais que compõem o sistema de contraventamento: as paredes perpendiculares às ações laterais, os diafragmas rígidos horizontais ao nível das lajes, as paredes de contraventamento e as interseções entre esses elementos. Como relata Parsekian *et. al.* (2012), os diafragmas rígidos, que em prédios de múltiplos pavimentos são compostos pelas lajes de concreto, distribuem as ações horizontais para as paredes de contraventamento, a depender de suas rigidezes. A Figura 1 ilustra um esquema do sistema de contraventamento com suas respectivas ações solicitantes.

Figura 1 - Esquema representativo do sistema de contraventamento em edifícios de alvenaria estrutural.



Fonte: Adaptado de Hendry *et. al* (1997)

As paredes de contraventamento, por sua vez, são os elementos estruturais responsáveis por resistir às ações horizontais advindas do vento e de sismos (a depender da localidade), posicionadas paralelamente a essas ações. Também são responsáveis por resistir às ações verticais, bem como servir de apoio aos pavimentos tipo que compõem a edificação,

devendo conferir rigidez necessária para que o edifício possa absorver a ação lateral e a flexão na direção do seu comprimento (PARSEKIAN *et. al.*, 2012).

Parsekian *et. al.* (2012) mostra que a rigidez destas paredes é diretamente proporcional ao seu comprimento, e por esse motivo deve-se prover paredes de comprimentos elevados, distribuídas de maneira uniforme, nas duas direções principais do edifício em planta, para garantir uma elevada e adequada rigidez contra a ação lateral e a estabilidade da edificação em ambas as direções. O comportamento dessas paredes é influenciado pela forma em planta, pelos tamanhos e distribuição de aberturas e pela presença de elementos em seu contorno (como paredes transversais). Para distribuição das ações laterais, diversas normas, como a NBR 16868-1:2020 e a AS 3700:2018, consideram a contribuição dos flanges, provenientes da presença de paredes transversais às paredes de contraventamento ou enrijecedores, o que aumenta a inércia dessas paredes e conseqüentemente sua rigidez. Dessa forma, também é aumentada a capacidade de resistir às cargas verticais e à flexão. Essa contribuição, entretanto, limita-se ao valor de seis vezes a espessura da parede.

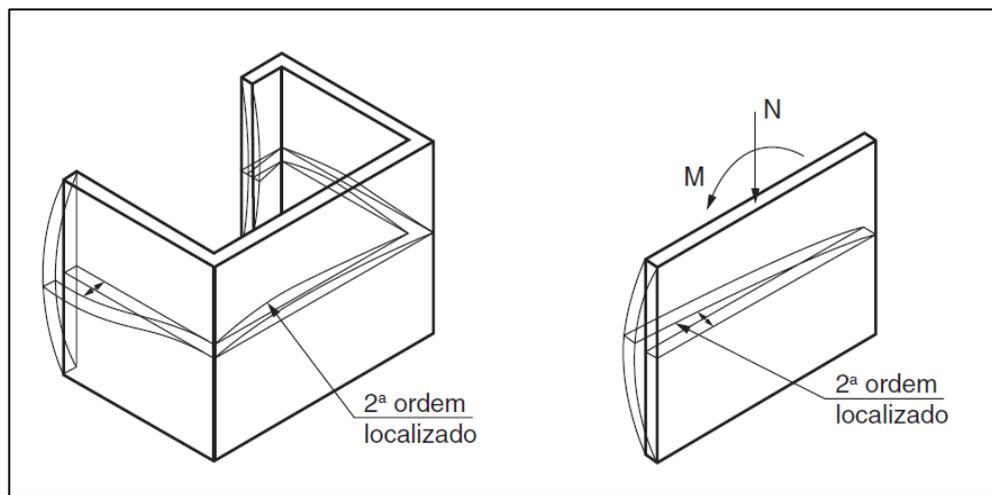
O dimensionamento de paredes submetidas à flexo-compressão, como é o caso das paredes de contraventamento, depende, dentre outros fatores, do seu índice de esbeltez. Ainda hoje as normas brasileiras utilizam o conceito de esbeltez de forma simplificada, onde o comprimento de flambagem é determinado pela altura efetiva do elemento, e o raio de giração é substituído pela espessura efetiva. Paredes muito esbeltas estão sujeitas a maiores deslocamentos laterais, com o conseqüente surgimento dos esforços de segunda ordem, o que faz com que a resistência dessas paredes seja limitada a valores inferiores à resistência à compressão simples do material (PARSEKIAN *et. al.*, 2016). Em diversas normas, incluindo a norma brasileira NBR 16868-1:2020, o índice de esbeltez é expresso pela relação entre a altura efetiva e a espessura efetiva da parede ( $h_e/t_e$ ), e é ele quem determina a consideração ou não dos efeitos de segunda ordem locais, que devem ser somados aos efeitos de primeira ordem oriundos da análise estrutural.

## **2.2. Consideração da não linearidade geométrica**

Quando submetida à esforços horizontais, as estruturas podem sofrer deslocamentos laterais que, devido a ação simultânea das cargas verticais, ocasionam o surgimento de efeitos de segunda ordem. Esses efeitos são calculados quando da análise da estrutura em sua posição final de equilíbrio (posição deformada), determinada pela não linearidade geométrica (NLG), e

são classificados em: efeitos globais, introduzidos pelos deslocamentos horizontais dos nós da estrutura; efeitos locais, que surgem nas barras das estruturas quando seus eixos perdem a retilineidade ou quando os deslocamentos de suas extremidades são diferentes; e efeitos localizados, que surgem em pilares parede, onde é possível que se tenha um trecho com não retilineidade maior que a do eixo do elemento como um todo, causando maiores efeitos de segunda ordem (OLIVEIRA, 2007). A Figura 2 ilustra os efeitos de segunda ordem localizados em um pilar parede.

Figura 2 - Efeito de segunda ordem localizado em pilar parede.



Fonte: NBR 6118:2014

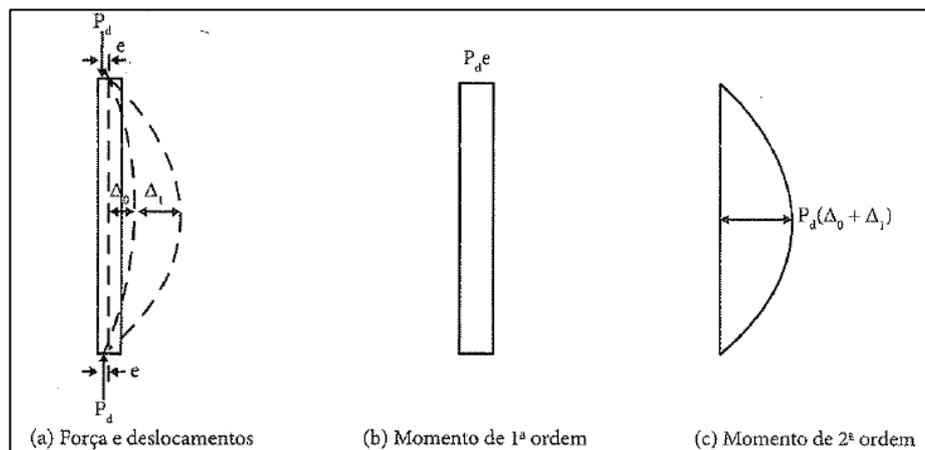
Como relata Oliveira (2007), a não consideração dos efeitos de segunda ordem globais não implica na não consideração dos efeitos locais e localizados, visto que a estabilidade global não interfere na local. Em estruturas com deslocamentos laterais consideráveis, os efeitos de segunda ordem representam uma parcela importante nos esforços finais e não podem ser desconsiderados, sendo necessário também considerar os efeitos da não-linearidade física.

A não-linearidade geométrica está relacionada com a magnitude dos deslocamentos e das deformações da estrutura. A ação simultânea dos carregamentos horizontais e verticais levam a estrutura a uma posição deformada e a uma nova posição de equilíbrio, de forma que a consideração da NLG é realizada através da análise da estrutura em sua posição deformada, computando-se os deslocamentos ocorridos.

Como relata Bean Popehn *et. al.* (2008), paredes submetidas à flexão fora do plano têm seu potencial de instabilidade ampliado devido a redução da seção transversal efetiva pelos

efeitos de fissuração e deflexão lateral. À medida que as tensões de tração na flexão aumentam, aumenta também a deflexão lateral fora do plano, produzindo os momentos de segunda ordem e podendo levar a uma possível ruptura da parede. Parsekian *et. al.* (2012) apresenta prescrições da norma canadense CSA-S301-1 acerca da necessidade de consideração da flambagem em paredes. De acordo com essa norma, dois métodos podem ser aplicados: o primeiro, denominado método do coeficiente amplificador de momento (baseado no procedimento para dimensionamento de pilares de concreto armado), no qual o momento de segunda ordem é considerado através de um incremento de deslocamento ( $\Delta_1$ ) a ser somado ao deslocamento provocado pelo momento de primeira ordem ( $\Delta_0$ ). Já o segundo método, denominado método de força x deslocamento ( $P\Delta$ ), permite o cálculo direto dos deslocamentos de 2ª ordem. A Figura 3 ilustra o método do coeficiente amplificador de momento.

Figura 3 - Método do Coeficiente Amplificado de Momento.



Fonte: Parsekian *et. al.* (2012)

A norma brasileira NBR 15961-1:2011 trazia prescrições simplificadas acerca da consideração da NLG nos projetos de alvenaria estrutural. A atual NBR 16868-1:2020 trouxe avanços na consideração desse tipo de não linearidade com a inclusão da metodologia de análise das paredes por faixas isoladas, além de mudanças nos cálculos de parâmetros como a altura efetiva e momentos de segunda ordem locais.

### 2.3. Considerações normativas dos efeitos localizados de segunda ordem

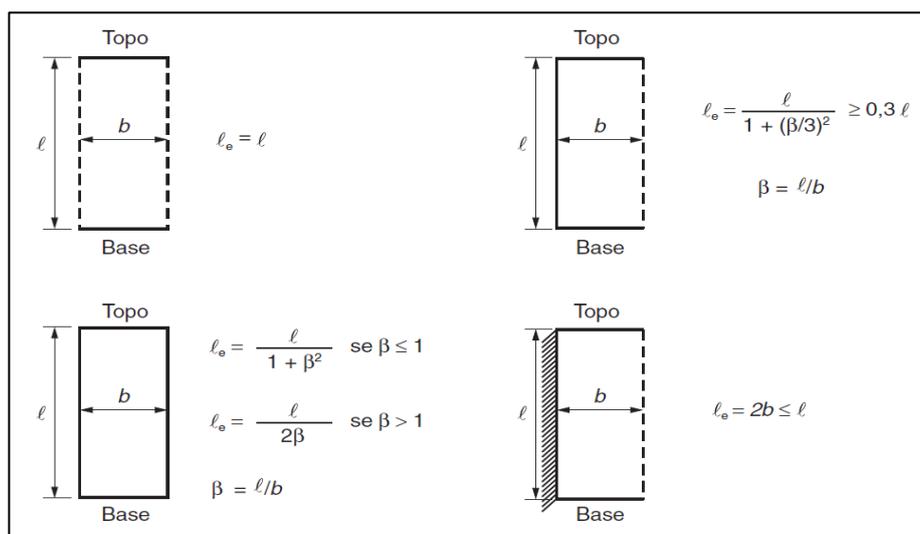
Neste item são apresentados os métodos normativos para consideração dos efeitos localizados de segunda ordem em paredes estruturais. Estão mostrados os métodos prescritos pela NBR 6118:2014, para o caso de estruturas em concreto armado – adaptado por Araújo (2016) para a verificação por faixas de paredes de contraventamento em alvenaria estrutural –, além dos métodos prescritos pela NBR 15961-1:2011, pela NBR 16868-1:2020 e pelo Eurocode 6 – PD 6697:2019.

#### 2.3.1. Considerações prescritas na NBR 6118:2014

A NBR 6118:2014 prescreve que para pilares-paredes – pilares cuja relação entre a base e a altura da seção transversal resultam maior que cinco – simples ou compostos, onde o índice de esbeltez de cada lâmina que os compõem seja menor que 90, o efeito localizado de 2ª ordem deve ser considerado através da decomposição do pilar-parede em faixas verticais, devendo estas serem analisadas como pilares isolados.

O cálculo do índice de esbeltez depende do comprimento equivalente ( $l_e$ ) do elemento, a depender da vinculação de suas extremidades, como ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Cálculo do comprimento equivalente dos pilares-parede.



Fonte: NBR 6118:2011

A largura ( $a_i$ ) das faixas pode ser calculada empregando-se a Equação 1.

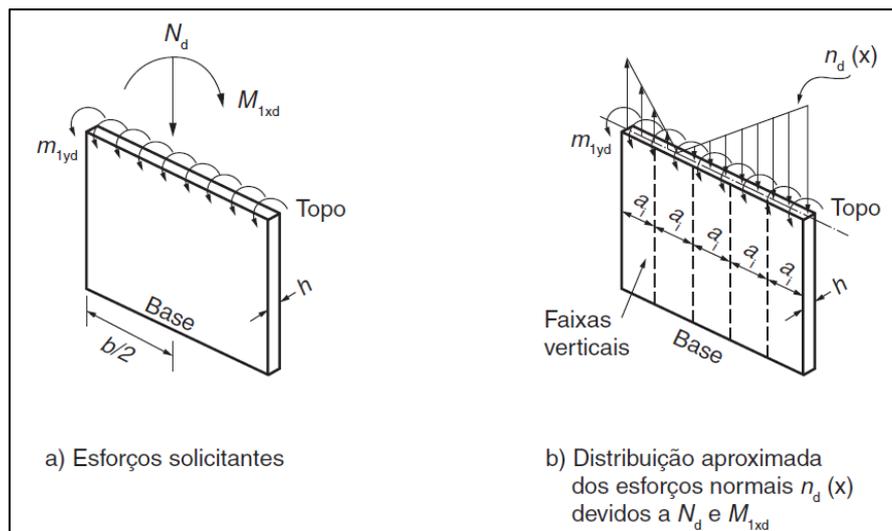
$$a_i = 3 h \leq 100 \text{ cm} \quad (\text{Equação 1})$$

Dessa forma, o dimensionamento de cada faixa deve ser realizado como um pilar isolado submetido aos esforços  $N_i$  e  $M_{yid}$ , sendo este último calculado pela Equação 2.

$$M_{yid} = m_{y1d} a_i \quad (\text{Equação 2})$$

A Figura 5 ilustra a subdivisão do pilar-parede em faixas, bem como seus respectivos esforços solicitantes.

Figura 5 - Subdivisão de pilar-parede em faixas.



Fonte: NBR 6118:2011

Além disso, a norma prescreve que aos efeitos localizados de segunda ordem em cada faixa devem ser assimilados os efeitos locais de segunda ordem.

### 2.3.2. Considerações prescritas na NBR 15961-1:2011

De acordo com a NBR 15961-1:2011 o índice de esbeltez de uma parede é dado pela razão entre a sua altura efetiva ( $h_e$ ) e sua espessura efetiva ( $t_e$ ), conforme a Equação 3.

$$\lambda = h_e/t_e \quad (\text{Equação 3})$$

Os itens 9.4.1 e 9.4.2 da referida norma apresentam as diretrizes para o cálculo desses parâmetros.

A altura efetiva de uma parede é definida a partir das vinculações de suas extremidades e deve ser considerada igual:

- À altura da parede, quando existem travamentos restringindo os deslocamentos horizontais de suas extremidades;
- Ao dobro da altura da parede, se uma extremidade for livre e a outra apresentar travamento restringindo os deslocamentos horizontais.

Já a espessura efetiva de uma parede é definida de acordo com a presença ou não de enrijecedores, devendo ser igual à própria espessura ( $t$ ) da parede quando na ausência de enrijecedores, não sendo considerados os revestimentos. Quando da presença de enrijecedores regularmente espaçados, a espessura efetiva deve ser calculada de acordo com a Equação 4.

$$t_e = \delta t \quad (\text{Equação 4})$$

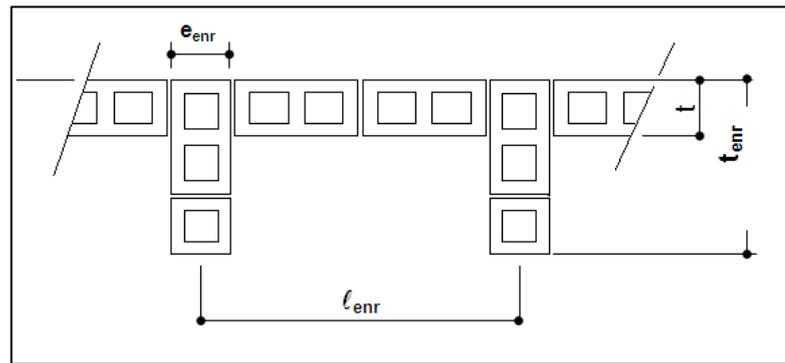
O coeficiente  $\delta$  é calculado de acordo com a Figura 6, com parâmetros dados pela Tabela 1. A tabela permite interpolação linear dos valores.

Tabela 1 – Valores do coeficiente  $\delta$  para cálculo da espessura efetiva

$l_{enr}/e_{enr}$	$t_{enr}/t = 1$	$t_{enr}/t = 2$	$t_{enr}/t = 3$
6	1,0	1,4	2,0
8	1,0	1,3	1,7
10	1,0	1,2	1,4
15	1,0	1,1	1,2
20 ou mais	1,0	1,0	1,0

Fonte: Adaptado da NBR 15961-1:2011

Figura 6 - Parâmetros para cálculo das espessuras efetivas.



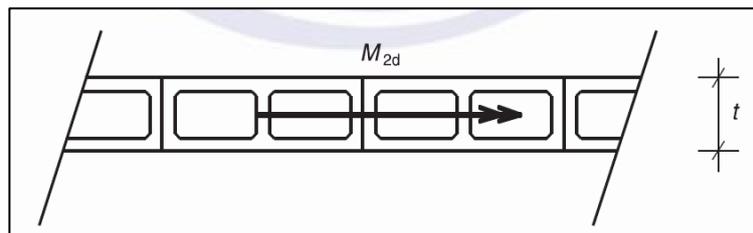
Fonte: NBR 15961-1

O índice de esbeltez é limitado a 24 para alvenaria não armada e a 30 para alvenaria armada.

A norma considera como esbeltos os elementos com índice de esbeltez superior a 12. Para esses elementos, a consideração dos efeitos localizados de segunda ordem é feita através da aplicação de um momento concentrado de segunda ordem fora do plano da parede, conforme ilustra a Figura 7, a ser adicionado aos momentos de primeira ordem. Na falta de procedimentos mais precisos, o cálculo desse momento é feito de acordo com a Equação 5.

$$M_{2d} = \frac{N_d (h_e)^2}{2000 t} \quad (\text{Equação 5})$$

Figura 7 - Momento de segunda ordem.



Fonte: NBR 15961-1:2011

### 2.3.3. Considerações prescritas na NBR 16868-1:2020

A NBR 16868-1:2020 traz algumas mudanças para a consideração dos efeitos localizados de segunda ordem nos elementos de alvenaria submetidos à flexo-compressão. A

começar pelo cálculo da altura efetiva dos elementos, que passa a considerar a existência de travamentos laterais transversais às paredes.

De acordo com esta norma, a altura efetiva ( $h_e$ ) da parede deve ser considerada igual:

a) Para os casos em que não há travamento lateral transversal à parede:

– À altura da parede, quando existem travamentos restringindo os deslocamentos horizontais de suas extremidades superior e inferior;

– Ao dobro da altura da parede, se uma extremidade for livre e se houver travamento restringindo conjuntamente os deslocamentos horizontais e a rotação na outra extremidade superior ou inferior.

b) Para os casos em que houver travamento lateral transversal à parede, conforme Equação 6.

$$h_e \leq \begin{cases} \alpha_v h \\ 0,7 \sqrt{\alpha_v h \alpha_h l} \end{cases} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$\alpha_v$  é um fator para consideração das restrições verticais, devendo ser tomado como:

- Igual a 1,0 se houver travamentos restringindo os deslocamentos horizontais das duas extremidades superior e inferior;

- Igual a 2,5 se houver travamentos restringindo os deslocamentos horizontais de apenas uma das extremidades superior ou inferior;

$\alpha_h$  é um fator para consideração das restrições horizontais, devendo ser tomado como:

- Igual a 1,0 se houver travamentos restringindo os deslocamentos horizontais das duas extremidades esquerda e direita;

- Igual a 2,5 se houver travamentos restringindo os deslocamentos horizontais de apenas uma das extremidades esquerda ou direita;

A norma ainda define que as paredes de travamento devem ter comprimento mínimo igual a 1/5 da altura da parede que está sendo travada e no mínimo a mesma espessura desta. Precisam também possuir travamentos que restrinjam os deslocamentos horizontais das suas extremidades superior e inferior. A verificação do comprimento mínimo deve desconsiderar a espessura da parede que está sendo travada.

O cálculo da espessura equivalente permanece igual ao da NBR 15961-1:2011, já explicado no item 2.3.2.

Da mesma forma que NBR 15961-1:2011, a NBR 16868-1:2020 faz a consideração dos efeitos localizados de segunda ordem através da aplicação de um momento concentrado de segunda ordem fora do plano da parede, a ser adicionado aos momentos de primeira ordem. Entretanto, agora são considerados esbeltos os elementos cujo índice de esbeltez (também calculado pela relação entre altura efetiva e espessura efetiva, conforme Equação 3) é superior a 16. Além disso, a expressão para o cálculo do momento concentrado de segunda ordem sofreu alterações baseadas em prescrições de normas internacionais para dimensionamento de elementos esbeltos de alvenaria, tais como a BS 5628-1:2005, que posteriormente foi substituída pelo Eurocode 6 (BS EN 1996-1-1:2005 + A1:2012) e pelo PD 6697:2019. De acordo com essa norma, a altura efetiva das paredes deve ser igual a 0,75 vezes a distância entre os travamentos laterais quando estes fornecem maior resistência ao movimento lateral, tal como ocorre quando as paredes são travadas por lajes de concreto, de modo que a Equação 5 pode ser reescrita conforme apresentado na Equação 7.

$$M_{2d} = \frac{N_d (0,75 \times h_e)^2}{2000 t} \quad (\text{Equação 7})$$

Os termos dessa equação podem ser rearranjados conforme apresentado na Equação 8.

$$\frac{M_{2d}}{N_d} \times \frac{2000 t}{0,75^2} = h_e^2 \rightarrow \frac{M_{2d}}{N_d} \times 3600 t = h_e^2 \quad (\text{Equação 8})$$

Dessa forma, na falta de procedimentos mais precisos, a NBR 16868-1:2020 prescreve que o cálculo do momento concentrado de segunda ordem deve ser realizado de acordo com a Equação 9.

$$M_{2d} = \frac{N_d (h_e)^2}{3600 t} \quad (\text{Equação 9})$$

A referida norma também contempla uma nova possibilidade, para o caso específico de paredes, para verificação da seção em flexão oblíqua pela verificação de faixas submetidas à flexo-compressão fora do plano da parede, semelhante ao procedimento adotado na

verificação dos efeitos localizados de segunda ordem em pilares-parede na NBR 6118:2014. Nesse caso, a largura ( $a_i$ ) das faixas é dada pela Equação 10.

$$a_i = 5 t \leq 100 \text{ cm} \quad (\text{Equação 10})$$

O índice de esbeltez e o eventual momento de 2ª ordem devem ser calculados para cada faixa, mas nesse caso deve-se tomar a altura efetiva ( $h_e$ ) conforme cada caso:

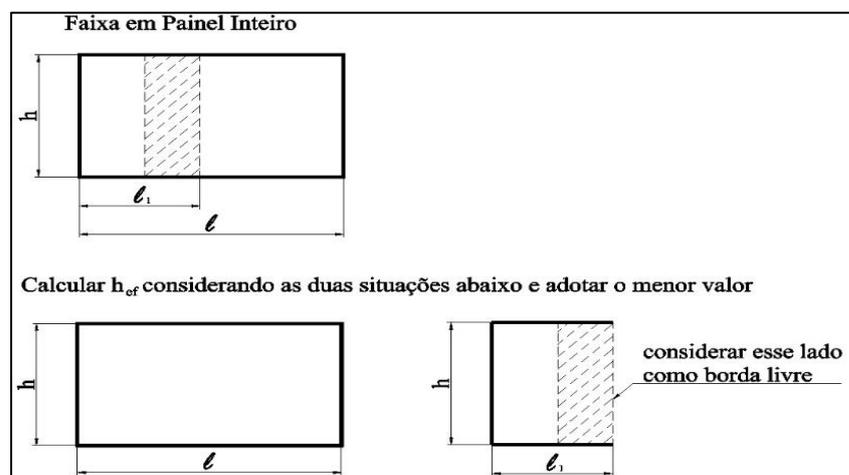
– Quando não houver travamento lateral do trecho inteiro, a altura efetiva deve ser calculada conforme o item (a) explicado anteriormente;

– Quando houver travamento lateral do trecho inteiro, a altura efetiva deve ser calculada conforme o item (b) explicado anteriormente, considerando, entretanto, o menor valor de ( $h_e$ ) entre:

- I.  $h_e$  calculada no trecho inteiro;
- II.  $h_e$  calculada considerando o lado interno livre e o outro lado conforme o painel inteiro, considerando a largura ( $l$ ) do painel como sendo a distância entre o apoio e a face mais interna da faixa.

A Figura 8 ilustra a consideração das características do painel para o cálculo da altura efetiva das faixas intermediárias.

Figura 8 - Características do painel para cálculo da altura efetiva das faixas intermediárias.



Fonte: NBR 16868-1:2020

O cálculo da faixa deve considerar um eventual momento fora do plano, além da força normal. Esse momento fora do plano corresponde ao momento  $m_{y1d}$  já ilustrado na Figura 5, e para o caso de edifícios usuais corresponde ao momento causado pela força lateral do vento, empuxo de terra ou líquido, ou pelos efeitos de 2ª ordem.

#### 2.3.4. Considerações prescritas no Eurocode 6 - PD 6697:2019

Diferente do que prescreve a NBR 16868-1:2020 para a consideração dos efeitos localizados de segunda ordem, o Eurocode 6 – PD 6697:2019 considera esses efeitos através de uma excentricidade adicional que modifica os coeficientes redutores de resistência (ou *Capacity Reduction Factors* – CRF), os quais estão definidos no decorrer deste trabalho e influenciam diretamente no cálculo das resistências.

- Excentricidade adicional

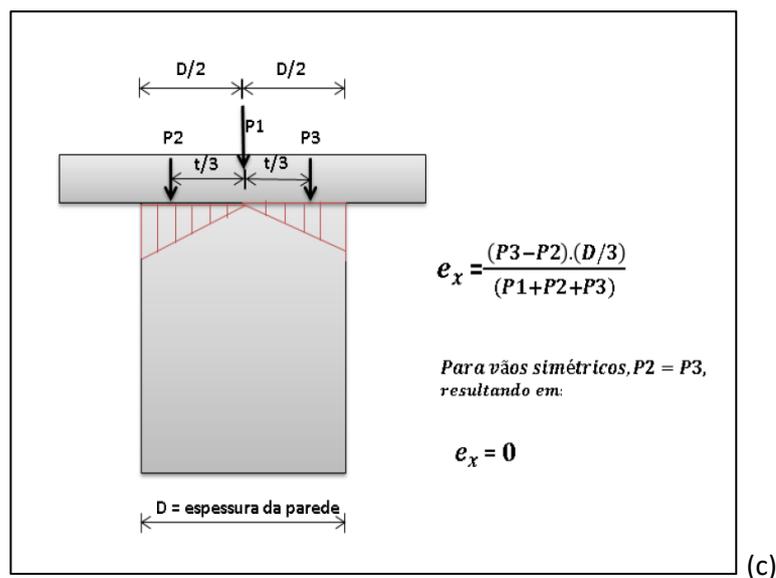
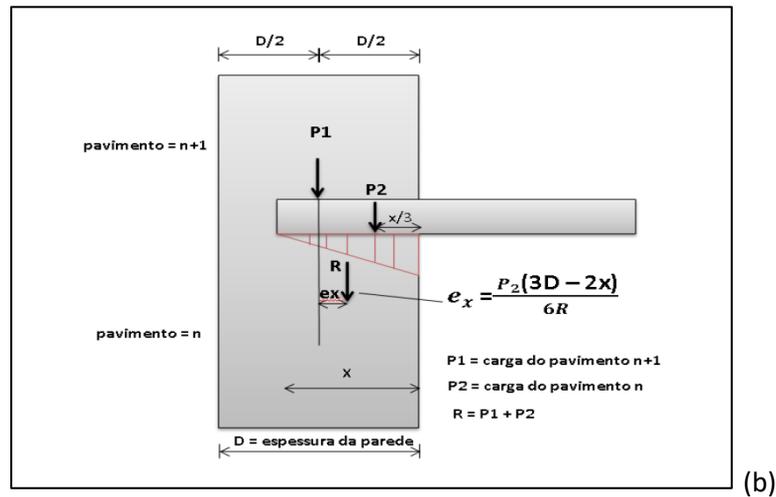
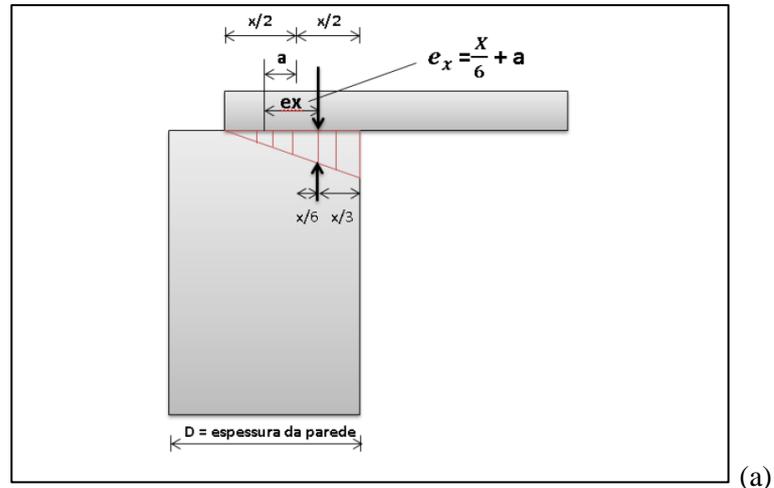
A excentricidade adicional ( $e_a$ ) varia linearmente de zero, no topo e na base do elemento, até seu valor máximo no quinto central da altura do pilar. Ela é obtida através da Equação 11.

$$e_a = D \left( \frac{1}{2400} \lambda^2 - 0,015 \right) \quad (\text{Equação 11})$$

- Excentricidade no topo da parede

A excentricidade no topo da parede ( $e_x$ ) depende da forma como a laje se apoia na parede, além da localização desta, considerando uma distribuição de tensão linear no apoio. Na Figura 9 são mostradas algumas formas de apoio e suas respectivas expressões para o cálculo da excentricidade.

Figura 9 – Excentricidades de acordo com as formas de apoio: (a) Parede de extremidade de pavimento superior; (b) Parede de extremidade de pavimento intermediário; (c) Parede interna.



Fonte: Araújo (2016)

Para vãos simétricos,  $P_2 = P_3$ ,  
resultando em:

$$e_x = 0$$

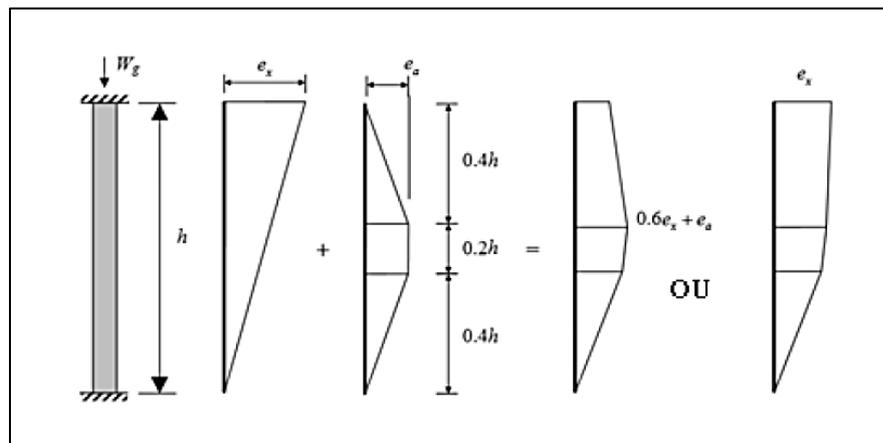
- Excentricidade de projeto

A excentricidade de projeto ( $e_d$ ) deve ser aquela que resulta no maior valor entre a excentricidade no topo da parede e a excentricidade total ( $e_t$ ), calculada conforme a Equação 12.

$$e_t = 0,6 e_x + e_a \quad (\text{Equação 12})$$

A Figura 10 ilustra os diagramas de excentricidades com suas possíveis combinações.

Figura 10 – Diagrama de excentricidades.



Fonte: Cipriano (2009, apud Araújo, 2016)

- Índice de esbeltez

O índice de esbeltez é definido como sendo a relação entre a altura efetiva e a espessura efetiva da parede. Entretanto, o Eurocode 6 - PD 6697:2019 trata de pilares e paredes com seção maciça retangular, e para esse caso a espessura efetiva coincide com a própria espessura da parede. Para seções complexas, como é o caso de paredes de bloco de concreto ou cerâmico, Araújo (2016) cita que esse conceito é inadequado, sendo preferível utilizar o conceito de raio de giração. Dessa forma, calcula-se a largura da parede de seção complexa como uma espessura equivalente da parede de seção retangular que resultaria no mesmo valor do índice de esbeltez. Sendo assim, é necessário calcular a espessura equivalente com base nas Equações 13 a 15.

$$I = \frac{b D^3}{12} \quad (\text{Equação 13})$$

$$A = b \cdot D \quad (\text{Equação 14})$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{b \cdot D^3}{12 \cdot b \cdot D}} \rightarrow r = \sqrt{\frac{D^2}{12}} \rightarrow r = \frac{D_{eq}}{3,46} \rightarrow D_{eq} = 3,46 r \quad (\text{Equação 15})$$

Dessa forma, o índice de esbeltez para alvenaria de seção complexa é calculado conforme a Equação 16.

$$\lambda = \frac{h_e}{D_{eq}} \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{h_e}{3,46 r} \quad (\text{Equação 16})$$

## 2.4. Dimensionamento de paredes

Nesta seção são apresentadas as prescrições acerca do dimensionamento de paredes em alvenaria estrutural de acordo com a norma brasileira NBR 16868-1 e o Eurocode 6 - PD 6697:2019. O dimensionamento de acordo com a NBR 16868-1 é análogo ao prescrito na NBR 15961-1.

### 2.4.1. Dimensionamento de acordo com a NBR 16868-1:2020

A NBR 16868-1:2020, em seu item 11, prescreve as recomendações para dimensionamento de elementos de alvenaria em seu estado-limite último. Esse dimensionamento, salvo quando devidamente especificado, deve ser realizado considerando-se a seção homogênea e sua área bruta. Para o caso de seções transversais submetidas à flexo-compressão, como é o caso das seções das paredes de contraventamento, a referida norma realiza o dimensionamento no estágio I.

- Elementos submetidos à compressão simples

Para as paredes submetidas à compressão simples, pode-se calcular o esforço resistente de cálculo através da Equação 17.

$$N_{rd,parede} = f_d \cdot A \cdot R \quad (\text{Equação 17})$$

Para pilares submetidos à compressão simples, pode-se calcular o esforço resistente de cálculo através da Equação 18.

$$N_{rd,pilar} = 0,9 f_d \cdot A \cdot R \quad (\text{Equação 18})$$

- Elementos submetidos à flexo-compressão

Para o caso de elementos submetidos à flexo-compressão, faz-se necessário verificar tanto as tensões máximas de compressão quanto as tensões máximas de tração que atuam nas seções transversais.

De acordo com a referida norma, para os elementos submetidos à flexo-compressão as tensões normais na seção transversal devem ser obtidas pela superposição das tensões normais lineares causadas pelo momento fletor com as tensões normais uniformes causadas pela força de compressão, através da Equação 19.

$$\frac{N_d}{A \cdot R} + \frac{M_d}{W \cdot K} \leq f_d \quad (\text{Equação 19})$$

Pela NBR 15961-1:2011 o valor de  $K$  é igual a 1,5. Já a NBR 16868-1:2020 estabelece esse parâmetro em função do grauteamento e da presença de flanges, de forma que se deve adotar o valor de 1,5 para regiões de alvenaria não grauteada e 2,0 para regiões de alvenaria completamente grauteada fora do plano. Além disso, quando da ausência de travamento na extremidade, o valor de  $K$  deve ser multiplicado por  $R$ .

Caso exista tensão de tração, seu valor máximo deve ser menor ou igual à resistência à tração da alvenaria ( $f_{td}$ ). Segundo Joaquim (1999) a verificação da existência de tensões de tração em seções submetidas à flexo-compressão pode ser feita pela verificação da excentricidade ( $e_k$ ), que para seções irregulares é dada através da Equação 20.

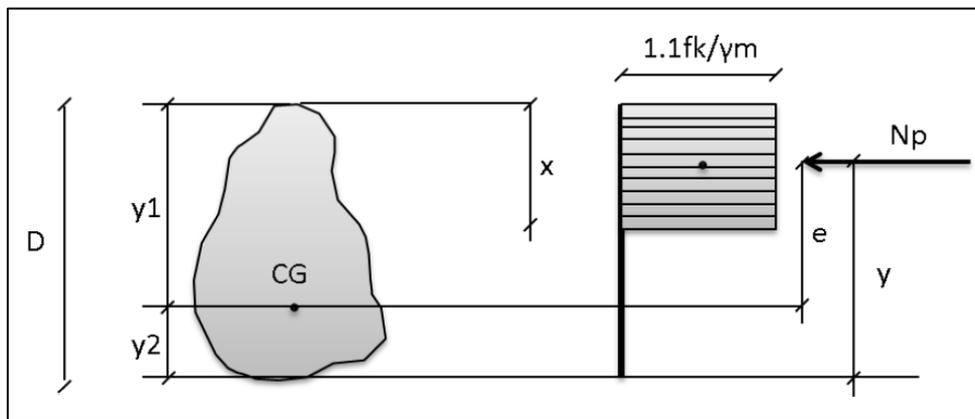
$$e_k = \frac{I}{A \cdot y} \rightarrow e_k = \frac{r^2}{y} \quad (\text{Equação 20})$$

Caso a excentricidade equivalente, calculada pela divisão entre o momento fletor e o esforço normal atuantes na seção ( $M/N$ ), resulte inferior à ( $e_k$ ), a seção estará totalmente comprimida.

#### 2.4.2. Dimensionamento de acordo com o Eurocode 6 - PD 6697:2019

A norma europeia para dimensionamento de alvenaria estrutural trata apenas de pilares e paredes simples de seção maciça. O dimensionamento desses elementos, quando submetidos a carregamentos verticais, é realizado pela consideração de uma seção com trecho plastificado de tensões de compressão e distribuição uniforme ao longo da zona comprimida (PHIPPS, 1987 *apud* Araújo, 2016). A Figura 11 ilustra essa distribuição de tensões em uma seção genérica, com o valor da tensão a ser considerada.

Figura 11 - Distribuição das tensões de compressão na seção genérica.



Fonte: Araújo (2016)

Dessa forma, a capacidade de suporte da alvenaria ao carregamento vertical ( $N_p$ ) é dada pela Equação 21.

$$N_p = \frac{1,1 A_c f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Equação 21})$$

Por sua vez, a capacidade de suporte da alvenaria ao carregamento vertical centrado ( $N_t$ ), quando a seção estará totalmente comprimida, é dada pela Equação 22.

$$N_t = \frac{A_t f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Equação 22})$$

A partir dessas duas capacidades de suporte é possível calcular os coeficientes redutores da capacidade resistente (*Capacity Reduction Factors – CRF*) através da Equação 23.

$$\beta = \frac{N_p}{N_t} = \frac{1,1 A_c}{A_t} \quad (\text{Equação 23})$$

A capacidade resistente de paredes esbeltas é menor se comparada às paredes curtas, visto que além da excentricidade de topo é considerada uma excentricidade adicional originada pela deflexão lateral. Em função da excentricidade de projeto, que é influenciada pela excentricidade adicional, e do índice de esbeltez do elemento, é possível calcular os coeficientes redutores da capacidade resistente.

A resistência de projeto de pilares ( $N_D$ ) submetidos a carregamento vertical pode ser calculada pela Equação 24.

$$N_D = \frac{\beta \cdot A \cdot f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Equação 24})$$

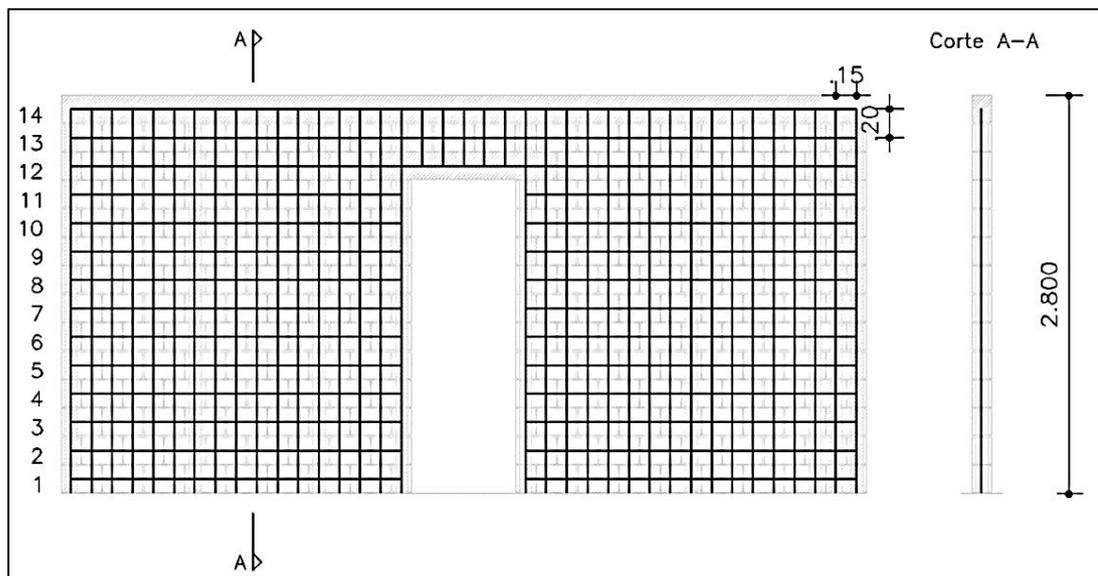
## 2.5. Modelo de barras equivalentes

Usualmente a modelagem de paredes estruturais de alvenaria é feita através do Método dos Elementos Finitos, empregando-se para isso elementos de casca ou de chapa. Esses modelos, apesar de serem considerados bastante refinados, são de difícil utilização nos projetos usuais de edifícios em alvenaria estrutural. Nascimento Neto *et. al.* (2014) propôs um modelo de barras equivalentes como alternativa prática aos modelos de casca. Esse modelo foi utilizado por Medeiros (2015) em seu estudo sobre a interação entre painéis de alvenaria e estruturas de suporte em concreto armado, no qual foram avaliadas as tensões na base da parede e os esforços e deslocamentos na viga de apoio, comparando os resultados com o modelo que utiliza elementos de casca.

O modelo consiste na utilização de elementos de barra verticais e horizontais para simular a rigidez das paredes no seu próprio plano. A discretização consiste na disposição de barras verticais espaçadas a cada 15 cm e barras horizontais espaçadas a cada 20 cm, com seções medindo, respectivamente, (14 x 15) cm<sup>2</sup> e (14 x 20) cm<sup>2</sup> para o caso de alvenaria não grauteada. Para esse caso, o material foi considerado com comportamento ortotrópico, admitindo-se que o módulo de deformação longitudinal das barras horizontais é metade do módulo de deformação longitudinal das barras verticais. Nos trechos com grauteamento, a seção das barras permaneceu com as mesmas propriedades geométricas, tendo sido adotado o módulo de elasticidade de alvenaria grauteada para considerar o acréscimo de rigidez devido ao graute. Nesse caso específico de alvenaria grauteada considerou-se comportamento isotrópico, com

módulo de deformação longitudinal igual para as barras horizontais e verticais. A disposição das barras foi feita de modo a coincidir cada uma delas com as faces dos elementos do modelo de casca, utilizado por Medeiros (2015) como referência. O autor ainda destaca a importância dessa disposição, visto que o modelo é muito sensível à discretização utilizada. A Figura 12 ilustra o esquema da disposição das barras no modelo de barras equivalentes.

Figura 12 – Esquema de disposição das barras no modelo de barras equivalentes.



Fonte: Cavalcanti (2018)

Medeiros (2015) ainda avaliou um modelo no qual as barras verticais foram dispostas no eixo dos elementos de casca do modelo de referência, aproximadamente no centro de gravidade dos furos dos blocos, concluindo que o posicionamento das barras na direção horizontal coincidindo com o eixo das fiadas e na direção vertical com o eixo dos vazados do bloco, aperfeiçoa a modelagem.

Com os resultados obtidos por Medeiros (2015) foi possível verificar a eficácia e o enorme potencial do uso do modelo de barras equivalentes para aplicação de projetos usuais de edifícios em alvenaria estrutural, visto que este apresentou resultados satisfatórios na previsão das tensões na base da parede e dos esforços da viga quando comparados aos resultados do modelo com elementos finitos de casca.

Posteriormente o modelo foi usado por Cavalcanti (2018), que realizou um estudo preliminar à análise do colapso progressivo em edifícios de alvenaria estrutural sobre estruturas de transição em concreto armado, e também por Lopes (2019), que desenvolveu um estudo

acerca do comportamento de edifício em alvenaria estrutural sob estruturas de transição, considerando a interação solo-estrutura e os efeitos construtivos.

## **2.6. Trabalhos sobre elementos esbeltos em alvenaria encontrados na literatura**

Sandoval e Roca (2012) realizaram um estudo da influência de diversos parâmetros no comportamento à flambagem de paredes de alvenaria cerâmica submetidas a carregamentos verticais. Para isso, analisaram os efeitos do índice de esbeltez, da excentricidade da carga aplicada, da rigidez e da resistência à tração da interface bloco-argamassa na capacidade de carga dessas paredes através de ensaios experimentais e de um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos com abordagem de micromodelagem. A abordagem adotada admitia que a não linearidade do modelo estava concentrada nas interfaces bloco-argamassa, enquanto os blocos possuíam um comportamento linear elástico.

O programa experimental foi conduzido para analisar a resposta de paredes de alvenaria em escala 1/4 submetidas a compressão, considerando diferentes índices de esbeltez e excentricidades de carga ( $0$ ,  $t/3$  e  $t/6$ ). Tais ensaios mostraram que esses dois parâmetros tiveram um efeito significativo sobre a capacidade de carga das paredes. Por sua vez, o modelo numérico foi aplicado, considerando a não linearidade geométrica, através do software DIANA. No modelo numérico, mesmo nas situações de carregamento centrado, foi aplicada uma excentricidade mínima, dada a necessidade de ativar numericamente a resposta não linear. O modelo foi validado com base nos resultados dos ensaios experimentais, em termos de tensão de ruptura e deflexão lateral, obtendo boa capacidade de previsão desses resultados.

De acordo com os autores, para paredes sob cargas verticais com excentricidade nula, o principal modo de ruptura foi pelo esmagamento da alvenaria, situação na qual a rigidez tornou-se mais determinante, enquanto que para maiores excentricidades a ruptura ocorreu principalmente devido à instabilidade lateral. Neste último caso, a rigidez desempenhou um papel limitado. Sendo assim, observou-se que a esbeltez e a rigidez da parede influenciam de maneira semelhante na capacidade de carga, podendo serem expressas através de um parâmetro unificado. O estudo também mostrou que a resistência à tração tem notável influência na capacidade de carga das paredes esbeltas sujeitas a cargas muito excêntricas, e negligenciá-la pode levar a previsões de capacidade de carga muito subestimadas.

Bean Popehn *et. al.* (2008) realizou um estudo sobre a influência de carregamentos transversais na estabilidade de paredes esbeltas de alvenaria não armadas. Para isso, desenvolveu um programa experimental com ensaios de paredes esbeltas não armadas,

carregadas transversalmente ao seu plano, para investigar seus comportamentos de flambagem. Com os resultados experimentais foram desenvolvidos dois modelos matemáticos: um modelo de elementos finitos para simular o comportamento pós fissuração e pós flambagem das paredes, e um modelo considerando a flambagem de forma elástica linear. Esses modelos foram usados para investigar o comportamento de paredes desse tipo frente aos efeitos dos carregamentos transversais e das excentricidades dos carregamentos verticais.

O programa experimental compreendeu ensaios com paredes de alvenaria de tijolos cerâmicos e de blocos de concreto. Foram aplicados os carregamentos axiais e, numa segunda fase, os carregamentos laterais, para os quais foram localizados os pontos de inflexão para definir a altura efetiva dos corpos de prova. Os ensaios mostraram que os efeitos da carga lateral fora do plano e da excentricidade dos carregamentos verticais devem ser considerados quando da análise da capacidade de flambagem das paredes não armadas de alvenaria.

Os autores observaram que as paredes responderam ao carregamento lateral de forma estável até a fissuração. Após isso verificou-se a abertura de uma fenda na junta de assentamento, próxima à meia altura da parede. Após atingir a capacidade de carga, os deslocamentos cresceram rapidamente e a resistência às cargas verticais e laterais diminuíram de forma rápida. Também foi possível observar que imperfeições iniciais, que se manifestaram como deflexões laterais crescentes com o aumento das cargas axiais, podem aumentar ou diminuir significativamente a capacidade da seção, devendo seus efeitos serem levados em consideração no dimensionamento de paredes esbeltas não armadas de alvenaria estrutural.

Kuddus (2010) realizou um estudo numérico para simulação da ruptura por flambagem de paredes portantes de alvenaria não armadas. Foi desenvolvido um modelo numérico com base no Método dos Elementos Finitos, através de uma abordagem de micromodelagem simplificada, na qual a resposta não linear da estrutura foi localizada na interface bloco-argamassa. Esse modelo foi validado de acordo com resultados obtidos em ensaios experimentais desenvolvidos no Laboratório da Universidade Técnica da Catalunha (UPC). Comparações com resultados obtidos por normas de dimensionamento também foram realizadas, especificamente com o Eurocode 6 e o ACI 530.

Neste estudo foram avaliados alguns parâmetros que influenciam no comportamento à flambagem e na capacidade de carga final das paredes. Dessa forma, foram realizadas simulações de paredes com diferentes esbeltezes e condições de contorno, além de cargas uniformemente distribuídas aplicadas de forma centrada ou com excentricidades.

Os resultados mostraram uma boa capacidade do modelo numérico de prever o comportamento desse tipo de estrutura, obtendo desempenho satisfatório na avaliação da

capacidade de carga das paredes submetidas a carregamentos centrados ou excêntricos. Como era de se esperar, o aumento do índice de esbeltez e da excentricidade dos carregamentos tendem a diminuir a capacidade de carga das paredes. Também foi observado que os resultados obtidos pelas normas supracitadas tendem a ser conservadores e subestimam a capacidade de carga desse tipo de estrutura. O autor ainda relata a influência da resistência à tração no comportamento à flambagem das paredes para determinadas excentricidades e condições de contorno. Para casos de cargas elevadas excêntricas, por exemplo, a capacidade de carga é altamente influenciada por esse parâmetro.

### 3. CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

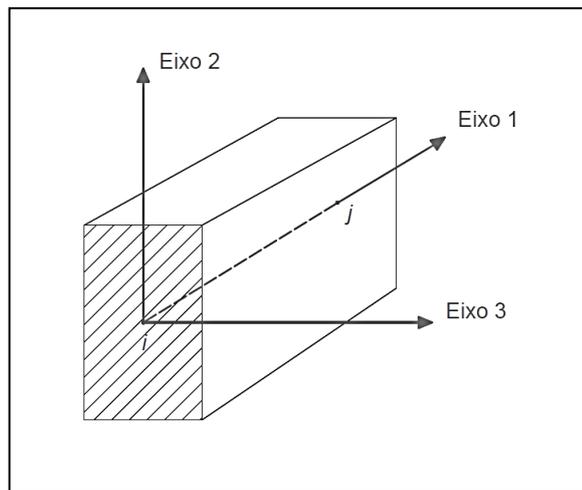
Neste capítulo estão apresentadas as modelagens preliminares realizadas com o intuito de fazer a calibração do modelo numérico a partir de resultados experimentais de ensaios em paredes não armadas de alvenaria estrutural. Devido à grande quantidade de modelagens, aqui estão apresentados apenas os modelos que contribuíram para o avanço das análises, além de informações sobre o software de análise pelo Método dos Elementos Finitos utilizado e a descrição dos ensaios experimentais desenvolvidos por Lopes (2014), cujos resultados foram utilizados como referência para a calibração do modelo numérico.

#### 3.1. Software de análise

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado o pacote de programas computacionais SAP2000<sup>®</sup>, que permite a simulação e resolução dos problemas estudados com base na modelagem via Método dos Elementos Finitos (MEF).

O software permite a utilização de alguns tipos de elementos para a representação da estrutura em análise, dentre eles o elemento do tipo FRAME (ou elemento de barra). De acordo com o Guia do Usuário do Programa, este tipo de elemento pode ser utilizado para modelar vigas e colunas em estruturas planas ou tridimensionais, incluindo efeitos da flexão, torção, deformação axial e deformação por cisalhamento no cálculo dos deslocamentos. O elemento é representado por uma linha reta conectada por dois nós (nó  $i$  e nó  $j$ ), contendo cada um deles seis graus de liberdade correspondentes a três componentes de translação e três componentes de rotação. Cada elemento possui um sistema de coordenadas local, cujos eixos são denominados por 1, 2 e 3. O eixo 1 é fixo, sempre paralelo ao eixo longitudinal da barra (no sentido do nó  $i$  para o nó  $j$ ), enquanto os eixos 2 e 3 são sempre perpendiculares ao eixo longitudinal da barra, podendo suas direções e sentidos variarem de acordo com o seu posicionamento. A Figura 13 ilustra o sistema local de coordenadas em um elemento de barra genérico. A depender do tipo de material utilizado, é possível escolher seções pré-definidas, além de modelar uma seção específica.

Figura 13 – Sistema de eixos locais do elemento FRAME.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Outro tipo de elemento disponível para as modelagens é o elemento tipo SHELL, que pode ser utilizado para modelar o comportamento de casca, placa e membrana em estruturas planas e tridimensionais tais como lajes e paredes. Podem ser utilizados elementos com três ou quatro nós, contendo cada um deles cinco graus de liberdade, correspondentes a três componentes de translação e duas componentes de rotação. Da mesma forma que os elementos do tipo FRAME, os elementos tipo SHELL possuem um sistema de eixos locais denotados por 1, 2 e 3, dos quais os dois primeiros eixos estão no plano e o terceiro eixo normal ao elemento. Na formulação de espessura do elemento pode-se determinar se as deformações por cisalhamento serão ou não incluídas no comportamento de flexão. Geralmente é utilizada a formulação de placa (Kirchoff), na qual as deformações por cisalhamento transversal são negligenciadas, mas também é permitida a utilização da formulação de placa espessa (Mindlin/Reissner) que inclui os efeitos da deformação por cisalhamento transversal.

Nesta pesquisa, em suas diferentes etapas, foram utilizados os dois tipos de elementos na modelagem, a fim de se obter um modelo numérico capaz de representar o comportamento das paredes de contraventamento estudadas. Os itens 3.2.3 e 3.2.4 contém a descrição de cada um dos modelos computacionais adotados.

## 3.2. Calibração do modelo numérico

A simulação numérica da resposta de qualquer estrutura frente às cargas as quais são solicitadas necessita de uma prévia calibração, a fim de verificar a aplicabilidade do modelo numérico para prever os parâmetros de interesse. Para realizar a calibração da resposta das paredes de contraventamento submetidas a ações fora do plano foram utilizados os resultados dos ensaios experimentais desenvolvidos por Lopes (2014), que desenvolveu um estudo teórico e experimental sobre paredes esbeltas de alvenaria estrutural.

### 3.2.1. Modelo experimental de referência – Lopes (2014)

Lopes (2014) executou um programa experimental que consistiu na realização de ensaios de paredes submetidas à compressão simples, além da caracterização dos materiais que compõem a alvenaria. Foram ensaiadas paredes de bloco cerâmico e de bloco de concreto com 5 fiadas (1,0 m de altura) e com 14 fiadas (2,80 m de altura), sendo, para este último caso, ensaiadas paredes com e sem armadura e instrumentadas para que fosse possível a medição das deformações axiais e dos deslocamentos laterais em diversos pontos ao longo da altura das paredes. Neste trabalho serão mostrados apenas os resultados referentes às paredes de bloco de concreto, que foram os resultados utilizados na calibração do modelo numérico.

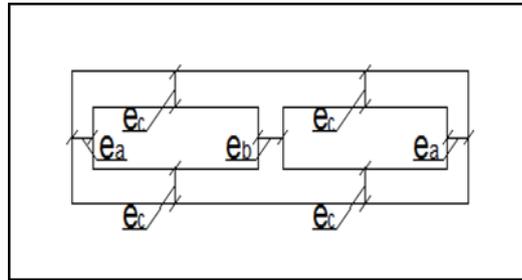
Com relação à caracterização dos materiais, os ensaios consistiram na análise dos componentes da alvenaria, onde foram analisados os blocos, argamassas e grautes utilizados na construção das paredes. Também foram ensaiados os prismas, considerando as situações de prisma vazado e prisma grauteado. Neste trabalho, como apenas os resultados referentes às paredes não armadas foram utilizados na calibração do modelo numérico, será dada ênfase nos ensaios de bloco, argamassa e prisma vazado, cujos parâmetros foram utilizados na definição das propriedades dos materiais utilizados na modelagem.

#### 3.2.1.1. Ensaios de caracterização dos blocos de concreto

Para a caracterização das unidades de bloco de concreto foram verificados os parâmetros referentes às dimensões dos blocos, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os ensaios dimensionais foram realizados de acordo com o que prescreve a NBR 7173, tendo sido ensaiada uma amostra de 10 blocos selecionados aleatoriamente em um

lote. A Figura 14 juntamente com a Tabela 2 apresentam os resultados dos ensaios dimensionais para a amostrada analisada.

Figura 14 – Dimensões das paredes dos blocos de concreto.



Fonte: Lopes (2014)

Tabela 2 - Resultados dos ensaios dimensionais dos blocos de concreto

<b>Dimensão</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Média</b>
Comprimento (mm)	389,7	390	389,9
Largura (mm)	88,0	88,7	88,4
Altura (mm)	190,0	189,3	189,7
e <sub>a</sub> (mm)	18,0	22,8	20,4
e <sub>b</sub> (mm)	18,3	30,7	24,5
e <sub>c</sub> (mm)	17,4	29,3	23,4

Fonte: Adaptado de Lopes (2014)

Os ensaios para verificação da resistência à compressão das unidades foram realizados de acordo com o que prescreve a NBR 6136, tendo sido utilizada uma amostra composta por 12 blocos de concreto. Dessa amostra, 6 blocos foram utilizados nos ensaios de resistência à compressão simples e os demais foram utilizados nos ensaios para verificação do módulo de elasticidade. Para a realização dos ensaios, os blocos foram capeados com pasta de cimento ARI (Alta Resistência Inicial).

Os ensaios para determinação do módulo de elasticidade consistiram na aplicação de 50% da carga de ruptura dos blocos obtida nos ensaios de compressão simples, mantendo essa carga por 3 minutos. Após isso os blocos foram descarregados e esse procedimento foi realizado mais uma vez. Depois, os blocos foram carregados com incrementos de carga de 10% da carga de ruptura, em intervalos de 1 minuto, até que fosse atingido novamente os 50% da carga de ruptura. O ensaio foi finalizado com a aplicação de carga até a ruptura das amostras. A Tabela

3 apresenta um resumo dos resultados obtidos por Lopes (2014) nos ensaios de compressão simples e módulo de elasticidade das unidades.

Tabela 3 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos blocos.

<b>Bloco</b>	<b>Tensão relativa à área bruta da seção (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade relativo à área bruta (GPa)</b>
Média	15,57	102,11
DP	1,81	27,56
CV (%)	11,70	26,99
$f_{bk}$ (MPa)	12,62	-

Fonte: Adaptado de Lopes (2014)

Como ressalta Lopes (2014), os resultados para o módulo de elasticidade dos blocos de concreto apresentaram-se muito elevados e não foram levados em consideração nas análises posteriores. Os valores encontrados indicam que pode ter acontecido algum problema na realização dos ensaios. Dessa forma, tais valores também não foram levados em consideração nas análises realizadas neste trabalho.

### 3.2.1.2. Ensaios de caracterização da argamassa

As argamassas utilizadas para construção dos prismas e das paredes com 5 fiadas (1,0 m de altura) e 14 fiadas (2,80 m de altura) de blocos de concreto foram fabricadas de acordo com o mesmo traço. Os corpos de prova foram ensaiados à flexão e à compressão, na idade de 28 dias. Para o caso das paredes com 14 fiadas, foram ensaiadas duas amostras de argamassas, sendo uma referente à confecção da primeira metade das paredes (1ª à 7ª fiada) e a outra referente à confecção da segunda metade (8ª à 14ª fiada). Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de compressão e flexão das argamassas.

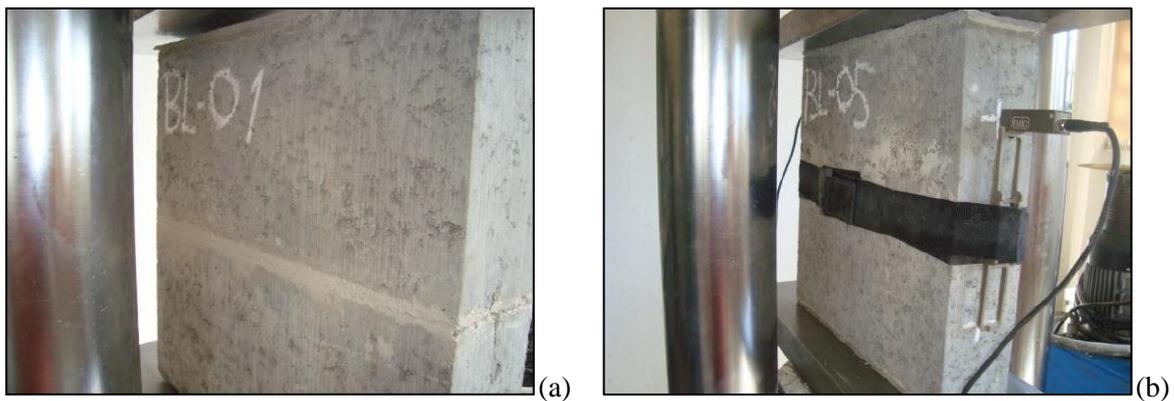
<b>Argamassa</b>	<b>Ensaios de Compressão</b>			<b>Ensaios de Flexão</b>		
	$f_{am}$ (MPa)	DP	CV (%)	$f_{am}$ (MPa)	DP	CV (%)
Prisma	7,10	0,40	5,63	2,14	0,24	11,04
Parede 5 fiadas	6,90	1,14	16,60	1,85	0,71	38,29
Parede 14 fiadas – 1ª metade	7,00	0,52	7,40	2,81	0,32	11,21
Parede 14 fiadas – segunda metade	6,27	0,37	5,95	2,64	0,41	15,53

Fonte: Adaptado de Lopes (2014)

### 3.2.1.3. Ensaio de prisma

Os ensaios de prisma foram realizados de acordo com as prescrições da NBR 15961 - 2, nos quais foram ensaiadas 12 amostras de prismas de 2 blocos com disposição de argamassa total. O capeamento das amostras foi realizado com pasta de cimento ARI. O procedimento dos ensaios de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dos prismas seguiu a mesma metodologia aplicada nos ensaios dos blocos, já comentada no item 3.2.1.1. A Figura 15 ilustra os ensaios realizados nos prismas de bloco de concreto. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 5.

Figura 15 – Ensaio de prisma: (a) Ensaio de compressão simples e (b) Ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Lopes (2014)

Tabela 5 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos prismas.

Prisma	Tensão relativa à área bruta da seção (MPa)	Módulo de elasticidade relativo a área bruta da seção (GPa)
Média	6,18	11,82
DP	1,14	3,40
CV (%)	18,43	28,75
$f_{pk}$ (MPa)	4,26	-

Fonte: Adaptado de Lopes (2014)

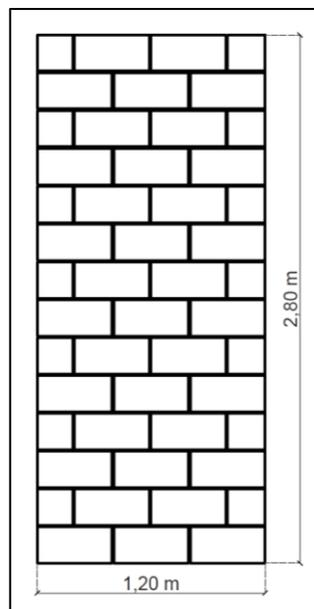
### 3.2.1.4. Ensaio das paredes esbeltas não armadas de bloco de concreto

Ao longo de sua pesquisa experimental, Lopes (2014) ensaiou 12 paredes com altura de 2,80 m (14 fiadas), separadas em quatro grupos, a saber: Grupo I, paredes de blocos de concreto não armadas; Grupo II, paredes de blocos cerâmicos não armadas; Grupo III, paredes

de blocos de concreto armadas; e Grupo IV, paredes de blocos cerâmicos armadas. Para este trabalho, apenas os resultados referentes às paredes do Grupo I foram considerados para a calibração do modelo numérico.

A construção dessas paredes foi realizada em duas etapas, onde na primeira foi executado o assentamento da primeira metade de cada parede (1ª à 7ª fiada) e na segunda etapa foi concluído o assentamento das fiadas restantes (8ª à 14ª fiada). O assentamento foi realizado com argamassa total nos blocos. A Figura 16 ilustra uma parede constituinte do Grupo I com suas respectivas dimensões

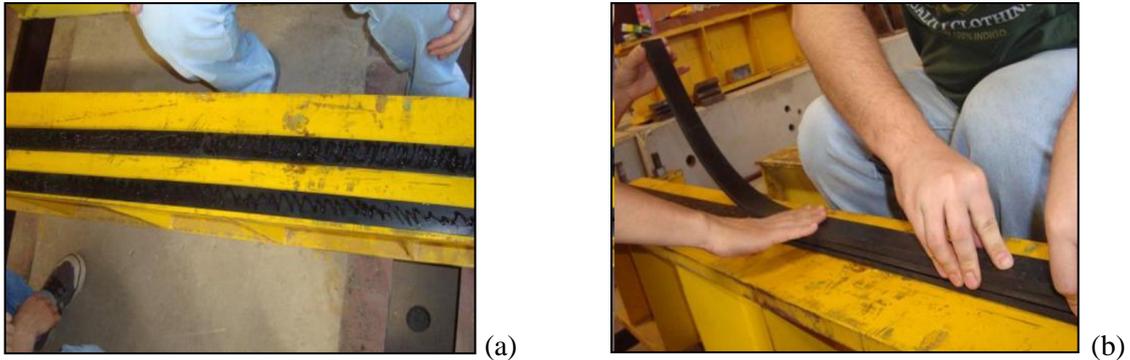
Figura 16 – Configurações e dimensões das paredes ensaiadas do Grupo I.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Para a execução do ensaio foram considerados apoios rotulados na base e no topo das paredes, fazendo-se uso de rótulas que permitissem a rotação e os movimentos laterais destas. Em sua base as paredes foram apoiadas em uma viga metálica de perfil I, sendo esta apoiada diretamente na laje de reação do laboratório. O apoio rotulado foi executado com a colagem de três faixas de neoprene de 1,0 cm de altura, conforme ilustra a Figura 17.

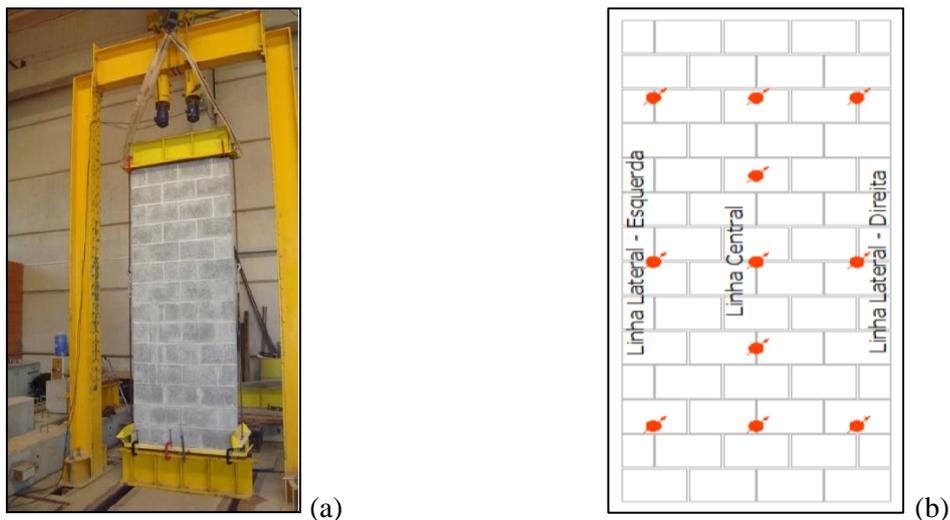
Figura 17 – Preparação dos ensaios: (a) Execução dos apoios rotulados e (b) Colagem das faixas de neoprene na base da parede



Fonte: Lopes (2014)

No topo das paredes foi colocada uma viga metálica fixada por meio de grampos tipo C. A aplicação das cargas foi realizada através de duas células, cada uma composta com um sistema de rótula, acopladas a dois macacos hidráulicos para que a distribuição de carga na parede fosse feita de maneira uniforme. A Figura 18 (a) apresenta uma parede já fixada no pórtico de reação do Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), onde foram realizados os ensaios.

Figura 18 – Ensaio das paredes esbeltas: (a) Posicionamento no pórtico de reação e (b) Disposição dos transdutores.



Fonte: Lopes (2014)

Os deslocamentos laterais foram medidos através de dois transdutores, posicionados na parte frontal da parede, conforme ilustra a Figura 18 (b). Traís transdutores foram instalados

ao longo de três linhas verticais, sendo uma no centro da parede e as outras duas em cada uma das extremidades.

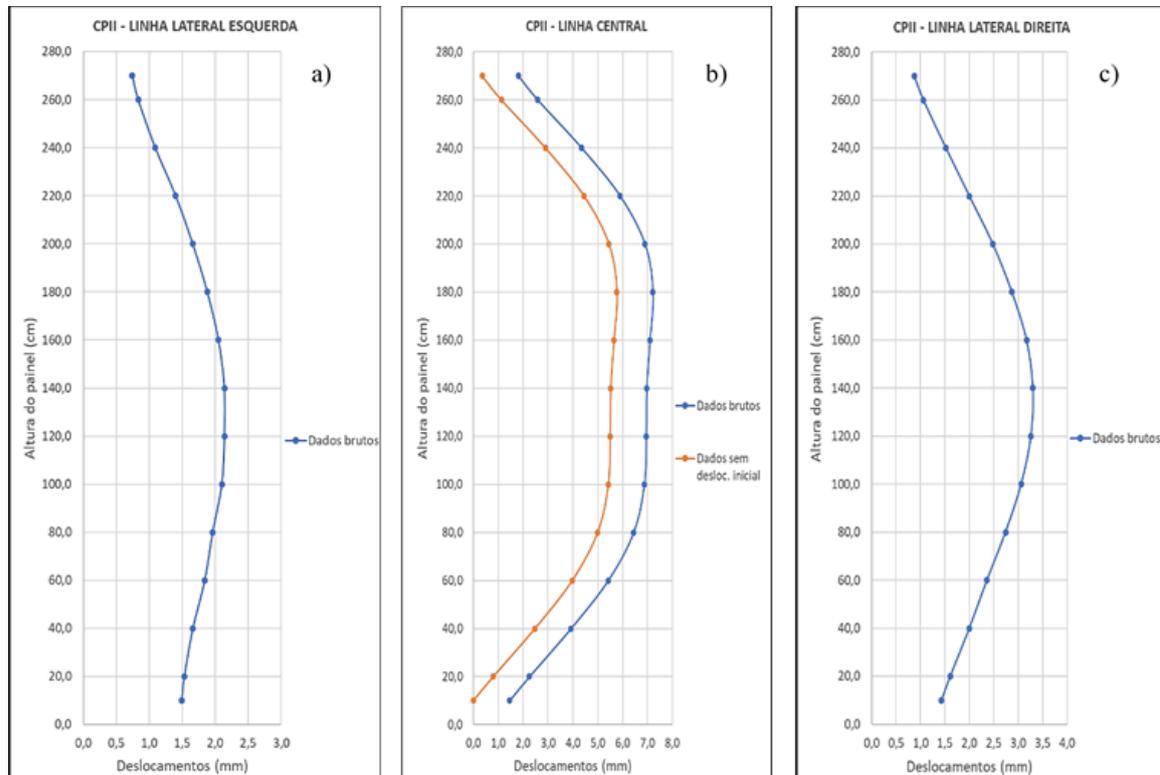
Conforme relata Lopes (2014), das 3 paredes do Grupo I que foram ensaiadas, uma delas (CP I) rompeu inesperadamente, indicando alguma falha na execução do ensaio. Dessa forma, apenas as paredes denominadas CP II e CP III apresentaram resultados consistentes. A Tabela 6 apresenta o resumo dos resultados para as cargas de ruptura e resistência à compressão (relativa à área bruta) das paredes ensaiadas. A Figura 19 apresenta os resultados dos deslocamentos laterais para a parede CP II, referentes à carga de ruptura.

Tabela 6 - Cargas de ruptura e resistência à compressão das paredes ensaiadas.

Parede	Cargas (kN)			$f_k$ (MPa)
	Célula 1	Célula 2	Total	
CP II	11,16	11,02	22,18	0,21
CP III	14,37	14,68	29,05	0,27

Fonte: Adaptado de Lopes (2014)

Figura 19 – Deslocamentos laterais da parede CP II: (a) Linha lateral esquerda, (b) Linha central e (c) Linha lateral direita.

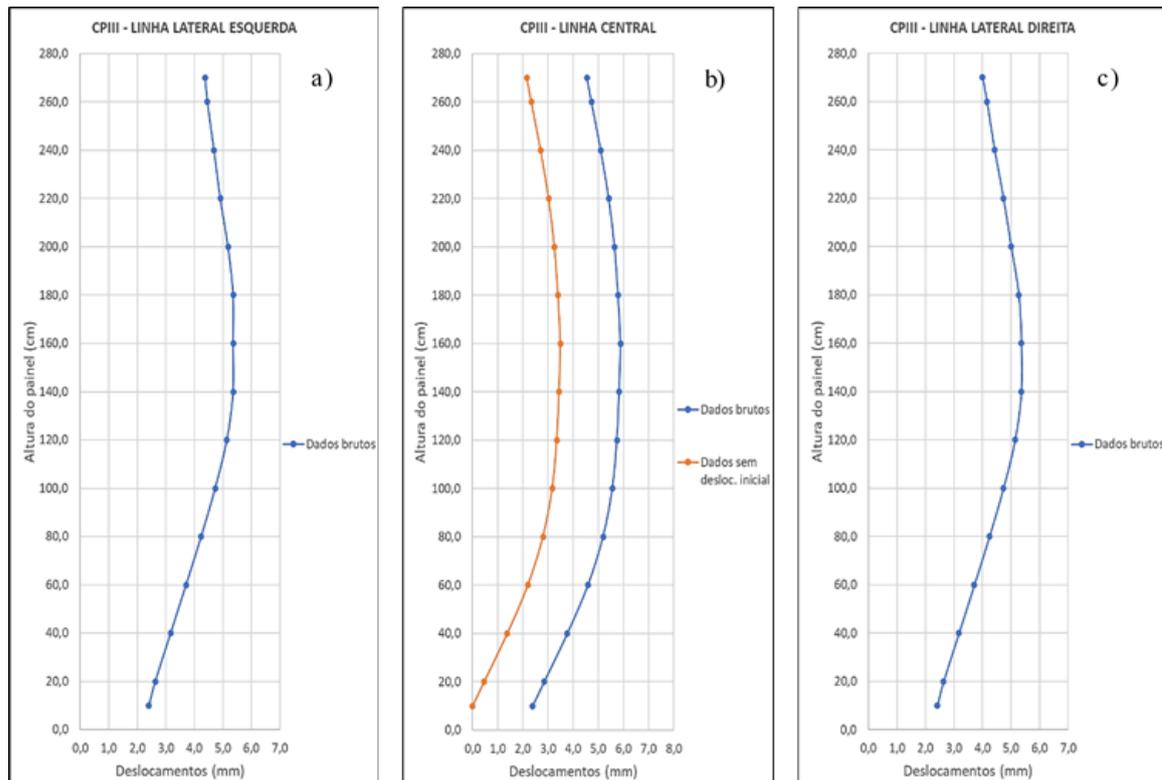


Fonte: Adaptado de Lopes (2014)

Nota-se que a parede CP II apresentou um deslocamento no seu topo e na sua base, indicando uma movimentação dessas extremidades durante a execução dos ensaios. Dessa forma, para os resultados da linha central, que apresentou os maiores valores de deslocamentos, foi realizada uma correção, descontando-se do deslocamento total o deslocamento das extremidades. Essa correção é importante para a calibração do modelo numérico, uma vez que as extremidades de topo e de base da parede não sofrem deslocamentos em virtude da vinculação adotada.

A Figura 20 apresenta os resultados dos deslocamentos laterais para a parede CP III, referentes à carga de ruptura.

Figura 20 - Deslocamentos laterais da parede CP III: (a) Linha lateral esquerda, (b) Linha central e (c) Linha lateral direita.



Fonte: Adaptado de Lopes (2014)

Nota-se que que a parede CP III apresentou deslocamento lateral máximo inferior à parede CP II. Entretanto, os deslocamentos laterais nas linhas de extremidade esquerda e direita se aproximaram mais dos deslocamentos laterais da linha central. Da mesma forma que na outra parede, ocorreram deslocamentos no topo e na base da parede CP III, indicando uma

movimentação dessas extremidades durante a execução dos ensaios, de forma que a correção dos valores dos deslocamentos laterais para a linha central também foi realizada.

### 3.2.2. Metodologia para calibração dos modelos numéricos

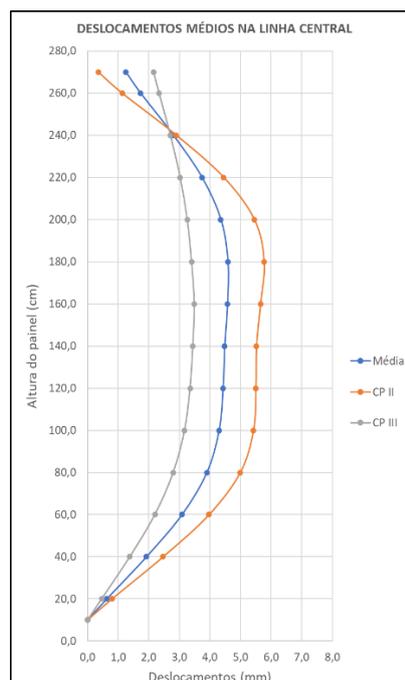
Os resultados obtidos por Lopes (2014), no que diz respeito à caracterização dos materiais que compõem a alvenaria e aos ensaios de prisma e paredes não armadas, foram utilizados na calibração dos modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho. Tais resultados foram utilizados como dados de entrada para os modelos, seja numa abordagem com macromodelagem ou micromodelagem.

Com relação aos deslocamentos laterais das paredes, como existem resultados referentes à dois corpos de prova, foi considerada a média dos valores corrigidos das duas paredes. A utilização dos valores corrigidos foi necessária para que houvesse a compatibilização da configuração deformada das paredes com a forma que os modelos numéricos se comportam em virtude das vinculações consideradas no topo e na base.

Utilizou-se como parâmetro da calibração os maiores valores da média dos deslocamentos, que em ambas as paredes foram obtidos para a linha central. A

Figura 21 apresenta os resultados médios para os valores dos deslocamentos laterais.

Figura 21 – Deslocamentos laterais médios na linha central das paredes ensaiadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As paredes ensaiadas são compostas por 3 blocos por fiada, para um total de 14 fiadas, cuja geometria final está ilustrada pela Figura 16. Foi considerando essas dimensões que todos os modelos numéricos foram desenvolvidos.

### 3.2.3. Modelo numérico de referência

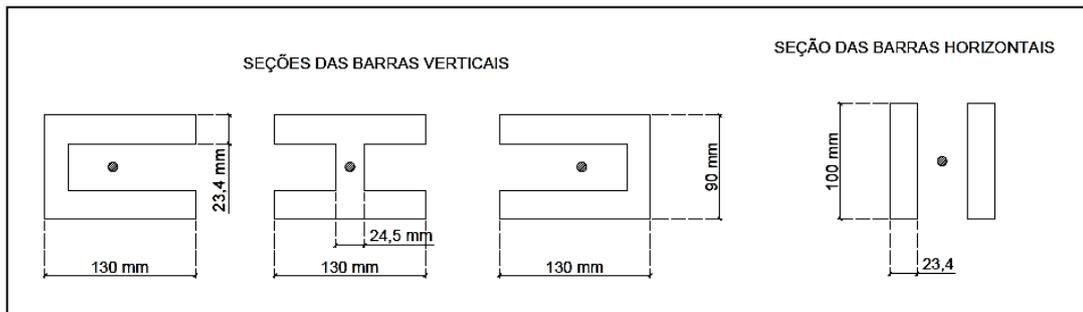
Nesta seção é apresentado o modelo numérico de referência, cujos resultados de deslocamentos transversais foram os que mais se aproximaram do modelo experimental desenvolvido por Lopes (2014), mediante as considerações que foram realizadas. Aqui ele será denominado Modelo 1. Na próxima seção serão apresentados os modelos numéricos preliminares, que constituíram etapas importantes na definição do modelo final.

O modelo de referência consistiu na modelagem da parede com elementos de barra (tipo FRAME), fazendo uma adaptação do modelo de barras equivalentes desenvolvido por Nascimento Neto *et. al.* (2014). Tal modelo, como já explicado, faz uso de elementos de barras verticais e horizontais que simulam a rigidez das paredes no seu próprio plano. Como as paredes analisadas neste trabalho estão solicitadas à flexão fora do plano, foi necessário fazer uma adaptação deste modelo. Essas adaptações consistiram basicamente numa discretização que represente os vazados dos blocos, visto que na flexão fora do plano em seções vazadas a seção resistente é composta apenas pela espessura das paredes longitudinais do bloco, desconsiderando qualquer parede transversal que esteja desalinhada ao longo das fiadas, conforme recomendado por Parsekian *et. al.* (2012). Dessa forma, foram adotadas variações das seções transversais para os elementos de barras verticais, compreendendo duas seções em formato “C” e uma seção em formato “I”. Além disso, a disposição das barras verticais no modelo passou a ser no centro de gravidade de cada uma dessas seções modeladas, e não mais no eixo dos vazados dos blocos.

Outra modificação realizada no modelo foi relativa à disposição das barras horizontais. No modelo desenvolvido por Nascimento Neto *et. al.* (2014) essas barras eram espaçadas a cada 20 cm, dispostas no eixo longitudinal das fiadas. Medeiros (2015) relata que a utilização de uma malha aproximadamente quadrada aprimora os resultados. Dessa forma, como houve uma diminuição da distância entre barras verticais, buscou-se diminuir também o espaçamento entre as barras horizontais, que passou a ser de 10 cm, sendo esse o mesmo valor para a altura da seção. Também foi realizada uma segunda alteração na seção dessas barras, que passou a incluir apenas as paredes longitudinais.

A Figura 22 ilustra as novas seções das barras verticais e horizontais adotadas na modelagem numérica. Nesta figura, o círculo hachurado representa o posicionamento da barra em cada seção.

Figura 22 – Seções das barras verticais e horizontais do modelo de referência.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As propriedades mecânicas utilizadas na discretização foram referentes à alvenaria, como um material composto, porém relacionadas à área líquida da seção. Os resultados obtidos por Lopes (2014) para as propriedades mecânicas de prisma, referentes à área líquida e área bruta, estão resumidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas obtidas por Lopes (2014).

Parâmetros	Dados relativos à área bruta da seção	Dados relativos à área líquida da seção*
$f_{pk}$ (MPa)	4,26	6,76
$E_p$ (GPa)	11,82	18,76

Área líquida calculada com base nas dimensões médias constantes da Tabela 1.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

É importante notar que a relação entre o módulo de elasticidade  $E_p$  e a resistência característica à compressão do prisma  $f_{pk}$  resultou em aproximadamente 2770. Esse valor é muito superior ao valor recomendado pela NBR 15961-1:2011 e pela NBR 16868-1:2020, que recomendam usar o valor do módulo de elasticidade longitudinal conforme a Equação 25.

$$E_p = 800 \times f_{pk} \quad (\text{Equação 25})$$

Portanto, o módulo de elasticidade longitudinal adotado foi aquele conforme recomendação das normas. Além disso, nas fiadas intermediárias da parede, que compreende o intervalo entre a 5ª e a 9ª fiada, foi utilizado o módulo de elasticidade secante, para considerar de forma simplificada a não-linearidade física do material. Uma vez que os estudos de Lopes (2014) não informaram a curva tensão x deformação completa para o prisma, esse módulo secante foi adotado conforme correlações existentes em outros estudos encontrados na literatura que realizaram ensaios de compressão em prismas. Os estudos considerados foram:

- “Estudo da resistência e da deformabilidade da alvenaria de blocos de concreto submetida a esforços de compressão” (Juste, 2001);
- “Estudo teórico e experimental do comportamento das interfaces verticais de paredes interconectadas de alvenaria estrutural” (Oliveira, 2014);
- “Análise teórica e experimental do comportamento ao cisalhamento de vigas em alvenaria estrutural de blocos de concreto” (Moraes, 2017).

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos nos estudos considerados, com as correlações entre seus módulos de elasticidade secante e tangente, calculados com base nas curvas tensão x deformação e considerando a reta secante da origem até a tensão de ruptura. Todos os dados são referentes à área líquida

Tabela 8 – Resultados e relações entre os módulos de elasticidades dos estudos considerados.

<b>Referência</b>	<b>Módulo Tangente (GPa)</b>	<b>Módulo Secante (GPa)</b>	<b>Relação entre Módulos</b>
Juste (2001)	4,756	1,884	0,396
Oliveira (2014)	16,818	4,686	0,279
Moraes (2017)	13,500	5,805	0,430
Média			0,368

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Dessa forma, utilizou-se o valor da relação média entre os módulos de elasticidade secante e tangente dos estudos considerados para obter o módulo de elasticidade secante dos prismas ensaiados por Lopes (2014). A Tabela 9 resume os valores das propriedades físico-mecânicas utilizadas na discretização do modelo de referência.

Tabela 9 – Propriedades físico-mecânicas utilizadas na discretização do modelo de referência.

<b>Parâmetros</b>	<b>Fiadas Intermediárias (5ª à 9ª)</b>	<b>Demais Fiadas (1ª à 4ª e 10ª à 14ª)</b>
$f_{pk}$ (MPa)	6,76	6,76
$E_p$ (GPa)	1,99	5,408
Poisson ( $\nu$ )	0,20	0,20
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	28,00	28,00

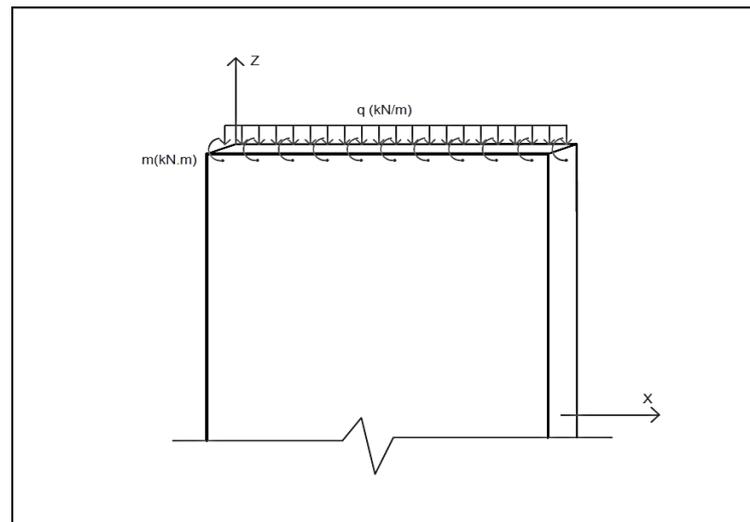
Obs: valores relativos à área líquida da seção.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

O carregamento utilizado na modelagem foi a média das cargas de ruptura obtidas nos ensaios experimentais de Lopes (2014), distribuído uniformemente na barra do topo da parede. O modo de análise considerado foi o não linear associado aos efeitos P-Delta para levar em consideração a não linearidade geométrica. A consideração dos efeitos P-delta pode ser realizada de duas maneiras, denominadas “*P-Delta*” e “*P-Delta plus Large Displacements*”, sendo esta última utilizada no modelo numérico. De acordo com Vieira (2015), ambas as opções admitem as equações de equilíbrio na configuração deformada da estrutura. Entretanto, enquanto na opção “*P-Delta*” esse efeito é considerado de forma parcial, na segunda opção “*P-Delta plus Large Displacements*”, além de incluir os efeitos P-Delta na formulação, todas as equações de equilíbrio são escritas considerando a estrutura na configuração deformada, sendo mais adequada para estruturas mais deslocáveis.

Sandoval e Roca (2012), em seu estudo sobre a flambagem de paredes de alvenaria, relatam que na modelagem numérica desse tipo de estrutura, mesmo para condições de carregamento centrado, é necessário incluir alguma excentricidade, mesmo que pequena, para ativar numericamente a resposta não linear. Dessa forma, passou-se a considerar uma excentricidade de carga nos modelos numéricos. Inicialmente foram testados dois valores de excentricidades, correspondentes a  $t/9$  e a  $t/12$ . Como o modelo numérico de barras equivalentes é plano, essa excentricidade foi aplicada na forma de um momento distribuído nos nós do topo da parede, em torno do eixo de menor inércia (eixo global X). A Figura 23 ilustra como foi realizada a disposição do carregamento no modelo numérico, incluindo as cargas verticais e os momentos representativos da excentricidade dessas cargas.

Figura 23 – Esquema de aplicação do carregamento no modelo numérico de referência.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Com relação à rigidez da estrutura adotada nas análises, o software permite dois métodos: a utilização da rigidez nas condições iniciais, com a estrutura em um estado sem tensões, e a utilização da rigidez modificada ao final de um caso de carga não linear. Nas análises foi utilizado o segundo método, no qual o carregamento vertical foi aplicado utilizando-se a rigidez modificada proveniente da aplicação do momento gerado pela excentricidade, em um caso de carga não linear.

Para reproduzir as condições dos apoios rotulados dos ensaios experimentais foram utilizadas as seguintes condições de contorno:

- Na base da parede foram utilizadas restrições ao movimento de translação na direção dos três eixos globais X, Y e Z (representado por U1, U2 e U3, respectivamente), deixando livre os movimentos de rotação.
- No topo da parede foi utilizada apenas a restrição ao movimento de translação na direção perpendicular ao plano da parede, ou seja, na direção do eixo global Y (representado por U2), deixando livre os movimentos de rotação.

Para avaliar de forma simplificada a diminuição da inércia da seção após a fissuração causada pelos efeitos da flexão fora do plano, considere-se os seguintes cálculos (Equações 26 a 28), baseados na Figura 24 (dimensões em cm).

Figura 24 – Seção genérica de um trecho da parede ensaiada por Lopes (2014), considerando apenas as paredes longitudinais dos blocos.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

$$I_1 = \frac{100 \times 9,0^3}{12} - \frac{100 \times 4,32^3}{12} = 5403,15 \text{ cm}^4 \quad (\text{Equação 26})$$

$$I_2 = \frac{100 \times 2,34^3}{12} = 106,77 \text{ cm}^4 \quad (\text{Equação 27})$$

$$I_2/I_1 = \frac{106,77}{5403,15} = 0,0198 = 1,98\% \quad (\text{Equação 28})$$

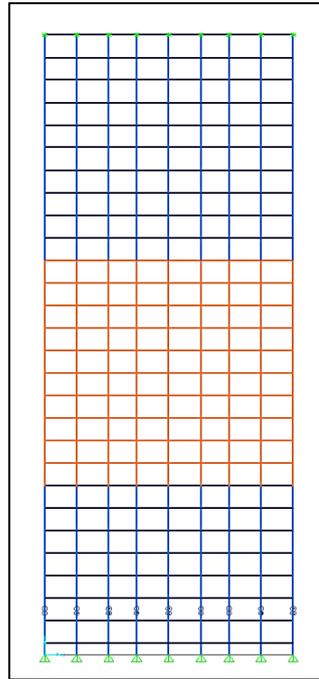
Onde:

$I_1$  é o momento de inércia da seção vazada em relação ao eixo longitudinal;

$I_2$  é o momento de inércia da largura da parede longitudinal do bloco, o qual não pode ser tomado em relação ao eixo longitudinal da parede, uma vez que a outra face está fissurada.

Percebe-se que, considerando os efeitos da fissuração causada pela flexão fora do plano, ocorre uma grande diminuição no momento de inércia da seção, com conseqüente diminuição da rigidez. Sendo assim, buscou-se realizar a calibração do modelo numérico de forma a considerar esses efeitos apenas nas barras correspondentes às fiadas centrais da parede em estudo, conforme ilustrado na Figura 25. Nesta figura, as barras em amarelo correspondem às fiadas centrais, nas quais foi considerada a redução da inércia e a consideração do módulo de elasticidade secante.

Figura 25 - Modelo numérico de referência.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

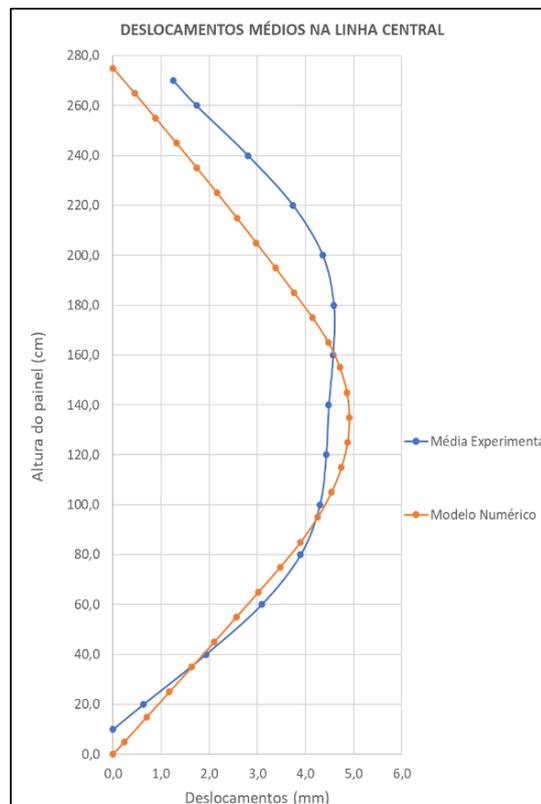
Neste modelo numérico foram realizadas algumas modificações nas propriedades das barras, entre elas a alteração do momento de inércia da seção em torno de seus eixos principais através de um coeficiente.

Foram realizados vários testes, em um procedimento iterativo, até se chegar em um valor de coeficiente redutor da inércia que permitisse obter resultados de deslocamentos transversais próximos aos obtidos nos ensaios experimentais. Esses testes foram realizados para as duas excentricidades de carga consideradas ( $t/9$  e  $t/12$ ). Percebeu-se, porém, que as respostas da estrutura para essas duas excentricidades eram muito próximas, de forma que a diminuição do coeficiente de inércia para a excentricidade de  $t/12$  era praticamente a mesma para a excentricidade de  $t/9$ . Para ser mais conservador, até pelo fato de não ter sido feito um estudo aprofundado da influência da não linearidade física, e como o ensaio experimental foi realizado com carga supostamente centrada, optou-se por utilizar como padrão a excentricidade correspondente a  $t/12$ . Feito isso, após diversas tentativas, foi obtido um coeficiente de inércia igual a 0,22. Isso significa que a inércia da seção, e conseqüentemente sua rigidez, precisou ser diminuída em 78% para que se chegasse a resultados próximos dos experimentais. Essa redução, apesar de ser elevada, é ainda inferior à redução calculada pela Equação 28. Ressalta-

se que ela foi realizada apenas nas fiadas centrais (5ª à 9ª fiada) do modelo, nas quais os efeitos dos deslocamentos transversais podem ser considerados mais acentuados.

A Figura 26 apresenta um gráfico com os resultados da calibração do modelo de referência, referentes aos deslocamentos transversais, comparados aos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Com relação aos deslocamentos máximos, percebe-se que o modelo numérico apresentou um deslocamento maior, totalizando 4,91 mm, enquanto a média dos deslocamentos dos ensaios experimentais resultou em 4,59 mm. Isso representa uma diferença de 0,32 mm, o que corresponde a aproximadamente 7,00%. Além disso, na média dos modelos experimentais o deslocamento máximo ocorreu na altura da 9ª fiada, e no modelo numérico esse deslocamento máximo ocorreu na altura da 7ª fiada. Apesar de apresentar deformada um pouco diferente daquela observada nos modelos experimentais, o modelo numérico mostrou-se adequado para a previsão dos deslocamentos máximos, dada a complexidade dos fenômenos envolvidos no comportamento de paredes de alvenaria submetidas à flexão fora do plano. A título de comparação, a Tabela 10 apresenta os principais resultados para as duas excentricidades analisadas.

Figura 26 - Comparação entre os deslocamentos transversais do Modelo Experimental e do Modelo Numérico.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela 10 – Comparação entre os deslocamentos transversais máximos numéricos e experimentais.

<b>Excentricidade</b>	<b>Coefficiente de Inércia</b>	<b>Deslocamento Numérico (mm)</b>	<b>Deslocamento Experimental* (mm)</b>	<b>Relação Numérico/Experimental</b>
t/9	0,26	4,70	4,59	1,024
t/12	0,22	4,91	4,59	1,070

\* O valor do deslocamento experimental é referente ao carregamento centrado dos ensaios.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Com o modelo numérico calibrado, as considerações realizadas na sua concepção foram aplicadas nas paredes de contraventamento do edifício em estudo, como será mostrado posteriormente. É importante destacar que o índice de esbeltez da parede ensaiada por Lopes (2014) é superior ao índice de esbeltez das paredes em estudo, pelo fato do bloco utilizado nos ensaios experimentais possuir menor espessura. Entretanto, esta diferença não foi alvo de estudos mais detalhados.

#### 3.2.4. Modelos numéricos preliminares

Durante o desenvolvimento da pesquisa, antes de se obter o modelo de referência, alguns outros modelos numéricos foram testados, a fim de verificar o que mais se adequava e apresentava resultados consonantes com os resultados dos ensaios desenvolvidos por Lopes (2014). Foram desenvolvidos modelos tanto com abordagem de micromodelagem detalhada quanto com abordagem de macromodelagem. Nos casos em que a abordagem de macromodelagem foi utilizada, foi adotado o modelo de barras equivalentes, com as devidas alterações para se adequar ao propósito deste trabalho.

Em todos esses modelos as análises foram realizadas considerando o comportamento elástico linear para os materiais componentes. Os modelos preliminares desenvolvidos, e que foram fundamentais para se chegar ao modelo de referência utilizado para a calibração, são descritos como:

- a) Modelo 2: paredes discretizadas com elementos finitos do tipo casca, através de micromodelagem detalhada;
- b) Modelo 3: paredes discretizadas com elementos finitos do tipo sólido, através de micromodelagem detalhada;

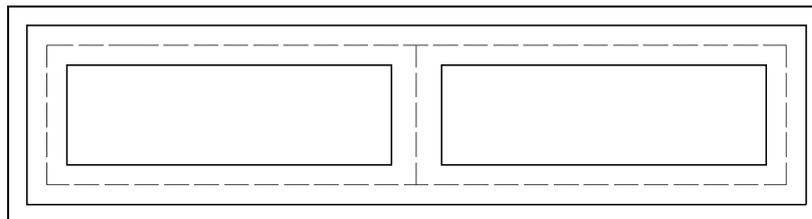
- c) Modelo 4: paredes discretizadas com o modelo de barras equivalentes plano (elementos tipo Frame), através de macromodelagem, com alteração do coeficiente “Shear Area”;
- d) Modelo 5: paredes discretizadas com o modelo de barras equivalentes plano (elementos tipo Frame), através de macromodelagem, com alteração do coeficiente de inércia em todas as barras;
- e) Modelo 6: paredes discretizadas com o modelo de barras equivalentes tridimensional (elementos tipo Frame), através de macromodelagem, com alteração dos coeficientes “Shear Area” e/ou coeficiente de inércia.

#### 3.2.4.1. Descrição do Modelo 2

Para o modelo preliminar 2 foi adotada uma abordagem de modelagem tridimensional da parede através de elementos finitos de casca (SHELL), fazendo-se uso da micromodelagem detalhada. Dessa forma, foram definidos os materiais constituintes através dos resultados obtidos por Lopes (2014) para o bloco de concreto e para a argamassa, discretizando-os separadamente.

Neste modelo, os elementos do tipo casca foram posicionados no centro de cada parede do bloco, contornando-o por inteiro, e para cada elemento foi adotada uma espessura correspondente à espessura da parede que ele representa. A configuração dos blocos utilizada foi a mesma dos blocos utilizados nos ensaios de Lopes (2014), cujas dimensões encontram-se na Tabela 2 já mostrada anteriormente. A Figura 27 ilustra o posicionamento dos elementos do tipo casca em um bloco padrão, na qual a linha tracejada indica a posição de tais elementos.

Figura 27 – Posicionamento dos elementos do tipo casca nas paredes de um bloco padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Como os resultados obtidos por Lopes (2014) para as propriedades mecânicas de bloco e prisma referem-se à área bruta, foi necessário calcular tais propriedades para a correspondente área líquida. Além disso, como os ensaios para obtenção do módulo de elasticidade do bloco não foram representativos, e pelo fato de não ter sido obtido o módulo de elasticidade da argamassa utilizada no assentamento, tais propriedades precisaram ser estimadas por métodos encontradas na literatura. Sendo assim, o módulo de elasticidade do bloco foi estimado aplicando-se a Equação 29:

$$E_p = \frac{1}{\frac{1-\delta}{E_a} + \frac{\delta}{E_b}} \quad (\text{Equação 29})$$

Onde:

$\delta$  é um parâmetro calculado conforme a Equação 30;

$$\delta = \frac{h_b}{h_b + h_a} \quad (\text{Equação 30})$$

Por sua vez, o módulo de elasticidade da argamassa  $E_a$  foi obtido através da Equação 31, desenvolvida por Cheema e Klingner (1986).

$$E_a = 500 \times f_a \quad (\text{Equação 31})$$

A Tabela 11 apresenta um resumo das propriedades físico-mecânica dos materiais utilizadas no Modelo 2.

Tabela 11 – Propriedades dos materiais utilizadas na modelagem numérica

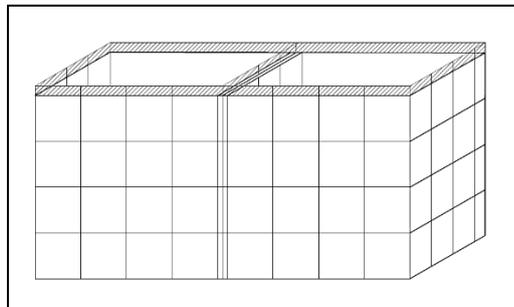
Parâmetros	Dados relativos à área bruta da seção	Dados relativos à área líquida da seção
$f_{pk}$ (MPa)	4,26	6,76
$E_p$ (GPa)	11,82	18,76
$f_{bk}$ (MPa)	12,62	20,03
$E_b$ (GPa)	-	24,22
$f_a$ (MPa)	7,10	-
$E_a$ (GPa)	3,55	-
Peso específico dos blocos (kN/m <sup>3</sup> )	14,00	28,00
Peso específico da argamassa (kN/m <sup>3</sup> )	19,00	-

Obs.: Área líquida calculada com base nas dimensões médias constantes da Tabela 2.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Para definição da malha de elementos finitos, inicialmente os elementos referentes às paredes longitudinais do bloco foram divididos em duas partes iguais, sendo o ponto de divisão a posição do elemento referente à parede transversal interior do bloco. Além disso, para haver a coincidência entre os nós das fiadas adjacentes, por estas serem alternadas, foi realizada mais uma divisão nessa posição intermediária, com as mesmas divisões adotadas para a junta de argamassa vertical. Dessa forma, cada elemento foi dividido em uma malha 4x4, inclusive os elementos referentes às paredes transversais. A divisão dos elementos referentes às juntas de argamassa horizontais foi realizada de forma a coincidir seus nós com os nós dos elementos dos blocos. A Figura 28 ilustra a divisão da malha em um bloco.

Figura 28 – Esquema da malha de elementos finitos utilizada no Modelo 2.



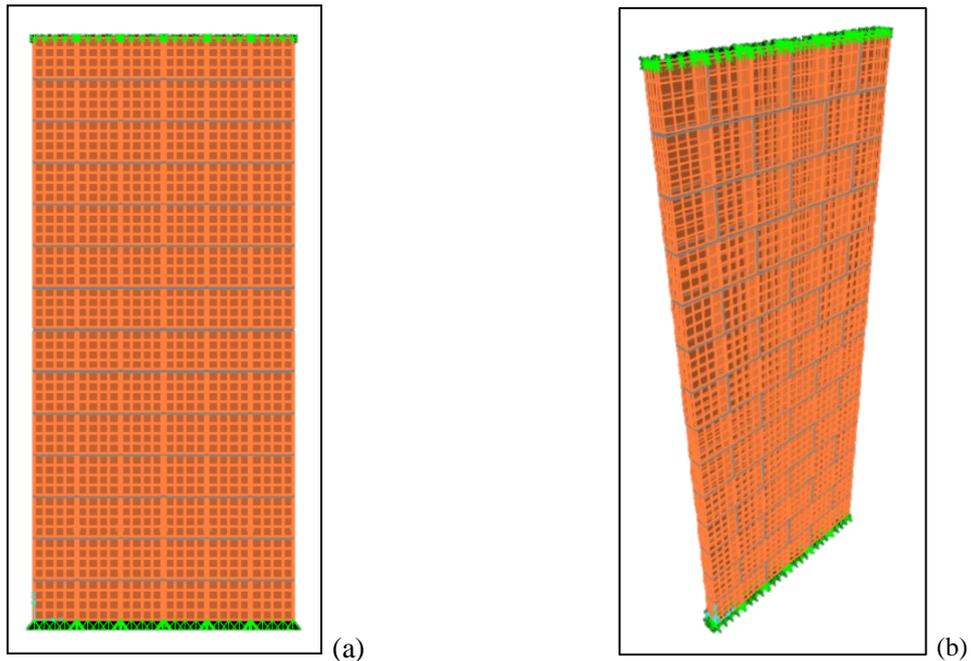
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Para reproduzir as condições dos apoios rotulados dos ensaios experimentais foram utilizadas as mesmas condições de contorno do modelo de referência (Modelo 1).

A Figura 29 apresenta as vistas frontal e tridimensional da parede modelada, com suas respectivas condições de contorno.

O carregamento utilizado na modelagem foi a média das cargas de ruptura obtidas nos ensaios experimentais de Lopes (2014), distribuídos uniformemente nos elementos de topo da parede. Como modo de análise, foi utilizado o caso não-linear com consideração dos efeitos P - delta.

Figura 29 – Parede discretizada no Modelo 2: (a) Vista frontal e (b) Vista lateral.



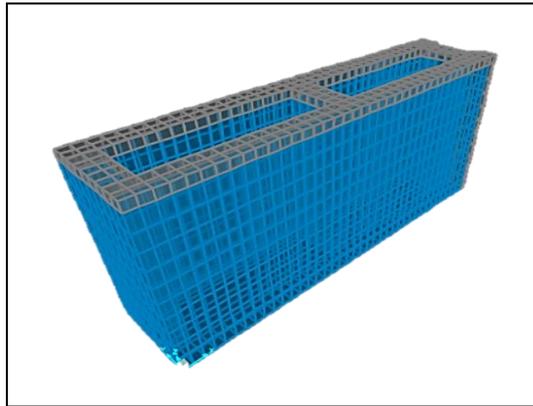
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

#### 3.2.4.2. Descrição do Modelo 3

Para o modelo preliminar 3 também foi adotada uma abordagem de modelagem tridimensional da parede, porém com elementos finitos do tipo sólido, fazendo-se uso da micromodelagem detalhada. As propriedades físico-mecânicas utilizadas para discretização dos blocos e das juntas de argamassa foram as mesmas utilizados no modelo 1, constantes da Tabela 11 apresentada anteriormente.

A malha de elementos finitos utilizada foi baseada no trabalho de Santos (2016), em seu estudo sobre a avaliação numérica da interação de paredes de alvenaria estrutural submetida a ações verticais. Sendo assim, utilizou-se elementos sólidos com dimensão de 1,0 centímetro, discretizando os blocos vazados e as juntas de argamassa verticais e horizontais. A Figura 30 apresenta um bloco discretizado através de elementos sólidos.

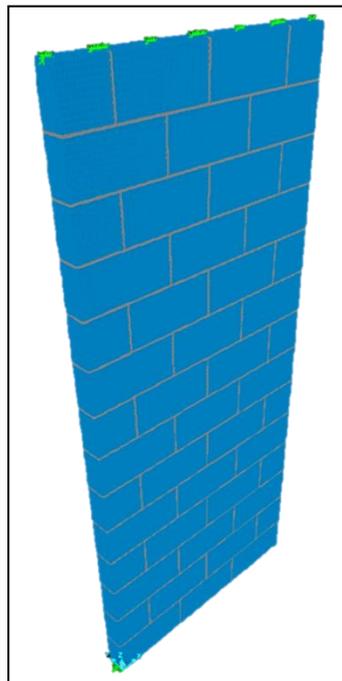
Figura 30 – Discretização da malha para o modelo numérico 3.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As condições de apoio utilizadas neste modelo foram as mesmas do modelo de referência. Considerou-se duas situações distintas: aplicando-se as restrições em todo o topo e base da parede e posteriormente aplicando-as apenas na linha central de topo e de base, para verificar como o modelo se comportava frente à essas duas condições. A Figura 31 ilustra o modelo numérico 3 em uma vista tridimensional.

Figura 31 – Vista tridimensional do modelo numérico 3.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

O carregamento utilizado na modelagem, tal como no modelo 1, foi a média das cargas de ruptura obtidas nos ensaios experimentais de Lopes (2014), distribuídos uniformemente nos elementos de topo da parede. Como modo de análise foi utilizado o caso não-linear com consideração dos efeitos P-delta.

Os resultados obtidos para o modelo 3 também não foram satisfatórios, tendo sido observado que o modelo apresentava alta rigidez com relação aos deslocamentos transversais. A situação na qual as restrições foram inseridas apenas na linha central de topo e de base da parede apresentou resultados um pouco melhores que a outra situação, porém ainda muito distantes dos valores obtidos nos ensaios experimentais.

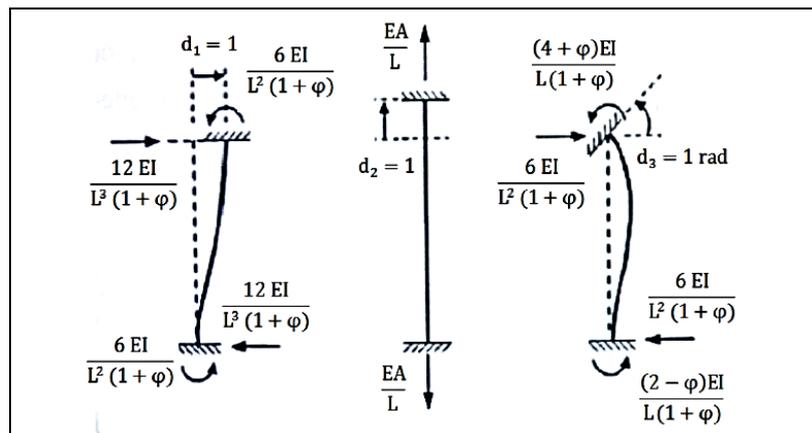
#### 3.2.4.3. Descrição do Modelo 4

O modelo preliminar 4 trata-se do modelo de barras equivalentes, com as mesmas propriedades físico-mecânicas e de seções utilizadas no modelo de referência. A discretização, bem como a aplicação do carregamento, ocorreram da mesma forma, com a carga média de ruptura uniformemente distribuída no topo da parede e a excentricidade de  $t/12$  aplicada sobre a forma de momento distribuído entre os nós do topo. As condições de contorno restringiram os três movimentos de translação na base da parede, enquanto no topo apenas o movimento de translação perpendicular ao seu plano foi restringido. O modo de análise foi o não linear com a consideração dos efeitos P-Delta através do modo “*P-Delta plus Large Displacements*”. Com relação às propriedades físico-mecânicas, a diferença deste modelo é que nele foi utilizado o módulo de elasticidade longitudinal tangente em todas as barras, não fazendo-se distinção dos valores nas fiadas centrais.

Além disso, diferente do modelo de referência, o modelo 4 utilizou como parâmetro de calibração o coeficiente “Shear Area”, constante das propriedades das seções dos elementos de barra, e não mais o coeficiente de inércia. Esse fator influencia na área de cisalhamento considerada no cálculo das deformações, podendo ser alterado nas duas direções dos eixos locais da barra perpendiculares ao seu eixo longitudinal. Utilizar valores superiores a 1,0 para esse parâmetro significa aumentar a área de cisalhamento e conseqüentemente reduzir a deformação por cisalhamento do elemento. De forma análoga, a utilização de valores inferiores a 1,0 significa diminuir a área de cisalhamento e potencializar a deformação por cisalhamento.

Para entender melhor o funcionamento desse parâmetro, pode-se tomar como exemplo uma barra como a ilustrada na Figura 32, com os respectivos coeficientes de rigidez local para barras retas bi-engastadas com seção constante.

Figura 32 – Coeficientes de rigidez local em barra bi-engastada.



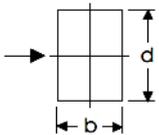
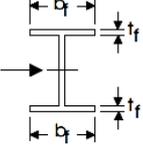
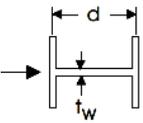
Fonte: Soriano (2005)

O parâmetro  $\varphi$  presente nos coeficientes de rigidez é utilizado para considerar o efeito da deformação por cisalhamento nas barras. Esse coeficiente é dado pela Equação 32.

$$\varphi = \frac{12EI}{GAL^2\omega} \quad (\text{Equação 32})$$

De acordo com o manual de utilização do SAP2000 (CSI, 2017), esse fator de forma é calculado conforme mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Cálculo do fator de forma para diferentes formatos de seções transversais.

Seção	Descrição	“Shear Area” efetiva
	Seção retangular Força paralela às direções da seção	$\frac{5}{6} b \times d$
	Seção I Força paralela à alma da seção	$\frac{5}{3} t_f \times b_f$
	Seção I Força paralela à mesa da seção	$t_w \times d$

Fonte: Manual do SAP2000 (CSI)

Sendo assim, o coeficiente “Shear Area” altera a área efetiva de cisalhamento.

No caso específico, alterou-se o coeficiente “Shear Area” na direção do eixo local 3 da barra, conforme mostrado anteriormente na Figura 13, por ser esse o eixo local perpendicular ao plano da parede. Esse coeficiente foi alterado em todas as barras componentes do modelo. Em um processo iterativo, chegou-se a um valor de coeficiente que resultou em deslocamentos transversais próximos aos obtidos nos ensaios experimentais de referência. O valor obtido para o “Shear Area” foi de 0,0026, o que significa reduzir a área de cisalhamento dos elementos em aproximadamente 384 vezes. Nesse processo, percebeu-se a sensibilidade do modelo à alteração desse coeficiente. Em muitos casos, uma pequena diminuição levava a um aumento acentuado dos deslocamentos.

Esse modelo chegou a ser utilizado na modelagem de uma das paredes de contraventamento do edifício em estudo, porém esta não apresentou um comportamento adequado após o processamento, apresentando uma deformada não condizente com a realidade.

#### 3.2.4.4. Descrição do Modelo 5

O modelo preliminar 5 também faz uso do modelo de barras equivalentes, já amplamente explicado no modelo de referência e no modelo preliminar 4, com as mesmas propriedades de seção. A discretização dos elementos, aplicação de cargas, condições de contorno e modo de análise também foram realizados de forma análoga aos outros dois

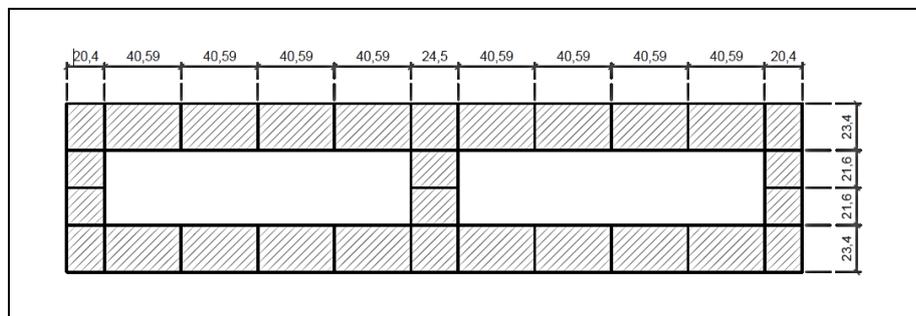
modelos. Entretanto, diferente destes, no modelo 5 utilizou-se o módulo de elasticidade secante em todas as barras, sem distinção nos valores aplicados às fiadas centrais.

Como no modelo de referência, o parâmetro de calibração do modelo 5 foi referente ao coeficiente de inércia da seção. Entretanto, a redução desse coeficiente também foi aplicada em todas as barras, e não apenas naquelas referentes às fiadas centrais. Para se obter valores de deslocamentos transversais próximos aos obtidos nos ensaios experimentais, foi necessário aplicar um coeficiente de inércia igual a 0,36. Isso significa reduzir a inércia da seção em 64%. Apesar dessa redução ser inferior àquela do modelo de referência, o modelo 5 foi desconsiderado por entender-se que não seria esse o comportamento real da estrutura, uma vez que a redução da inércia após os efeitos da flexão fora do plano não aconteceria com a mesma intensidade em todas as fiadas, além de que a utilização do módulo secante em todas as barras também não seria representativa. Contudo, o desenvolvimento deste modelo contribuiu de forma efetiva no desenvolvimento do modelo de referência.

#### 3.2.4.5. Descrição do Modelo 6

O modelo preliminar 6 consistiu em uma nova abordagem do modelo de barras equivalentes, fazendo uso de uma macromodelagem tridimensional. Neste modelo, os blocos foram discretizados com seus vazados, sendo composto por várias barras prismáticas. A Figura 33 ilustra a malha utilizada em um bloco padrão, com as respectivas dimensões das barras verticais utilizadas (dimensões em mm).

Figura 33 – Seções das barras verticais e suas disposições em um bloco do modelo preliminar 6.

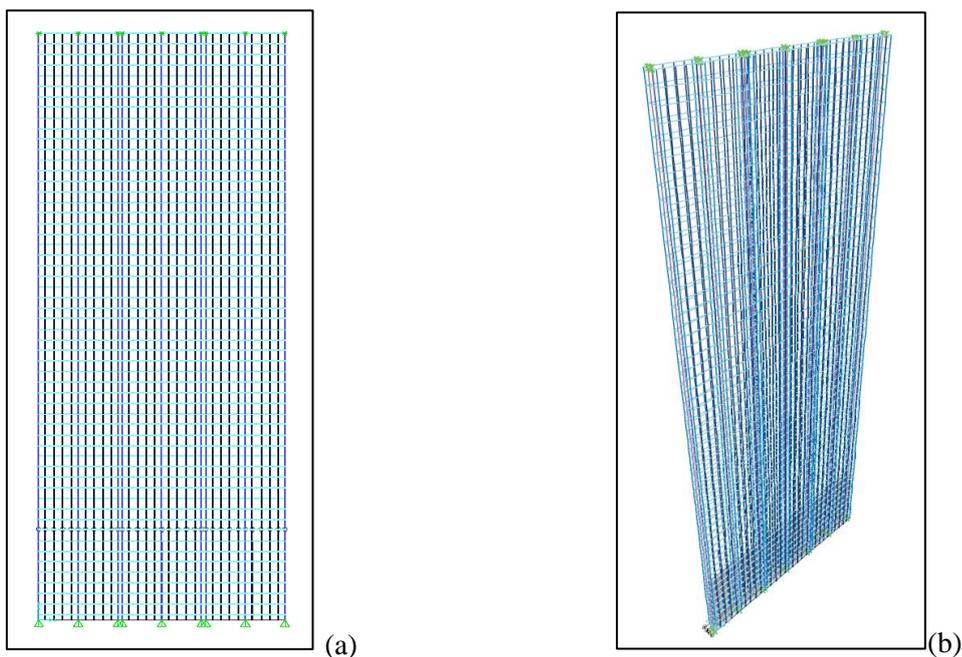


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Quanto às barras horizontais, foram utilizadas seções prismáticas, cada uma com a largura da respectiva parede do bloco que representava. O espaçamento entre essas barras também foi diminuído para aproximar a malha do modelo para um formato quadrado, uma vez que também houve uma diminuição no espaçamento das barras verticais devido a maior quantidade de barras utilizada. Dessa forma, as barras horizontais passaram a ser espaçadas a cada 5 cm.

A Figura 34 ilustra as vistas frontal e tridimensional do modelo preliminar 6.

Figura 34 -Vistas do modelo numérico preliminar 6: (a) Vista frontal e (b) Vista tridimensional.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As propriedades físico-mecânicas do material foram as mesmas utilizadas nos modelos de barras equivalentes planos. O modelo tridimensional foi desenvolvido antes do modelo de referência, portanto em sua concepção não foi considerada a utilização do módulo de elasticidade secante nas fiadas centrais. Utilizou-se o módulo de elasticidade tangente em todas as barras.

O carregamento também foi aplicado da mesma forma que nos modelos de barras equivalentes planos, bem como as condições de contorno, buscando-se reproduzir aquelas dos ensaios experimentais. Neste modelo, as vinculações foram aplicadas apenas na fiada central da base e do topo da parede, conforme pode ser visto na Figura 34.

Foram testados os dois parâmetros de calibração já utilizados nos modelos planos: redução do coeficiente de inércia das seções das barras em torno do eixo de menor inércia, e a redução do coeficiente “Shear Area” na direção do eixo local das barras perpendicular ao plano da parede, aplicados de forma separada. Entretanto, verificou-se que para ambos os parâmetros o modelo se mostrou consideravelmente mais rígido que os modelos planos, de forma que seu uso foi descartado.

## **4. MODELAGEM DAS PAREDES DO EDIFÍCIO**

Neste capítulo é apresentada a modelagem numérica das paredes de contraventamento do edifício em estudo e os correspondentes resultados. Foram realizadas três abordagens de modelagem: paredes completas com aplicação dos carregamentos de forma integral; faixas isoladas selecionadas a partir das paredes; e paredes completas com aplicação dos carregamentos isoladamente em cada faixa. Esta última abordagem foi realizada com o intuito de avaliar a influência da continuidade entre faixas e dos travamentos transversais.

### **4.1. Edifício analisado e divisão das paredes em faixas**

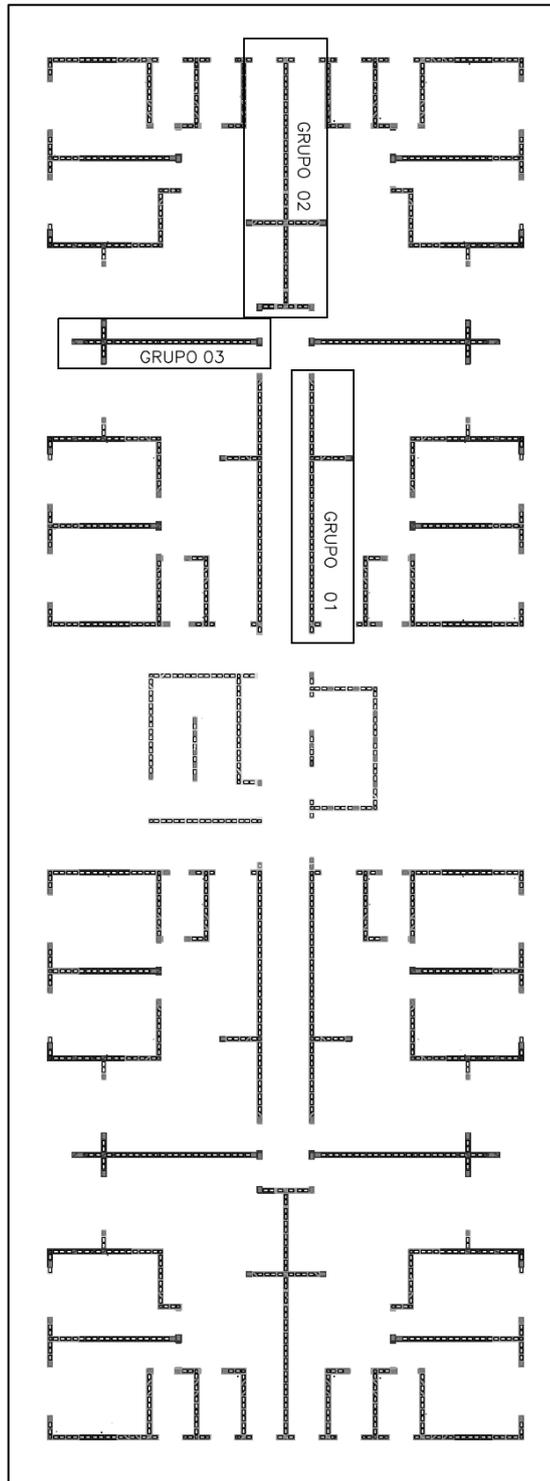
Definido o modelo numérico de referência, foi elaborado um estudo a partir de um projeto real de um edifício residencial de 12 pavimentos. Este edifício também foi estudado por Araújo (2016) em sua pesquisa sobre os efeitos localizados de segunda ordem em paredes de contraventamento de edifício de alvenaria estrutural. O referido estudo analisou as paredes selecionadas através da divisão em faixas, adaptando a metodologia da NBR 6118:2014 para cálculo dos efeitos localizados de segunda ordem em pilares-parede, e comparou os resultados do dimensionamento dessas faixas com aqueles obtidos pela aplicação da metodologia presente na norma britânica BS 5628:2005. Entretanto, o autor não realizou em seu estudo a modelagem numérica de tais paredes, além de focar apenas nas paredes do pavimento térreo do edifício.

Dessa forma, na pesquisa ora apresentada, além da realização da modelagem numérica das paredes, aplicou-se no dimensionamento as prescrições da NBR 16868-1:2020, considerando também as paredes referentes ao 9º pavimento do edifício.

As paredes escolhidas foram as mesmas analisadas pelo autor supracitado, bem como a divisão das faixas em cada parede. Araújo (2016) relata que a escolha de paredes de contraventamento de maiores comprimentos se deu pelo fato destas apresentarem maior importância para o sistema de contraventamento do edifício, absorvendo a maior parcela dos esforços provenientes da ação do vento.

A Figura 35 ilustra a localização das paredes na planta baixa do edifício.

Figura 35 – Localização das paredes em estudo na plana baixa do edifício.

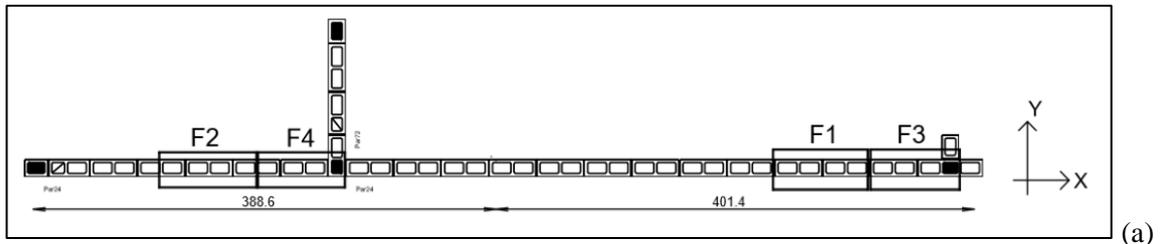


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

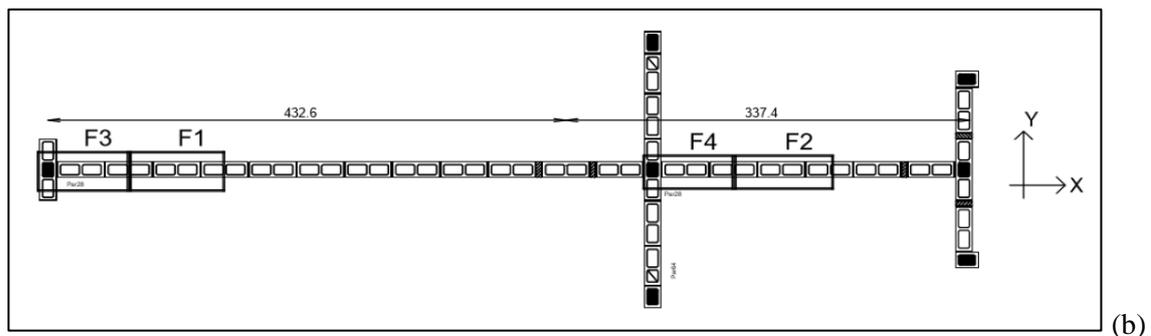
As Figura 36 ilustra de forma mais detalhada as paredes escolhidas, bem como as faixas selecionadas, na qual as cotas indicadas definem a posição do centro de gravidade da seção composta com as respectivas flanges. Para verificação dos efeitos de travamentos laterais,

em função da existência de paredes transversais, foram escolhidas faixas na proximidade e distantes desses travamentos.

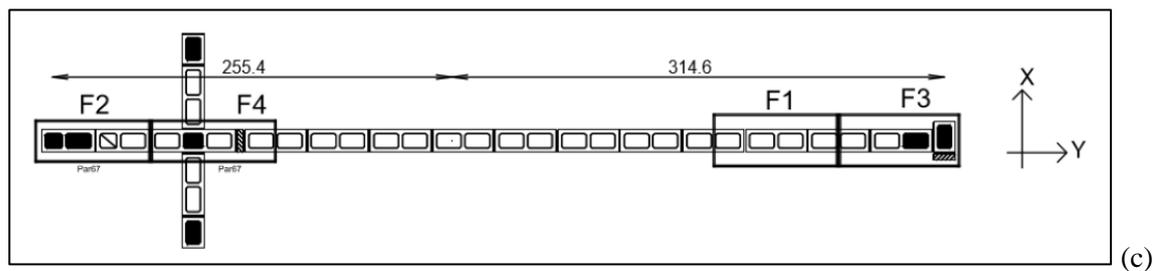
Figura 36 – Grupos de paredes e divisão das faixas analisadas: (a) Parede do Grupo 01; (b) Parede do Grupo 02 e (c) Parede do Grupo 03.



Fonte: Araújo (2016)



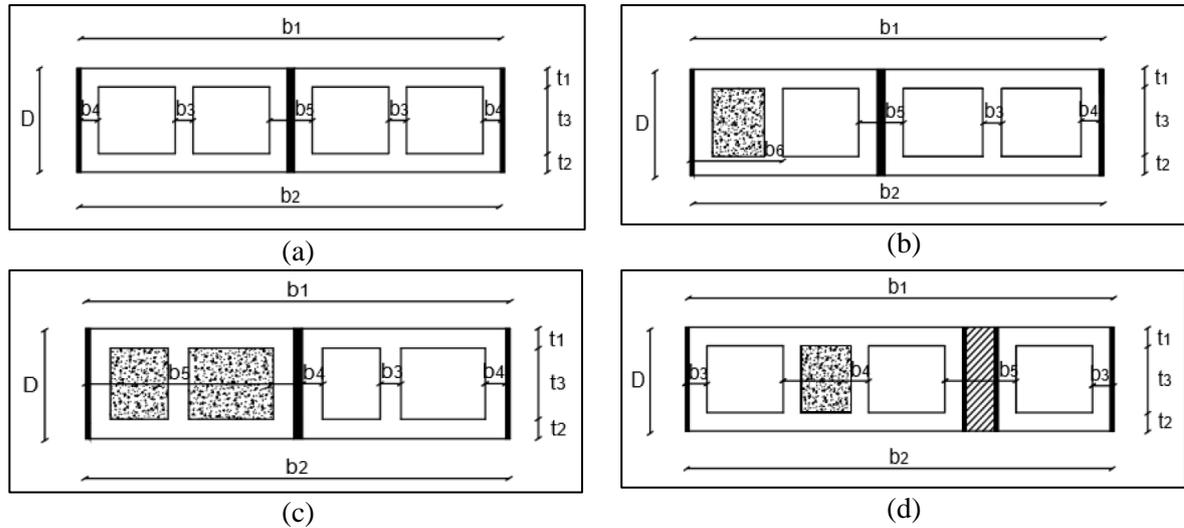
Fonte: Araújo (2020)



Fonte: Araújo (2020)

A partir das características geométricas das faixas selecionadas, foram definidas 4 seções representativas destas faixas. As propriedades destas seções foram utilizadas para o dimensionamento das faixas pelas normas brasileira e europeia. A Figura 37 ilustra essas seções, e a Tabela 13 contém, de forma mais detalhada, as dimensões e as propriedades geométricas de cada uma delas.

Figura 37 – Características geométricas das seções das faixas: (a) Seção 01; (b) Seção 02; (c) Seção 03 e (d) Seção 04.



Fonte: Adaptado de Araújo (2016)

Tabela 13 – Dimensões e características geométricas das seções analisadas.

Dimensões e propriedades geométricas das seções (cm)														
Seção	b1	b2	b3	b4	b5	b6	t1	t2	t3	D	A <sub>bruta</sub>	A <sub>líq</sub>	I <sub>bruta</sub>	I <sub>líq</sub>
01	80,0	80,0	2,5	3,0	6,0	-	2,5	2,5	9,0	14,0	1120,0	553,0	18293,33	14466,08
02	75,0	75,0	2,5	3,0	6,0	17,5	2,5	2,5	9,0	14,0	1050,0	636,0	17150,00	14279,56
03	70,0	70,0	2,5	3,0	35,0	-	2,5	2,5	9,0	14,0	980,0	741,5	16006,67	14396,79
04	80,0	80,0	3,0	17,5	11,0	-	2,5	2,5	9,0	14,0	1120,0	710,5	18293,33	15422,90

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Para melhor identificação, a Tabela 14 apresenta um resumo correlacionando cada uma das faixas analisadas às correspondentes seções.

Por sua vez, a Tabela 15 apresenta os carregamentos verticais e as características geométricas das paredes completas, tanto para o pavimento térreo quanto para o 9º pavimento, obtidas do projeto estrutural.

Tabela 14 – Seções correspondentes a cada uma das faixas das paredes.

Parede	Faixa	Seção
Grupo 01	Faixa 01	01
	Faixa 02	01
	Faixa 03	02
	Faixa 04	02
Grupo 02	Faixa 01	01
	Faixa 02	01
	Faixa 03	02
	Faixa 04	02
Grupo 03	Faixa 01	01
	Faixa 02	03
	Faixa 03	03
	Faixa 04	04

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela 15 – Cargas verticais e características geométricas das paredes por pavimento.

Pavimento Térreo										
Parede	$q_{k,total}$ (kN/m)	$q_{k,acid}$ (kN/m)	$M_k$ (kN.m)	$A_{bruta}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{liquida}$ (m <sup>2</sup> )	$I_{bruta}$ (m <sup>4</sup> )	$I_{liquida}$ (m <sup>4</sup> )	$X_1$ (m)	$X_2$ (m)	$L$ (m)
Grupo 01	194,1	32,9	1148,9	1,342	0,710	7,06	3,77	3,96	4,08	8,04
Grupo 02	197,2	32,3	1524,6	1,795	0,961	9,37	5,44	3,44	4,35	7,79
Grupo 03	224,3	40,1	1181,6	1,092	0,615	3,34*	2,04*	2,62*	3,22*	5,84
9º Pavimento										
Parede	$q_{k,total}$ (kN/m)	$q_{k,acid}$ (kN/m)	$M_k$ (kN.m)	$A_{bruta}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{liquida}$ (m <sup>2</sup> )	$I_{bruta}$ (m <sup>4</sup> )	$I_{liquida}$ (m <sup>4</sup> )	$X_1$ (m)	$X_2$ (m)	$L$ (m)
Grupo 01	50,8	8,7	148,0	1,342	0,710	7,06	3,77	3,96	4,08	8,04
Grupo 02	51,1	8,5	196,3	1,795	0,961	9,37	5,44	3,44	4,35	7,79
Grupo 03	58,5	10,6	134,3	1,092	0,615	3,34*	2,04*	2,62*	3,22*	5,84

\* Como a parede do Grupo 03 está na direção vertical na planta do edifício, perpendicular aos demais, lê-se  $Y_1$  e  $Y_2$ . O mesmo vale para a inércia da parede.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

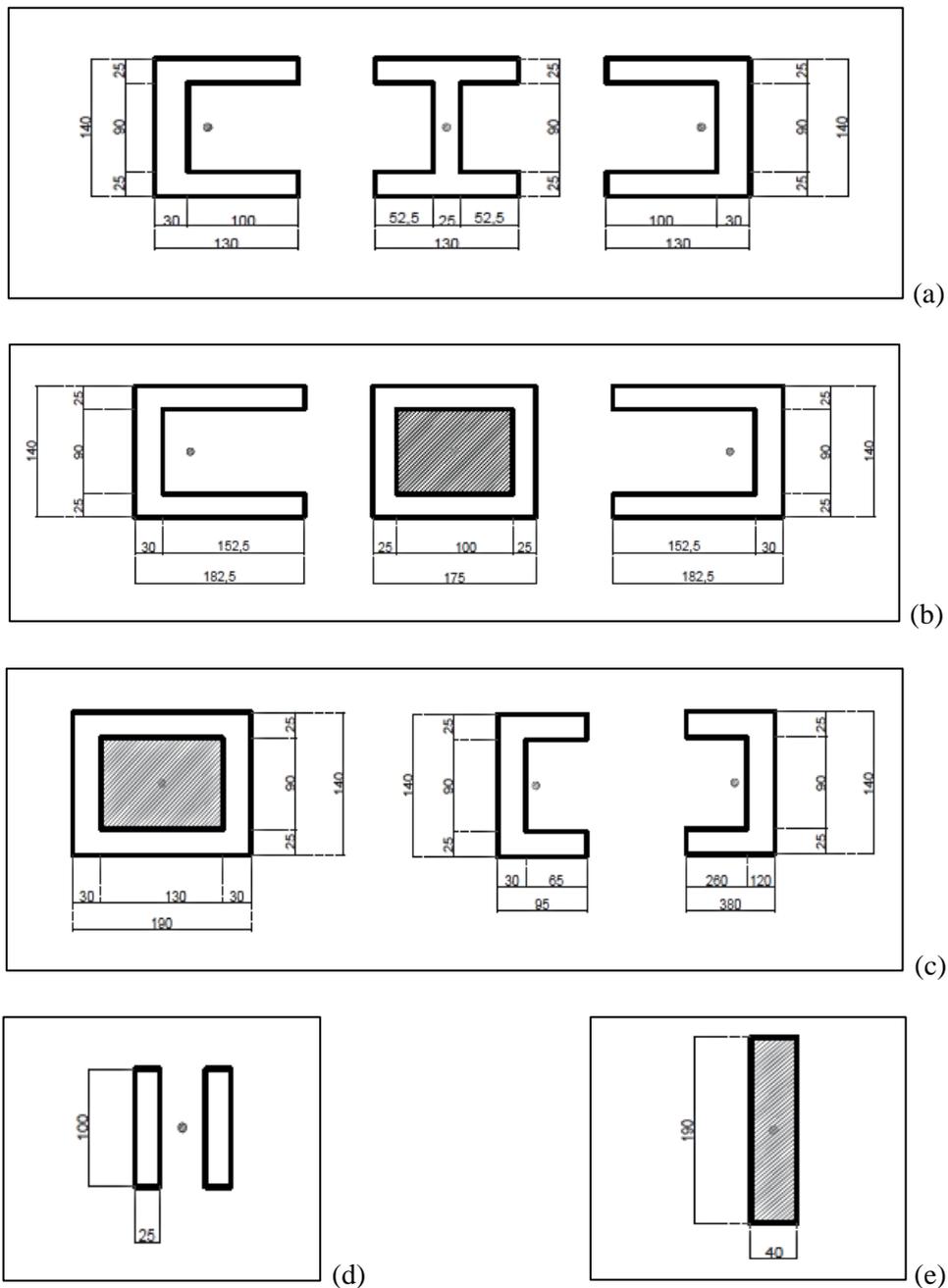
## 4.2. Elaboração dos modelos numéricos das paredes e faixas

As paredes de contraventamento do edifício foram modeladas fazendo-se uso das considerações adotadas quando da elaboração do modelo de referência, através da adaptação do modelo de barras equivalentes. A disposição das barras verticais e horizontais seguiu a mesma idealização, com as barras verticais posicionadas no centro de gravidade de cada seção e as barras horizontais espaçadas a cada 10 cm.

As seções das barras verticais foram definidas de acordo com o estabelecido no modelo de referência, com o bloco sendo dividido em duas seções em formato “C” e uma intermediária

em formato “I”. Nos casos em que o bloco continha grauteamento em um ou mais furos, a seção correspondente foi modelada como uma seção maciça. A Figura 38 ilustra as seções das barras verticais e horizontais adotadas na modelagem das paredes (dimensões em mm). Nesta figura, o círculo hachurado representa o posicionamento da barra em cada seção.

Figura 38 – Seções das barras verticais e horizontais aplicadas na modelagem das paredes do edifício: (a) Bloco inteiro oco; (b) Bloco de amarração; (c) Meio-bloco grauteado e oco; (d) Barras horizontais dos blocos e (e) Bloco de ajuste.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As propriedades físico-mecânicas utilizadas na discretização das paredes referem-se à alvenaria como um material composto, porém relacionadas à área líquida da seção. Nos trechos de alvenaria que dispunham de grauteamento, as propriedades utilizadas foram referentes às de alvenaria grauteada. Os módulos de deformação longitudinal foram determinados com base nas prescrições da NBR 16868-1:2020, considerando as resistências características de prisma ( $f_{pk}$ ) adotadas na elaboração do projeto. A relação entre a resistência de prisma grauteado e prisma oco foi considerada como 1,70.

Nas fiadas intermediárias das paredes, que compreende o intervalo entre a 5ª e a 9ª fiada, foi utilizado o módulo de elasticidade secante para considerar de forma simplificada a não-linearidade física do material. Nos procedimentos descritos no capítulo 3, a maior relação entre o módulo de elasticidade secante e o módulo de elasticidade tangente foi igual a 0,43, obtida por Moraes (2017). Nas modelagens realizadas, esta relação foi adotada com valor igual a 0,45.

Os valores para as resistências e as correspondentes propriedades elásticas utilizadas estão indicadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Características físico-mecânicas dos materiais utilizados na modelagem das paredes.

<b>Pavimento Térreo</b>			
<b>Material</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Fiadas Intermediárias (5ª à 9ª)</b>	<b>Demais Fiadas (1ª à 4ª e 10ª à 14ª)</b>
Alvenaria oca	$f_{pk}$ (MPa)	4,05	9,00
	$E_p$ (GPa)	3,24	7,20
	Poisson ( $\nu$ )	0,20	0,20
	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	28,00	28,00
Alvenaria grauteada	$f_{pk}$ (MPa)	6,88	15,30
	$E_p$ (GPa)	5,50	12,24
	Poisson ( $\nu$ )	0,20	0,20
	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	22,00	22,00
<b>9º Pavimento</b>			
	<b>Parâmetros</b>	<b>Fiadas Intermediárias (5ª à 9ª)</b>	<b>Demais Fiadas (1ª à 4ª e 10ª à 14ª)</b>
Alvenaria oca	$f_{pk}$ (MPa)	1,44	3,20
	$E_p$ (GPa)	1,15	2,56
	Poisson ( $\nu$ )	0,20	0,20
	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	28,00	28,00
Alvenaria grauteada	$f_{pk}$ (MPa)	2,45	5,44
	$E_p$ (GPa)	1,96	4,35
	Poisson ( $\nu$ )	0,20	0,20
	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	22,00	22,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Os carregamentos utilizados na modelagem de cada parede constam na Tabela 15. Os valores referentes ao carregamento permanente e acidental foram distribuídos uniformemente,

enquanto que a ação do vento foi considerada a partir de carregamento vertical com variação linear, considerando os dois sentidos de atuação do vento. Com o objetivo de mobilizar o comportamento não linear geométrico dos modelos, foi considerada uma excentricidade do carregamento vertical (permanente e acidental) igual a  $t/12$ , aplicada na forma de um momento distribuído nos nós do topo da parede, em torno do eixo de menor inércia (eixo global X), conforme ilustrado pela Figura 23. A Tabela 17 apresenta os valores referentes ao momento total, representativo da excentricidade, a ser distribuído ao longo do comprimento das paredes.

Tabela 17 – Momentos gerados pela excentricidade de carga adotada nas análises.

Pavimento	Parede	Carga Vertical – Perm + Acid (kN)	Comprimento da parede (m)	Momento total (kN.m)
Pavimento Térreo	Grupo 01	194,10	8,04	18,21
	Grupo 02	197,20	7,79	17,92
	Grupo 03	224,30	5,84	15,28
9º Pavimento	Grupo 01	50,80	8,04	4,77
	Grupo 02	51,10	7,79	4,42
	Grupo 03	58,50	5,84	3,99

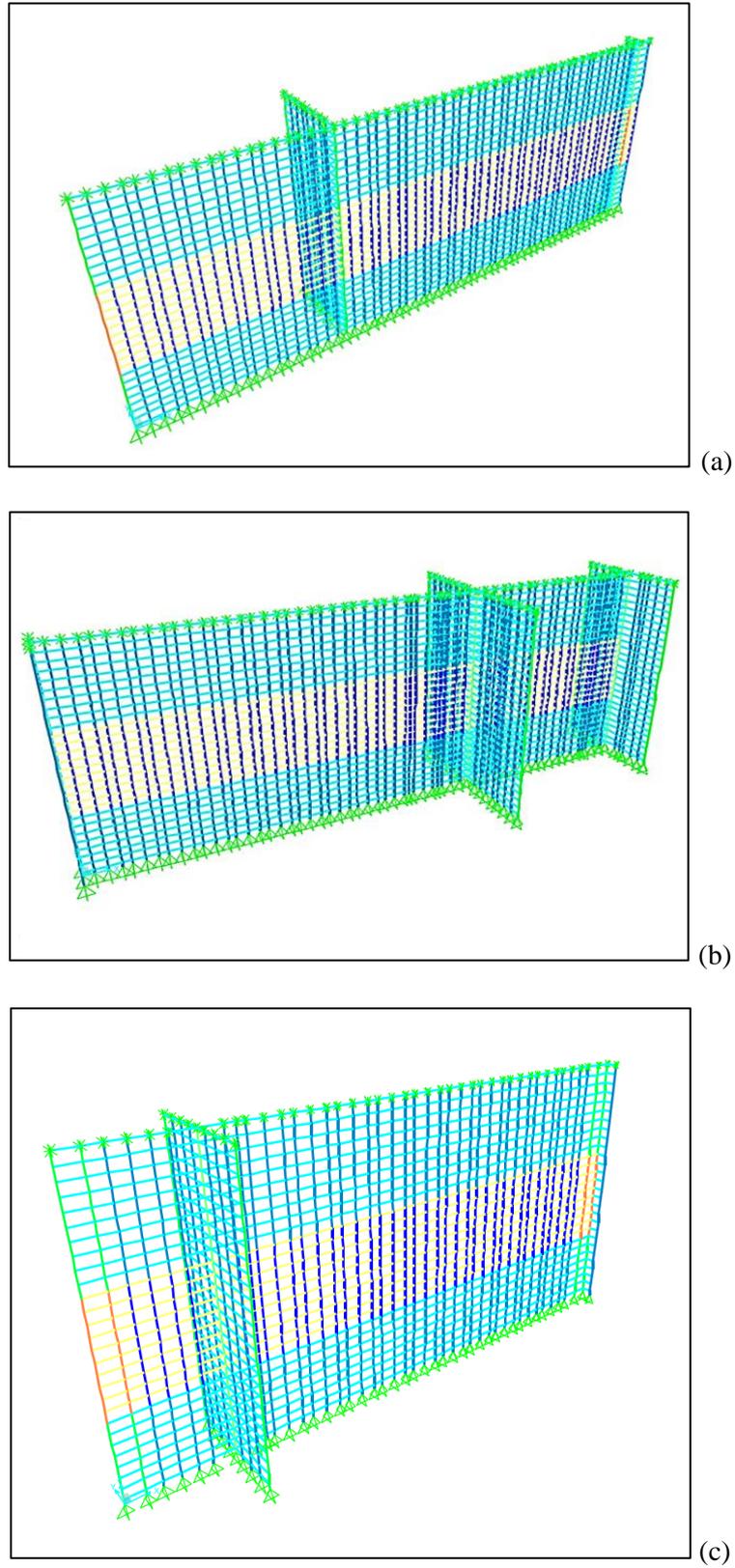
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As condições de contorno aplicadas foram as mesmas adotadas no modelo numérico de referência. No topo foi considerada restrição apenas ao movimento de translação na direção perpendicular ao seu plano, ou seja, na direção do eixo global Y (representado pelo deslocamento U2), deixando livre os movimentos de rotação. Já na base foram aplicadas restrições ao movimento de translação na direção dos três eixos globais X, Y e Z, deixando livre os movimentos de rotação.

A consideração dos efeitos P-delta foi realizada através da opção “*P-Delta plus Large Displacements*”.

A Figura 39 ilustra as paredes de contraventamento modeladas através do modelo de barras equivalentes. As barras em destaque nestas figuras correspondem às fiadas centrais de cada parede.

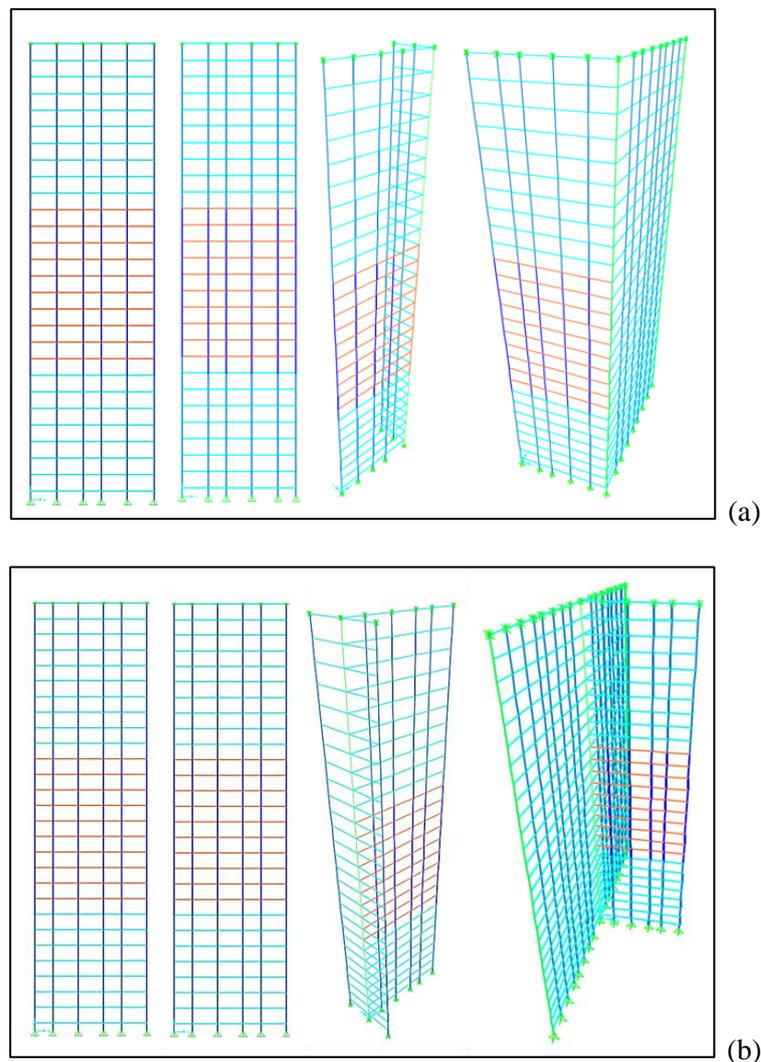
Figura 39 – Modelos numéricos das paredes: (a) Grupo 01; (b) Grupo 02 e (c) Grupo 03.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

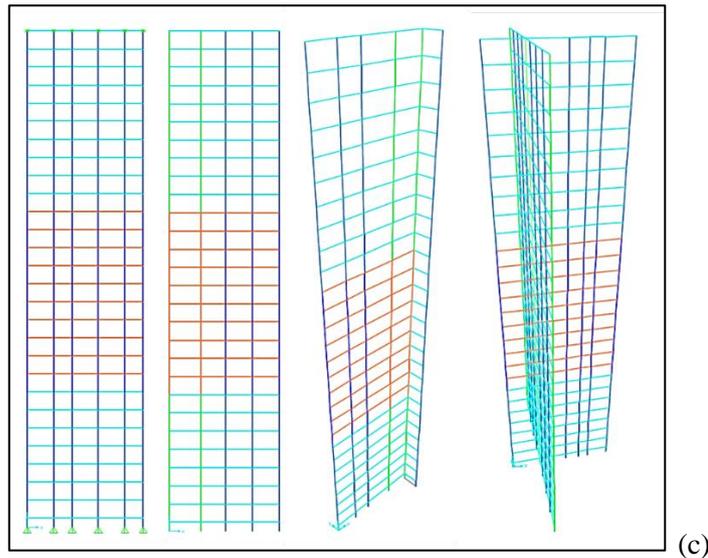
Posteriormente à discretização completa das paredes, foi providenciada a separação das respectivas faixas. Cada parede foi decomposta nas quatro faixas selecionadas, sendo cada uma delas processada isoladamente. A Figura 40 ilustra os modelos numéricos de cada faixa, para cada grupo de parede. Eventuais travamentos associados a trechos de parede transversal também foram considerados nos modelos. Tal como mencionado anteriormente, as barras em destaque correspondem às fiadas centrais.

Figura 40 – Modelos numéricos das faixas isoladas das paredes: (a) Grupo 01; (b) Grupo 02.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

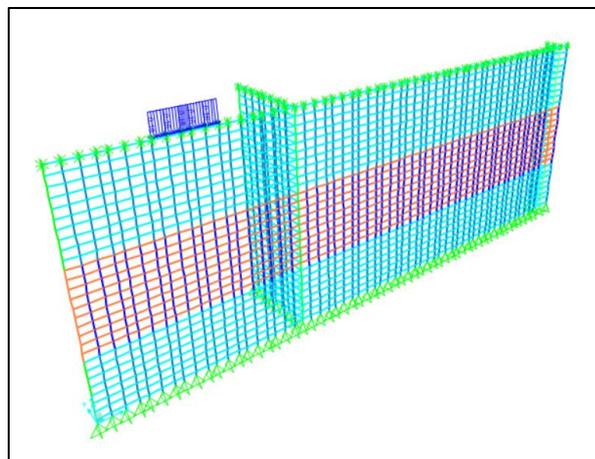
Figura 40 (Continuação) - Modelos numéricos das faixas isoladas das paredes: (c) Grupo 03.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Por fim, foram modeladas as paredes completas com aplicação dos carregamentos isoladamente em cada uma de suas faixas. Para esse modelo, foram escolhidos dois grupos de paredes, sendo um que apresentasse pouca influência dos travamentos laterais em suas faixas e outro no qual essa influência fosse mais acentuada. Dessa forma, as análises foram realizadas para as paredes do Grupo 01 e do Grupo 02, limitando-se ao pavimento térreo. A Figura 41 ilustra uma parede completa com aplicação do carregamento ao longo do trecho de apenas uma faixa.

Figura 41 - Aplicação do carregamento apenas na Faixa 02 da parede do Grupo 01 completa.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### 4.3. Resultados obtidos através da modelagem numérica

#### 4.3.1. Deslocamentos transversais

A apresentação e a análise dos resultados foram iniciadas com aqueles referentes aos deslocamentos transversais, uma vez que tal resultado pode ser utilizado para explicar as tendências de comportamento, além de ter correlação direta com os efeitos localizados de 2ª ordem mobilizados nas paredes.

##### 4.3.1.1. Paredes completas com carregamento aplicado de forma integral

###### a) Paredes do Grupo 01

A Figura 42 (a) ilustra o comportamento da parede do Grupo 01 no pavimento térreo, considerando o vento atuando no sentido 1. Para o sentido de atuação avaliado, as ações solicitantes devidas ao vento comprimem o primeiro trecho da parede, no qual situam-se as faixas 02 e 04. Invertendo-se o sentido de atuação do vento, ilustrado pela Figura 42 (b), como era de se esperar, os efeitos da compressão associada ao vento concentram-se no segundo trecho da parede, no qual situam-se as faixas 01 e 03.

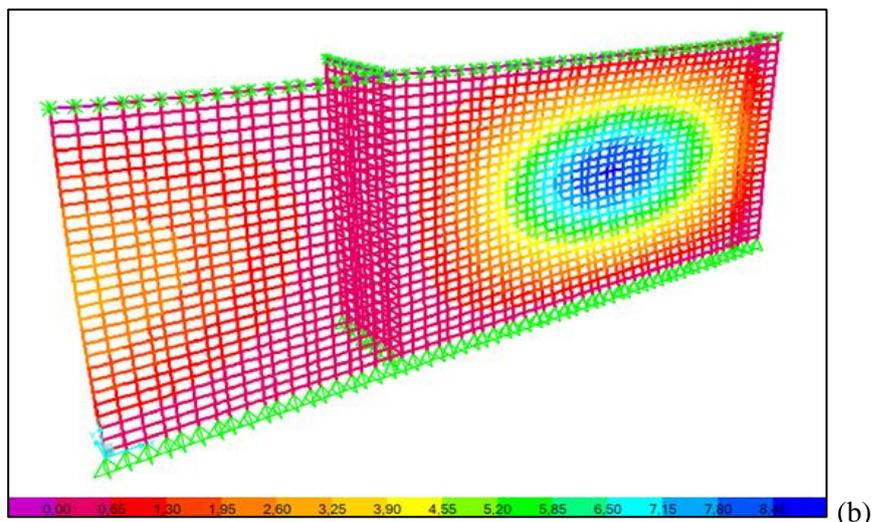
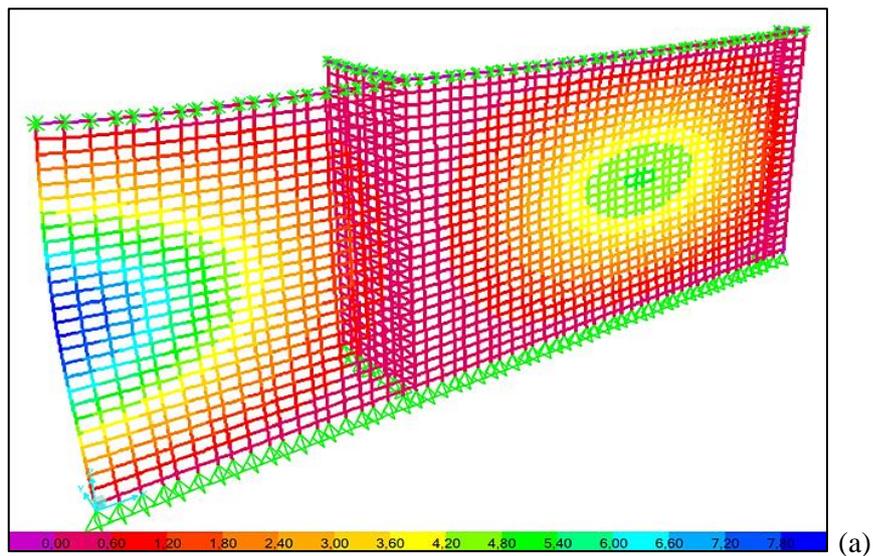
Observa-se que a parede transversal ao plano da parede de contraventamento em estudo confere maior rigidez às faixas localizadas nas suas proximidades. Os deslocamentos transversais aumentam à medida em que a distância ao travamento lateral aumenta, como seria de se esperar.

Para o vento no sentido 1 de atuação, o valor máximo de deslocamento transversal obtido foi da ordem de 8,00 mm, na extremidade livre do primeiro trecho. No segundo trecho, como era de se esperar, os deslocamentos foram menores, com valores máximos da ordem de 4,80 mm, próximos à porção central do referido trecho.

No caso do vento atuando no sentido 02, contrário ao anterior, o valor máximo de deslocamento obtido foi da ordem de 8,40 mm na porção central do segundo trecho da parede, nas proximidades da Faixa 01. No primeiro trecho, os deslocamentos foram inferiores, com valores máximos da ordem de 2,90 mm, na extremidade livre do referido trecho. Esse comportamento pode ser explicado, além da menor intensidade do carregamento total, também pela presença de grauteamento na sua extremidade livre, aumentando a rigidez desse trecho da seção.

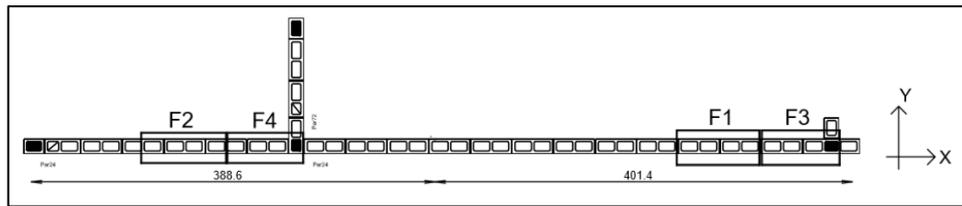
A análise das duas condições de solicitação dessa parede indica claramente os efeitos associados à presença de elementos transversais de travamento. Em qualquer dos dois casos, as máximas intensidades do carregamento associado ao vento ocorrem nas extremidades das paredes, mas apenas no caso do sentido 01 de sua atuação os deslocamentos transversais máximos ocorreram na extremidade. No caso do vento atuando segundo o sentido 02, a presença da parede transversal na extremidade fez com que os deslocamentos máximos ocorressem, agora, na porção central do trecho 02, mesmo não sendo uma região com atuação da máxima intensidade de carregamento total dada pela superposição do carregamento vertical com aquele associado ao efeito do vento.

Figura 42 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 01 no pavimento térreo, com carregamento aplicado de forma integral: (a) Sentido 1 de atuação do vento e (b) Sentido 2 de atuação do vento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Figura 43 – Indicação da localização das faixas na parede do Grupo 01.



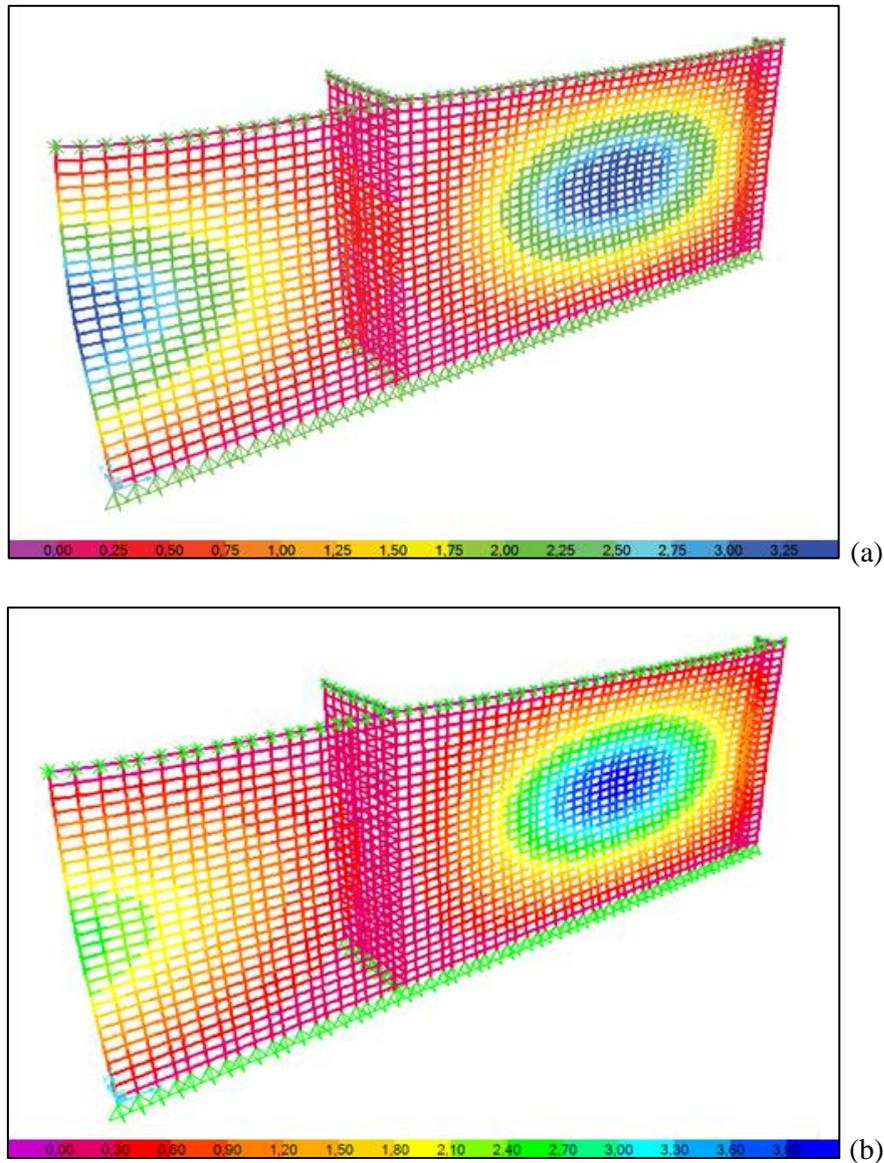
Fonte: Araújo (2016)

Considerando a parede no 9º pavimento, a Figura 44 (a) ilustra os resultados obtidos para o vento atuando segundo o sentido 01. Nesse caso específico, observa-se que os deslocamentos máximos (da ordem de 3,40 mm) ocorreram tanto na extremidade do trecho 01, local correspondente a atuação da maior intensidade do carregamento total, quanto na porção central do trecho 02, local no qual o carregamento associado ao vento tende a aliviar o carregamento vertical. Ressalta-se, porém, que no 9º pavimento a influência dos carregamentos verticais se sobressai em relação aos correspondentes à ação do vento, o que pode explicar esse comportamento. Além disso, o  $f_{pk}$  utilizado é menor que aquele do pavimento térreo, de forma que a rigidez da parede também sofre redução considerável.

Ao se inverter o sentido de atuação do vento, conforme ilustrado pela Figura 44 (b), é perceptível o efeito do alívio do carregamento vertical ocasionado pela ação do vento na extremidade do trecho 01 da parede, verificado pela redução dos deslocamentos transversais com valores máximos da ordem de 2,50 mm. Os maiores deslocamentos, nesta situação, ocorreram na porção central do trecho 02, semelhante ao verificado no pavimento térreo, com valores máximos da ordem de 4,00 mm nas proximidades da faixa 01.

Os resultados obtidos para o 9º pavimento ressaltam a influência de paredes transversais no comportamento da parede de contraventamento. As faixas mais distantes das paredes transversais tendem a apresentar os máximos deslocamentos, mesmo que não atue a maior intensidade do carregamento total (vertical e vento) nessas faixas.

Figura 44 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 01 no 9º pavimento, com carregamento aplicado de forma integral: (a) Sentido 1 de atuação do vento e (b) Sentido 2 de atuação do vento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

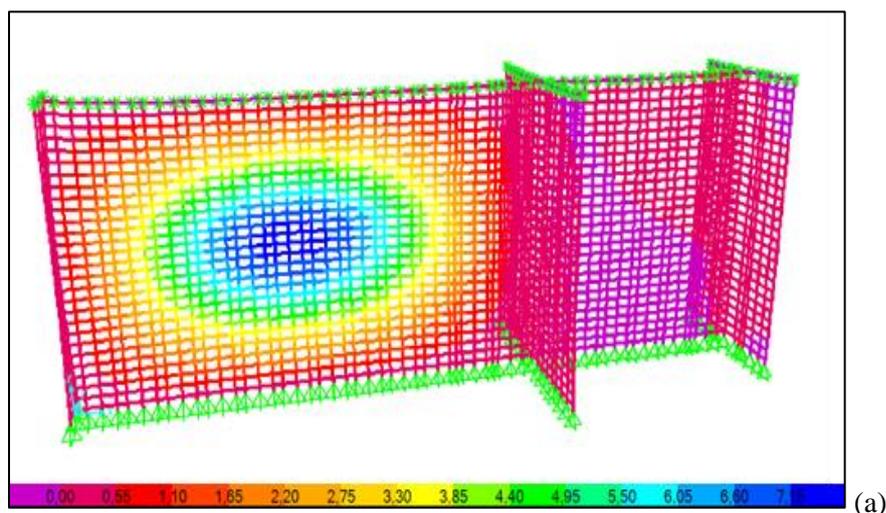
#### b) Paredes do Grupo 02

A Figura 45 (a) ilustra o comportamento da parede do Grupo 02 no pavimento térreo, considerando o sentido 1 de atuação do vento. Para esta condição, os efeitos associados ao vento resultam em tensões de compressão no primeiro trecho da parede, no qual situam-se as faixas 01 e 03. Invertendo-se o sentido de atuação do vento invertem-se também os trechos com ocorrência de tensões de compressão, situando-se agora nas faixas 02 e 04. A Figura 45 (b) ilustra o comportamento da parede do Grupo 02, considerando o sentido 2 de atuação do vento.

Pelo que se pode observar nestas figuras, fica ainda mais evidente a influência das paredes transversais na rigidez da parede de contraventamento. Percebe-se que o segundo trecho, por estar localizado entre duas paredes transversais muito próximas, apresentou deslocamentos praticamente nulos, mesmo na situação em que a ação do vento o solicita à compressão.

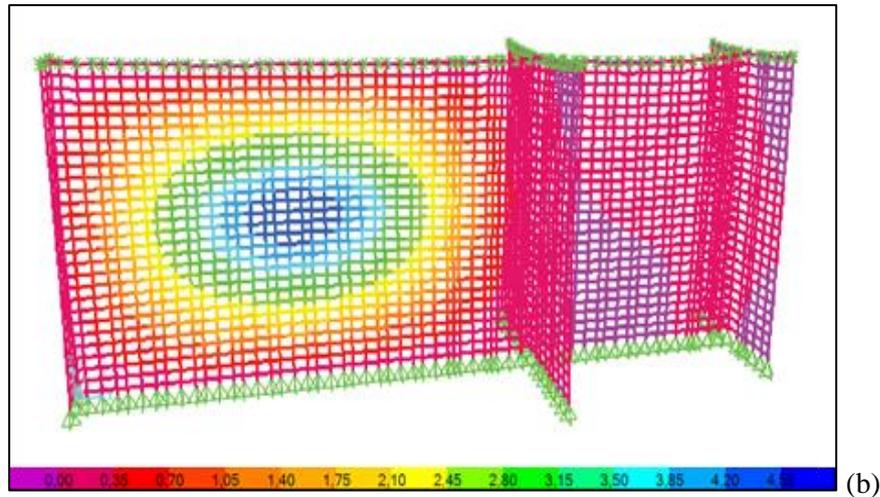
Já no primeiro trecho, no qual a influência dos travamentos laterais é menos significativa, em função do comprimento do trecho, os deslocamentos aumentaram para as faixas mais distantes do travamento, com valores máximos próximos à metade do comprimento deste trecho. Para a situação de atuação do vento no sentido 1, os deslocamentos máximos foram da ordem de 7,40 mm, enquanto que no sentido 2 de atuação foram da ordem de 4,40 mm, evidenciando o efeito significativo da proximidade de travamentos na redução dos deslocamentos transversais das faixas. Além disso, percebe-se também que a rigidez das paredes transversais em seu próprio plano não teve influência no comportamento dos trechos, uma vez que os máximos deslocamentos ocorreram, na condição de existência de travamentos nas duas extremidades, na porção central do correspondente trecho. Sob esse aspecto, é importante mencionar que a parede transversal à esquerda do trecho 01 da parede em estudo, apesar de apresentar comprimento muito pequeno, tem influência do grauteamento vertical na amarração.

Figura 45 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 02 no pavimento térreo, com carregamento aplicado de forma integral: (a) Sentido 1 de atuação do vento.



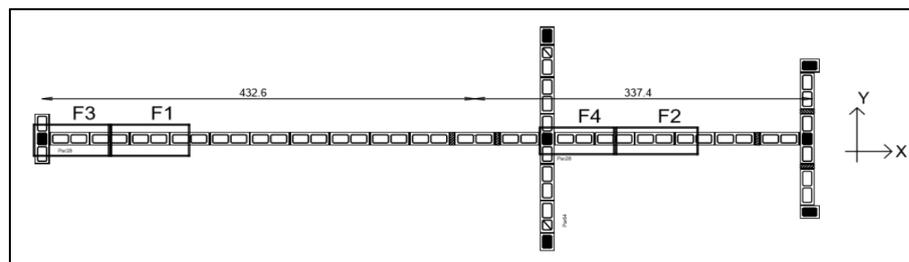
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Figura 45 (Continuação) - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 02 no pavimento térreo, com carregamento aplicado de forma integral: (b) Sentido 2 de atuação do vento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

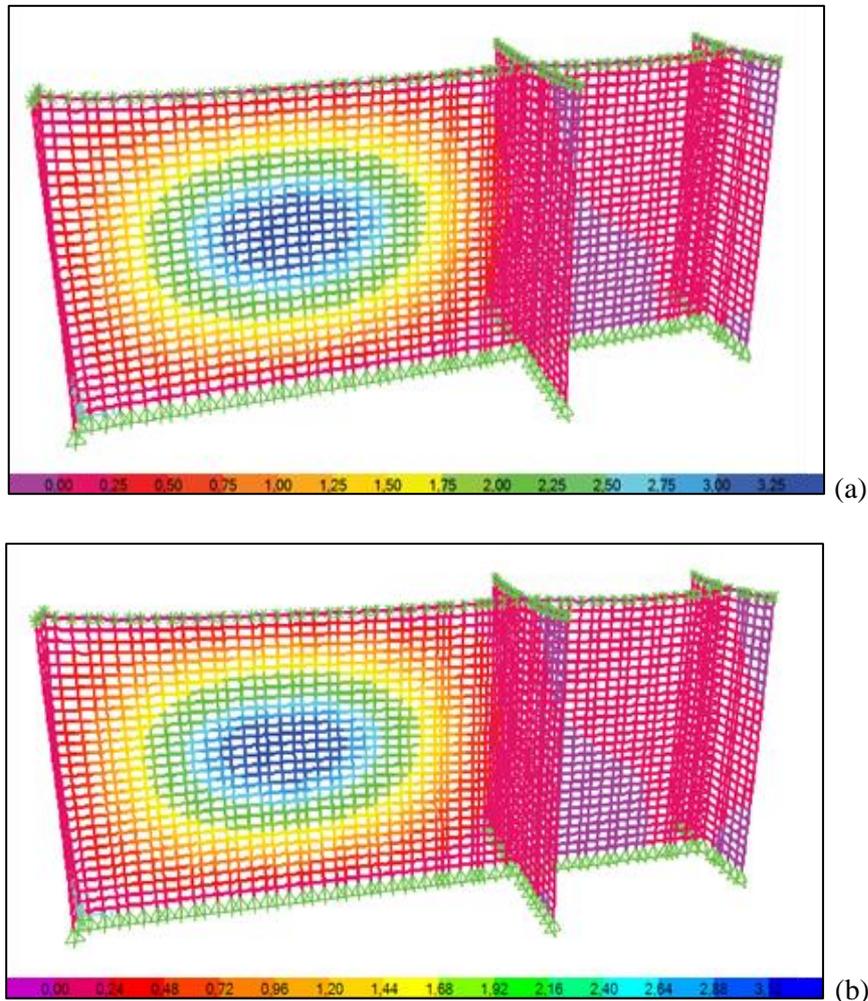
Figura 46 - Indicação da localização das faixas na parede do Grupo 02.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Em relação aos resultados para o 9º pavimento, não houve alterações na tendência de comportamento, ocorrendo, tão somente, a redução nos valores dos deslocamentos, iguais a 3,40 mm e 3,20 mm segundo os sentidos 01 e 02 de atuação do vento respectivamente, ambos associados ao trecho 01 da parede, conforme ilustra a Figura 47 (a) e Figura 47 (b).

Figura 47 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 02 no 9º pavimento, com carregamento aplicado de forma integral: (a) Sentido 1 de atuação do vento e (b) Sentido 2 de atuação do vento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### c) Paredes do Grupo 03

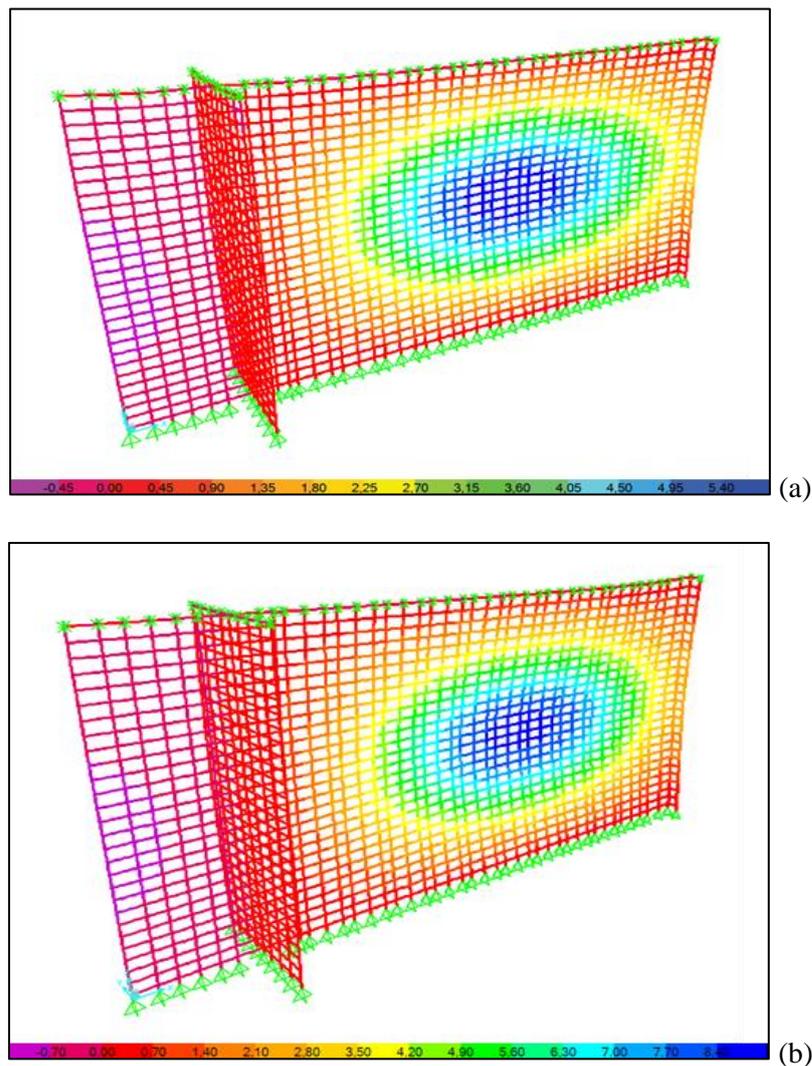
Os resultados obtidos para atuação do vento segundo os sentidos 01 e 02 estão ilustrados pela Figura 48 (a) e Figura 48 (b), respectivamente.

É possível perceber a influência das paredes transversais na rigidez do primeiro trecho da parede de contraventamento, que apresentou deslocamentos transversais praticamente nulos mesmo na situação em que a ação do vento o solicita à compressão. Apesar desse trecho apresentar sua extremidade esquerda livre, o fato de apresentar pequeno comprimento resultou na influência dos travamentos laterais estendendo-se por praticamente todo o trecho. Sob esse aspecto, percebe-se também que a região de máximo deslocamento no trecho 02 está um pouco

mais próxima da extremidade direita, apesar de também haver travamento nesta extremidade. Ocorre que esse travamento é constituído apenas em uma das faces laterais da parede em estudo, eliminando a formação de binários constituídos por barras verticais dispostas simetricamente em relação ao plano da parede de contraventamento. Observando as figuras, percebe-se, inclusive, a ocorrência de pequenos deslocamentos à meia altura do travamento à direita, fato não ocorrido nas paredes avaliadas anteriormente.

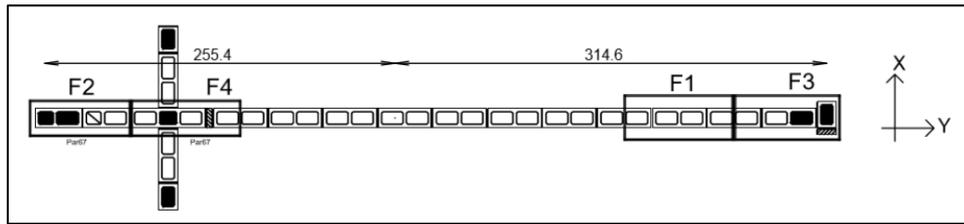
No segundo trecho, a influência das paredes transversais diminuiu para as faixas mais distantes, fato já observado nas paredes avaliadas anteriormente. Para o sentido 1 de atuação do vento, os deslocamentos máximos foram da ordem de 5,70 mm, enquanto que no sentido 2 foram da ordem de 8,70 mm.

Figura 48 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 03 no pavimento térreo, com carregamento aplicado de forma integral: (a) Sentido 1 de atuação do vento e (b) Sentido 2 de atuação do vento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

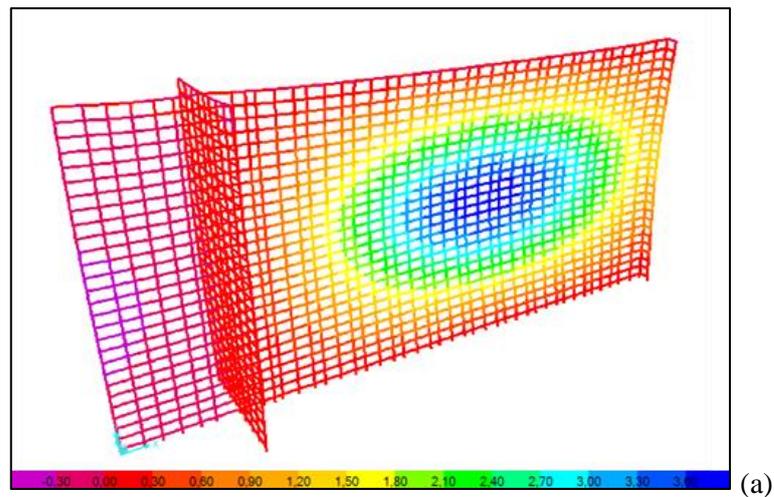
Figura 49 - Indicação da localização das faixas na parede do Grupo 03.



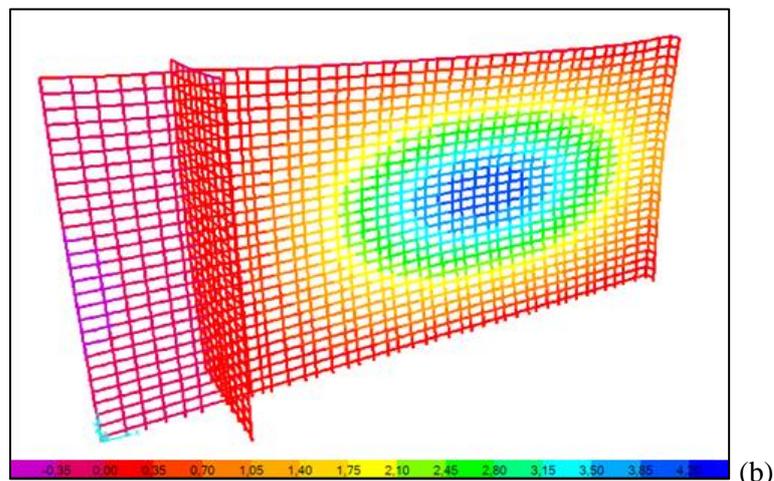
Fonte: Araújo (2016)

A tendência de comportamento foi mantida para o caso do 9º pavimento, cujos resultados estão ilustrados pela Figura 50. As diferenças se limitaram aos valores dos deslocamentos máximos, iguais a 3,75 mm e 4,10 mm segundo os sentidos 01 e 02 de atuação do vento, ambos no trecho 02 da parede.

Figura 50 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 03 no 9º pavimento, com carregamento aplicado de forma integral: (a) Sentido 1 de atuação do vento e (b) Sentido 2 de atuação do vento.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

#### 4.3.1.2. Faixas isoladas

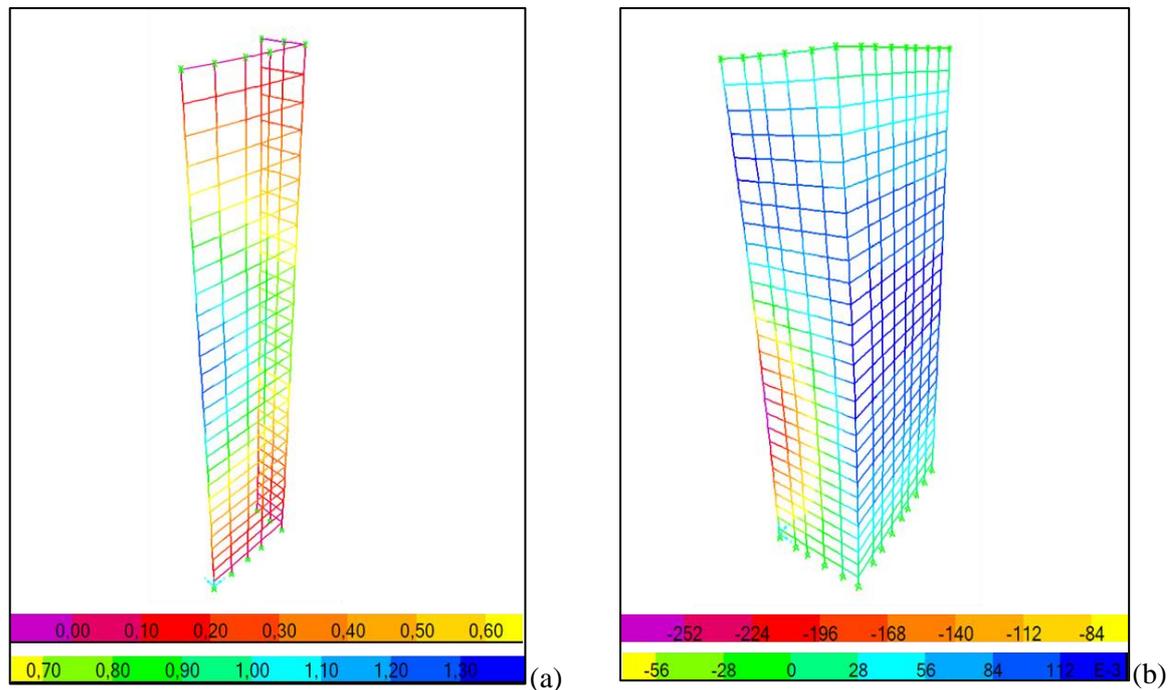
Conforme mencionado anteriormente, foi realizada também a modelagem das faixas selecionadas em cada grupo de parede de forma isolada. Como primeiro resultado importante, registra-se que, no caso das faixas no pavimento térreo que não dispunham de travamento lateral conectado diretamente, não foi possível alcançar o equilíbrio com o processamento da análise não-linear geométrica. Deve-se levar em consideração que os carregamentos no pavimento térreo são elevados, o que pode ter sido a causa para que não fosse obtida a convergência durante o processamento não-linear, indicando que o modelo numérico deve ser melhor estudado no caso da análise isolada das faixas.

Ao contrário, no caso das faixas que dispunham de travamento lateral vertical, foi possível alcançar uma configuração de equilíbrio ao final do processamento do modelo computacional. Isso ocorreu mesmo para os trechos de paredes transversais de pequeno comprimento, que, pelas prescrições da NBR 16868-1:200 não seriam considerados como travamentos laterais. Entretanto, para essas faixas, os deslocamentos preponderantes ocorreram no plano da parede de contraentamento. Para esses casos, seria necessária uma investigação mais detalhada referente aos efeitos da rigidez da faixa e da parede transversal a ela ligada, além das vinculações no topo da parede.

##### a) Paredes do Grupo 01

A Figura 51 ilustra um exemplo do comportamento para as Faixas 03 e 04 da parede do Grupo 01 no pavimento térreo, as quais possuem influência de um trecho de parede transversal de pequeno comprimento e de um trecho de parede transversal de maior comprimento, respectivamente. Percebe-se que para a Faixa 03, conectada a um trecho transversal de pequeno comprimento, os deslocamentos ocorreram na própria faixa e foram consideravelmente maiores que aqueles da Faixa 04, que, por sua vez, foram praticamente nulos. Tal aspecto demonstra, mais uma vez, a influência pouco significativa de trechos curtos de travamento. Para as faixas dos demais grupos com características semelhantes às do Grupo 01, o comportamento observado foi análogo.

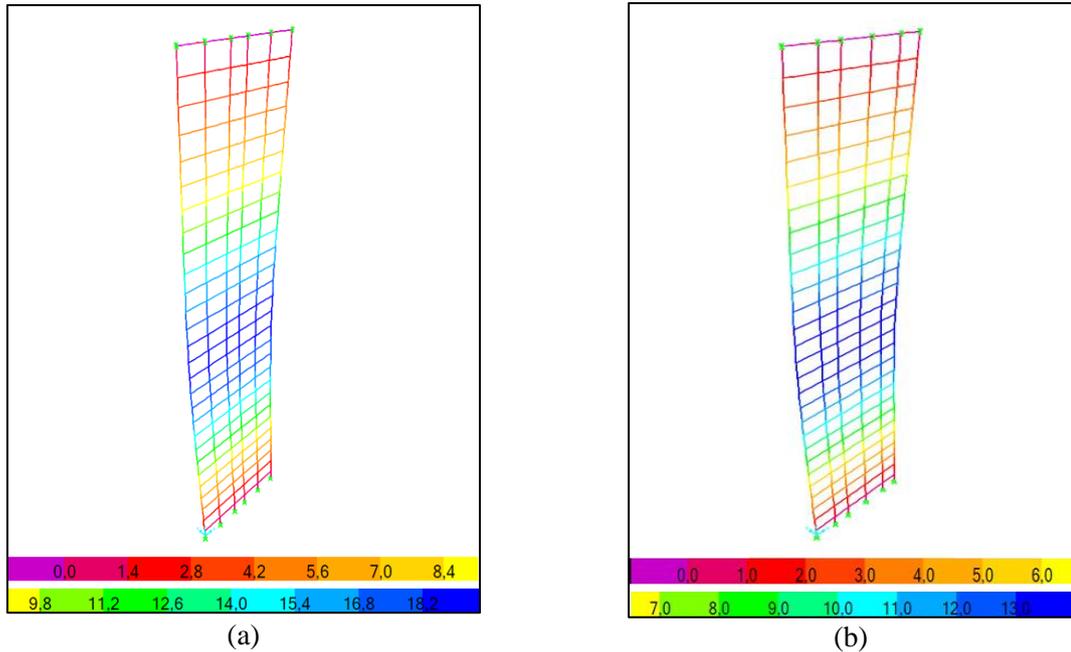
Figura 51 - Deslocamentos transversais (mm) da parede do Grupo 01 no pavimento térreo: (a) Faixa 03 e (b) Faixa 04



Fonte: Araújo (2020)

A Figura 52 apresenta os resultados para as Faixas 01 e 02 da parede do Grupo 01 no 9º pavimento. Essas correspondem a trechos da parede sem conexão direta com travamentos laterais. Os resultados apresentados indicam que a modelagem das Faixas 01 e 02 isoladas resultou em deslocamentos transversais muito maiores que aqueles obtidos para as mesmas faixas na modelagem da parede completa do 9º pavimento. Enquanto a Faixa 01 apresentou deslocamento máximo da ordem de 18,50 mm, a Faixa 02 apresentou deslocamento máximo da ordem de 13,60 mm, muito maiores que os máximos deslocamentos na parede e que não ocorreram nas Faixas 01 e 02. A diferença entre os deslocamentos dessas faixas, aqui apresentados, é justificada pela solicitação mais intensa do vento na Faixa 01. Na comparação com os resultados da parede completa, a justificativa para essa enorme diferença pode ser atribuída à continuidade entre faixas e à proximidade do travamento, efeitos que são intrínsecos ao modelo da parede completa.

Figura 52 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 01 no 9º pavimento: (a) Faixa 01 e (b) Faixa 02.



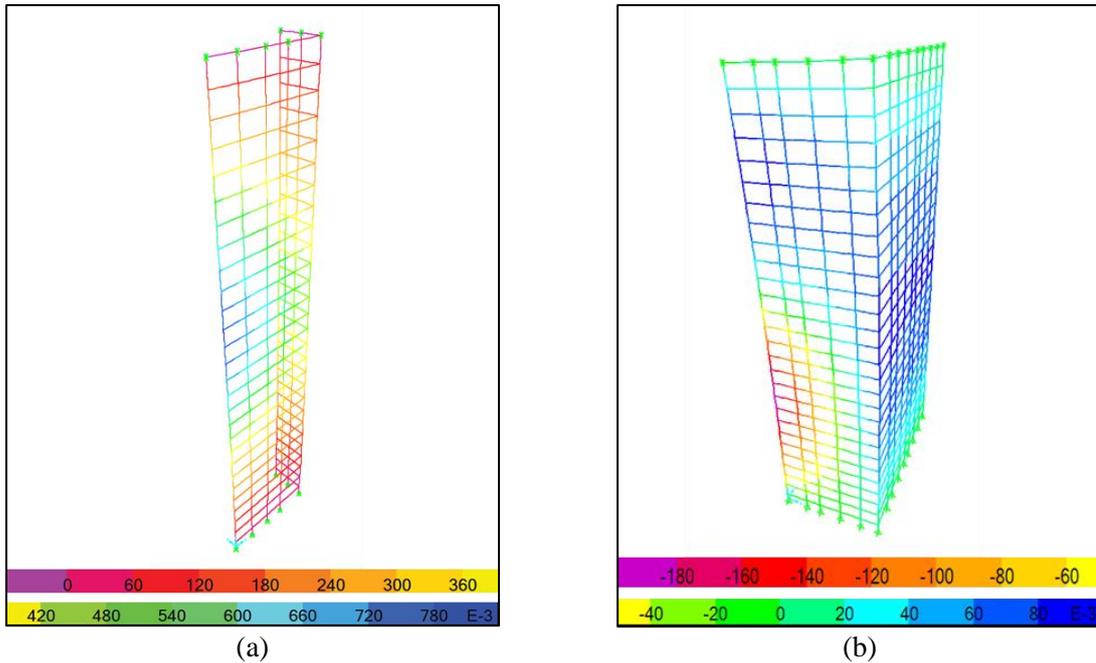
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Figura 53 ilustra os resultados para as Faixas 03 e 04 da parede do Grupo 01 no 9º pavimento. Essas são faixas que apresentam vinculação direta com travamentos laterais, mesmo que esses apresentem pequenos comprimentos, como ocorre na Faixa 03.

Para essas faixas foi mantida a tendência de comportamento observado no pavimento térreo. As diferenças limitaram-se aos menores valores dos deslocamentos máximos. A Faixa 03, que apresenta travamento de comprimento pequeno, apresentou deslocamentos maiores que aqueles da Faixa 04. Enquanto que para a Faixa 03 os deslocamentos foram da ordem de 0,78 mm, para a Faixa 04 foram da ordem de 0,18 mm.

Tal como ocorreu para o pavimento térreo, percebe-se que na Faixa 03 os deslocamentos máximos se concentraram na própria faixa, enquanto que na Faixa 04 essa tendência não se manteve e os deslocamentos foram praticamente nulos, expressos pelo valor máximo de 0,13 mm.

Figura 53 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 01 no 9º pavimento: (a) Faixa 03 e (b) Faixa 04.



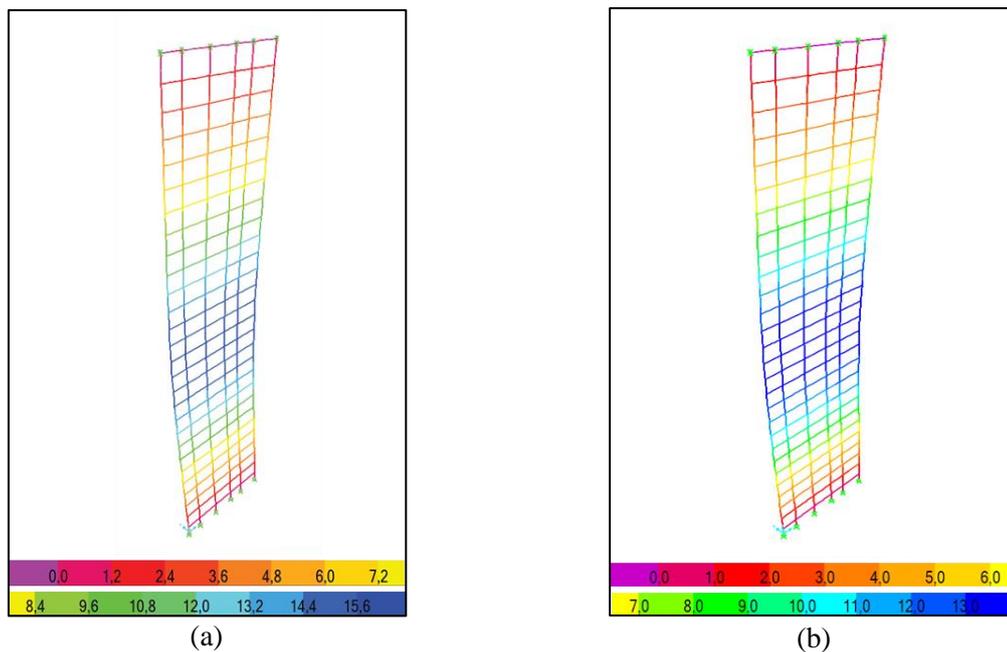
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

#### b) Paredes do Grupo 02

A análise dos resultados para as Faixas 01 e 02 da parede do Grupo 02 indicou que foi mantida a tendência de comportamento das faixas de mesma numeração do Grupo 01, com deslocamentos transversais maiores que aqueles obtidos na modelagem da parede completa. A Figura 54 apresenta os resultados para essas faixas.

Para a Faixa 01 os valores de deslocamentos transversais foram da ordem de 15,60 mm, enquanto que para a Faixa 02 foram de 13,60 mm. Tal como no caso do pavimento térreo, as diferenças entre os deslocamentos das faixas, aqui apresentados, podem ser atribuídas a maior intensidade da solicitação do vento na Faixa 01, assim como a enorme diferença em relação ao modelo da parede completa pode ser atribuída aos efeitos da continuidade entre as faixas e da proximidade em relação ao travamento lateral.

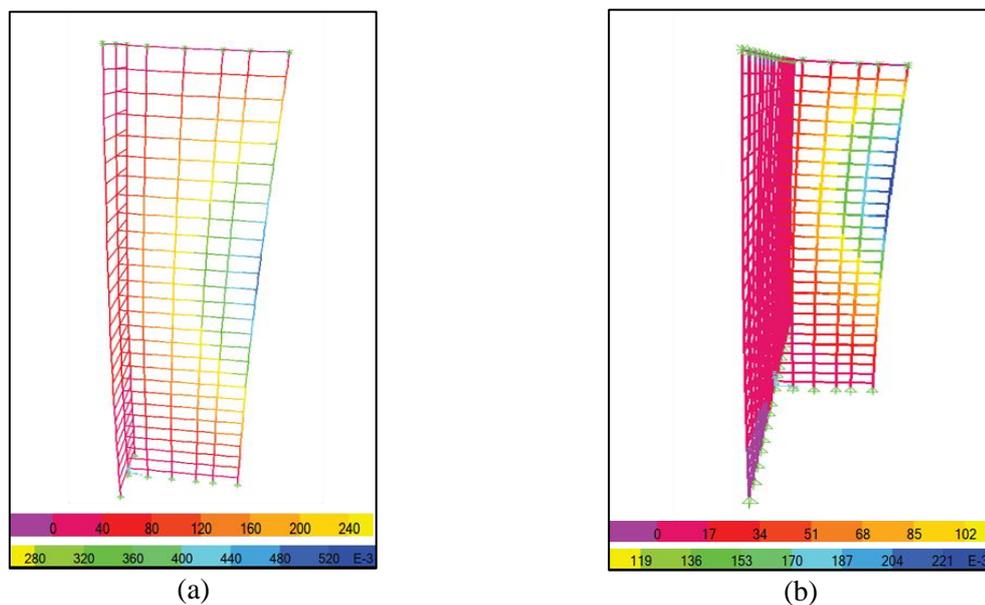
Figura 54 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 02 no 9º pavimento: (a) Faixa 01 e (b) Faixa 02.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Figura 55 ilustra os resultados para as Faixas 03 e 04. Verifica-se que houve manutenção na tendência de comportamento das faixas observada no caso do Grupo 01. Para a Faixa 03, os deslocamentos transversais foram da ordem de 0,50 mm, enquanto que para a Faixa 04 foram da ordem de 0,23 mm.

Figura 55 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 02 no 9º pavimento: (a) Faixa 03 e (b) Faixa 04.

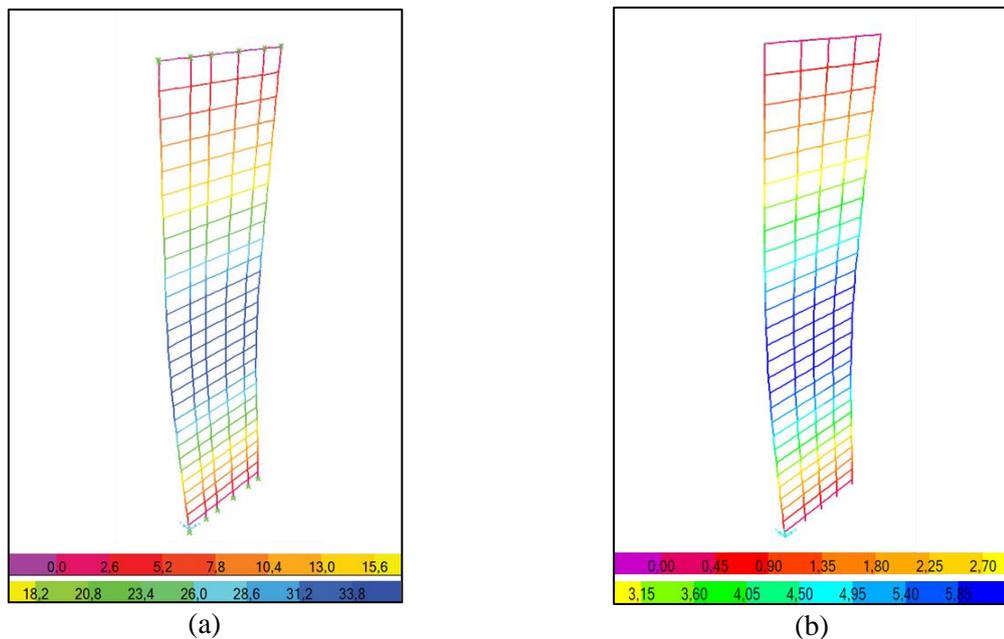


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

c) Paredes do Grupo 03

A Figura 56 apresenta os resultados para as Faixas 01 e 02 da parede do Grupo 03 no 9º pavimento. A análise dos resultados mostrou valores mais elevados para os deslocamentos transversais da Faixa 01, da ordem de 34,60 mm. Isso ocorre porque, além dessa faixa estar localizada mais distante dos travamentos laterais, os carregamentos são mais acentuados para o Grupo 03. Para a Faixa 02 os valores de deslocamentos transversais foram menores, da ordem de 6,20 mm. Diferente das demais, essa faixa possui grauteamento vertical, o que aumenta sua rigidez e justifica o menor valor para o máximo deslocamento.

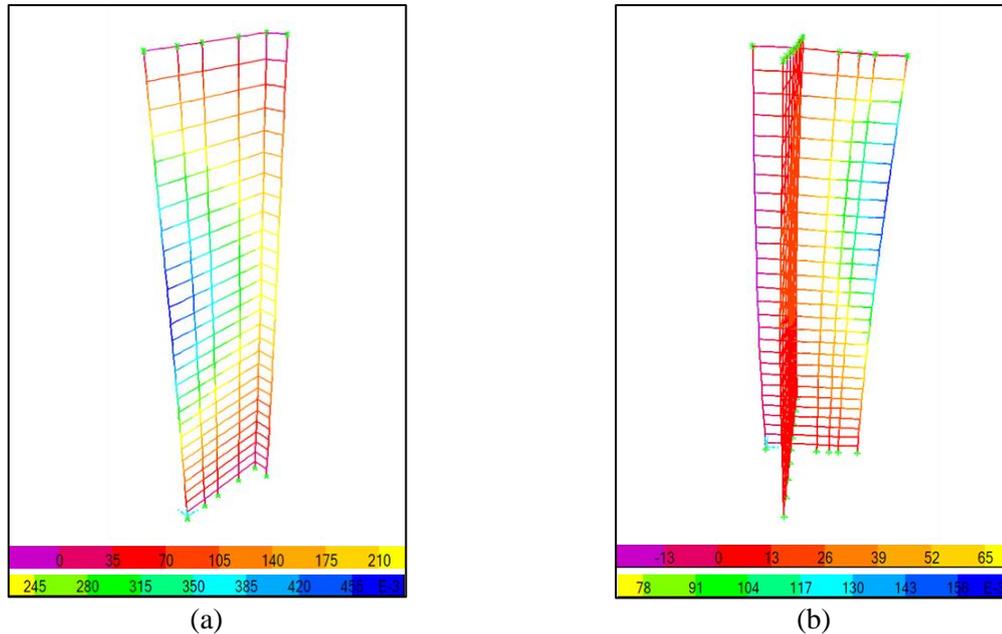
Figura 56 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 03 no 9º pavimento: (a) Faixa 01 e (b) Faixa 02.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Figura 57 apresenta os resultados para as Faixas 03 e 04. Considerando as faixas do Grupo 02, a tendência de comportamento foi mantida. As diferenças se limitaram aos valores dos deslocamentos máximos, iguais a 0,48 mm e 0,16 mm para as Faixas 03 e 04, respectivamente, podendo o último ser considerado nulo.

Figura 57 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 03 no 9º pavimento: (a) Faixa 03 e (b) Faixa 04.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

#### 4.3.1.3. Paredes completas com carregamento aplicado isoladamente em cada faixa

Como já foi mencionado anteriormente, nesta verificação foram selecionadas as paredes do Grupo 01 e do Grupo 02 do pavimento térreo para realizar a aplicação dos carregamentos de forma isolada em cada faixa, porém com toda a parede discretizada na modelagem. A escolha dos grupos se deu pela maior ou menor influência dos travamentos laterais em suas faixas. Já a escolha pelo pavimento térreo se deu pela maior intensidade dos carregamentos.

##### a) Parede do Grupo 01

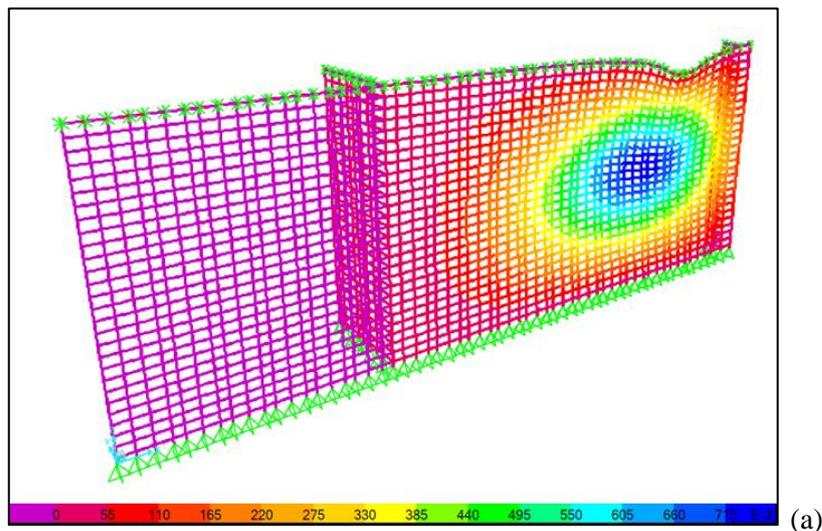
A Figura 58 ilustra os resultados dos deslocamentos transversais referentes à aplicação dos carregamentos de forma isolada nas Faixas 01, 02, 03 e 04 da parede do Grupo 01 no pavimento térreo.

Observando os resultados percebe-se que a aplicação do carregamento de forma isolada nas faixas mobilizou de forma intensa as faixas vizinhas dispostas mais distantes dos travamentos. Mais especificamente nas Faixas 02 e 04 os máximos deslocamentos ficaram associados à faixa vizinha, não ocorrendo naquela onde o carregamento foi aplicado. Tal resultado pode ser explicado pelo trecho que contém essas faixas ter a extremidade esquerda

isenta de travamento lateral. Da mesma forma, verifica-se que o máximo deslocamento associado ao caso da Faixa 04 foi muito menor que o da Faixa 02, efeito que pode ser atribuído à maior proximidade do elemento vertical de travamento na extremidade direita. Diferentemente, verifica-se que no caso da Faixa 01 parte da região com deslocamento máximo situa-se na própria, o que pode ser atribuído à proximidade do travamento, mesmo que de pequena rigidez, à direita dessa faixa. Tais resultados ilustram a influência da continuidade entre faixas e da proximidade de elementos verticais de travamento.

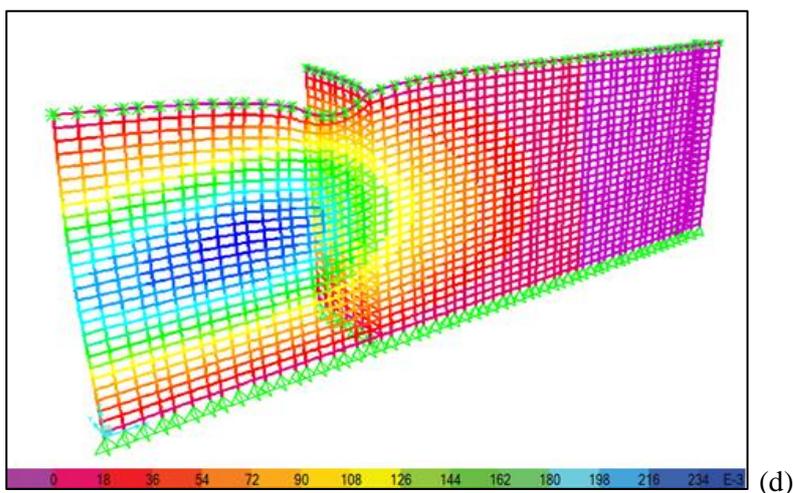
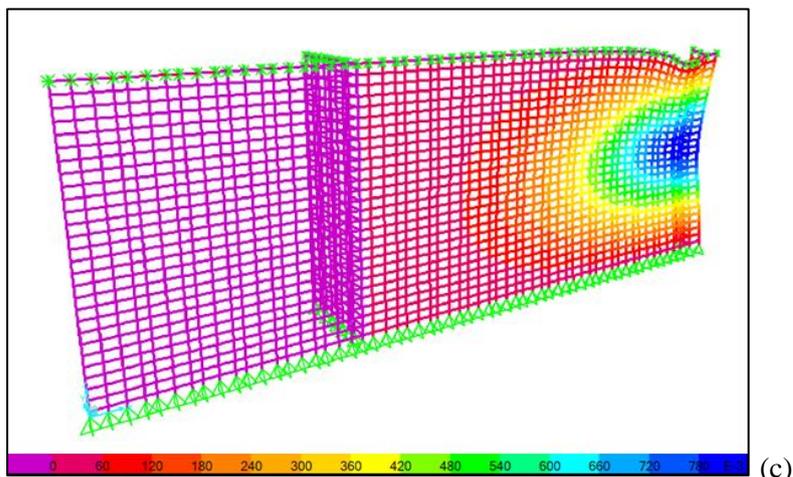
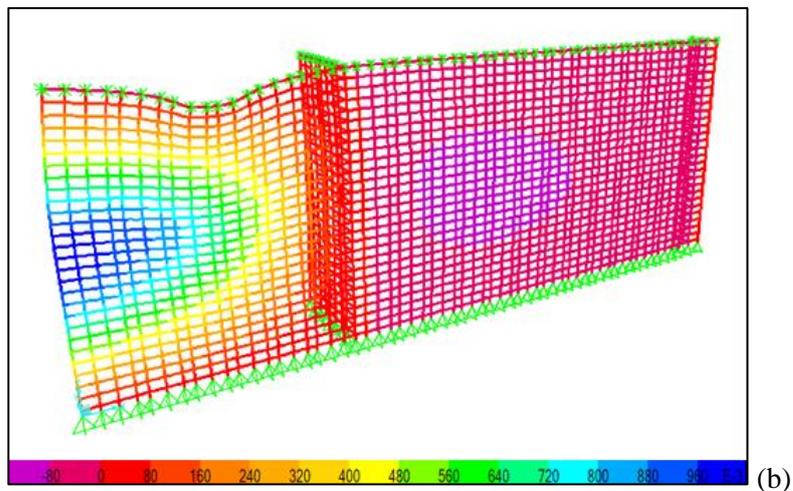
Resultado inesperado ocorreu no caso da aplicação do carregamento na Faixa 03, Figura 58 (c), em que os máximos deslocamentos ocorreram, além da região da faixa vizinha, também na região da própria Faixa 03 mesmo com a existência do elemento vertical de travamento. Uma justificativa para esse comportamento pode ser a disposição do elemento de travamento, que se situa apenas em uma das faces da parede de contraventamento. Tal aspecto foi descrito mais detalhadamente na análise do Grupo 02.

Figura 58 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 01 com carregamento aplicado de forma isolada: (a) Na Faixa 01.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Figura 58 (Continuação) - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 01 com carregamento aplicado de forma isolada: (b) Na Faixa 02; (c) Na Faixa 03 e (d) Na Faixa 04.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

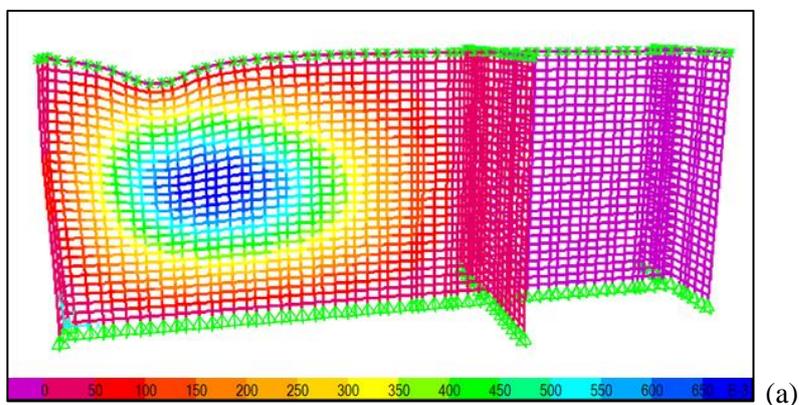
b) Parede do Grupo 02

A Figura 59 ilustra os resultados dos deslocamentos transversais referentes à aplicação dos carregamentos de forma isolada nas Faixas 01, 02, 03 e 04 da parede do Grupo 02 no pavimento térreo.

Verifica-se que os resultados obtidos para os casos do carregamento aplicado nas Faixas 01 e 04 mantiveram a tendência de comportamento observada no Grupo 01. Para o caso da Faixa 02, situada em trechos curtos de parede, verifica-se alteração substancial no comportamento, em que os máximos deslocamentos ocorreram praticamente na região da própria faixa. Essa alteração no comportamento pode ser atribuída à existência de elementos verticais de travamento, com rigidez semelhante, nas duas extremidades do trecho, o que não ocorria no Grupo 01.

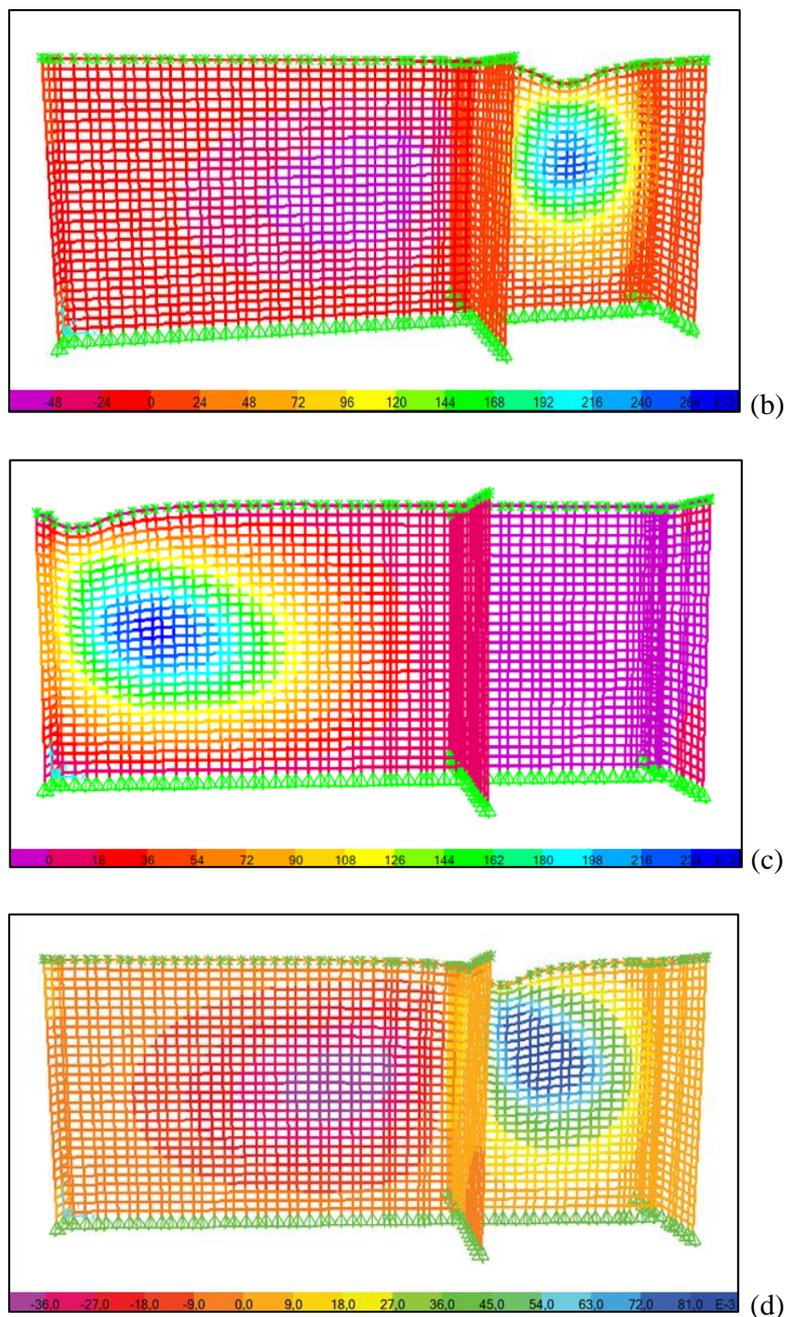
Alteração substancial na tendência de comportamento também foi observada para a Faixa 03 em comparação ao ocorrido no Grupo 01. Mesmo o elemento vertical de travamento apresentando pequeno comprimento, os máximos deslocamentos ocorreram integralmente na faixa vizinha àquela de aplicação do carregamento. Essa nova tendência de comportamento pode estar relacionada à disposição do elemento de travamento, que possui trechos vinculados as duas faces da parede de contraventamento. Essa disposição induz, de modo mais intenso, a ocorrência de binários nas extremidades do elemento de travamento, o que aumenta substancialmente sua rigidez aos deslocamentos na direção transversal da parede. No caso do Grupo 01, o elemento de travamento, também de pequeno comprimento, apresentava vinculação em apenas uma das faces da parede de contraventamento.

Figura 59 - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 02 com carregamento aplicado de forma isolada: (a) Na Faixa 01.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Figura 59 (Continuação) - Deslocamentos transversais (mm) para a parede do Grupo 02 com carregamento aplicado de forma isolada: (b) Na Faixa 02; (c) Na Faixa 03 e (d) Na Faixa 04.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

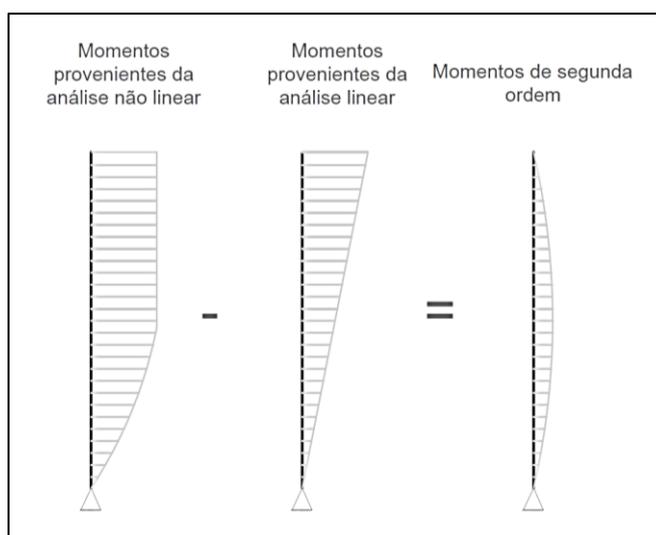
#### 4.3.2. Avaliação dos momentos de segunda ordem nas faixas

As verificações seguintes trataram dos valores obtidos para os momentos de segunda ordem provenientes da análise não-linear geométrica dos modelos computacionais, comparando-os aos correspondentes valores obtidos pelas normas adotadas. De modo que as

comparações fossem as mais adequadas possíveis, os resultados da análise computacional limitaram-se aos modelos completos das paredes de contraventamento e aos das faixas isoladas. Os valores assim obtidos para o momento de segunda ordem foram utilizados também para realizar o dimensionamento das faixas, estabelecendo, portanto, uma comparação consistente entre os resultados da modelagem computacional com os das formulações da NBR 15961-1 e NBR 16868-1.

A obtenção dos valores dos momentos de segunda ordem no modelo computacional foi realizada através do levantamento dos momentos originados da análise não linear com consideração dos efeitos P-delta com posterior subtração dos momentos originados da análise linear. A Figura 60 ilustra o processo de obtenção dos momentos.

Figura 60 – Obtenção dos momentos de segunda ordem no modelo numérico.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 18 apresenta os resultados dos momentos de segunda ordem obtidos através da modelagem numérica e da aplicação das formulações da NBR 15961-1 e NBR 16868-1 para as faixas das paredes do pavimento térreo. Como discutido anteriormente, não houve convergência durante o processo de análise não linear geométrica para algumas faixas deste pavimento, não sendo possível obter o equilíbrio, de forma que foram realizadas comparações apenas entre os valores correspondentes à modelagem da parede completa. Nesta tabela, os valores de diferença negativos referem-se à uma redução, enquanto os valores positivos referem-se à um acréscimo percentual.

A partir dos resultados indicados, é possível perceber uma diferença acentuada entre os valores de momento de segunda ordem  $M_{2d}$  calculados pela NBR 15961-1 e pela

NBR 16868-1, seja pela nova formulação ou pelas novas considerações para o cálculo do índice de esbeltez. Para os casos nos quais o índice de esbeltez resultou no mesmo valor para as duas normas, a redução dos momentos foi igual a 44,4%, em média. Para os casos nos quais o índice de esbeltez calculado pela NBR 16868-1 resultou menor que aquele obtido pela NBR 15961-1, as reduções foram ainda mais acentuadas, chegando a 100% em algumas faixas, tais como a Faixa 02 dos Grupos 02 e 03. Pelas considerações da NBR 15961-1 essas faixas seriam classificadas como elementos esbeltos ( $\lambda > 12$ ), enquanto que pelas considerações da NBR 16868-1 não o seriam ( $\lambda < 16$ ), de forma que não seria necessário considerar os efeitos de segunda ordem localizados na verificação das faixas à flexo-compressão.

Considerando os resultados obtidos a partir da modelagem numérica, foi possível perceber reduções nos valores dos momentos de segunda ordem em praticamente todas as faixas, ao se comparar com os momentos obtidos a partir das prescrições da NBR 16868-1. Em média, os valores obtidos pela modelagem foram 84% inferiores. As únicas exceções ocorreram para a Faixa 04 do Grupo 01, e para as Faixas 02 e 04 dos Grupos 02 e 03. Pelas prescrições da norma, não seria necessário considerar os momentos de segunda ordem em razão do índice de esbeltez ser inferior a 16. Já os resultados da modelagem indicaram que os efeitos da não linearidade geométrica ainda são percebidos, mesmo que os valores para  $M_{2d}$  sejam pequenos e em alguns casos praticamente nulos. É importante destacar que essas faixas se localizam, em suas respectivas paredes de contraventamento, próximas às paredes transversais. Além disso, é muito importante mencionar que o efeito da continuidade entre as faixas está automaticamente incorporado no modelo computacional, o que pode não estar considerado na formulação adotada pela NBR 16868-1.

Tabela 18 – Valores e comparações entre os momentos de segunda ordem para o pavimento térreo.

Grupo	Faixa	Esbeltez		Momento $M_{2d}$ (kN.m) - Pavimento Térreo				Diferença (%)	
		NBR 15961-1	NBR 16868-1	NBR 15961-1	NBR 16868-1	Modelagem (Parede Completa)	Modelagem (Faixa Isolada)	NBR 16868-1 e NBR 15961-1	Modelagem (Parede Completa) e NBR 16868-1
01	F1	20	20	7,53	4,18	0,69	-	-44,49	-83,49
	F2	20	16,1	7,30	2,62	0,41	-	-64,11	-84,35
	F3	20	20	7,57	4,21	0,46	0,05	-44,39	-89,07
	F4	7,8	11,5	0,00	0,00	0,18	0,00	-	-
02	F1	20	20	8,01	4,45	0,60	-	-44,44	-86,52
	F2	20	13,7	6,97	0,00	0,02	-	-100,00	-
	F3	20	20	8,03	4,46	0,50	0,03	-44,46	-88,79
	F4	7,8	11,5	0,00	0,00	0,06	0,00	-	-
03	F1	20	20	9,64	5,36	0,89	-	-44,40	-83,40
	F2	20	13	8,70	0,00	0,16	-	-100,00	-
	F3	20	20	9,52	5,29	1,47	0,04	-44,43	-72,21
	F4	8,5	11,8	0,00	0,00	0,12	0,01	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para as faixas das paredes do 9º pavimento. Tal como ocorreu para os momentos das faixas para o pavimento térreo, observaram-se diferenças acentuadas entre os valores de momento de segunda ordem  $M_{2d}$  calculados a partir da NBR 15961-1 e a partir da NBR 16868-1. Para os casos nos quais o índice de esbeltez resultou no mesmo valor para as duas normas, a diminuição dos momentos foi igual a 44,5%, em média. Para os casos nos quais o índice de esbeltez calculado a partir da NBR 16868-1 resultou menor que aquele obtido a partir da NBR 15961-1, a redução foi mais acentuada. Evidentemente, as situações relacionadas ao índice de esbeltez das Faixas 02 e 04 dos Grupos 02 e 03 identificadas no térreo, se repetem no 9º pavimento.

Também ficou evidenciada redução acentuada na intensidade dos momentos de segunda ordem obtidos a partir da modelagem da parede completa, em comparação aos valores de norma, com redução média de aproximadamente 92,40%. As únicas exceções ocorrem para a Faixa 04 do grupo 01, e para as Faixas 02 e 04 dos Grupos 02 e 03. Para essas faixas, pelas considerações da norma, não seria necessário considerar os momentos de segunda ordem em razão do índice de esbeltez delas serem inferiores a 16. Entretanto, os resultados da

modelagem indicaram valores de momentos de segunda ordem próximos de zero, podendo-se concluir que esses resultados foram consonantes.

Com relação aos valores obtidos para a modelagem isolada das faixas, as diferenças com relação aos valores obtidos a partir da NBR 16868-1 apresentaram maior variação. Em alguns casos, como para as Faixas 01 e 02 do Grupo 01, a modelagem apresentou valores muito próximos daqueles obtidos pela norma, com diferença média igual a 4,5%. Já para a Faixa 01 do Grupo 02, a modelagem apresentou valores menores, mas ainda próximos daqueles obtidos a partir NBR 16868-1, com diferença igual a 19,19%. Para a Faixa 04 de todos os grupos de paredes, os resultados da modelagem se mostraram muito próximos aos de norma, com valores praticamente nulos. Ressalta-se que essas faixas se localizam próximas às paredes transversais de suas respectivas paredes de contraventamento. Por fim, as diferenças mais significativas foram encontradas para a Faixa 03 dos Grupos 01 e 03, e para a Faixa 01 do Grupo 03. Os resultados obtidos pela modelagem indicaram acréscimos da ordem de 99,00%, e 79,82% em média.

Tabela 19 - Valores e comparações entre os momentos de segunda ordem para o 9º pavimento.

parede	Faixa	Esbeltez		Momento $M_{2d}$ (kN.m) - 9º Pavimento				Diferença (%)		
		NBR 15961-1	NBR 16868-1	NBR 15961-1	NBR 16868-1	Modelagem (Parede Completa)	Modelagem (Faixa Isolada)	NBR 16868-1 e NBR 15961-1	Modelagem (Parede Completa) e NBR 16868-1	Modelagem (Faixa Isolada) e NBR 16868-1
GRUPO 01	F1	20	20	1,75	0,97	0,08	0,98	-44,57	-91,96	1,03
	F2	20	16,1	1,73	0,62	0,03	0,67	-64,16	-94,68	8,06
	F3	20	20	1,68	0,93	0,05	0,01	-44,64	-94,41	-98,92
	F4	7,8	11,5	0,00	0,00	0,02	0,08	-	-	-
GRUPO 02	F1	20	20	1,78	0,99	0,06	0,80	-44,38	-93,94	-19,19
	F2	20	13,7	1,70	0,00	0,01	0,66	-100,00	-	-
	F3	20	20	1,73	0,96	0,05	0,00	-44,51	-94,79	-
	F4	7,8	11,5	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
GRUPO 03	F1	20	20	2,06	1,14	0,10	2,05	-44,66	-91,23	79,82
	F2	20	13	1,82	0,00	0,03	0,34	-100,00	-	-
	F3	20	20	1,91	1,06	0,15	0,01	-44,50	-85,85	-99,06
	F4	8,5	11,8	0,00	0,00	0,02	0,00	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

#### 4.4. Comentários

Neste capítulo foram apresentadas as considerações e metodologias utilizadas na modelagem numérica das paredes de contraventamento do edifício em estudo. Foram verificados os deslocamentos transversais para cada uma das paredes modeladas de forma integral, bem como para cada uma de suas faixas modeladas isoladamente. Também foi verificada a extensão das paredes que é mobilizada quando da aplicação do carregamento de forma isolada em cada uma das faixas para duas paredes do pavimento térreo. Por fim, foram comparados os valores de momentos de segunda ordem obtidos a partir da modelagem numérica e das formulações e considerações prescritas pelas normas brasileiras. Em decorrência das análises realizadas, foi possível concluir que:

- De maneira geral, o comportamento das paredes com relação aos deslocamentos transversais aos seus planos ocorreu de maneira similar. Os deslocamentos tendem a aumentar à medida que a distância aos travamentos laterais aumenta, de forma que as faixas situadas nas proximidades desses travamentos apresentam deslocamentos muito pequenos. Esse comportamento também pôde ser observado na modelagem da parede completa com aplicação dos carregamentos de forma isolada em cada faixa. Além disso, os resultados mostraram que pequenos trechos de paredes transversais, mesmo aqueles que não são classificados como travamentos laterais pelas considerações da norma brasileira, são capazes de conferir um aumento de rigidez às faixas das paredes situadas em suas proximidades;

- A modelagem por faixas isoladas não se mostrou adequada para paredes com maiores intensidades de carregamentos, tais como aquelas do pavimento térreo. Isso pode ser explicado pelo comportamento que o software de análise estrutural admite para os elementos esbeltos, nos quais as formulações, em sua maioria, possuem a limitação de serem aplicadas em casos de baixa intensidade de carregamentos verticais. Já para as paredes do 9º pavimento a modelagem se mostrou adequada, apresentando resultados coerentes e, na maioria dos casos, muito próximos aos obtidos pela norma brasileira;

- Com relação aos momentos de segunda ordem, os resultados obtidos pela modelagem numérica mostraram-se, em sua grande maioria, inferiores àqueles obtidos pelas normas. Os momentos obtidos pela NBR 16868-1, ainda que inferiores aos obtidos pela NBR 15961-1, são superiores aos obtidos pela modelagem. Destaca-se, porém, que para uma análise mais detalhada seria necessário incluir nos modelos numéricos os efeitos da não

linearidade física dos materiais, para assim representar o comportamento das estruturas de forma mais fidedigna.

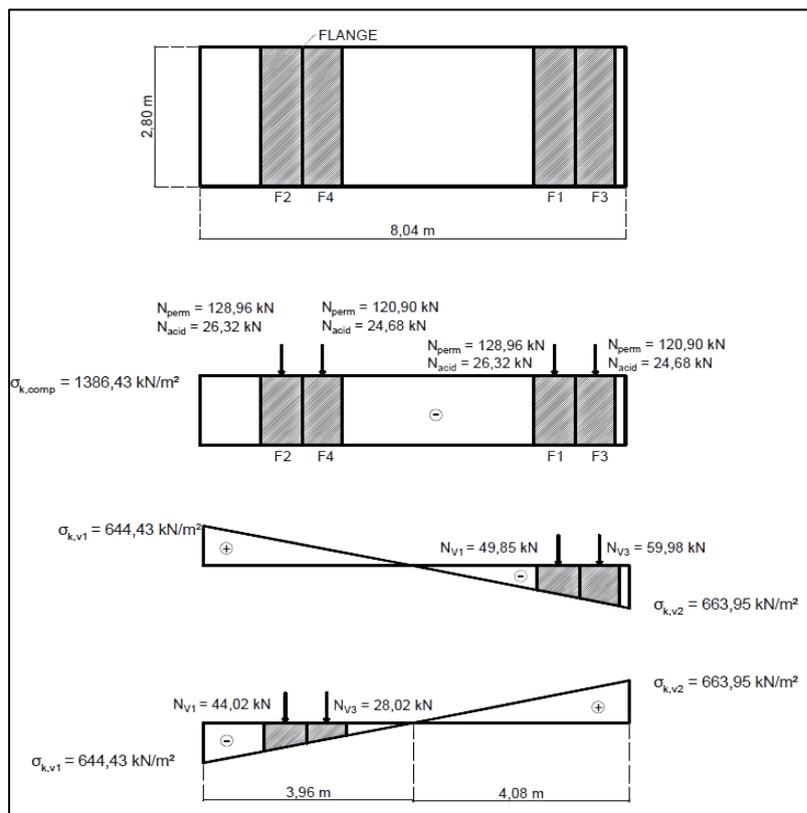
## 5. EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo estão apresentados exemplos de dimensionamento conforme as prescrições das normas brasileiras NBR 15961-1 e NBR 16868-1 e do Eurocode 6 – PD 6697:2019. O dimensionamento foi realizado considerando a divisão das paredes por faixas. Serão apresentados os procedimentos de cálculo para a Faixa 01 da parede do Grupo 01 no pavimento térreo, visto que os cálculos para as demais faixas são semelhantes.

### 5.1. Diagramas de tensões normais

A Figura 61 ilustra os diagramas de tensões normais para a parede do Grupo 01 no pavimento térreo, incluindo a normal resultante em cada faixa da parede.

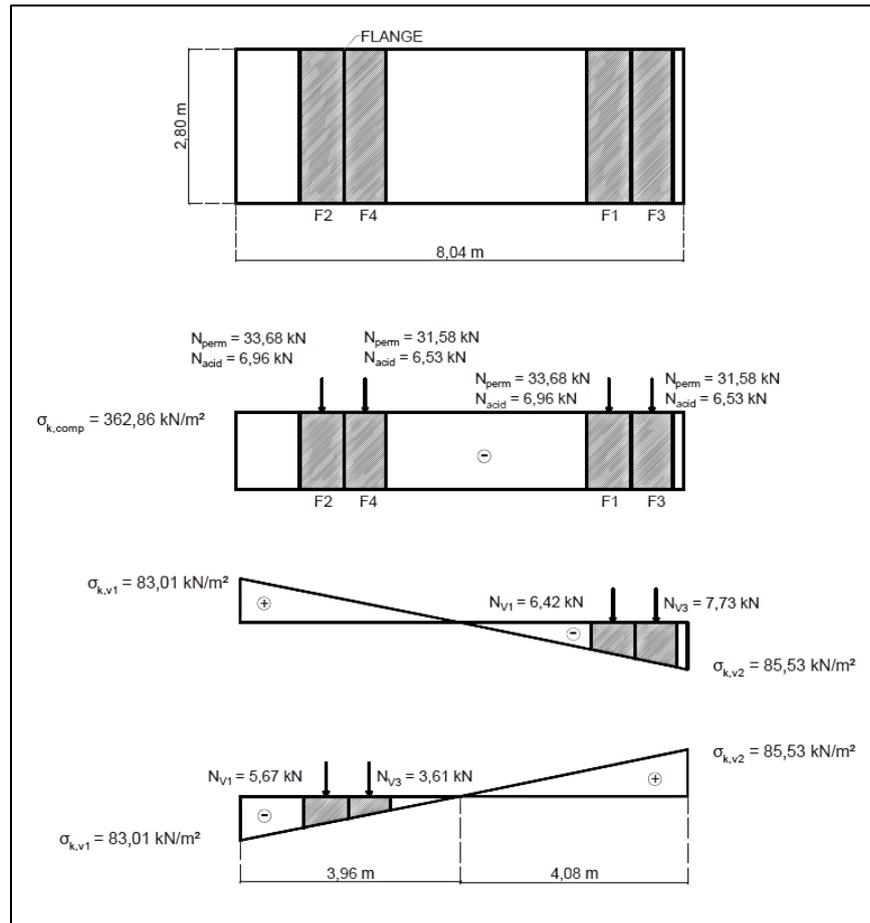
Figura 61 - Diagramas de tensões normais para a parede do Grupo 01 no pavimento térreo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Figura 62 ilustra os diagramas de tensões normais para a parede do Grupo 01 no 9º pavimento.

Figura 62 - Diagramas de tensões normais para a parede do Grupo 01 no 9º pavimento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As forças normais resultantes foram obtidas pela integração das funções de tensão para cada faixa. Neste procedimento foram desconsiderados os momentos residuais devido à variação das tensões associadas ao vento em cada uma das faixas, o que resultaria em uma flexão composta oblíqua, admitindo-se que as forças resultantes da ação do vento estariam aplicadas no mesmo local das forças resultantes das ações permanentes.

## 5.2. Dimensionamento de acordo com as prescrições da NBR 15961-1

A NBR 15961-1 não prescreve o dimensionamento de paredes submetidas a flexo-compressão através da divisão em faixas, entretanto, conforme realizado por Araújo (2016), aqui será apresentado o roteiro de cálculo para o dimensionamento à compressão simples e à flexo-compressão das faixas isoladas adaptando a metodologia da NBR 6118:2014 para verificação dos efeitos localizados de segunda ordem em pilares-parede, especificamente na

determinação do comprimento efetivo das faixas. Os cálculos relativos às faixas isoladas serão realizados considerando a área bruta e a área líquida da seção, neste último caso para posteriores comparações com as demais normas.

a) Cálculos relativos à área bruta da seção

– Tensões normais devidas às cargas verticais

$$\sigma_{perm} = \frac{(194,1-32,9)kN/m}{0,14 m} = 1151,43 kN/m^2 \quad (\text{Equação 33})$$

$$\sigma_{acid} = \frac{32,9 kN/m}{0,14 m} = 235,00 kn/m^2 \quad (\text{Equação 34})$$

– Tensões normais devidas à flexão

$$\sigma_{v1} = \frac{1148,9 kN.m \times 3,96 m}{7,06 m^4} = 644,43 kN/m^2 \quad (\text{Equação 35})$$

$$\sigma_{v2} = \frac{1148,9 kN.m \times 4,08 m}{7,06 m^4} = 663,95 kN/m^2 \quad (\text{Equação 36})$$

– Espessura equivalente

Conforme mencionado anteriormente, será utilizado o conceito de raio de giração para obtenção da espessura equivalente.

$$r = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \rightarrow r = \sqrt{\frac{18293,33 cm^4}{1120,00 cm^2}} = 4,04 cm \quad (\text{Equação 37})$$

$$D_{eq} = 3,46 \times r \rightarrow D_{eq} = 3,46 \times 4,04 \cong 14,0 cm \quad (\text{Equação 38})$$

O valor obtido para a espessura equivalente é coerente, uma vez que estão sendo utilizadas as propriedades geométricas da área bruta da seção.

– Altura efetiva

Como não existem travamentos laterais, a altura efetiva da Faixa 01 será a própria altura do pavimento, considerada do piso ao teto.

$$h_e = 280,00 \text{ cm} \quad (\text{Equação 39})$$

– Índice de esbeltez

$$\lambda = \frac{l_{eq}}{D_{eq}} = \frac{280,00 \text{ cm}}{14,00 \text{ cm}} = 20,00 \quad (\text{Equação 40})$$

– Coeficiente redutor devido a esbeltez

$$R = 1 - \left(\frac{\lambda}{40}\right)^3 \rightarrow R = 1 - \left(\frac{20,00}{40}\right)^3 = 0,875 \quad (\text{Equação 41})$$

– Momento de segunda ordem ( $M_{2d}$ )

Para a Faixa 01 do pavimento térreo foi identificado que a combinação que resultou nos esforços mais desfavoráveis foi aquela na qual a ação do vento foi considerada como variável principal.

$$M_{2d} = \frac{N_d \times l^2}{2000 \times t} \rightarrow M_{2d} = \frac{268,76 \times 2,80^2}{2000 \times 0,14} = 7,53 \text{ kN.m} \quad (\text{Equação 42})$$

– Resistência requerida à flexo-compressão considerando os efeitos de segunda ordem

$$\frac{N_d}{A \times R} + \frac{N_{vento}}{A \times R} + \frac{M_{2d}}{W \times K} \leq \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Equação 43})$$

$$\frac{268,76 \text{ kN}}{0,1120 \text{ m}^2 \times 0,875} + \frac{7,53 \text{ kN.m}}{0,0026133 \text{ m}^3 \times 1,5} \leq \frac{f_k}{2,0}$$

$$f_{k,req} = 9324,33 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 9,32 \text{ MPa}$$

– Resistência requerida à flexo-compressão sem considerar os efeitos de segunda ordem

Para a parede de contraventamento, preliminarmente foram verificadas as combinações de ações, tendo sido identificado que a combinação na qual o vento foi considerado como ação variável principal resultou em maiores valores. Dessa forma, tem-se:

$$\frac{\gamma_g \times F_{G,k} + \gamma_q \times \psi_{0j} \times F_{Q2,k}}{R} + \frac{\gamma_q \times F_{Q1,k}}{1,5} \leq \frac{f_k}{2,0} \quad (\text{Equação 44})$$

$$\frac{1,4 \times 1151,53 + 1,4 \times 0,5 \times 235,00}{0,875} + \frac{1,4 \times 663,95}{1,5} \leq \frac{f_k}{2,0}$$

$$f_{k,req} = 5302,02 \frac{kN}{m^2} = 5,30 MPa$$

A resistência característica à compressão da alvenaria com a consideração dos efeitos de segunda ordem resultou em um valor 69,25% maior que aquele obtido sem a consideração dos efeitos de segunda ordem. O dimensionamento considerando as propriedades da área líquida da seção da parede seguiu a mesma rotina de cálculo.

b) Cálculos relativos à área líquida da seção

- Espessura equivalente

$$r = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \rightarrow r = \sqrt{\frac{14466,08 \text{ cm}^4}{553,00 \text{ cm}^2}} = 5,11 \text{ cm} \quad (\text{Equação 45})$$

$$D_{eq} = 3,46 \times r \rightarrow D_{eq} = 3,46 \times 5,11 \cong 17,70 \text{ cm} \quad (\text{Equação 46})$$

O valor obtido corresponde à espessura equivalente da seção maciça que resultaria no mesmo índice de esbeltez da seção vazada.

- Altura efetiva

$$h_e = 280,00 \text{ cm} \quad (\text{Equação 47})$$

- Índice de esbeltez

$$\lambda = \frac{l_{eq}}{D_{eq}} = \frac{280,00 \text{ cm}}{17,70 \text{ cm}} = 15,80 \quad (\text{Equação 48})$$

- Coeficiente redutor devido à esbeltez

$$R = 1 - \left(\frac{\lambda}{40}\right)^3 \rightarrow R = 1 - \left(\frac{15,80}{40}\right)^3 = 0,938 \quad (\text{Equação 49})$$

- Momento de segunda ordem ( $M_{2d}$ )

$$M_{2d} = \frac{N_d \times l^2}{2000 \times t} \rightarrow M_{2d} = \frac{268,76 \times 2,80^2}{2000 \times 0,14} = 7,53 \text{ kN.m} \quad (\text{Equação 50})$$

– Resistência requerida à compressão considerando os efeitos de segunda ordem

$$\frac{N_d}{A \times R} + \frac{N_{vento}}{A \times R} + \frac{M_{2d}}{W \times K} \leq \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Equação 51})$$

$$\frac{268,76 \text{ kN}}{0,0553 \text{ m}^2 \times 0,938} + \frac{7,53 \text{ kN.m}}{0,0020666 \text{ m}^3 \times 1,5} \leq \frac{f_k}{2,0}$$

$$f_{k,req} = 15217,73 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 15,22 \text{ MPa}$$

– Especificação das resistências de prisma

As resistências características de prisma foram obtidas através da consideração de fatores de eficiência parede/prisma para alvenaria de blocos de concreto. Os fatores foram os mesmos utilizados por Araújo (2016) e encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Fatores de eficiência para especificação das resistências de prisma e bloco

Fatores de eficiência para especificações de prisma e bloco			
Parede/Prisma	Prisma/Bloco		
	$f_{pk} \leq 12,00 \text{ MPa}$	$12,00 \text{ MPa} < f_{pk} \leq 16,00 \text{ MPa}$	$16,00 \text{ MPa} < f_{pk} \leq 22,00 \text{ MPa}$
0,7	0,75	0,65	0,55

Fonte: Adaptado de Araújo (2016)

O dimensionamento realizado para a Faixa 01 na parede do 9º pavimento seguiu a mesma rotina de cálculo.

Para fins de comparação, o dimensionamento realizado considerando a área líquida da seção foi transformado para o correspondente valor na área bruta a partir da correlação entre área líquida e área bruta. A Tabela 21 apresenta os resultados para os dimensionamentos das faixas de acordo com cada uma das metodologias adotadas.

Tabela 21 - Resistências características à compressão para as faixas das paredes no pavimento térreo e 9º pavimento (NBR 15961-1).

Parede	Faixa	$f_{k, \text{requerido}}$ (MPa) - Térreo			$f_{k, \text{requerido}}$ (MPa) - 9º Pav.		
		$A_{\text{bruta}}$ (Cálculo de norma)	$A_{\text{líquida}}$	$A_{\text{bruta}}$ (Correlação entre áreas)	$A_{\text{bruta}}$	$A_{\text{líquida}}$	$A_{\text{bruta}}$ (Correlação entre áreas)
GRUPO 01	F1	9,32	15,22	7,51	2,16	3,53	1,74
	F2	9,04	14,76	7,29	2,14	3,49	1,72
	F3	10,01	14,18	8,59	2,21	3,14	1,90
	F4	4,37	7,18	4,74	1,08	1,78	1,08
GRUPO 02	F1	9,92	16,19	7,99	2,21	3,61	1,78
	F2	8,62	14,08	6,95	2,11	3,44	1,70
	F3	10,60	15,01	9,09	2,28	3,23	1,96
	F4	4,26	7,01	4,25	1,07	1,76	1,07
GRUPO 03	F1	11,93	19,48	9,62	2,55	4,16	2,05
	F2	12,31	14,92	11,29	2,57	3,12	2,36
	F3	13,46	16,32	12,35	2,70	3,27	2,47
	F4	5,64	8,87	5,63	1,28	2,02	1,28

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 22 e a Tabela 23 apresentam os resultados das resistências à compressão requeridas para alvenaria e prisma para as faixas do pavimento térreo e do 9º pavimento, respectivamente, com e sem consideração dos efeitos de segunda ordem. Os resultados indicam um acréscimo significativo nas resistências requeridas com a consideração dos efeitos de segunda ordem. As exceções estão restritas à Faixa 04 de todos os grupos, nas quais houve uma redução. Essas faixas estão localizadas próximas às paredes transversais das paredes de contraventamento, e de acordo com a metodologia aplicada não são consideradas esbeltas. O fato dessas faixas apresentarem resistências requeridas à compressão inferiores àquelas obtidas para a parede sem consideração dos efeitos de segunda ordem justifica-se porque as tensões de compressão resultantes nessas faixas isoladas são inferiores às máximas tensões de compressão nas extremidades de suas respectivas paredes quando dimensionadas integralmente. Os acréscimos mais significativos ocorreram para as Faixas 03 dos grupos, destacando-se o acréscimo de 97,94% para a resistência característica do Grupo 03 no pavimento térreo. É possível ainda perceber que, para o caso no qual o dimensionamento foi realizado com as propriedades de área líquida das seções, as diferenças entre os resultados com e sem a consideração dos efeitos de segunda ordem foram, em grande parte, menores quando comparadas às diferenças entre os resultados do dimensionamento realizado com as propriedades de área bruta.

Tabela 22 - Resistências requeridas para alvenaria, prisma e bloco para as faixas dos grupos de paredes no pavimento térreo (NBR 15961-1).

Parede	Faixa	$f_k$ , requerido (MPa) Abruta		$f_{pk}$ (MPa) Abruta		Aumento de $f_k$ e $f_{pk}$ requerido (%)	$f_k$ , requerido (MPa) Alíquida		$f_{pk}$ (MPa) Alíquida		Aumento de $f_k$ e $f_{pk}$ requerido (%)
		Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem		Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	
		GRUPO 01	F1 F2 F3 F4	5,30	9,32 9,04 10,01 4,37		7,57	13,31 12,91 14,30 6,24	75,85 70,57 88,87 -17,55	9,56	
GRUPO 02	F1 F2 F3 F4	5,48	9,92 8,62 10,60 4,26	7,83	14,17 12,31 15,14 6,09	81,02 57,30 93,43 -22,26	9,69	16,19 14,08 15,01 7,01	13,84	23,13 20,11 21,44 10,01	67,08 45,30 54,90 -27,66
GRUPO 03	F1 F2 F3 F4	6,80	11,93 12,31 13,46 5,64	9,71	17,04 17,59 19,23 8,06	75,44 81,03 97,94 -17,06	11,36	19,48 14,92 16,32 8,87	16,23	27,83 21,31 23,31 12,67	71,48 31,34 43,66 -21,92

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela 23 - Resistências requeridas para alvenaria, prisma e bloco para as faixas dos grupos de paredes no 9º pavimento (NBR 15961-1).

Parede	Faixa	$f_k$ , requerido (MPa) Abruta		$f_{pk}$ (MPa) Abruta		Diferença	$f_k$ , requerido (MPa) Alíquida		$f_{pk}$ (MPa) Alíquida		Diferença
		Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Aumento de $f_k$ e $f_{pk}$ requerido (%)	Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Aumento de $f_k$ e $f_{pk}$ requerido (%)
		GRUPO 01	F1 F2 F3 F4	1,22	2,16 2,14 2,21 1,08	1,74	3,09 3,06 3,16 1,54	77,05 75,41 81,15 -11,48	2,19	3,53 3,49 3,14 1,78	3,13
GRUPO 02	F1 F2 F3 F4	1,24	2,21 2,11 2,28 1,07	1,77	3,16 3,01 3,26 1,53	78,23 70,16 83,87 -13,71	2,19	3,61 3,44 3,23 1,76	3,13	5,16 4,91 4,61 2,51	64,84 57,08 47,49 -19,63
GRUPO 03	F1 F2 F3 F4	1,46	2,55 2,57 2,70 1,28	2,09	3,64 3,67 3,86 1,83	74,66 76,03 84,93 -12,33	2,44	4,16 3,12 3,27 2,02	3,49	5,94 4,46 4,67 2,89	70,49 27,87 34,02 -17,21

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 24 apresenta, para o pavimento térreo e para o 9º pavimento, as comparações entre as resistências requeridas à compressão de alvenaria e prisma relativas à área bruta, considerando as duas metodologias apresentadas anteriormente. Os resultados indicam uma diferença significativa entre os valores quando estes são calculados diretamente na área bruta, considerando os procedimentos prescritos na NBR 15961-1, e obtidos por meio da correlação entre as áreas bruta e líquida da seção. De maneira geral, as resistências requeridas calculadas diretamente na área bruta resultaram em valores superiores àqueles obtidos pela correlação entre áreas, com exceção da Faixa 04 do Grupo 01 para o pavimento térreo, e a Faixa 04 do Grupo 04 para o 9º pavimento, nas quais essa tendência de comportamento foi inversa. As diferenças obtidas entre os resultados indicam que o uso da correlação entre áreas não é adequado para o dimensionamento de elementos esbeltos submetidos à flexo-compressão, uma vez que pode resultar em resistências requeridas consideravelmente diferentes daquelas que realmente seriam necessárias.

Tabela 24 – Comparação entre as resistências requeridas à compressão, relativas à área bruta da seção, para o pavimento térreo (NBR 15961-1).

Parede	Faixa	Pavimento Térreo					9º Pavimento				
		$f_k$ , requerido (MPa) - $A_{bruta}$		$f_{pk}$ (MPa) - $A_{bruta}$		Diferença (%)	$f_k$ , requerido (MPa) - $A_{bruta}$		$f_{pk}$ (MPa) - $A_{bruta}$		Diferença (%)
		Cálculo da norma	Correlação entre áreas	Cálculo da norma	Correlação entre áreas		Cálculo da norma	Correlação entre áreas	Cálculo da norma	Correlação entre áreas	
GRUPO 01	F1	9,32	7,51	13,31	10,74	24,02	2,16	1,74	3,09	2,49	23,93
	F2	9,04	7,29	12,91	10,41	24,04	2,14	1,72	3,06	2,46	24,19
	F3	10,01	8,59	14,30	12,27	16,54	2,21	1,90	3,16	2,72	16,20
	F4	4,37	4,74	6,24	6,78	-7,86	1,08	1,08	1,54	1,54	0,17
GRUPO 02	F1	9,92	7,99	14,17	11,42	24,10	2,21	1,78	3,16	2,55	23,99
	F2	8,62	6,95	12,31	9,93	23,99	2,11	1,70	3,01	2,43	24,23
	F3	10,60	9,09	15,14	12,99	16,59	2,28	1,96	3,26	2,79	16,54
	F4	4,26	4,25	6,09	6,07	0,33	1,07	1,07	1,53	1,52	0,37
GRUPO 03	F1	11,93	9,62	17,04	13,74	24,04	2,55	2,05	3,64	2,93	24,15
	F2	12,31	11,29	17,59	16,13	9,04	2,57	2,36	3,67	3,37	8,87
	F3	13,46	12,35	19,23	17,64	9,00	2,70	2,47	3,86	3,53	9,13
	F4	5,64	5,63	8,06	8,04	0,23	1,28	1,28	1,83	1,83	-0,11

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### 5.3. Dimensionamento de acordo com as prescrições da NBR 16868-1

A NBR 16868-1 traz algumas mudanças com relação aos procedimentos de cálculo para o dimensionamento das paredes de alvenaria à flexo-compressão, especificamente nas considerações para determinação da altura efetiva, adequação da formulação para o cálculo do momento de segunda ordem  $M_{2d}$  para elementos esbeltos e a inclusão de uma metodologia para análise das paredes por faixas. Tal como foi feito para o dimensionamento a partir da NBR 15961-1, os cálculos relativos às faixas isoladas serão realizados considerando a área bruta e a área líquida da seção, neste último caso para posteriores comparações com as demais normas.

a) Cálculos relativos à área bruta da seção

– Tensões normais devidas às cargas verticais e à flexão

Os valores de tensões normais devidas às cargas verticais e à flexão são os mesmos já calculados no item 5.2, através das Equações 33 a 36.

– Largura da faixa

De acordo com a NBR 16868-1, a largura da faixa ( $a_i$ ) deve ser igual a 5 vezes a espessura da parede, limitada a 100 cm. Para as paredes em análise, essa largura seria:

$$a_i = 5 t \leq 100 \text{ cm} \rightarrow a_i = 5 \times 14,00 = 70,00 \text{ cm} \quad (\text{Equação 52})$$

A largura da faixa em estudo foi considerada como 80,00 cm, para que fosse possível adequar tal dimensão com as dimensões do modelo numérico. Apesar dessa largura ser superior a 5 vezes a espessura da parede na qual a faixa está localizada, ainda é inferior ao limite de norma.

– Espessura equivalente

$$r = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \rightarrow r = \sqrt{\frac{18293,33 \text{ cm}^4}{1120,00 \text{ cm}^2}} = 4,04 \text{ cm} \quad (\text{Equação 53})$$

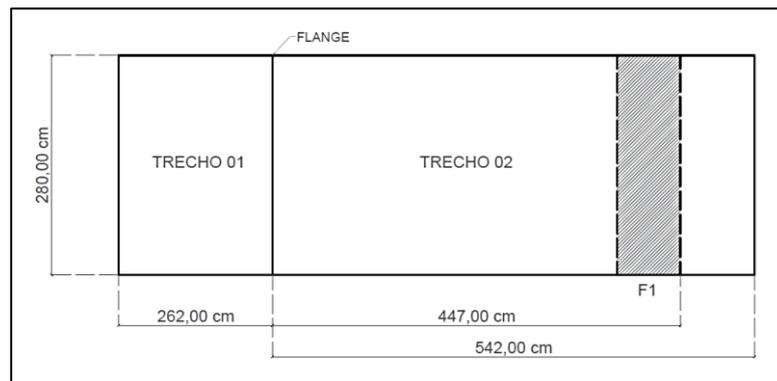
$$D_{eq} = 3,46 \times r \rightarrow D_{eq} = 3,46 \times 4,04 \cong 14,0 \text{ cm} \quad (\text{Equação 54})$$

O valor obtido para a espessura equivalente é coerente, uma vez que estão sendo utilizadas as propriedades geométricas da área bruta da seção.

- Altura efetiva

Para a análise por faixas é preciso analisar duas situações, relativas à determinação da sua altura efetiva, escolhendo o menor valor calculado a partir delas. Para isso, deve-se levar em consideração as larguras dos trechos ilustradas na Figura 63.

Figura 63 - Dimensões dos trechos da parede do Grupo 01 para cálculo da altura efetiva das faixas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

I. Considerando a altura calculada com as características do trecho inteiro

$$h_e \leq \left\{ 0,7 \frac{\alpha_v h}{\sqrt{\alpha_v h \alpha_h l}} \rightarrow h_e \leq \left\{ 0,7 \sqrt{\frac{1,0 \times 280 \text{ cm}}{1,0 \times 280 \times 2,5 \times 542,00}} \right. \right. \quad \text{Equação (55)}$$

$$h_e \leq \begin{cases} 280,00 \text{ cm} \\ 431,17 \text{ cm} \end{cases}$$

II. Considerando o lado interno livre e o outro lado conforme parede inteira

$$h_e \leq \left\{ 0,7 \sqrt{\frac{1,0 \times 280 \text{ cm}}{1,0 \times 280 \times 2,5 \times 447,00}} \rightarrow h_e \leq \begin{cases} 280 \text{ cm} \\ 391,56 \text{ cm} \end{cases} \quad \text{(Equação 56)}$$

Dessa forma, a menor altura efetiva resultante foi  $h_e = 280,00 \text{ cm}$

- Índice de esbeltez

$$\lambda = \frac{l_{eq}}{D_{eq}} = \frac{280,00 \text{ cm}}{14,00 \text{ cm}} = 20,00 \quad \text{(Equação 57)}$$

- Coeficiente redutor devido à esbeltez

$$R = 1 - \left(\frac{\lambda}{40}\right)^3 \rightarrow R = 1 - \left(\frac{20,00}{40}\right)^3 = 0,875 \quad (\text{Equação 58})$$

- Momento de segunda ordem ( $M_{2d}$ )

$$M_{2d} = \frac{N_d \times l^2}{3600 \times t} \rightarrow M_{2d} = \frac{268,76 \times 2,80^2}{3600 \times 0,14} = 4,18 \text{ kN.m} \quad (\text{Equação 59})$$

- Resistência requerida à flexo-compressão considerando os efeitos de segunda ordem

$$\frac{N_d}{A \times R} + \frac{N_{vento}}{A \times R} + \frac{M_{2d}}{W \times K \times R} \leq \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Equação 60})$$

$$\frac{268,76 \text{ kN}}{0,1120 \text{ m}^2 \times 0,875} + \frac{4,18 \text{ kN.m}}{0,0026133 \text{ m}^3 \times 1,5 \times 0,875} \leq \frac{f_k}{2,0}$$

$$f_{k,req} = 7922,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 7,92 \text{ MPa}$$

- Resistência requerida à flexo-compressão sem considerar os efeitos de segunda ordem

Para o cálculo da resistência requerida à flexo-compressão para a parede de contraventamento, de acordo com as prescrições da NBR 16868-1, seria necessário realizar a verificação para cada um dos dois trechos da parede em análise. Em ambos os casos a combinação que resultou nos maiores valores foi aquela na qual a ação do vento foi considerada como ação variável principal.

Para cada trecho foi necessário calcular sua altura efetiva. Para isso, utilizou-se da mesma formulação apresentada na Equação 55 e das dimensões de cada trecho apresentadas na Figura 63. Para os dois trechos, a altura efetiva resultou em  $h_e = 280,00 \text{ cm}$ .

Dessa forma, os valores para índice de esbeltez e coeficiente redutor devido à esbeltez para cada trecho foram os mesmos calculados nas Equações 57 e 58, respectivamente.

I. Cálculo para o trecho 01 da parede

$$\frac{\gamma_g \times F_{G,k} + \gamma_q \times \psi_{0j} \times F_{Q2,k}}{R} + \frac{\gamma_q \times F_{Q1,k}}{1,5} \leq \frac{f_k}{2,0} \quad (\text{Equação 61})$$

$$\frac{1,4 \times 1151,53 + 1,4 \times 0,5 \times 235,00}{0,875} + \frac{1,4 \times 644,43}{1,5} \leq \frac{f_k}{2,0}$$

$$f_{k,req} = 5263,83 \frac{kN}{m^2} = 5,26 MPa$$

II. Cálculo para o trecho 02 da parede

$$\frac{\gamma_g \times F_{G,k} + \gamma_q \times \psi_{0j} \times F_{Q2,k}}{R} + \frac{\gamma_q \times F_{Q1,k}}{1,5} \leq \frac{f_k}{2,0} \quad (\text{Equação 62})$$

$$\frac{1,4 \times 1151,53 + 1,4 \times 0,5 \times 235,00}{0,875} + \frac{1,4 \times 663,95}{1,5} \leq \frac{f_k}{2,0}$$

$$f_{k,req} = 5302,02 \frac{kN}{m^2} = 5,30 MPa$$

O dimensionamento considerando as propriedades da área líquida da parede seguiu a mesma rotina de cálculo.

b) Cálculos relativos à área líquida da seção

- Espessura equivalente

$$r = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \rightarrow r = \sqrt{\frac{14466,08 \text{ cm}^4}{553,00 \text{ cm}^2}} = 5,11 \text{ cm} \quad (\text{Equação 63})$$

$$D_{eq} = 3,46 \times r \rightarrow D_{eq} = 3,46 \times 5,11 \cong 17,70 \text{ cm} \quad (\text{Equação 64})$$

- Altura efetiva

$$h_e = 280,00 \text{ cm} \quad (\text{Equação 65})$$

- Índice de esbeltez

$$\lambda = \frac{l_{eq}}{D_{eq}} = \frac{280,00 \text{ cm}}{17,70 \text{ cm}} = 15,80 \quad (\text{Equação 66})$$

Apesar do índice de esbeltez ser inferior a 16, será calculado o momento de segunda ordem para que possa ser feita uma comparação coerente entre os resultados de normas.

- Coeficiente redutor devido à esbeltez

$$R = 1 - \left(\frac{\lambda}{40}\right)^3 \rightarrow R = 1 - \left(\frac{15,80}{40}\right)^3 = 0,938 \quad (\text{Equação 67})$$

- Momento de segunda ordem ( $M_{2d}$ )

$$M_{2d} = \frac{N_d \times l^2}{3600 \times t} \rightarrow M_{2d} = \frac{268,76 \times 2,80^2}{3600 \times 0,14} = 4,18 \text{ kN.m} \quad (\text{Equação 68})$$

- Resistência requerida à compressão considerando os efeitos de segunda ordem

$$\frac{N_d}{A \times R} + \frac{N_{vento}}{A \times R} + \frac{M_{2d}}{W \times K \times R} \leq \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Equação 69})$$

$$\frac{268,76 \text{ kN}}{0,0553 \text{ m}^2 \times 0,938} + \frac{4,18 \text{ kN.m}}{0,0020666 \text{ m}^3 \times 1,5 \times 0,938} \leq \frac{f_k}{2,0}$$

$$f_{k,req} = 13237,67 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 13,24 \text{ MPa}$$

O dimensionamento realizado para a Faixa 01 na parede do 9º pavimento seguiu a mesma rotina de cálculo.

As resistências características de prisma foram obtidas através da consideração dos fatores de eficiência parede/prisma para alvenaria de blocos de concreto, cujos valores estão apresentados na Tabela 20.

Para fins de comparação, o dimensionamento realizado considerando a área líquida da seção foi transformado para o correspondente valor na área bruta a partir da correlação entre área líquida e área bruta. A Tabela 25 apresenta os resultados para os dimensionamentos das faixas de acordo com cada uma das metodologias adotadas.

Tabela 25 - Resistências características à compressão para as faixas das paredes no pavimento térreo e 9º pavimento (NBR 16868-1).

(continua)

Parede	Faixa	$f_{k, \text{requerido}}$ (MPa) - Térreo			$f_{k, \text{requerido}}$ (MPa) - 9º Pav.		
		A <sub>bruta</sub>	A <sub>líquida</sub>	A <sub>bruta</sub> (Correlação)	A <sub>bruta</sub>	A <sub>líquida</sub>	A <sub>bruta</sub> (Correlação)
GRUPO 01	F1	7,92	13,24	6,54	1,84	3,07	1,52
	F2	6,40	11,48	5,67	1,52	2,72	1,34
	F3	8,51	12,21	7,40	1,88	2,70	1,64
	F4	4,43	7,26	4,40	1,10	1,80	1,09

Tabela 25 - Resistências características à compressão para as faixas das paredes no pavimento térreo e 9º pavimento (NBR 16868-1).

(conclusão)

Parede	Faixa	$f_{k, \text{requerido}}$ (MPa) - Térreo			$f_{k, \text{requerido}}$ (MPa) - 9º Pav.		
		$A_{\text{bruta}}$	$A_{\text{liquida}}$	$A_{\text{bruta}}$ (Correlação)	$A_{\text{bruta}}$	$A_{\text{liquida}}$	$A_{\text{bruta}}$ (Correlação)
GRUPO 02	F1	8,43	14,08	6,95	1,88	3,14	1,55
	F2	4,62	9,17	4,53	1,13	2,24	1,11
	F3	9,00	12,93	7,83	1,94	2,78	1,68
	F4	4,32	7,08	4,29	1,08	1,77	1,07
GRUPO 03	F1	10,14	16,94	8,36	2,16	3,61	1,78
	F2	6,56	8,60	6,51	1,37	1,80	1,36
	F3	11,44	13,95	10,56	2,29	2,79	2,11
	F4	5,74	8,97	5,69	1,31	2,04	1,29

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 26 e a Tabela 27 apresentam os resultados das resistências requeridas para alvenaria e prisma relativas às faixas do pavimento térreo e do 9º pavimento, respectivamente, com e sem consideração dos efeitos de segunda ordem. Os resultados indicam a mesma tendência de comportamento já observada para os cálculos realizados a partir das prescrições da NBR 15961-1, com aumento significativo das resistências requeridas quando são levados em consideração os efeitos de segunda ordem. As exceções estão restritas à algumas faixas localizadas próximas às paredes transversais das paredes de contraventamento, tais como as Faixas 04 dos Grupos 01 e 03, e as Faixas 02 e 04 do Grupo 02 no pavimento térreo, que de acordo com a metodologia aplicada não seriam consideradas esbeltas. O fato dessas faixas apresentarem resistências requeridas à compressão inferiores àquelas obtidas para a parede sem consideração dos efeitos de segunda ordem justifica-se porque as tensões de compressão resultantes nessas faixas isoladas são inferiores às máximas tensões de compressão nas extremidades dos trechos de suas respectivas paredes dimensionados integralmente. Os acréscimos mais significativos ocorreram para as Faixas 03 dos grupos, destacando-se o acréscimo de 68,48% para a resistência característica do Grupo 03 no pavimento térreo.

É possível ainda perceber que, para o caso no qual o dimensionamento foi realizado com as propriedades de área líquida das seções, as diferenças entre os resultados com e sem a consideração dos efeitos de segunda ordem foram, em sua maioria, menores quando comparadas às diferenças entre os resultados do dimensionamento realizado com as propriedades de área bruta.

Tabela 26 - Resistências requeridas para alvenaria, prisma e bloco para as faixas dos grupos de paredes no pavimento térreo (NBR16868-1).

Parede	Faixa	Trecho	f <sub>k</sub> , requerido (MPa) Abruta		f <sub>pk</sub> (MPa) Abruta		Aumento de f <sub>k</sub> e f <sub>pk</sub> requerido (%)	f <sub>k</sub> , requerido (MPa) Alíquida		f <sub>pk</sub> (MPa) Alíquida		Aumento de f <sub>k</sub> e f <sub>pk</sub> requerido (%)
			Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem		Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	
GRUPO 01	F2	1	5,26	6,40	7,51	9,14	21,67	9,39	11,48	13,41	16,40	22,26
	F4		4,43	4,43	7,51	6,33	-15,78	7,26	7,26	13,41	10,37	-22,68
	F1	2	5,30	7,92	7,57	11,31	49,43	9,56	13,24	13,66	18,91	38,49
	F3		8,51	8,51	7,57	12,16	60,57	12,21	12,21	13,66	17,44	27,72
GRUPO 02	F1	1	5,47	8,43	7,81	12,04	54,11	9,69	14,08	13,84	20,11	45,30
	F3		9,00	9,00	7,81	12,86	64,53	12,93	12,93	13,84	18,47	33,44
	F2	2	4,78	4,62	6,83	6,60	-3,35	8,51	9,17	12,16	13,10	7,76
	F4		4,32	4,32	6,83	6,17	-9,62	7,08	7,08	12,16	10,11	-16,80
GRUPO 03	F2	1	5,96	6,56	8,51	9,37	10,07	10,18	8,60	14,54	12,29	-15,52
	F4		5,74	5,74	8,51	8,20	-3,69	8,97	8,97	14,54	12,81	-11,89
	F1	2	6,79	10,14	9,70	14,49	49,34	11,36	16,94	16,23	24,20	49,12
	F3		11,44	11,44	9,70	16,34	68,48	13,95	13,95	16,23	19,93	22,80

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela 27 - Resistências requeridas para alvenaria, prisma e bloco para as faixas dos grupos de paredes no 9º pavimento (NBR16868-1).

Parede	Faixa	Trecho	f <sub>k</sub> , requerido (MPa) Abruta		f <sub>pk</sub> (MPa) Abruta		Aumento de f <sub>k</sub> e f <sub>pk</sub> requerido (%)	f <sub>k</sub> , requerido (MPa) Alíquida		f <sub>pk</sub> (MPa) Alíquida		Aumento de f <sub>k</sub> e f <sub>pk</sub> requerido (%)
			Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem		Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	Sem considerar 2ª ordem	Considerando 2º ordem	
GRUPO 01	F2	1	1,22	1,52	1,74	2,17	24,59	2,16	2,72	3,09	3,89	25,93
	F4		1,10	1,10	1,74	1,57	-9,84	1,80	1,80	3,09	2,57	-16,67
	F1	2	1,22	1,84	1,74	2,63	50,82	2,19	3,07	3,13	4,39	40,18
	F3		1,88	1,88	1,74	2,69	54,10	2,70	2,70	3,13	3,86	23,29
GRUPO 02	F1	1	1,24	1,88	1,77	2,69	51,61	2,19	3,14	3,13	4,49	43,38
	F3		1,94	1,94	1,77	2,77	56,45	2,78	2,78	3,13	3,97	26,94
	F2	2	1,14	1,13	1,63	1,61	-0,88	2,07	2,24	2,96	3,20	8,21
	F4		1,08	1,08	1,63	1,54	-5,26	1,77	1,77	2,96	2,53	-14,49
GRUPO 03	F2	1	1,30	1,37	1,86	1,96	5,38	2,24	1,80	3,20	2,57	-19,64
	F4		1,31	1,31	1,86	1,87	0,77	2,04	2,04	3,20	2,91	-8,93
	F1	2	1,46	2,16	2,09	3,09	47,95	2,44	3,61	3,49	5,16	47,95
	F3		2,29	2,29	2,09	3,27	56,85	2,79	2,79	3,49	3,99	14,34

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 28 apresenta, para o pavimento térreo e para o 9º pavimento, as comparações entre as resistências requeridas à compressão de alvenaria e prisma relativas à área bruta, considerando as duas metodologias apresentadas anteriormente. Os resultados indicam uma diferença significativa entre os valores quando estes são calculados diretamente na área bruta, considerando os procedimentos prescritos na NBR 16868-1, e obtidos pela correlação entre as áreas bruta e líquida da seção. De maneira geral, as resistências requeridas calculadas diretamente na área bruta resultaram em valores superiores àqueles obtidos pela correlação entre áreas. As diferenças entre os resultados reforçam o que já foi observado naqueles obtidos a partir da NBR 15961-1.

Tabela 28 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão, relativas à área bruta da seção, para o pavimento térreo (NBR 16868-1).

Parede	Faixa	Pavimento Térreo					9º Pavimento				
		$f_k$ , requerido (MPa) - $A_{bruta}$		$f_{pk}$ (MPa) - $A_{bruta}$		Diferença (%)	$f_k$ , requerido (MPa) - $A_{bruta}$		$f_{pk}$ (MPa) - $A_{bruta}$		Diferença (%)
		Cálculo da norma	Correlação entre áreas	Cálculo da norma	Correlação entre áreas		Cálculo da norma	Correlação entre áreas	Cálculo da norma	Correlação entre áreas	
GRUPO 01	F1	7,92	6,54	11,31	9,34	21,10	1,84	1,52	2,63	2,17	21,20
	F2	6,40	5,67	9,14	8,10	12,87	1,52	1,34	2,17	1,91	13,61
	F3	8,51	7,40	12,16	10,57	15,00	1,88	1,64	2,69	2,34	14,96
	F4	4,43	4,40	6,33	6,29	0,68	1,10	1,09	1,57	1,56	0,64
GRUPO 02	F1	8,43	6,95	12,04	9,93	21,29	1,88	1,55	2,69	2,21	21,72
	F2	4,62	4,53	6,60	6,47	1,99	1,13	1,11	1,61	1,59	1,26
	F3	9,00	7,83	12,86	11,19	14,94	1,94	1,68	2,77	2,40	15,42
	F4	4,32	4,29	6,17	6,13	0,70	1,08	1,07	1,54	1,53	0,65
GRUPO 03	F1	10,14	8,36	14,49	11,94	21,29	2,16	1,78	3,09	2,54	21,65
	F2	6,56	6,51	9,37	9,30	0,77	1,37	1,36	1,96	1,94	1,03
	F3	11,44	10,56	16,34	15,09	8,33	2,29	2,11	3,27	3,01	8,64
	F4	5,74	5,69	8,20	8,13	0,88	1,31	1,29	1,87	1,84	1,63

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

#### 5.4. Dimensionamento de acordo com as prescrições do Eurocode 6 - PD 6697:2019

Como primeiro passo para a realização do dimensionamento das faixas pelas prescrições do Eurocode 6 - PD 6697:2019, foi necessário elaborar as tabelas com os valores

dos coeficientes redutores da capacidade de carga (*Capacity Reduction Factors*). Para cada uma das quatro seções que caracterizam as faixas em estudo foram construídas as tabelas com os valores de excentricidade de projeto, linha neutra e coeficientes redutores. Neste item serão apresentadas apenas as tabelas referentes à seção da Faixa 01 da parede do Grupo 01. As demais tabelas podem ser consultadas no Anexo A. Todos os cálculos foram realizados considerando as propriedades de área líquida das seções.

– Espessura equivalente

$$r = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \rightarrow r = \sqrt{\frac{14466,08 \text{ cm}^4}{553,00 \text{ cm}^2}} = 5,11 \text{ cm} \quad (\text{Equação 70})$$

$$D_{eq} = 3,46 \times r \rightarrow D_{eq} = 3,46 \times 5,11 \cong 17,70 \text{ cm} \quad (\text{Equação 71})$$

O valor obtido corresponde à espessura equivalente da seção maciça que resultaria no mesmo índice de esbeltez da seção vazada.

– Altura efetiva

A altura efetiva da Faixa 01 será igual a 0,75 vezes a altura do pavimento, considerada do piso ao teto, uma vez que os travamentos laterais compostos pelas lajes de concreto fornecem maior resistência ao movimento lateral.

$$l_{eq} = 0,75 \times 280,00 = 210,00 \text{ cm} \quad (\text{Equação 72})$$

– Índice de esbeltez

$$\lambda = \frac{l_{eq}}{D_{eq}} = \frac{210,00 \text{ cm}}{17,7 \text{ cm}} = 11,86 \cong 12,00 \quad (\text{Equação 73})$$

– Excentricidade de projeto

O cálculo da excentricidade de projeto é precedido pelo cálculo de outras duas excentricidades: a excentricidade de topo e a excentricidade acidental.

## a) Excentricidade de topo

Como a parede do Grupo 01 é uma parede interna ao pavimento, pode-se considerar que existe simetria entre os vãos das lajes que nela se apoiam, de forma que a excentricidade de topo pode ser considerada nula ( $e_x = 0$ ).

## b) Excentricidade acidental

$$e_a = D \times \left( \frac{1}{2400} \lambda^2 - 0,015 \right) \rightarrow e_a = 14,00 \times \left( \frac{1}{2400} 12,00^2 - 0,015 \right) = 0,63 \text{ cm} \quad \text{Equação (74)}$$

Dessa forma, a excentricidade de projeto é calculada como:

$$e_d = \begin{cases} e_x \\ e_t = 0,6 \times e_x + e_a \end{cases} \quad \text{(Equação 75)}$$

$$e_d = \begin{cases} 0 \\ e_t = 0,6 \times 0 + 0,63 = 0,63 \text{ cm} \end{cases}$$

Logo,  $e_a = 0,63 \text{ cm}$ .

A Tabela 29 apresenta os valores de excentricidade de projeto para as seções 01 a 04, em função do índice de esbeltez.

Tabela 29 - Excentricidades de projeto para as seções de acordo com o Eurocode 6 - PD 6697:2019.

$\lambda$	$e_a$ (cm)	$e_d$ (cm)					
		<b>0,05D</b>	<b>0,10D</b>	<b>0,15D</b>	<b>0,20D</b>	<b>0,25D</b>	<b>0,30D</b>
<b>0</b>	-0,21	0,70	1,40	2,10	2,80	3,50	4,20
<b>5</b>	-0,06	0,70	1,40	2,10	2,80	3,50	4,20
<b>6</b>	0,00	0,70	1,40	2,10	2,80	3,50	4,20
<b>8</b>	0,16	0,70	1,40	2,10	2,80	3,50	4,20
<b>10</b>	0,37	0,79	1,40	2,10	2,80	3,50	4,20
<b>12</b>	0,63	1,05	1,47	2,10	2,80	3,50	4,20
<b>14</b>	0,93	1,35	1,77	2,19	2,80	3,50	4,20
<b>15</b>	1,10	1,52	1,94	2,36	2,80	3,50	4,20
<b>16</b>	1,28	1,70	2,12	2,54	2,96	3,50	4,20
<b>18</b>	1,68	2,10	2,52	2,94	3,36	3,78	4,20
<b>20</b>	2,12	2,54	2,96	3,38	3,80	4,22	4,64
<b>22</b>	2,61	3,03	3,45	3,87	4,29	4,71	5,13
<b>4</b>	3,15	3,57	3,99	4,41	4,83	5,25	5,67
<b>25</b>	3,44	3,86	4,28	4,70	5,12	5,54	5,96
<b>26</b>	3,73	4,15	4,57	4,99	5,41	5,83	6,25
<b>27</b>	4,04	4,46	4,88	5,30	5,72	6,14	6,56

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Os valores em destaque correspondem àqueles a partir dos quais a excentricidade adicional torna-se suficientemente significativa para que o valor da equação  $e_t = 0,6 \times e_x + e_d$  seja superior ao valor de  $e_x$ .

A excentricidade de projeto deve ser escrita como uma porcentagem da espessura da parede, para que dessa forma seja possível obter o valor do coeficiente redutor da capacidade de carga  $\beta$  na Tabela 30.

$$\frac{e_d}{D} = \frac{0,63 \text{ cm}}{14,00 \text{ cm}} \rightarrow e_d \cong 0,045 \quad (\text{Equação 76})$$

- Capacity Reduction Factor ( $\beta$ )

Com os valores da excentricidade de projeto  $e_d$  e do índice de esbeltez  $\lambda$  é possível obter o valor de  $\beta$  na Tabela 30, através de interpolação linear. Para o caso específico, foi obtido um coeficiente  $\beta = 0,95$ .

Tabela 30 - Valores dos *Capacity Reduction Factors* para a seção 01.

$\lambda$	Capacity Reduction Factor ( $\beta$ )					
	0,05D	0,10D	0,15D	0,20D	0,25D	0,30D
0	1,00	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
5	1,00	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
6	1,00	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
8	1,00	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
10	0,98	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
12	0,95	0,89	0,82	0,75	0,68	0,61
14	0,91	0,86	0,81	0,75	0,68	0,61
15	0,89	0,84	0,79	0,75	0,68	0,61
16	0,86	0,82	0,77	0,73	0,68	0,61
18	0,82	0,77	0,73	0,69	0,65	0,61
20	0,77	0,73	0,69	0,65	0,61	0,57
22	0,72	0,68	0,64	0,60	0,56	0,51
24	0,67	0,63	0,59	0,54	0,49	0,42
25	0,65	0,60	0,56	0,51	0,45	0,33
26	0,62	0,57	0,52	0,47	0,37	0,24
27	0,59	0,54	0,48	0,41	0,27	0,14

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

- Resistência requerida à compressão

$$N_{sd} \leq N_d = \frac{\beta \times A \times f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Equação 77})$$

$$(217,39 + 69,79) = \frac{0,95 \times 0,0553 \text{ m}^2 \times f_k}{2,5} \rightarrow f_{k,req} = 13666,13 \frac{kN}{m^2} = 13,67 \text{ MPa}$$

– Especificação de bloco e argamassa

A especificação da resistência à compressão dos blocos e da argamassa pode ser obtida através de uma tabela presente no PD 6697:2019. Esta tabela apresenta os valores de resistência característica à compressão da parede em função da classe da argamassa e das características do bloco, tais como material, dimensões e resistência. Dessa forma, conhecendo os valores da resistência característica à compressão das paredes, também é possível fazer o processo inverso e obter a resistência dos blocos. Ela ainda permite, de acordo com a norma, realizar interpolação para obtenção dos valores. A Figura 64 apresenta a referida tabela.

Figura 64 - Tabela do PD 6697:2019 para obtenção da resistência característica à compressão das paredes.

<i>d) — Constructed with aggregate concrete blocks having not more than 25% of formed voids and a ratio of height to least horizontal dimension of between 2.0 and 4.5</i>									
Mortar strength Class/Designation	Compressive strength of unit (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>								
	2.9	3.6	5.2	7.3	10.4	17.5	22.5	30	40 or greater
<b>M12 / (i)</b>	2.8	3.5	5.0	6.8	8.8	12.5	15.0	18.7	22.1
<b>M6 / (ii)</b>	2.8	3.5	5.0	6.4	8.4	11.1	13.0	15.9	18.7
<b>M4 / (iii)</b>	2.8	3.5	5.0	6.4	8.2	10.1	12.0	14.5	16.8
<b>M2 / (iv)</b>	2.8	3.5	4.4	5.6	7.0	9.1	10.5	12.5	14.5

Fonte: PD 6697:2019

Para que se possa obter o valor de  $f_{k,req} = 13,67 \text{ MPa}$  é necessário utilizar argamassa de assentamento da classe M12, que corresponde à resistência à compressão de 12,00 MPa, e bloco com resistência à compressão de 19,84 MPa.

O dimensionamento para a Faixa 01 do Grupo 01 no 9º pavimento seguiu a mesma rotina de cálculo.

A Tabela 31 apresenta os valores das resistências características à compressão requeridas para as faixas dos grupos de paredes.

Tabela 31 - Resistências características à compressão, considerando a área líquida, para as faixas das paredes no pavimento térreo e 9º pavimento - (Eurocode 6 - PD 6697:2019).

<b>Parede</b>	<b>Faixa</b>	<b><math>f_{k, \text{requerido}}</math> (MPa) – Pav. Térreo</b>	<b><math>f_{k, \text{requerido}}</math> (MPa) - 9º Pav.</b>
GRUPO 01	F1	13,67	3,14
	F2	13,28	3,09
	F3	12,31	2,74
	F4	10,40	2,50
GRUPO 02	F1	14,46	3,23
	F2	12,69	3,00
	F3	12,97	2,83
	F4	9,90	2,43
GRUPO 03	F1	17,43	3,74
	F2	12,64	2,68
	F3	13,76	2,80
	F4	12,91	2,89

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Para fins de comparação, também foram calculadas as resistências características à compressão requeridas para as faixas considerando a hipótese de extremidades articuladas, ou seja, considerando a altura efetiva como sendo a própria altura do pavimento. Os valores das resistências estão apresentados na Tabela 32. Como era de se esperar, é possível observar um aumento nas resistências requeridas em todas as faixas dos grupos de paredes, em razão do maior índice de esbeltez calculado para cada faixa.

Tabela 32 - Resistências características à compressão, considerando a área líquida, para as faixas das paredes no pavimento térreo e 9º pavimento considerando extremidades articuladas (Eurocode 6 - PD 6697:2019).

<b>Parede</b>	<b>Faixa</b>	<b><math>f_{k, \text{requerido}}</math> (MPa) – Pav. Térreo</b>	<b><math>f_{k, \text{requerido}}</math> (MPa) - 9º Pav.</b>
GRUPO 01	F1	15,72	3,61
	F2	15,27	3,55
	F3	14,51	3,23
	F4	12,25	2,94
GRUPO 02	F1	16,63	3,72
	F2	14,59	3,46
	F3	15,29	3,33
	F4	11,67	2,86
GRUPO 03	F1	20,05	4,30
	F2	15,97	3,38
	F3	17,38	3,54
	F4	15,46	3,46

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### 5.5. Dimensionamento através dos resultados da modelagem numérica

O dimensionamento através dos resultados da modelagem numérica seguiu a mesma metodologia prescrita pela NBR 16868-1, uma vez que esta norma apresenta metodologia para análise das paredes por faixas isoladas. A diferença entre os procedimentos consistiu nos valores dos momentos de segunda ordem  $M_{2d}$  utilizados, que nesta etapa foram aqueles obtidos a partir da modelagem numérica, tanto para as paredes completas quanto para as faixas isoladas. Tais valores estão apresentados na Tabela 18 e na Tabela 19, no capítulo 4.

A Tabela 33 apresenta os valores das resistências características à compressão requeridas para as faixas das paredes do pavimento térreo. Como o modelo computacional foi discretizado considerando a área líquida das seções dos blocos, os resultados relativos à área bruta foram obtidos a partir daqueles relativos à área líquida, utilizando-se a correlação entre essas áreas.

Para as faixas nas quais foi possível fazer a comparação entre os valores, os resultados mostram que as resistências requeridas à compressão a partir da modelagem das paredes completas apresentam valores superiores aos obtidos a partir da modelagem das faixas isoladas. Entretanto, esses valores são próximos, de forma que a maior diferença percentual ocorreu para a Faixa 03 do Grupo 03, da ordem 10,12%.

Tabela 33 - Resistências características à compressão obtidas através do modelo numérico para as faixas das paredes no pavimento térreo.

Parede	Faixa	f <sub>k</sub> , requerido (MPa) - Parede Completa (Térreo)		f <sub>k</sub> , requerido (MPa) - Faixa Isolada (Térreo)		Diferença (%)	
		Abruta	Alíquida	Abruta	Alíquida	Abruta	Alíquida
GRUPO 01	F1	5,35	10,84	-	-	-	-
	F2	4,94	10,01	-	-	-	-
	F3	5,78	9,55	5,61	9,26	3,13	3,13
	F4	4,47	7,38	4,40	7,26	1,65	1,65
GRUPO 02	F1	5,64	11,43	-	-	-	-
	F2	4,54	9,19	-	-	-	-
	F3	6,13	10,12	5,93	9,79	3,37	3,37
	F4	4,31	7,12	4,29	7,08	0,56	0,56
GRUPO 03	F1	6,85	13,87	-	-	-	-
	F2	6,59	8,71	-	-	-	-
	F3	8,48	11,21	7,70	10,18	10,12	10,12
	F4	5,73	9,04	5,69	8,97	0,78	0,78

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 34 apresenta os valores das resistências características à compressão requeridas para as faixas dos grupos de paredes do 9º pavimento. A análise dos resultados mostra que as diferenças entre os dois casos de modelagem foram mais variáveis. Com relação à área bruta da seção, algumas faixas apresentaram valores de resistências requeridas bastante próximos, como é o caso das Faixas 03 e 04 dos grupos de paredes. Já as demais faixas apresentaram valores que diferem 20%, em média, destacando-se os valores obtidos para a Faixa 01 do Grupo 03, cuja diferença foi de 46,21%.

Tabela 34 - Resistências características à compressão obtidas através do modelo numérico para as faixas das paredes no 9º pavimento.

Parede	Faixa	$f_k$ , requerido (MPa) - Parede Completo		$f_k$ , requerido (MPa) - Faixa Isolada		Diferença (%)	
		Abruta	Alíquida	Abruta	Alíquida	Abruta	Alíquida
GRUPO 01	F1	1,21	2,46	1,52	3,08	25,20	25,20
	F2	1,15	2,32	1,36	2,75	18,53	18,53
	F3	1,26	2,08	1,24	2,05	1,46	1,46
	F4	1,10	1,81	1,12	1,85	2,21	2,21
GRUPO 02	F1	1,23	2,50	1,48	3,00	20,00	20,00
	F2	1,11	2,25	1,32	2,68	19,11	19,11
	F3	1,30	2,14	1,27	2,10	1,90	1,90
	F4	1,07	1,77	1,07	1,77	0,00	0,00
GRUPO 03	F1	1,43	2,90	2,09	4,24	46,21	46,21
	F2	1,38	1,82	1,53	2,02	10,99	10,99
	F3	1,62	2,14	1,54	2,04	4,90	4,90
	F4	1,30	2,05	1,29	2,04	0,49	0,49

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

## 5.6. Comparações entre os resultados

Nesta seção estão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos para as resistências requeridas de alvenaria e prisma a partir das metodologias prescritas pelas diferentes normas, além daqueles obtidos a partir dos parâmetros oriundos dos modelos numéricos. Foram realizadas comparações entre os resultados da NBR 15961-1:2011 e NBR 16868-1:2020, e da NBR 15961-1:2011 e Eurocode 6 - PD 6697:2019 considerando a hipótese de extremidades articuladas. Após isso, todas as demais comparações foram realizadas entre a NBR 16868-1 e os demais métodos (Eurocode 6 - PD 6697:2019 e modelo numérico), visto que esta norma apresenta procedimentos de cálculos mais atuais. Também estão apresentadas as comparações dos resultados obtidos para verificação das tensões de tração em cada grupo de parede do pavimento térreo, conforme metodologias apresentadas no item 2.4.1.

5.6.1. Resistência característica à compressão das paredes ( $f_k$ )

A Tabela 35 e a Tabela 36 apresentam os resumos dos resultados obtidos a partir das diferentes metodologias de análise, para as paredes do pavimento térreo e do 9º pavimento, respectivamente.

Tabela 35 - Resistências características à compressão das paredes do pavimento térreo para cada método de análise.

Parede	Faixa	fk, requerido - Alíquota (MPa) - Pavimento Térreo				
		NBR 15961-1	NBR 16868-1	Eurocode 6	Modelagem (Parede Completa)	Modelagem (Faixas Isoladas)
GRUPO 01	F1	15,22	13,24	13,67	10,84	-
	F2	14,76	11,48	13,28	10,01	-
	F3	14,18	12,21	12,31	9,55	9,26
	F4	7,83	7,26	10,40	7,38	7,26
GRUPO 02	F1	16,19	14,08	14,46	11,43	-
	F2	14,08	9,17	12,69	9,19	-
	F3	15,01	12,93	12,97	10,12	9,79
	F4	7,01	7,08	9,90	7,12	7,08
GRUPO 03	F1	19,48	16,94	17,43	13,87	-
	F2	14,92	8,60	12,64	8,71	-
	F3	16,32	13,95	13,76	11,21	10,18
	F4	8,87	8,97	12,91	9,04	8,97

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela 36 - Resistências características à compressão das paredes do 9º pavimento para cada método de análise.

Parede	Faixa	fk, requerido - Alíquota (MPa) - 9º Pavimento				
		NBR 15961-1	NBR 16868-1	Eurocode 6	Modelagem (Parede Completa)	Modelagem (Faixas Isoladas)
GRUPO 01	F1	3,53	3,07	3,14	2,46	3,08
	F2	3,49	2,72	3,09	2,32	2,75
	F3	3,14	2,70	2,74	2,08	2,05
	F4	1,78	1,80	2,50	1,81	1,85
GRUPO 02	F1	3,61	3,14	3,23	2,50	3,00
	F2	3,44	2,24	3,00	2,25	2,68
	F3	3,23	2,78	2,83	2,14	2,10
	F4	1,76	1,77	2,43	1,77	1,77
GRUPO 03	F1	4,16	3,61	3,74	2,90	4,24
	F2	3,12	1,80	2,68	1,82	2,02
	F3	3,27	2,79	2,80	2,14	2,04
	F4	2,02	2,04	2,89	2,05	2,04

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 37 apresenta as comparações entre as resistências requeridas à compressão da alvenaria obtidas a partir da NBR 15961-1 e da NBR 16868-1 para as paredes do pavimento térreo e do 9º pavimento.

Para ambos os pavimentos, os resultados indicam que houve redução na resistência característica à compressão de quase todas as faixas considerando-se a metodologia da NBR 16868-1. Para o pavimento térreo as únicas exceções dizem respeito às resistências obtidas para as Faixas 04 dos Grupos 02 e 03, para as quais os valores obtidos a partir NBR 16868-1 foram superiores, porém com diferença percentual muito pequena. Comportamento análogo foi obtido para as Faixas 04 dos Grupos 01, 02 e 03 do 9º pavimento. As maiores diferenças ocorreram para os resultados das Faixas 02 dos Grupos 02 e 03, sendo estas diferenças em média de 53,5% e 73,5%, respectivamente. Uma possível justificativa para tais diferenças está relacionada com o cálculo da altura efetiva das faixas, cujos valores são diferentes de acordo com as duas metodologias, influenciando no valor dos coeficientes redutores de esbeltez e conseqüentemente nas resistências requeridas à compressão.

Tabela 37 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir NBR 15961-1 e da NBR 16868-1.

Parede	Faixa	fk, requerido - Alíquida (MPa) - Pavimento Térreo			fk, requerido - Alíquida (MPa) -9º Pavimento		
		NBR 15961-1	NBR 16868-1	Diferença (%)	NBR 15961-1	NBR 16868-1	Diferença (%)
GRUPO 01	F1	15,22	13,24	14,95	3,53	3,07	14,98
	F2	14,76	11,48	28,57	3,49	2,72	28,31
	F3	14,18	12,21	16,13	3,14	2,70	16,30
	F4	7,83	7,26	7,85	1,78	1,80	1,12
GRUPO 02	F1	16,19	14,08	14,99	3,61	3,14	14,97
	F2	14,08	9,17	53,54	3,44	2,24	53,57
	F3	15,01	12,93	16,09	3,23	2,78	16,19
	F4	7,01	7,08	1,00	1,76	1,77	0,57
GRUPO 03	F1	19,48	16,94	14,99	4,16	3,61	15,24
	F2	14,92	8,60	73,49	3,12	1,80	73,33
	F3	16,32	13,95	16,99	3,27	2,79	17,20
	F4	8,87	8,97	1,13	2,02	2,04	0,99

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 38 apresenta as comparações entre as resistências características à compressão da alvenaria obtidas a partir da NBR 16868-1 e do Eurocode 6 - PD 6697:2019 (considerando extremidades engastadas) para o pavimento térreo e para o 9º pavimento.

Através da análise dos resultados percebeu-se que, para ambos os pavimentos, as resistências calculadas a partir da NBR 16868-1 e do Eurocode 6 – PD 6697:2019 para algumas faixas resultaram em valores muito próximos, como é o caso das Faixas 01 e 03 de todos os grupos. A máxima diferença entre resultados dessas faixas foi de 3,25% para a Faixa 01 do Grupo 01 no pavimento térreo e de 3,60% para a Faixa 01 do Grupo 03 no 9º pavimento.

Já para as Faixas 02 e 04 de todos os grupos as diferenças entre os resultados obtidos através das duas normas foram mais acentuadas. Tal fato pode ser explicado porque essas faixas se localizam próximas a paredes transversais em suas respectivas paredes de contraventamento, de forma que pelas considerações da NBR 16868-1 possuem alturas efetivas inferiores àquelas obtidas pelas prescrições do Eurocode 6 - PD 6697:2019.

Tabela 38 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir da NBR 16868-1 e do Eurocode 6 - PD 6697:2019.

Parede	Faixa	fk, requerido - Alíquida (MPa) - Pavimento Térreo			fk, requerido - Alíquida (MPa) - 9º Pavimento		
		NBR 16868-1	Eurocode 6	Diferença (%)	NBR 16868-1	Eurocode 6	Diferença (%)
GRUPO 01	F1	13,24	13,67	3,25	3,07	3,14	2,28
	F2	11,48	13,28	15,68	2,72	3,09	13,60
	F3	12,21	12,31	0,82	2,70	2,74	1,48
	F4	7,26	10,40	43,25	1,80	2,50	38,89
GRUPO 02	F1	14,08	14,46	2,70	3,14	3,23	2,87
	F2	9,17	12,69	38,39	2,24	3,00	33,93
	F3	12,93	12,97	0,31	2,78	2,83	1,80
	F4	7,08	9,90	39,83	1,77	2,43	37,29
GRUPO 03	F1	16,94	17,43	2,89	3,61	3,74	3,60
	F2	8,60	12,64	46,98	1,80	2,68	48,89
	F3	13,95	13,76	1,38	2,79	2,80	0,36
	F4	8,97	12,91	43,92	2,04	2,89	41,67

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Por sua vez, a Tabela 39 apresenta as comparações entre as resistências características à compressão da alvenaria obtidas a partir da NBR 15961-1 e do Eurocode 6 - PD 6697:2019 (considerando extremidades articuladas) para o pavimento térreo e para o 9º pavimento.

A análise dos resultados mostra que, para ambos os pavimentos, as resistências calculadas a partir da NBR 15961-1 e do Eurocode 6 - PD 6697:2019 para a maioria das faixas resultaram em valores muito próximos, excetuando-se as Faixas 04 dos grupos. Essas são faixas que, por estarem localizadas próximas a paredes transversais em suas respectivas paredes de contraventamento, possuem alturas efetivas diferentes quando calculadas pelas prescrições da

NBR 15961-1 e pelo Eurocode 6 - PD 6697:2019 ao se considerar a hipótese de extremidades articuladas.

A proximidade dos resultados corrobora a constatação de que as prescrições da NBR 15961-1 levavam à valores de resistências requeridas à compressão superiores àqueles que realmente seriam necessários, uma vez que considerava vinculações articuladas para as extremidades das paredes, o que em edifícios usuais não corresponde à realidade, uma vez que as lajes de concreto proporcionam maior resistência ao movimento lateral.

Tabela 39 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir da NBR 15961-1 e do Eurocode 6 - PD 6697:2019 considerando extremidades articuladas.

Parede	Faixa	f <sub>k</sub> , requerido - Alíquota (MPa) - Pavimento Térreo			f <sub>k</sub> , requerido - Alíquota (MPa) -9° Pavimento		
		NBR 15961-1	Eurocode 6	Diferença (%)	NBR 15961-1	Eurocode 6	Diferença (%)
GRUPO 01	F1	15,22	15,72	3,29	3,53	3,61	2,27
	F2	14,76	15,27	3,46	3,49	3,55	1,72
	F3	14,18	14,51	2,33	3,14	3,23	2,87
	F4	7,83	12,25	56,45	1,78	2,94	65,17
GRUPO 02	F1	16,19	16,63	2,72	3,61	3,72	3,05
	F2	14,08	14,59	3,62	3,44	3,46	0,58
	F3	15,01	15,29	1,87	3,23	3,33	3,10
	F4	7,01	11,67	66,48	1,76	2,86	62,50
GRUPO 03	F1	19,48	20,05	2,93	4,16	4,30	3,37
	F2	14,92	15,97	7,04	3,12	3,38	8,33
	F3	16,32	17,38	6,50	3,27	3,54	8,26
	F4	8,87	15,46	74,30	2,02	3,46	71,29

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 40 apresenta as comparações entre as resistências características à compressão da alvenaria obtidas a partir da NBR 16868-1 e do modelo numérico para as paredes do pavimento térreo. Para este caso foram considerados apenas os resultados referentes à modelagem da parede completa, uma vez que não houve convergência durante o processamento de algumas faixas isoladas desse pavimento, como já foi relatado anteriormente. Os resultados indicam, para a maioria das faixas, uma boa aproximação entre as resistências características à compressão obtidas a partir dos dois métodos. De forma geral, as resistências requeridas obtidas a partir do modelo numérico foram inferiores àquelas obtidas a partir da NBR 16868-1, com exceção das Faixas 04 do Grupo 01 e das Faixas 02 e 04 dos Grupos 02 e 03, nas quais as resistências requeridas foram superiores. Entretanto, observa-se que para estas faixas as diferenças percentuais entre os resultados são inferiores às demais. Tais faixas

localizam-se, em suas respectivas paredes, nas proximidades dos travamentos verticais. As maiores diferenças observadas ocorreram para as Faixas 01 e 03 dos grupos de paredes, sendo iguais a 24,6% em média.

Tabela 40 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir da NBR 16868-1 e do modelo numérico para o pavimento térreo.

Parede	Faixa	f <sub>k</sub> , requerido - Alíquota (MPa) - Pav. Térreo		Diferença (%)
		NBR 16868-1	Modelagem (Parede Completa)	
GRUPO 01	F1	13,24	10,84	22,14
	F2	11,48	10,01	14,69
	F3	12,21	9,55	27,85
	F4	7,26	7,38	1,65
GRUPO 02	F1	14,08	11,43	23,18
	F2	9,17	9,19	0,22
	F3	12,93	10,12	27,77
	F4	7,08	7,12	0,56
GRUPO 03	F1	16,94	13,87	22,13
	F2	8,60	8,71	1,28
	F3	13,95	11,21	24,44
	F4	8,97	9,04	0,78

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A Tabela 41 apresenta as comparações entre as resistências características à compressão da alvenaria obtidas a partir da NBR 16868-1 e do modelo numérico para as paredes do 9º pavimento. Para este caso foram considerados os resultados referentes tanto à modelagem da parede completa quanto à modelagem das faixas isoladas.

Para os resultados obtidos a partir da modelagem da parede completa verificou-se que foi mantida a mesma tendência de comportamento já observada para as paredes do pavimento térreo. Por sua vez, os resultados obtidos a partir da norma e do modelo numérico de faixas isoladas foram, de maneira geral, mais próximos, com algumas exceções. Destacam-se os resultados obtidos para as Faixas 04 dos grupos 02 e 04, cujos valores foram exatamente iguais para ambas as metodologias. As maiores diferenças observadas ocorreram para as Faixas 03 dos grupos de paredes, sendo iguais a 33,6% em média.

Tabela 41 - Comparação entre as resistências requeridas à compressão das paredes obtidas a partir da NBR 16868-1 e do modelo numérico para o 9º pavimento.

Parede	Faixa	$f_k$ , requerido - Alíquota (MPa) -9º Pavimento			Diferença (%) entre NBR e Parede Completa	Diferença (%) entre NBR e Faixas isoladas
		NBR 16868-1	Modelagem (Parede Completa)	Modelagem (Faixas Isoladas)		
GRUPO 01	F1	3,07	2,46	3,08	24,80	0,33
	F2	2,72	2,32	2,75	17,24	1,10
	F3	2,70	2,08	2,05	29,81	31,71
	F4	1,80	1,81	1,85	0,56	2,78
GRUPO 02	F1	3,14	2,50	3,00	25,60	4,67
	F2	2,24	2,25	2,68	0,45	19,64
	F3	2,78	2,14	2,10	29,91	32,38
	F4	1,77	1,77	1,77	0,00	0,00
GRUPO 03	F1	3,61	2,90	4,24	24,48	17,45
	F2	1,80	1,82	2,02	1,11	12,22
	F3	2,79	2,14	2,04	30,37	36,76
	F4	2,04	2,05	2,04	0,49	0,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### 5.6.2. Resistência característica à compressão dos prismas ( $f_{pk}$ )

O cálculo das resistências características à compressão dos prismas foi realizado a partir dos resultados das resistências características à compressão da alvenaria ( $f_k$ ) para as faixas dos grupos de paredes, considerando uma relação parede/prisma igual a 0,7, conforme apresentado na Tabela 20. Para que as comparações pudessem ser coerentes, tal relação também foi utilizada para o cálculo do  $f_{pk}$  através da metodologia da norma Eurocode 6 – PD 6697:2019.

A Tabela 42 e a Tabela 43 apresentam o resumo dos resultados obtidos a partir das diferentes metodologias de análise, para as paredes do pavimento térreo e do 9º pavimento, respectivamente. Todos os dados são referentes à área líquida das seções. É importante destacar que a tendência de comportamento para os resultados da resistência à compressão de prisma é exatamente a mesma observada nos resultados de resistência à compressão da alvenaria, uma vez que é utilizado o mesmo fator de correlação parede/prisma para todas as faixas. Dessa forma, as comparações entre os resultados das diferentes normas se repetem.

Tabela 42 - Resistências características à compressão dos prismas para as paredes do pavimento térreo de acordo com cada método de análise.

Parede	Faixa	fk, requerido - Alíquida (MPa) - Pavimento Térreo				
		NBR 15961-1	NBR 16868-1	Eurocode 6	Modelagem (Parede Completa)	Modelagem (Faixas Isoladas)
GRUPO 01	F1	21,74	18,91	19,53	15,49	-
	F2	21,09	16,40	18,97	14,30	-
	F3	20,26	17,44	17,59	13,64	13,23
	F4	10,26	10,37	14,86	10,54	10,37
GRUPO 02	F1	23,13	20,11	20,66	16,33	-
	F2	20,11	13,10	18,13	13,13	-
	F3	21,44	18,47	18,53	14,46	13,99
	F4	10,01	10,11	14,14	10,17	10,11
GRUPO 03	F1	27,83	24,20	24,90	19,81	-
	F2	21,31	12,29	18,06	12,44	-
	F3	23,31	19,93	19,66	16,01	14,54
	F4	12,67	12,81	18,44	12,91	12,81

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela 43 - Resistências características à compressão dos prismas para as paredes do 9º pavimento de acordo com cada método de análise.

Parede	Faixa	fk, requerido - Alíquida (MPa) - 9º Pavimento				
		NBR 15961-1	NBR 16868-1	Eurocode 6	Modelagem (Parede Completa)	Modelagem (Faixas Isoladas)
GRUPO 01	F1	5,04	4,39	4,49	3,51	4,40
	F2	4,99	3,89	4,41	3,31	3,93
	F3	4,49	3,86	3,91	2,97	2,93
	F4	2,54	2,57	3,57	2,59	2,64
GRUPO 02	F1	5,16	4,49	4,61	3,57	4,29
	F2	4,91	3,20	4,29	3,21	3,83
	F3	4,61	3,97	4,04	3,06	3,00
	F4	2,51	2,53	3,47	2,53	2,53
GRUPO 03	F1	5,94	5,16	5,34	4,14	6,06
	F2	4,46	2,57	3,83	2,60	2,89
	F3	4,67	3,99	4,00	3,06	2,91
	F4	2,89	2,91	4,13	2,93	2,91

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### 5.6.3. Verificação das tensões de tração

A Tabela 44 e a Tabela 45 apresentam, respectivamente os resultados obtidos para a verificação das tensões de tração máximas permitidas em cada um dos grupos de paredes estudados. É possível perceber que os resultados obtidos a partir do método das excentricidades

( $e_k$ ) indicam que nenhuma das paredes necessitam de armadura, uma vez que as tensões de tração solicitantes não excederam a resistência à tração da alvenaria. Por sua vez, os resultados obtidos a partir do método da combinação linear de ações indicam que a parede do Grupo 3 necessita de armadura, uma vez que nela as tensões de tração solicitantes excedem a resistência à tração da alvenaria. Nas demais paredes a utilização de armadura construtiva é suficiente para contribuir com a resistência à tração.

Tabela 44 – Verificação das tensões máximas de tração nas paredes do pavimento térreo pelo método da excentricidade.

Parede	I (m <sup>4</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	F <sub>k</sub> (kN)	M <sub>k</sub> (kN.m)	X (m)	e <sub>x</sub>	e <sub>k</sub>	Armadura
Grupo 01	7,06	1,342	1860,59	1148,9	4,08	0,62	1,29	Não armar
Grupo 02	9,37	1,795	2528,38	1524,6	4,40	0,60	1,19	Não armar
Grupo 03	3,34	1,092	1749,54	1181,6	3,22	0,68	0,95	Não armar

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela 45 - Verificação das tensões máximas de tração nas paredes do pavimento térreo pelo método da combinação linear de ações.

Parede	$\sigma_{v1}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{v2}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{sk,perm}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$f_{tk}/\gamma_m$ (MPa)	$f_{t,v1}$ (MPa)	$f_{t,v2}$ (MPa)	Armadura
Grupo 01	644,43	663,95	1151,43	0,10	-0,13	-0,11	Não armar
Grupo 02	715,93	551,59	1177,86	0,10	-0,06	-0,29	Não armar
Grupo 03	926,88	1139,15	1315,71	0,125*	0,11	0,41*	Armar

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

## 5.7. Comentários

Neste capítulo foram apresentados os exemplos de dimensionamento de uma das faixas das paredes em estudo através das metodologias prescritas na NBR 15961-1:2011, NBR 16868-1:2020 e Eurocode 6 - PD 6697:2019. Para os modelos numéricos, foi aplicada a metodologia da análise por faixas da NBR 16868-1, porém com os valores dos momentos de segunda ordem obtidos a partir da modelagem. Também são apresentadas as comparações entre as resistências características à compressão das paredes e prismas para cada metodologia aplicada. Em decorrência das análises realizadas, foi possível concluir que:

– A NBR 16868-1 traz importantes avanços na análise das paredes de alvenaria submetidas à flexo-compressão, com as novas considerações para o cálculo da altura efetiva (e conseqüente mudança nos valores dos índices de esbeltez), a nova formulação para cálculo dos momentos de segunda ordem para elementos esbeltos e a possibilidade de análise por faixas

isoladas. As comparações entre as normas mostraram que, para a maioria dos casos, a NBR 15961-1 apresentava resultados muito conservadores, elevando os valores das resistências requeridas para as alvenarias e prismas.

– A utilização da correlação entre as áreas bruta e líquida mostrou-se inadequada para a obtenção das resistências de elementos esbeltos submetidos à flexo-compressão. As diferenças entre os valores obtidos a partir dessa correlação e a partir do dimensionamento direto considerando a área bruta se mostraram elevadas para a maioria das faixas.

– No tocante às comparações entre as normas NBR 16868-1 e Eurocode 6 – PD 6697:2019, percebeu-se que a aplicação da metodologia da norma europeia resultou em valores requeridos para as resistências de alvenarias e prismas superiores àqueles obtidos pela norma brasileira. Apesar disso, os resultados obtidos a partir das duas normas para as faixas que não possuíam vinculação direta com as paredes transversais foram próximos. Por sua vez, para as faixas que possuíam vinculação direta com as paredes transversais, as diferenças entre os resultados obtidos a partir das duas normas foram mais acentuadas. É possível ainda perceber que os resultados obtidos a partir da NBR 15961-1 se aproximaram mais dos resultados obtidos pela norma europeia, fato já observado por Araújo (2016).

– Para as faixas do pavimento térreo, a aplicação do modelo de barras equivalentes através da modelagem da parede completa se mostrou eficiente para a previsão dos valores das resistências características à compressão para a maioria das faixas. Foi possível perceber que, para pavimentos com menores intensidades de carregamentos, como é o caso do 9º pavimento, o modelo numérico de faixas isoladas se mostrou mais adequado, se comparado ao modelo no qual a parede é discretizada por completo.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo numérico que consistiu inicialmente na calibração de um modelo computacional para simulação do comportamento de paredes de alvenaria de blocos de concreto à flexão fora do seu plano. O modelo foi aplicado para avaliar os efeitos localizados de segunda ordem em paredes de contraventamento de um projeto de edifício de alvenaria estrutural com 12 pavimentos. O estudo também foi pautado no dimensionamento e na comparação entre os resultados das resistências características à compressão requeridas para as paredes e prismas obtidos a partir das prescrições que constam na norma europeia Eurocode 6 - PD 6697:2019 e nas normas brasileiras NBR 15961-1 e NBR 16868-1.

O modelo de barras equivalentes, utilizado inicialmente em alguns estudos que trataram do comportamento da alvenaria no seu próprio plano, precisou passar por várias adaptações para que pudesse ser utilizado na simulação da rigidez das paredes fora do seu plano. A validação/calibração do modelo numérico foi realizada a partir de resultados de ensaios de paredes esbeltas em que a flexão fora do plano das paredes foi mobilizada.

### 6.1. Definição do modelo computacional

Relativamente à calibração do modelo computacional, foi possível concluir o seguinte:

- A discretização dos blocos com consideração de seus vazados é fato crucial na modelagem. Desse modo, as propriedades geométricas e elásticas das barras devem ser tratadas relativamente à área líquida;

- Verificou-se que a utilização do modelo de barras equivalentes plano, com a divisão das seções dos blocos em três barras (sendo duas com seção tipo “C” e uma com seção tipo “I”) se mostrou mais adequada que o modelo de barras equivalentes com discretização tridimensional das paredes dos blocos;

- Foi evidenciada a importância da disponibilidade de resultados experimentais de blocos e prismas com maior riqueza de detalhes, a fim de realizar uma modelagem mais adequada. Dessa forma, destaca-se a necessidade de se realizar um estudo mais aprimorado que inclua os efeitos da não linearidade física dos materiais constituintes da alvenaria no modelo.

## 6.2. Verificação do comportamento das paredes

A aplicação do modelo computacional para avaliação do comportamento das paredes do edifício tomou como referência três abordagens distintas: modelagem das paredes completas com aplicação do carregamento de forma integral; modelagem isolada das faixas e modelagem das paredes completas com aplicação das cargas apenas no comprimento da faixa. As análises dos resultados permitiram concluir que:

- De maneira geral, os travamentos oriundos de paredes transversais, mesmo com comprimentos inferiores aos valores prescritos na normatização brasileira, tendem a impedir os deslocamentos transversais dos trechos da parede de contraventamento, em que esses deslocamentos sofrem acréscimos para trechos mais distantes do travamento lateral;

- A simulação das faixas isoladas não se mostrou adequada para paredes submetidas a elevada intensidade das cargas verticais, necessitando, portanto, de novos estudos para definição de um modelo mais consistente;

- Os problemas de inconsistência do modelo numérico ocorridos na simulação das faixas isoladas não se repetiram ao se adotar a modelagem completa das paredes. No caso específico do modelo completo com aplicação das cargas apenas no comprimento da faixa, além de ter sido possível avaliar paredes com atuação de elevada intensidade das cargas verticais, foi possível identificar a mobilização das faixas vizinhas em razão da continuidade do modelo. Nesse sentido, percebeu-se que as faixas mais próximas aos travamentos tenderam a mobilizar de forma mais acentuada as regiões vizinhas;

- Os momentos de segunda ordem obtidos a partir da modelagem numérica foram, para a maioria dos casos, inferiores àqueles obtidos pela formulação presente na NBR 16868 - 1. Essas diferenças foram mais acentuadas no caso da modelagem das paredes completas. Tal resultado pode ser justificado, mais uma vez, pela incorporação da continuidade entre faixas no modelo computacional, efeito que pode não estar representado na formulação prescrita na norma. No caso específico da modelagem isolada das faixas foram obtidos valores mais próximos aos de norma, corroborando com a hipótese da influência da continuidade entre faixas.

### 6.3. Dimensionamento das faixas das paredes

No que diz respeito ao dimensionamento das faixas, os cálculos foram realizados de acordo com as metodologias para elementos submetidos à flexo-compressão prescritas pelas NBR 15961-1, NBR 16868-1 e Eurocode 6 - PD 6697:2019. Além disso, também foi realizado o dimensionamento das paredes considerando os valores dos momentos de segunda ordem obtidos pelas modelagens numéricas, aplicando a metodologia da NBR 16868-1 para cálculo dos demais parâmetros, tais como altura efetiva, índice de esbeltez e coeficiente redutor da resistência devido a esbeltez. A escolha por essa metodologia se deu pelo fato de a norma brasileira permitir a análise por faixas. As diversas comparações entre os resultados obtidos permitiram concluir o seguinte:

- As alterações na metodologia de cálculo introduzidas pela NBR 16868-1 permitem avaliar de forma mais adequada a influência dos travamentos laterais ao levar em consideração os coeficientes de esbeltez vertical e horizontal no cálculo da altura efetiva das paredes e das faixas. A possibilidade da verificação por faixas, que já ocorre para pilares-parede de concreto na NBR 6118:2014, permite também avaliar de forma mais detalhada os efeitos localizados de segunda ordem nas paredes de contraventamento;

- Os resultados para as resistências à compressão de alvenaria e de prisma obtidos a partir da metodologia da NBR 16868-1 foram menos conservadores que aqueles obtidos pela NBR 15961-1, pelos motivos já discutidos anteriormente;

- Na comparação com os valores da modelagem numérica, os resultados para as resistências à compressão de alvenaria e de prisma obtidos pela NBR 16868-1 apresentaram boa correlação, com valores, na maioria dos casos, um pouco maiores que os obtidos a partir do modelo computacional. Isso indica que as prescrições da referida norma, com as recentes alterações, se mostram adequadas para o dimensionamento de elementos de alvenaria submetidos à flexo-compressão. Apesar disso, comenta-se que novos estudos, com o emprego de modelos computacionais mais robustos, devem ser realizados para que se confirmem os resultados ora apresentados.

Destaca-se, por fim, o potencial do modelo de barras equivalentes, com as adaptações já descritas, na aplicação de projetos usuais de edifícios de alvenaria estrutural, frente aos bons resultados obtidos. Além disso, o modelo apresenta facilidade de obtenção e avaliação dos resultados, expressos em termos de esforços e deslocamentos nas barras, como já observado

por Medeiros (2015). Ressalta-se a importância de se realizar ajustes e outras verificações no modelo, que ficam como sugestões para trabalhos futuros.

#### **6.4. Continuidade da pesquisa**

Para continuidade do estudo desenvolvido sugere-se avaliar os seguintes aspectos:

- Avaliação do comportamento de paredes armadas submetidas à flexão fora do plano;
- Verificação da consideração dos efeitos de segunda ordem de acordo com outras normas internacionais, a exemplo da AS 3700, CSA-S304.1 e ACI 530;
- Realização de ensaios experimentais de paredes de alvenaria representativas de edifícios usuais submetidas à flexão fora do plano, assim como dos materiais de alvenaria, com o intuito de subsidiar de forma mais consistente a calibração/validação de modelos computacionais.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Igor Gabriel de. **Análise de painéis de contraventamento de edifício em alvenaria estrutural considerando os efeitos localizados de 2ª ordem**. 2016. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-1 – Alvenaria estrutural. Blocos de concreto. Parte 1: Projeto**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1 – Alvenaria estrutural. Parte 1: Projeto**. Rio de Janeiro, 2020.
- BEAN POPEHN, Jennifer R. et al. Influence of transverse loading on the stability of slender unreinforced masonry walls. **Engineering Structures**. Amsterdã, p. 2830-2839. maio 2008.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 5628-1:2005 - Code of practice for the use of masonry**. Londres, 2005.
- BSI. BRITISH STANDARD INSTITUTION. **PD 6697:2019: Recommendations for the design of masonry structures to BS EN 1996-1-1 and BS EN 1996-2**. Londres, 2019.
- CAVALCANTI, Rennan Augusto Silva. **Estudo preliminar à análise do colapso progressivo em edifícios de alvenaria estrutural sobre estrutura de transição em concreto armado**. 2018. 145p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- HENDRY, A. W., SINHA, P. B. and DAVIES, S. R. **Design of masonry structures**. University of Edinburg, Department of Civil Engineering, 1997.
- JOAQUIM, M. M. **Flexão e flexo-compressão em elementos de alvenaria estrutural**. São Carlos. 129p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.
- JUSTE, Andrea Elizabeth. **Estudo da resistência e da deformabilidade da alvenaria de blocos de concreto submetida a esforços de compressão**. 2001. 236p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- Kuddus, Mir Abdul. **Numerical Simulation on Buckling Failure of the Masonry Load Bearing Walls**. Technical University of Catalonia, Spain, 2010.
- LOPES, Anna Christinna Secundo. **Avaliação do comportamento de edifícios de alvenaria estrutural sobre estrutura de transição considerando a interação solo-estrutura e o efeito construtivo**. 2019. 179p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LOPES, Guilherme Martins. **Estudo teórico e experimental de paredes esbeltas de alvenaria estrutural**. 2014. 133p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

MEDEIROS, Klaus André de Sousa. **Modelagem computacional para avaliação da interação entre painéis de alvenaria e estrutura de suporte em concreto armado**. 2015. 120p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

MORAES, Rafael Santos de. **Análise teórica e experimental do comportamento ao cisalhamento de vigas em alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 2017. 329p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

NASCIMENTO NETO, J. A. (1999). **Investigação das solicitações de cisalhamento em edifícios de alvenaria estrutural**. São Carlos. 127p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NASCIMENTO NETO, J. A.; MEDEIROS, K. A. S. e 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.

OLIVEIRA, Danielle Meireles de. **Estudo dos processos aproximados utilizados para a consideração das não-linearidades física e geométrica na análise global das estruturas de concreto armado**. 2007. 297p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

OLIVEIRA, Luciane Marcela Filizola de. **Estudo teórico e experimental do comportamento das interfaces verticais de paredes interconectadas de alvenaria estrutural**. 2014. 272p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R.G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. Edufscar. São Carlos, 2012.

PARSEKIAN, G. A.; CORRÊA, M. R. S.; LOPES, G. M.; CAVICHIOLLI, I. Estudo teórico e experimental de paredes esbeltas de alvenaria estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 197-213, out./dez. 2016.

SANDOVAL, Cristian; ROCA, Pere. Study of the influence of different parameters on the buckling behaviour of masonry walls. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 35, p. 888-899, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.053>.

SAP2000®. (2005): CSI Analysis Reference Manual. Berkeley, CA - USA: Computers and Structures, Inc.

SORIANO, Humberto Lima. **Análise de Estruturas: formulação matricial e implementação computacional**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2005.

VIEIRA, Vitor Vinicius dos Santos. **Análise de parâmetros globais de projeto em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2015. 181 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

**ANEXO A – TABELAS DE DIMENSIONAMENTO PARA O EUROCODE 6 –  
PD 6697:2019**

A norma europeia Eurocode 6 - PD 6697:2019 trata do dimensionamento de elementos de alvenaria de blocos maciços. Dessa forma, as tabelas presentes na norma para o cálculo dos *Capacity Reductions Factors* (CRF) não são adequadas para utilização no dimensionamento de elementos com seções de geometria complexa, como é o caso das alvenarias de bloco de concreto. Dessa forma, no desenvolvimento da pesquisa ora apresentada foram elaboradas tabelas para cálculo da linha neutra e dos CRF para as quatro seções características das faixas selecionadas nas paredes em estudo. A correlação de cada seção com sua respectiva faixa está apresentada na Tabela 14.

Dessa forma, as Tabelas A.1 a A.4 referem-se aos valores de linha neutra das seções de 01 a 04, respectivamente.

Tabela A. 1 – Valores de linha neutra obtidos para a seção 01.

$\lambda$	LINHA NEUTRA - X PARA A SEÇÃO 01 (cm)					
	0,05D	0,10D	0,15D	0,20D	0,25D	0,30D
0	13,34	12,76	12,23	11,77	10,84	8,85
5	13,34	12,76	12,23	11,77	10,84	8,85
6	13,34	12,76	12,23	11,77	10,84	8,85
8	13,34	12,76	12,23	11,77	10,84	8,85
10	13,26	12,76	12,23	11,77	10,84	8,85
12	13,04	12,70	12,23	11,77	10,84	8,85
14	12,79	12,47	12,17	11,77	10,84	8,85
15	12,66	12,35	12,05	11,77	10,84	8,85
16	12,52	12,22	11,93	11,67	10,84	8,85
18	12,23	11,95	11,69	11,23	10,07	8,85
20	11,93	11,67	11,16	10,00	8,78	7,46
22	11,63	10,97	9,80	8,56	7,23	5,73
24	10,65	9,47	8,21	6,83	5,26	3,13
25	9,85	8,62	7,29	5,80	3,94	2,09
26	8,99	7,69	6,25	4,55	2,33	1,49
27	8,04	6,65	5,04	2,74	1,72	0,88

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela A. 2 - Valores de linha neutra obtidos para a seção 02.

$\lambda$	LINHA NEUTRA - X PARA A SEÇÃO 02 (cm)					
	0,05D	0,10D	0,15D	0,20D	0,25D	0,30D
0	13,19	12,44	11,77	10,61	8,99	7,29
5	13,19	12,44	11,77	10,61	8,99	7,29
6	13,19	12,44	11,77	10,61	8,99	7,29
8	13,19	12,44	11,77	10,61	8,99	7,29
10	13,08	12,44	11,77	10,61	8,99	7,29
12	12,81	12,37	11,77	10,61	8,99	7,29
14	12,49	12,07	11,69	10,61	8,99	7,29
15	12,32	11,91	11,54	10,61	8,99	7,29
16	12,14	11,75	11,19	10,23	8,99	7,29
18	11,77	11,24	10,29	9,31	8,32	7,29
20	11,19	10,23	9,26	8,26	7,23	6,14
22	10,07	9,10	8,09	7,05	5,95	4,76
24	8,82	7,81	6,75	5,63	4,40	2,88
25	8,14	7,10	6,00	4,81	3,42	2,09
26	7,40	6,33	5,17	3,86	2,33	1,49
27	6,62	5,49	4,23	2,64	1,72	0,88

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela A. 3 - Valores de linha neutra obtidos para a seção 03.

$\lambda$	LINHA NEUTRA - X PARA A SEÇÃO 03 (cm)					
	0,05D	0,10D	0,15D	0,20D	0,25D	0,30D
0	12,97	12,00	10,83	9,36	7,87	6,34
5	12,97	12,00	10,83	9,36	7,87	6,34
6	12,97	12,00	10,83	9,36	7,87	6,34
8	12,97	12,00	10,83	9,36	7,87	6,34
10	12,83	12,00	10,83	9,36	7,87	6,34
12	12,47	11,90	10,83	9,36	7,87	6,34
14	12,06	11,50	10,63	9,36	7,87	6,34
15	11,83	11,15	10,28	9,36	7,87	6,34
16	11,59	10,78	9,90	9,01	7,87	6,34
18	10,83	9,95	9,06	8,17	7,27	6,34
20	9,90	9,01	8,12	7,22	6,29	5,34
22	8,87	7,97	7,06	6,14	5,18	4,18
24	7,72	6,81	5,87	4,91	3,89	2,75
25	7,10	6,18	5,22	4,23	3,14	2,09
26	6,45	5,50	4,52	3,47	2,33	1,49
27	5,76	4,79	3,76	2,59	1,72	0,88

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela A. 4 - Valores de linha neutra obtidos para a seção 04.

$\lambda$	<b>LINHA NEUTRA - X PARA A SEÇÃO 04 (cm)</b>					
	<b>0,05D</b>	<b>0,10D</b>	<b>0,15D</b>	<b>0,20D</b>	<b>0,25D</b>	<b>0,30D</b>
<b>0</b>	13,15	12,36	11,65	10,29	8,70	7,05
<b>5</b>	13,15	12,36	11,65	10,29	8,70	7,05
<b>6</b>	13,15	12,36	11,65	10,29	8,70	7,05
<b>8</b>	13,15	12,36	11,65	10,29	8,70	7,05
<b>10</b>	13,04	12,36	11,65	10,29	8,70	7,05
<b>12</b>	12,74	12,29	11,65	10,29	8,70	7,05
<b>14</b>	12,41	11,97	11,56	10,29	8,70	7,05
<b>15</b>	12,23	11,80	11,26	10,29	8,70	7,05
<b>16</b>	12,04	11,62	10,86	9,92	8,70	7,05
<b>18</b>	11,65	10,91	9,98	9,03	8,05	7,05
<b>20</b>	10,86	9,92	8,97	8,00	6,99	5,94
<b>22</b>	9,77	8,81	7,83	6,82	5,76	4,61
<b>24</b>	8,54	7,56	6,53	5,45	4,27	2,85
<b>25</b>	7,87	6,86	5,81	4,66	3,35	2,09
<b>26</b>	7,16	6,12	5,01	3,76	2,33	1,49
<b>27</b>	6,40	5,31	4,11	2,62	1,72	0,88

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As Tabelas A.5 a A.8 apresentam os valores dos CRF das seções 01 a 04, respectivamente.

Tabela A. 5 – Valores de CRF obtidos para a seção 01.

$\lambda$	<b>Capacity Reduction Factor (<math>\beta</math>) para a Seção 01</b>					
	<b>0,05D</b>	<b>0,10D</b>	<b>0,15D</b>	<b>0,20D</b>	<b>0,25D</b>	<b>0,30D</b>
<b>0</b>	1,00	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
<b>5</b>	1,00	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
<b>6</b>	1,00	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
<b>8</b>	1,00	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
<b>10</b>	0,98	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61
<b>12</b>	0,95	0,89	0,82	0,75	0,68	0,61
<b>14</b>	0,91	0,86	0,81	0,75	0,68	0,61
<b>15</b>	0,89	0,84	0,79	0,75	0,68	0,61
<b>16</b>	0,86	0,82	0,77	0,73	0,68	0,61
<b>18</b>	0,82	0,77	0,73	0,69	0,65	0,61
<b>20</b>	0,77	0,73	0,69	0,65	0,61	0,57
<b>22</b>	0,72	0,68	0,64	0,60	0,56	0,51
<b>24</b>	0,67	0,63	0,59	0,54	0,49	0,42
<b>25</b>	0,65	0,60	0,56	0,51	0,45	0,33
<b>26</b>	0,62	0,57	0,52	0,47	0,37	0,24
<b>27</b>	0,59	0,54	0,48	0,41	0,27	0,14

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela A. 6 - Valores de CRF obtidos para a seção 02.

$\lambda$	Capacity Reduction Factor ( $\beta$ ) para a Seção 02					
	0,05D	0,10D	0,15D	0,20D	0,25D	0,30D
0	1,0	0,90	0,81	0,73	0,65	0,56
5	1,0	0,90	0,81	0,73	0,65	0,56
6	1,0	0,90	0,81	0,73	0,65	0,56
8	1,0	0,90	0,81	0,73	0,65	0,56
10	0,98	0,90	0,81	0,73	0,65	0,56
12	0,95	0,89	0,81	0,73	0,65	0,56
14	0,90	0,85	0,80	0,73	0,65	0,56
15	0,88	0,83	0,78	0,73	0,65	0,56
16	0,86	0,81	0,76	0,71	0,65	0,56
18	0,81	0,76	0,71	0,67	0,62	0,56
20	0,76	0,71	0,66	0,61	0,56	0,51
22	0,70	0,66	0,60	0,55	0,50	0,44
24	0,64	0,59	0,54	0,48	0,42	0,34
25	0,61	0,55	0,50	0,44	0,37	0,27
26	0,57	0,52	0,46	0,39	0,30	0,19
27	0,53	0,47	0,41	0,33	0,22	0,11

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela A. 7 - Valores de CRF obtidos para a seção 03.

$\lambda$	Capacity Reduction Factor ( $\beta$ ) para a seção 03					
	0,05D	0,10D	0,15D	0,20D	0,25D	0,30D
0	1,0	0,89	0,80	0,70	0,61	0,51
5	1,0	0,89	0,80	0,70	0,61	0,51
6	1,0	0,89	0,80	0,70	0,61	0,51
8	1,0	0,89	0,80	0,70	0,61	0,51
10	0,98	0,89	0,80	0,70	0,61	0,51
12	0,94	0,88	0,80	0,70	0,61	0,51
14	0,90	0,84	0,78	0,70	0,61	0,51
15	0,87	0,82	0,76	0,70	0,61	0,51
16	0,85	0,79	0,74	0,68	0,61	0,51
18	0,80	0,74	0,68	0,63	0,57	0,51
20	0,74	0,68	0,62	0,56	0,50	0,44
22	0,67	0,61	0,55	0,49	0,43	0,37
24	0,60	0,54	0,48	0,42	0,35	0,28
25	0,56	0,50	0,44	0,37	0,30	0,22
26	0,51	0,45	0,39	0,32	0,24	0,16
27	0,47	0,41	0,34	0,27	0,18	0,09

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela A. 8 - Valores de CRF obtidos para a seção 04.

$\lambda$	Capacity Reduction Factor ( $\beta$ ) para a Seção 04					
	0,05D	0,10D	0,15D	0,20D	0,25D	0,30D
<b>0</b>	1,0	0,90	0,81	0,73	0,64	0,55
<b>5</b>	1,0	0,90	0,81	0,73	0,64	0,55
<b>6</b>	1,0	0,90	0,81	0,73	0,64	0,55
<b>8</b>	1,0	0,90	0,81	0,73	0,64	0,55
<b>10</b>	0,98	0,90	0,81	0,73	0,64	0,55
<b>12</b>	0,94	0,89	0,81	0,73	0,64	0,55
<b>14</b>	0,90	0,85	0,80	0,73	0,64	0,55
<b>15</b>	0,88	0,83	0,78	0,73	0,64	0,55
<b>16</b>	0,86	0,81	0,76	0,71	0,64	0,55
<b>18</b>	0,81	0,76	0,71	0,66	0,61	0,55
<b>20</b>	0,76	0,71	0,66	0,60	0,55	0,49
<b>22</b>	0,70	0,65	0,59	0,54	0,48	0,42
<b>24</b>	0,63	0,58	0,53	0,47	0,40	0,33
<b>25</b>	0,60	0,54	0,49	0,43	0,36	0,26
<b>26</b>	0,56	0,50	0,44	0,38	0,29	0,18
<b>27</b>	0,52	0,46	0,40	0,32	0,21	0,11

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)