

Rennan Augusto Silva Cavalcanti

**ESTUDO PRELIMINAR À ANÁLISE DO COLAPSO
PROGRESSIVO EM EDIFÍCIOS DE ALVENARIA
ESTRUTURAL SOBRE ESTRUTURA DE TRANSIÇÃO EM
CONCRETO ARMADO**

Natal

2018

Rennan Augusto Silva Cavalcanti

**ESTUDO PRELIMINAR À ANÁLISE DO COLAPSO
PROGRESSIVO EM EDIFÍCIOS DE ALVENARIA
ESTRUTURAL SOBRE ESTRUTURA DE TRANSIÇÃO EM
CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto
Coorientador: Prof. Dr. Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega

Natal

2018

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

Cavalcanti, Rennan Augusto Silva.

Estudo preliminar à análise do colapso progressivo em edifícios de alvenaria estrutural sobre estrutura de transição em concreto armado / Rennan Augusto Silva Cavalcanti. - 2018.
164 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

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

Coorientador: Prof. Dr. Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega.

1. Alvenaria estrutural - Dissertação. 2. Redistribuição de tensões - Dissertação. 3. Estrutura de suporte - Dissertação. 4. Colapso desproporcional - Dissertação. 5. Colapso progressivo - Dissertação. I. Nascimento Neto, Joel Araújo do. II. Nóbrega, Petrus Gorgônio Bulhões da. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.01(043)

RENNAN AUGUSTO SILVA CAVALCANTI

**ESTUDO PRELIMINAR À ANÁLISE DO COLAPSO PROGRESSIVO
EM EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL SOBRE ESTRUTURA
DE TRANSIÇÃO EM CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto – Orientador

Prof. Dr. Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega – Coorientador

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

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

Natal, 29 de junho de 2018.

ESTUDO PRELIMINAR À ANÁLISE DO COLAPSO PROGRESSIVO EM EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL SOBRE ESTRUTURA DE TRANSIÇÃO EM CONCRETO ARMADO

Rennan Augusto Silva Cavalcanti

Orientador: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto

Coorientador: Prof. Dr. Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega

RESUMO

Uma problemática envolvendo os edifícios de alvenaria estrutural remete à dificuldade de realizar reformas no layout dos apartamentos. A remoção parcial ou total de paredes estruturais pode ocasionar fissuração, deformações excessivas ou mesmo o colapso progressivo da estrutura. Entretanto, são escassos os estudos relativos a essa situação, especialmente em edifícios sobre estrutura de transição em concreto armado. Esta pesquisa teve como propósito principal avaliar a redistribuição de tensões normais e de cisalhamento e suas implicações nos demais elementos da estrutura, tais como lintéis e cintas de respaldo, além de avaliar a influência da estrutura de transição nesta redistribuição, sugerindo algumas verificações a serem feitas para o estudo do colapso progressivo em edifícios de alvenaria estrutural. Com esse intuito, foram modelados dois edifícios, com distinta disposição das paredes em planta, utilizando o modelo de barras equivalentes proposto por Nascimento Neto et. al. (2014). A análise dos resultados contemplou, em pavimentos próximos aos da ocorrência de remoções de trechos de paredes, a avaliação das tensões normais e de cisalhamento na base das paredes e em seções transversais verticais predeterminadas; e dos esforços normais nas cintas de respaldo. Os resultados mostraram que: ocorrem intensas concentrações de tensões nos pavimentos imediatamente acima e abaixo daquele em que ocorreu a remoção, que se dissipam consideravelmente em dois/três pavimentos distantes daquele da remoção; as cintas de respaldo, os lintéis e a amarração entre as paredes desempenham papel importante na ocorrência de mecanismos internos para a redistribuição das tensões.

Palavras-chave: estruturas de alvenaria; redistribuição de tensões; estrutura de suporte; colapso desproporcional.

PRELIMINARY STUDY TO ANALYSIS OF PROGRESSIVE COLLAPSE IN STRUCTURAL MASONRY BUILDINGS ABOVE CONCRETE FLOOR STRUCTURE

Rennan Augusto Silva Cavalcanti

Supervisor: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto

Co-Supervisor: Prof. Dr. Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega

ABSTRACT

One of the characteristics of structural masonry buildings is the difficult to make changes in the arrangement of apartment walls. If openings are made in structural walls, as a result of an inappropriate apartment layout modification, excessive displacements, large size cracking, local damage, even progressive collapse may occurs. However, there are few studies concerned with these situations, especially in the case of structural masonry buildings above concrete floors structures, emphasizing the importance of more accurate studies. The research presented herein aimed to evaluate the stresses redistribution on walls and the implications in others structural members, such as lintels and bond beams, as well as to evaluate the influence of concrete floor structure in this redistribution, suggesting a series of verifications to the study of progressive collapse in masonry buildings. For this purpose, two masonry buildings with different walls arrangement in plan were modeled using the equivalent frame model proposed by Nascimento Neto et. al. (2014). The analyzes were conducted to evaluate, at the nearest floors to the opening created by the removal of a structural wall portion, the normal and shear stresses at the walls base and at predetermined vertical cross sections; and normal forces in the bond beams. The results showed: the occurrence of intense stresses peaks in the floors immediately above and under the floor in which occurred the removal, which dissipates considerably two/three floors distant of the removal; the existence of masonry lintels, bond beams and walls interconnections are very important to ensure the occurrence of internal mechanisms to the stresses redistribution.

Keywords: masonry structures; stress redistribution; support concrete structure; disproportionate collapse.

*“Você não sabe o quanto eu caminhei
pra chegar até aqui...”*

AGRADECIMENTOS

A Deus,

Pela vida, por todas as bênçãos que recebi e por me dar confiança para concluir esta pesquisa.

Aos meus pais,

Por todo o apoio, amor e paciência depositados, que foram indispensáveis ao longo desta longa caminhada.

Aos amigos,

Klaus André de Sousa Medeiros, Anna Christinna Secundo Lopes, Mariana Silva Freitas, Arthur da Silva Rebouças, Yeza Câmara Santiago de Medeiros, Ana Clara Batista e demais colegas da graduação e do PEC por toda a colaboração e por dividir os diversos momentos de árduo estudo. Em especial, à minha terapeuta, psicóloga Jéssica Carvalho.

Aos professores,

Tanto da graduação, quanto do PEC, por todas as contribuições, especialmente aos membros da banca e aos meus orientadores Joel Araújo do Nascimento Neto e Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega por me guiarem e, principalmente, por confiarem na minha capacidade de desenvolver esta pesquisa.

À CAPES,

Pela bolsa de estudos concedida, me dando a oportunidade de me dedicar exclusivamente à pesquisa.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	4
1.2 Objetivo Geral	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1 Colapso Progressivo	6
2.2 Características do sistema parede-viga	20
2.3 Modelagem Numérica	24
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DE ANÁLISE	34
3.1 Descrição do modelo computacional	34
3.2 Edifícios exemplos.....	35
3.2.1 Caso I.....	35
3.2.2 Caso II.....	40
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
4.1 Análise dos resultados do Caso I	45
4.1.1 Análise da redistribuição de tensões ao longo dos pavimentos	46
4.1.1.1 Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento	46
4.1.1.2 Situação de remoções de paredes no sexto pavimento	58
4.1.1.3 Comentários.....	74
4.1.2 Análise das cintas de respaldo no pavimento superior à remoção dos trechos de alvenaria.....	75
4.1.2.1 Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento	75
4.1.2.2 Situação de remoções de paredes no sexto pavimento	81
4.1.2.3 Comentários.....	83
4.1.3 Análise das tensões normais em seções transversais verticais no pavimento superior à remoção dos trechos de alvenaria	85

4.1.3.1	Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento	85
4.1.3.2	Situação de remoções de paredes no sexto pavimento	89
4.1.3.3	Comentários.....	90
4.1.4	Análise das tensões de cisalhamento em seções transversais verticais no pavimento superior à remoção dos trechos de alvenaria	91
4.1.4.1	Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento	91
4.1.4.2	Situação de remoções de paredes no sexto pavimento	92
4.1.4.3	Comentários.....	94
4.2	Análise dos resultados do Caso II	95
4.2.1	Redistribuição de tensões normais na base das paredes	95
4.2.1.1	Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento	95
4.2.1.2	Situações de remoções de paredes no quinto e no nono pavimento..	102
4.2.1.3	Comentários.....	110
4.2.2	Análise das cintas de respaldo no pavimento superior às remoções dos trechos de alvenaria.....	111
4.2.2.1	Situações de remoções de paredes no primeiro e no quinto pavimento	111
4.2.2.2	Situação de remoções de paredes no nono pavimento	118
4.2.2.3	Comentários.....	121
4.2.3	Análise das tensões normais em seções verticais nas paredes do pavimento superior à remoção do trecho de alvenaria.....	122
4.2.3.1	Situações de remoção de parede no primeiro e no quinto pavimento	122
4.2.3.2	Situação de remoção de parede no nono pavimento	125
4.2.3.3	Comentários.....	126
4.2.4	Análise das tensões de cisalhamento em seções transversais verticais no pavimento superior à remoção do trecho de alvenaria.....	127

4.2.4.1	Comentários.....	129
4.2.5	Verificações preliminares.....	129
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....		134
5.1	Comentários iniciais	134
5.2	Redistribuição de tensões normais e de cisalhamento nas paredes..	135
5.3	Importância das cintas de respaldo e dos lintéis	135
5.4	Tensões normais e de cisalhamento em seções transversais verticais	136
5.5	Sugestões para procedimento de verificação das paredes.....	137
5.6	Continuidade da pesquisa.....	141
Referências.....		142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Edifício Ronan Point no Reino Unido, em 1968. Fonte: Laranjeiras (2011).	3
Figura 2.1 – Exemplo de colapso progressivo. Fonte: El Debs (2000).	6
Figura 2.2 – À esquerda, exemplo de estrutura sem redundância; à direita, exemplo de estrutura redundante. Fonte: adaptado de Laranjeiras (2011).	8
Figura 2.3 – Metodologias e estratégias para prevenção do colapso progressivo. Fonte: adaptado de Melo (2015).	9
Figura 2.4 – Exemplo de localização dos trechos de paredes externas a serem removidos. Fonte: adaptado de GSA (2016).	12
Figura 2.5 – Exemplo de localização dos trechos de paredes internas a serem removidos. Fonte: adaptado de GSA (2016).	12
Figura 2.6 – Detalhe da armadura de laje maciça sobre apoios.	14
Figura 2.7 – Opção para detalhe contra colapso progressivo em painéis de lajes pré- moldadas sem ligação entre estes. Fonte: Parsekian (2012).	15
Figura 2.8 – Opção para detalhe contra colapso progressivo em painéis de lajes pré- moldadas com ligação entre estes (a armadura negativa deve ser maior que 1,5 cm ² /m). Fonte: Parsekian (2012).	15
Figura 2.9 – Detalhe da ligação entre painéis de lajes pré-moldadas. Fonte: Parsekian (2012).	16
Figura 2.10 – Idealização de sistemas (a) em série e (b) em paralelo. Fonte: adaptado de Nogueira (2010) apud Felipe (2017).	17
Figura 2.11 – Representação do diagrama de Venn para a determinação do EC. Fonte: Felipe (2017).	18
Figura 2.12 – Diagrama unifilar das paredes em planta. Fonte: Felipe (2017).	19
Figura 2.13 – Coeficiente de vulnerabilidade para o colapso estrutural (CVC) via FORM. Fonte: Felipe (2017).	19
Figura 2.14 – Edificação em alvenaria estrutural sobre pilotis em concreto armado. Fonte: Barbosa (2000).	20
Figura 2.15 – Ação conjunta do sistema parede-viga. Fonte: adaptado de Haseltine & Moore (1981).	21

Figura 2.16 – Tensões verticais de tração na interface parede-viga. Fonte: Barbosa (2000).	22
Figura 2.17 – Distribuição de tensões no sistema parede-viga. Fonte: adaptado de Barbosa (2000).	22
Figura 2.18 – Esforços na viga de um sistema parede-viga. Fonte: Barbosa (2000).	23
Figura 2.19 – Distribuições aproximadas de tensões adotadas por Davies e Ahmed. Fonte: Barbosa (2000).	24
Figura 2.20 – Modelagens típicas para alvenaria estrutural. (a) Trecho de uma estrutura em alvenaria; (b) Micro-modelagem detalhada; (c) Micro-modelagem simplificada; (d) macro-modelagem. Fonte: adaptado de Lourenço (1996).	26
Figura 2.21 – Planta baixa da modelagem tridimensional dos painéis de contraventamento com elementos de barra. Fonte: Nascimento Neto (1999).	27
Figura 2.22 – Modelagem das paredes do pórtico tridimensional. Fonte: Nascimento Neto (1999).	28
Figura 2.23 – Esquema de disposição das barras do modelo de barras equivalentes (dimensões em metros).	29
Figura 2.24 – Ilustração do modelo tridimensional em barras equivalentes discretizado no SAP2000®.	30
Figura 2.25 – Modelo do lintel adotado na análise. Fonte: Barbosa (2017).	31
Figura 2.26 – Discretização do lintel A em modelo de barras equivalentes via SAP2000®. Fonte: Barbosa (2017).	31
Figura 2.27 – Janela de configuração do fator de modificação da rigidez das seções transversais. Fonte: SAP2000®.	32
Figura 3.1 – Planta de fiadas do edifício do Caso I.	36
Figura 3.2 – Fôrma da estrutura de transição do Caso I.	37
Figura 3.3 – Intensidade (kN/m) das cargas verticais uniformemente distribuídas aplicadas no topo de cada pavimento do Caso I.	38
Figura 3.4 – Indicação das paredes removidas nos Modelos 2a, 2b e 3, em planta.	39
Figura 3.5 – Planta de fiadas do edifício do Caso II.	40
Figura 3.6 – Planta de fiadas do apartamento do Caso II.	41
Figura 3.7 – Estrutura de transição no trecho do apartamento modelado.	42

Figura 3.8 – Intensidade (kN/m) das cargas verticais uniformemente distribuídas aplicadas no topo de cada pavimento do Caso II.	43
Figura 3.9 – Indicação das paredes removidas nos Modelos 2 e 3, em planta.	44
Figura 4.1 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	46
Figura 4.2 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 25, do primeiro ao quarto pavimento.	48
Figura 4.3 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-2, do primeiro ao quarto pavimento.	51
Figura 4.4 – Indicação do trecho removido no Modelo 3 (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para remoção no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	53
Figura 4.5 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-1, do primeiro ao quarto pavimento.	54
Figura 4.6 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 16, do primeiro ao quarto pavimento.	56
Figura 4.7 – Grupos de paredes da Parede 16.	57
Figura 4.8 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para as remoções no sexto pavimento, em vista tridimensional.	59
Figura 4.9 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 25, do terceiro ao nono pavimento.	60
Figura 4.10 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-2, do terceiro ao nono pavimento.	64
Figura 4.11 – Indicação do trecho removido no Modelo 3 (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para remoção no sexto pavimento, em vista tridimensional.	67
Figura 4.12 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-1, do terceiro ao nono pavimento.	68
Figura 4.13 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 16, do terceiro ao nono pavimento.	71

Figura 4.14 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e dos trechos de análise das forças normais nas cintas de respaldo (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	76
Figura 4.15 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 25 e 13-2, no segundo pavimento, ao longo do comprimento.	77
Figura 4.16 – Esforços de tração e compressão nas barras da Parede 13-2, Modelo 2b, segundo pavimento.	78
Figura 4.17 – Indicação dos trechos removidos no Modelo 3 (à esquerda) e dos trechos de análise das forças normais nas cintas de respaldo (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	79
Figura 4.18 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 25 e 13-2, no segundo pavimento, ao longo do comprimento.	80
Figura 4.19 – Esforços de tração e compressão nas barras da Parede 13-1, Modelo 3, segundo pavimento.	81
Figura 4.20 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 25 e 13-2, no sétimo pavimento, ao longo do comprimento.	82
Figura 4.21 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) da Parede 13-1, no sétimo pavimento, ao longo do comprimento.	83
Figura 4.22 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e das seções verticais estabelecidas para análise das tensões normais (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	85
Figura 4.23 – Tensões em viga-parede com $l/h = 1$. Fonte: Araújo (2014).	86
Figura 4.24 – Tensões normais nas seções das Paredes 25 e 13-2, para remoções no primeiro pavimento.	87
Figura 4.25 – Tensões normais na seção S2 da Parede 25, para remoções no primeiro pavimento.	87
Figura 4.26 – Indicação dos trechos removidos no Modelo 3 (à esquerda) e das seções verticais estabelecidas para análise das tensões normais (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	88
Figura 4.27 – Tensões normais nas seções da Parede 13-1, no Modelo 3, para remoções no primeiro pavimento.	89
Figura 4.28 – Tensões normais nas seções das Paredes 25 e 13-2, nos Modelos 2a e 2b, para remoções no sexto pavimento.	89

Figura 4.29 – Tensões normais nas seções da Parede 13-1, no Modelo 3, para remoções no sexto pavimento.	90
Figura 4.30 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura na Parede 25, considerando os Modelos 2a e 2b, para remoções no primeiro pavimento.	92
Figura 4.31 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura na Parede 13-1, considerando o Modelo 3, para remoções no primeiro pavimento.	92
Figura 4.32 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura na Parede 25, considerando os Modelos 2a e 2b, para remoções no sexto pavimento.	93
Figura 4.33 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura na Parede 13-1, considerando o Modelo 3, para remoções no sexto pavimento.	93
Figura 4.34 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	96
Figura 4.35 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 05 no primeiro e no segundo pavimento.	97
Figura 4.36 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 07 no primeiro e no segundo pavimento.	99
Figura 4.37 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 11 no primeiro e no segundo pavimento.	101
Figura 4.38 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 05 no quinto e no sexto pavimento.	103
Figura 4.39 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 07 no quinto e no sexto pavimento.	103
Figura 4.40 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 11 no quinto e no sexto pavimento.	104
Figura 4.41 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 05 no nono e no décimo pavimento.	107
Figura 4.42 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 07 no nono e no décimo pavimento.	107
Figura 4.43 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 11 no nono e no décimo pavimento.	108

Figura 4.44 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2 e 3 (à esquerda) e dos trechos de análise das forças normais nas cintas de respaldo (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	111
Figura 4.45 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 12 e 05, no segundo pavimento, ao longo do comprimento.	113
Figura 4.46 – Esforços de tração e compressão nas barras das Paredes 12 e 05, Modelo 2, para remoções no primeiro pavimento.....	114
Figura 4.47 – Esforços de tração e compressão nas barras das Paredes 12 e 05, Modelo 3, para remoções no primeiro pavimento.....	114
Figura 4.48 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) da Parede 11, no segundo pavimento, ao longo do comprimento.	115
Figura 4.49 – Esforços de tração e compressão nas barras da Parede 11, Modelo 3, para remoções no primeiro pavimento.	116
Figura 4.50 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 12 e 05, no sexto pavimento, ao longo do comprimento.	117
Figura 4.51 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) da Parede 11, no sexto pavimento, ao longo do comprimento.	118
Figura 4.52 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 12 e 05, no décimo pavimento, ao longo do comprimento.	119
Figura 4.53 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) da Parede 11, no décimo pavimento, ao longo do comprimento.	120
Figura 4.54 – Esforços de tração e compressão nas barras da Parede 11, Modelo 3, para remoções no nono pavimento.	121
Figura 4.55 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2 e 3 (à esquerda) e das seções verticais estabelecidas para análise das tensões normais (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	123
Figura 4.56 – Tensões normais nas seções verticais da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para remoção no primeiro pavimento.	124
Figura 4.57 – Tensões normais nas seções verticais da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para remoção no quinto pavimento.	124
Figura 4.58 – Tensões normais na seção vertical S2 da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para as remoções no quinto e no nono pavimento ocorridas separadamente.	125

Figura 4.59 – Tensões normais nas seções verticais da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para remoção no nono pavimento.	125
Figura 4.60 – Tensões normais na seção vertical S2 da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para remoção no nono pavimento.	126
Figura 4.61 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2 e 3 (à esquerda) e da seção vertical estabelecida para análise das tensões normais (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.	127
Figura 4.62 – Tensões de cisalhamento nos Modelos 1 e 3 ao longo da altura na Parede 11, para remoções no primeiro, no quinto e no nono pavimento.	128
Figura 4.63 – Tensões normais na base da Parede 05 no primeiro e no segundo pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no primeiro pavimento.	130
Figura 4.64 – Tensões normais na base da Parede 05 no quinto e no sexto pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no quinto pavimento.	130
Figura 4.65 – Tensões normais na base da Parede 05 no nono e no décimo pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no nono pavimento.	131
Figura 4.66 – Tensões normais na base da Parede 07 no primeiro e no segundo pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no primeiro pavimento.	132
Figura 4.67 – Tensões normais na base da Parede 07 no quinto e no sexto pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no quinto pavimento.	132
Figura 4.68 – Tensões normais na base da Parede 07 no nono e no décimo pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no nono pavimento.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Deformações dos lintéis A, B e C obtidas com o modelo de barras equivalentes. Fonte: adaptado de Barbosa (2017).	32
Tabela 2.2 – Fator de cisalhamento necessário em cada lintel. Fonte: adaptado de Barbosa (2017).	33
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas adotadas de acordo com os pavimentos do Caso I.	36
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas adotadas de acordo com os pavimentos do Caso II.	41
Tabela 4.1 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 25, com remoções de parede no primeiro pavimento.	49
Tabela 4.2 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 13-2, com remoções de parede no primeiro pavimento.....	52
Tabela 4.3 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 13-1, com remoção de parede no primeiro pavimento.	55
Tabela 4.4 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 16, com remoção de parede no primeiro pavimento.	58
Tabela 4.5 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 25, com remoção de parede no sexto pavimento.	62
Tabela 4.6 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 13-2, com remoções de parede no sexto pavimento.	66
Tabela 4.7 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 13-1, com remoções de parede no sexto pavimento.	70
Tabela 4.8 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 16, com remoções de parede no sexto pavimento.....	73
Tabela 4.9 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 05, com remoções de parede no primeiro pavimento.	98
Tabela 4.10 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 07, com remoções de parede no primeiro pavimento.....	100
Tabela 4.11 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 11, com remoções de parede no primeiro pavimento.....	101

Tabela 4.12 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 05, com remoções de parede no quinto pavimento.	105
Tabela 4.13 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 07, com remoções de parede no quinto pavimento.	105
Tabela 4.14 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 11, com remoções de parede no quinto pavimento.	106
Tabela 4.15 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 05, com remoções de parede no nono pavimento.	109
Tabela 4.16 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 07, com remoções de parede no nono pavimento.	109
Tabela 4.17 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 11, com remoções de parede no nono pavimento.	110

CAPÍTULO 1

Introdução

Embora constitua um sistema construtivo antigo, a alvenaria estrutural tem recebido maior atenção recentemente no Brasil, mostrando-se competitiva frente à tradicional construção em concreto armado em termos de custos, rapidez na execução e racionalização. Atribuída somente a construções populares até a década de 80, a alvenaria estrutural passou a ser utilizada na construção de edifícios altos e de maior padrão, fruto de resultados de pesquisa para o desenvolvimento dos materiais, dos modelos de cálculo e de atualizações nas normas brasileiras.

A experiência tem demonstrado que o emprego da alvenaria estrutural pode trazer vantagens técnicas e econômicas como: redução de custos, simplificação das técnicas de execução, menor diversidade dos materiais empregados, redução da mão-de-obra e rapidez na execução. Isso permite uma melhor inserção e disseminação no mercado, especialmente junto às classes média e baixa (BARBOSA, 2000).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura (IBDA), o extraordinário crescimento do mercado imobiliário nos últimos anos tem levado ao aumento na demanda por sistemas construtivos que aliem economia e qualidade técnica.

Medeiros (2015) comenta que, com o objetivo de aproveitar cada vez mais os ambientes coletivos dos empreendimentos, os construtores desejam utilizar o subsolo e o térreo como áreas de convívio comunitário e estacionamento. Assim, para possibilitar a existência de vãos livres em edifícios de alvenaria estrutural, torna-se necessária a utilização de pilotis em concreto armado, formando uma estrutura de transição. Além disso, este arranjo estrutural também pode ser aplicado quando o edifício de alvenaria estrutural é construído em solos que não suportam fundações diretas, tal como o radier, que é largamente utilizado nesse tipo de construção. Dessa forma, projetistas e pesquisadores vêm tentando desenvolver técnicas de análise que simulem mais adequadamente o comportamento real das estruturas de alvenaria,

especialmente quando há estruturas de transição, permitindo uma utilização mais racional dos materiais e dos espaços, bem como o desenvolvimento de projetos mais econômicos, fundamentados em teorias melhor elaboradas.

Conforme comentado por Barbosa (2000), pela existência do chamado “efeito arco”, cargas aplicadas pela alvenaria estrutural em vigas de concreto armado sobre apoios discretos, como pavimentos de pilotis e fundações sobre estacas, tendem a ser muito diferentes dos valores uniformes usualmente adotados. Assim, pode-se superestimar os esforços nestas estruturas pela adoção incorreta do carregamento a que estão submetidas e, por outro lado, existem concentrações de tensões na alvenaria que comumente deixam de ser consideradas.

Estes níveis de tensões tornam-se incertos quando se leva em consideração que muitos proprietários, em reformas indevidas, tendem a modificar o layout da planta, sendo levados ao erro de remover ou alterar paredes estruturais sem estudo prévio e acompanhamento profissional, o que pode acarretar no aparecimento de fissuras, deformações excessivas ou mesmo no colapso parcial ou total da estrutura.

De acordo com Laranjeiras (2011), o colapso parcial do edifício de apartamentos Ronan Point, em Londres, em maio de 1968, despertou a atenção do meio técnico para o fenômeno do colapso progressivo, e esse interesse tem crescido exponencialmente, nos últimos anos. A estrutura de 22 andares, que era constituída de painéis portantes pré-moldados, sofreu uma explosão de gás na cozinha do 18º andar que destruiu o painel portante da fachada e, conseqüentemente, o colapso da laje da cozinha se propagou para os demais andares, conforme ilustrado pela Figura 1.1.

O colapso progressivo consiste na ruína parcial de uma grande parte da estrutura ou total, resultado da propagação dos efeitos de um dano inicial, devido a fenômenos excepcionais (terremotos, tornados, atentados terroristas), erros de projetos, sobrecargas imprevistas, reformas, etc. O fenômeno é particularmente preocupante, pois o colapso progressivo é desproporcional ao evento que o aciona, de forma que pequenos eventos podem ter conseqüências catastróficas (NAIR, 2007).

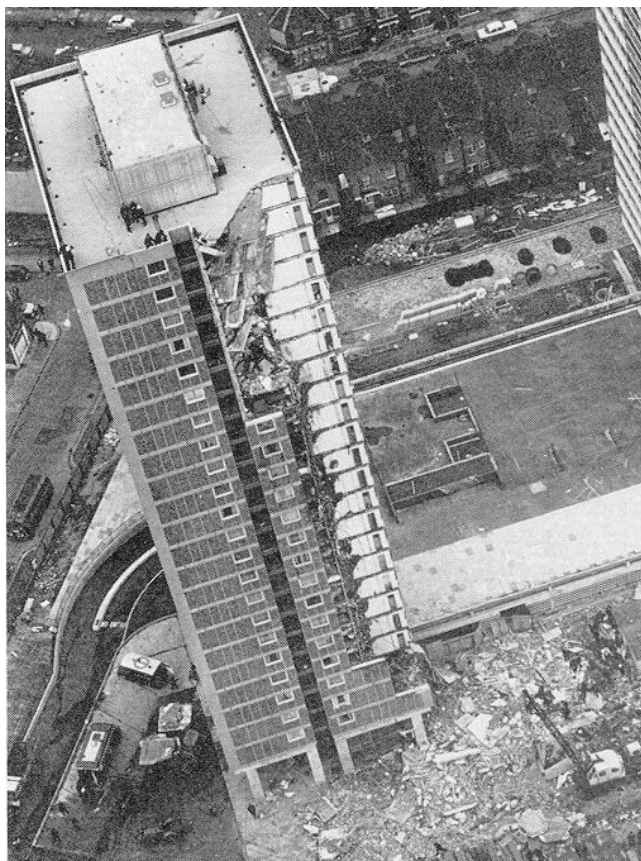


Figura 1.1 – Edifício Ronan Point no Reino Unido, em 1968. Fonte: Laranjeiras (2011).

Predomina, atualmente, o convencimento da necessidade de normas e procedimentos específicos de projeto para prevenção do colapso progressivo nas edificações, vez que as concepções e análises estruturais exigidas diferem substancialmente das usuais da prática de projeto (LARANJEIRAS, 2011).

No Brasil, por exemplo, a NBR 6118 (2014) faz apenas duas citações sobre o tema: no item 10.3, onde se diz que a estrutura deve ser verificada para o “estado-limite último de colapso progressivo” e no item 19.5.4, dentro das prescrições de dimensionamento de lajes à punção, onde se recomenda uma armadura na laje, sobre os pilares, “para garantir a ductilidade local e a consequente proteção contra o colapso progressivo”. No caso da NBR 9062 (2017), para o projeto das estruturas pré-moldadas, recomenda-se que “devem ser tomados cuidados especiais na organização geral da estrutura e nos detalhes construtivos de forma a minimizar a possibilidade de colapso progressivo”.

As normas de alvenaria estrutural de bloco cerâmico e de bloco de concreto, NBR 15812-1 (2010) e NBR 15961-1 (2011), respectivamente, apresentam um anexo apenas de caráter informativo tratando sobre dano acidental e colapso progressivo, já demonstrando a preocupação da engenharia brasileira com esses assuntos; preocupação crescente com a queda de três edifícios no centro do Rio de Janeiro no início de 2012 (HAACH, 2015).

Por outro lado, nos Estados Unidos, o documento GSA (2016) de título “Análise dos caminhos alternativos e diretrizes de projeto para resistência ao colapso progressivo”, da Administração de Serviços Gerais, agência do governo americano, apresenta procedimento de análise para estruturas de aço, concreto armado, alvenaria armada ou não armada, entre outras. O documento estabelece um procedimento para escolha hipotética dos elementos estruturais do edifício a serem afetados e removidos e, a partir daí, a estrutura deve ser verificada segundo critérios de aceitação estabelecidos pelo mesmo.

1.1 Justificativa

Como a alvenaria estrutural também tem função de vedação e compartimentação, não se deve realizar reformas acidentais fazer modificações em um layout estrutural já construído. Entende-se reforma acidental como uma reforma indevida, inadvertida, geralmente sem acompanhamento técnico, tratando-se, portanto, de uma situação transitória, em que ocorreu um dano estrutural e há necessidade de reparo posterior. Para evitar este problema, as empresas construtoras fornecem opções diferenciadas em planta ou executam paredes internas que não tenham função estrutural. Ainda assim, estas soluções não garantem a impossibilidade de um usuário realizar, deliberadamente, alterações nas paredes estruturais existentes. Essa situação particular do projeto potencializa a possibilidade de ocorrência de efeitos danosos (fissuração, deformações excessivas ou colapso progressivo) que podem ocorrer com a estrutura ao se retirar, inadvertidamente, parte ou o total de uma parede estrutural. Diante desses aspectos, torna-se evidente a importância da avaliação da capacidade de redistribuição de esforços nos edifícios de alvenaria estrutural quando se verifica a remoção total ou parcial, de maneira inadvertida, de paredes estruturais.

Além disso, sobre o colapso progressivo, as normas brasileiras tratam do tema apenas superficialmente. Com a escassez de trabalhos sobre estes temas relacionados aos edifícios em alvenaria estrutural, há a necessidade de conhecimento claro durante a elaboração do projeto, ou mesmo em uma análise por modelagem em elementos finitos, sobre a capacidade de redistribuição de tensões nestes edifícios. Assim, este trabalho surge da necessidade de estudos sobre estes aspectos relacionados à alvenaria estrutural, de modo que se possa avaliar, a partir de uma análise simplificada, as implicações nos elementos estruturais preliminarmente à possibilidade de ocorrência de um colapso progressivo.

1.2 Objetivo Geral

A pesquisa teve como objetivo principal avaliar a redistribuição de tensões em edificações de alvenaria estrutural, utilizando a modelagem desenvolvida por Nascimento Neto et al. (2014) para simular computacionalmente situações não previstas em projeto de remoção parcial ou total de paredes do edifício.

Mais especificamente, os objetivos da pesquisa podem ser definidos como os que seguem:

- Avaliar as modificações na distribuição de tensões normais e de cisalhamento após a remoção de trechos de parede do edifício;
- Identificar a influência da modificação das tensões em pavimentos superiores e inferiores aos trechos de alvenaria removidos;
- Avaliar a importância de cintas e de lintéis na redistribuição ocorrida;
- Identificar a influência de estruturas de transição na redistribuição das tensões nas paredes;
- Sugerir verificações necessárias para análises de redistribuição de tensões devido às reformas acidentais consideradas.

CAPÍTULO 2

Revisão de literatura

2.1 Colapso Progressivo

O termo “colapso progressivo” é usado para identificar a propagação de uma ruptura inicial, localizada, de modo semelhante a uma reação em cadeia que conduz à ruptura parcial ou total de um edifício. A característica básica do colapso progressivo é a de que o estado final da ruptura é desproporcionalmente maior do que a ruptura que deu início ao colapso (LARANJEIRAS, 2011).

De acordo com El Debs (2000), o colapso progressivo também pode ser chamado de “ruína em cadeia” ou, ainda, de acordo com Laranjeiras (2011), “colapso desproporcional”.

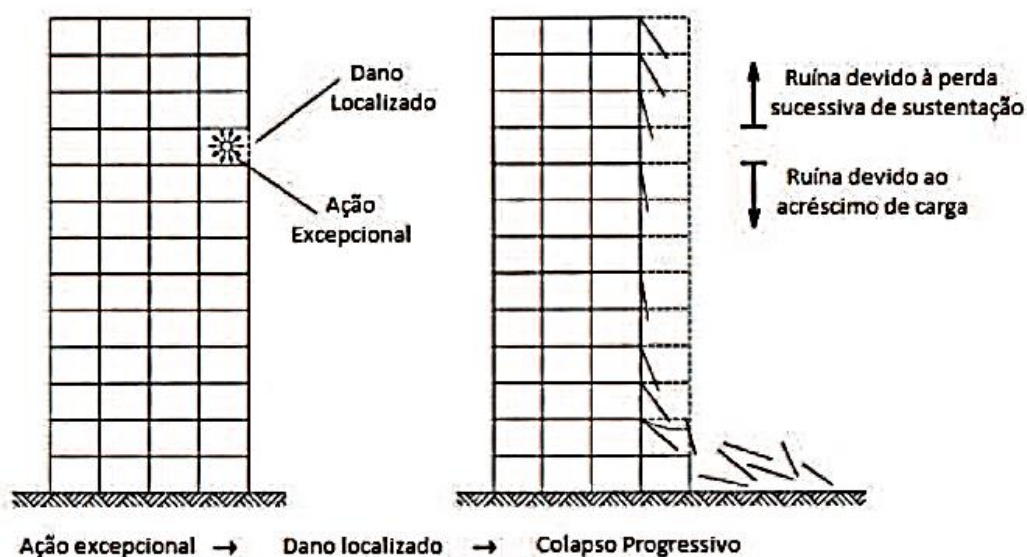


Figura 2.1 – Exemplo de colapso progressivo. Fonte: El Debs (2000).

Na Figura 2.1, ilustra-se a ocorrência do colapso progressivo. Este dano provoca a ruína dos painéis acima do dano por perda de sustentação, que por sua vez

provocam a ruína por acréscimo de carga dos painéis abaixo do pavimento onde ocorre o dano localizado.

De acordo com Laranjeiras (2011), os colapsos progressivos de edifícios em uso ocorrem por diferentes causas, que incluem:

- Erros de projeto ou de construção;
- Ações variáveis abusivas, que extrapolam as envoltórias de ações e combinações consideradas, ou que não foram explicitamente adotadas em projeto;
- Ações excepcionais, tais como explosão de gás, explosão de bombas, colisão de veículos, colisão de aviões, ações ambientais extremas (tornados, por ex.), capazes de solicitar a estrutura além da envoltória de ações considerada em projeto.

Acrescenta-se, ainda, ao primeiro item as alterações indevidas no layout, especialmente quando se trata de um edifício de alvenaria estrutural.

Conforme El Debs (2000), para reduzir o risco do colapso progressivo são empregados normalmente três procedimentos, que podem ser combinados entre si:

- Reduzir o risco da ocorrência de ações excepcionais;
- Projetar a estrutura para suportar as cargas excepcionais;
- Prevenir a propagação de uma possível ruína localizada.

O terceiro procedimento é o mais utilizado, pois o primeiro tem um alcance limitado diante da dificuldade de prever tais ações e o segundo se torna oneroso além de ser difícil de quantificar essas cargas.

Nesse caso, parte-se do pressuposto de que a ruptura dos elementos não é impossível e então se deve prover a estrutura de reforços capazes de propiciar caminhos alternativos para transferência das forças (EL DEBS, 2000).

Assim, Khandelwal (2008) comenta que os sistemas carecem de robustez, tornando-os aptos a absorver ou a dissipar a energia que resulta de danos localizados. Entende-se robustez como a capacidade de uma estrutura resistir a eventos extremos como incêndios, explosões, impactos ou consequência de erros humanos, sem ser danificada de maneira desproporcional ao dano original. Melo (2015) também ressalta

que quanto mais robusta for uma estrutura, menos suscetível ao colapso progressivo ela será.

De acordo com Laranjeiras (2011), os atributos de um sistema estrutural que lhe garantem integridade e robustez são:

- a continuidade, que se caracteriza pela sua capacidade em redistribuir esforços, após um dano;
- a redundância, que se caracteriza pela disponibilidade de alternativas diversas de redistribuir os esforços;
- a ductilidade, que se caracteriza pela sua capacidade de plastificação, de suportar extensas deformações antes de romper-se.

A Figura 2.2 ilustra exemplos de avaliação da redundância em estruturas.



Figura 2.2 – À esquerda, exemplo de estrutura sem redundância; à direita, exemplo de estrutura redundante. Fonte: adaptado de Laranjeiras (2011).

Para Melo (2015), a abordagem de controle do Colapso Progressivo se divide em dois ramos: Abordagem Não Estrutural e Abordagem Estrutural. Na primeira, há a preocupação de prevenir que a estrutura não seja exposta a eventos que possam desencadear o colapso progressivo. Para isso, são tomadas medidas de segurança de caráter exclusivamente preventivo. Assim, esta abordagem também é conhecida como Controle de Eventos. Na segunda opção, considera-se que o evento desencadeador do colapso progressivo já ocorreu e que se deve voltar a atenção em verificar se a estrutura vai ser capaz de resistir aos esforços solicitantes calculados. A

Figura 2.3 ilustra um esquema com as abordagens sobre a prevenção do colapso progressivo.

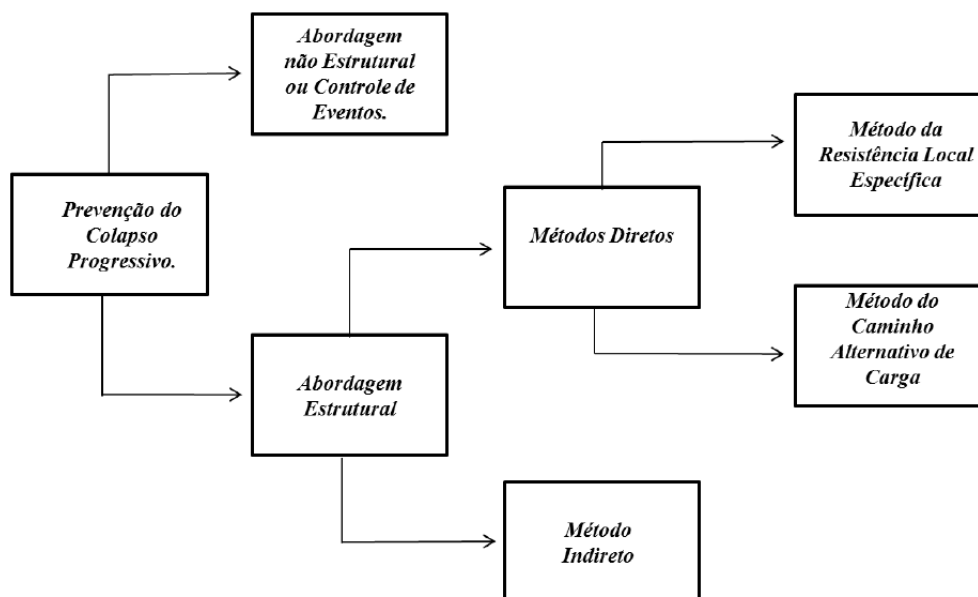


Figura 2.3 – Metodologias e estratégias para prevenção do colapso progressivo. Fonte: adaptado de Melo (2015).

Conforme apresentado por Laranjeiras (2011), no caso da abordagem estrutural, existem dois métodos para projetar estruturas de edifícios resistentes ao colapso progressivo: o método indireto e o método direto.

O método indireto é um processo simplificado, que consiste em prover robustez à estrutura a partir de medidas práticas, sem se recorrer a uma análise mais complexa. De acordo com Laranjeiras (2011), isso é conseguido por medidas de melhoria da integridade estrutural desde a seleção do sistema estrutural, ao posicionamento dos elementos estruturais, ao dimensionamento das peças e detalhamento das ligações. Desse modo, o método indireto pode ser tomado como um método inicial a ser usado para aumentar a robustez dos edifícios.

No caso das estruturas de alvenaria, sua modulação e rigidez contribuem na prevenção do colapso progressivo, pois, em geral são estruturas de baixa deslocabilidade e apresentam um efeito favorável conhecido como efeito arco que confere à alvenaria a capacidade de redistribuição de esforços (HAACH, 2015). O Instituto Nacional de Normas e Tecnologia dos Estados Unidos, por meio de seu

documento NISTIR 7396 (2007), estabelece que em estruturas de alvenaria deve-se prover amarrações de modo a maximizar a redundância e a continuidade.

Já o método direto consiste na análise da estrutura e no dimensionamento dos elementos para resistir a uma determinada ação excepcional ou para que se garanta a transferência das cargas por caminhos alternativos no entorno do dano local.

Ainda de acordo com Laranjeiras (2011), quando o método é aplicado com a finalidade de aumentar a resistência de elementos estruturais para resistir a uma ação excepcional específica, ganha a designação de “Método da Resistência Localizada Específica” (MRLE); e quando visa prover que a estrutura seja capaz de transferir as cargas de um local em colapso, é identificado como “Método de Caminhos Alternativos de Carga” (MCAC).

O MRLE consiste em projetar explicitamente os elementos de sustentação das cargas verticais para resistir uma ação excepcional prevista. Assim, por exemplo, as pressões de uma explosão podem ser consideradas explicitamente em projeto com auxílio de métodos de análise não-linear dinâmica (LARANJEIRAS, 2011).

Já o MCAC consiste em projetar a estrutura para suportar cargas por caminhos alternativos de transferência de esforços, em caso de perda de um elemento importante de sustentação do edifício. O MCAC permite uma verificação formal da capacidade do sistema estrutural resistir à remoção de elementos específicos, tais como de um pilar de fachada. O método não exige a caracterização específica do que teria provocado a remoção do pilar, sendo, portanto, uma abordagem independente do tipo de ação excepcional (LARANJEIRAS, 2011).

A GSA (2016) estabelece um procedimento de acordo com o MCAC, de modo que se satisfaça determinados requerimentos de combate ao colapso progressivo, considerando a remoção de elementos estruturais específicos. O método é baseado no Fator de Carga e Resistência de Projeto (LRFD, do inglês “Load and Resistance Factor Design”) empregando uma versão modificada do fator de combinação para eventos excepcionais e fatores de resistência para definir as resistências de projeto, sendo tais fatores obtidos na ASCE 7 (2013). Três procedimentos são empregados: Análise Estática Linear (LSP, do inglês “Linear Static Procedure”), Análise Estática Não-Linear (NSP, do inglês “Nonlinear Static Procedure”) e Análise Dinâmica Não-Linear (NDP, do inglês “Nonlinear Dynamic Procedure”). O uso da LSP é limitado a

estruturas de dez pavimentos ou menos. Estes procedimentos seguem as especificações da ASCE 41 (2014), com modificações para considerar a particularidade do colapso progressivo.

De acordo com o LRFD, a resistência de projeto é tomada como o produto do fator de redução da resistência ϕ e a resistência nominal R_n calculada de acordo com as especificações das normas aplicáveis ao material. A resistência de projeto deve ser maior ou igual à resistência requerida, conforme a Equação 2.1.

$$\phi R_n \geq R_u \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em que:

ϕR_n	=	resistência de projeto;
ϕ	=	fator de redução da resistência;
R_n	=	resistência nominal;
$R_u = \sum \gamma_i Q_i$	=	resistência requerida;
γ_i	=	fator de combinação de carga;
Q_i	=	carga considerada.

De maneira geral, a GSA (2016) classifica dois tipos de elementos estruturais a serem consideradas suas remoções: elementos externos e internos. No caso da alvenaria estrutural, para os elementos externos, devem ser consideradas as remoções de pelo menos: trechos de parede localizados no centro do menor lado em planta; trechos de parede localizados no centro do maior lado em planta, e; trechos de canto de parede, com comprimento “H” igual à altura da parede, em cada direção, conforme exemplo ilustrado pela Figura 2.4.

Já para os elementos internos, deve-se analisar a área interna classificando-a de acordo com o controle de acesso de pessoas. Uma vez delimitada a área de acesso público, deve-se considerar remoções de pelo menos: trechos de parede localizados no centro do menor lado em planta; trechos de parede localizados no centro do maior lado em planta, e; trechos de canto de parede localizados dentro da área de acesso público, conforme exemplo ilustrado pela Figura 2.5.

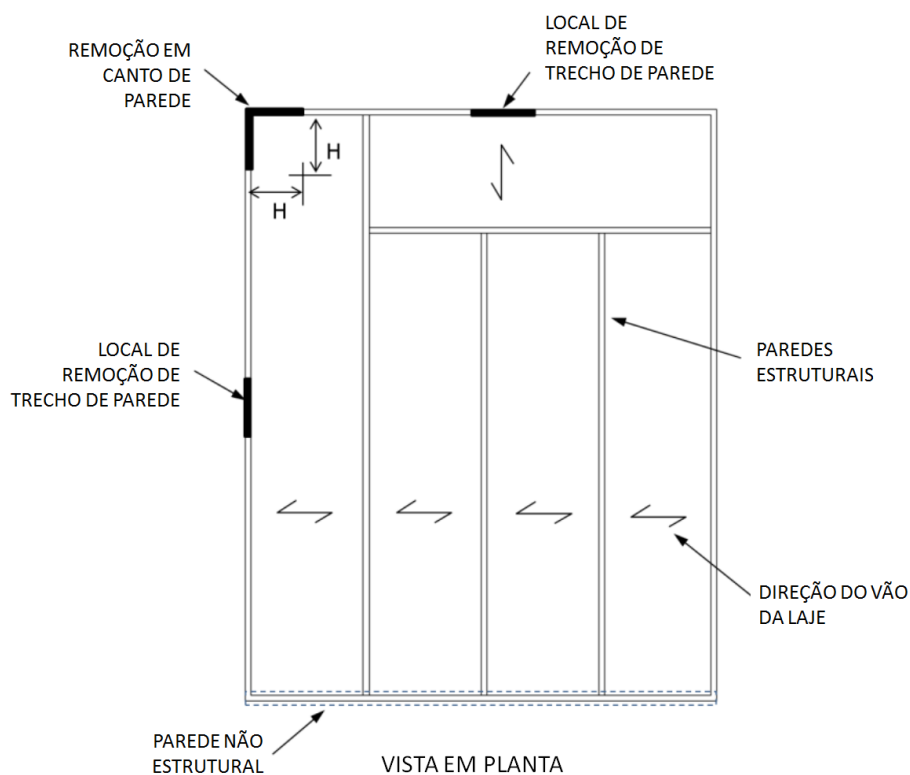


Figura 2.4 – Exemplo de localização dos trechos de paredes externas a serem removidos. Fonte: adaptado de GSA (2016).

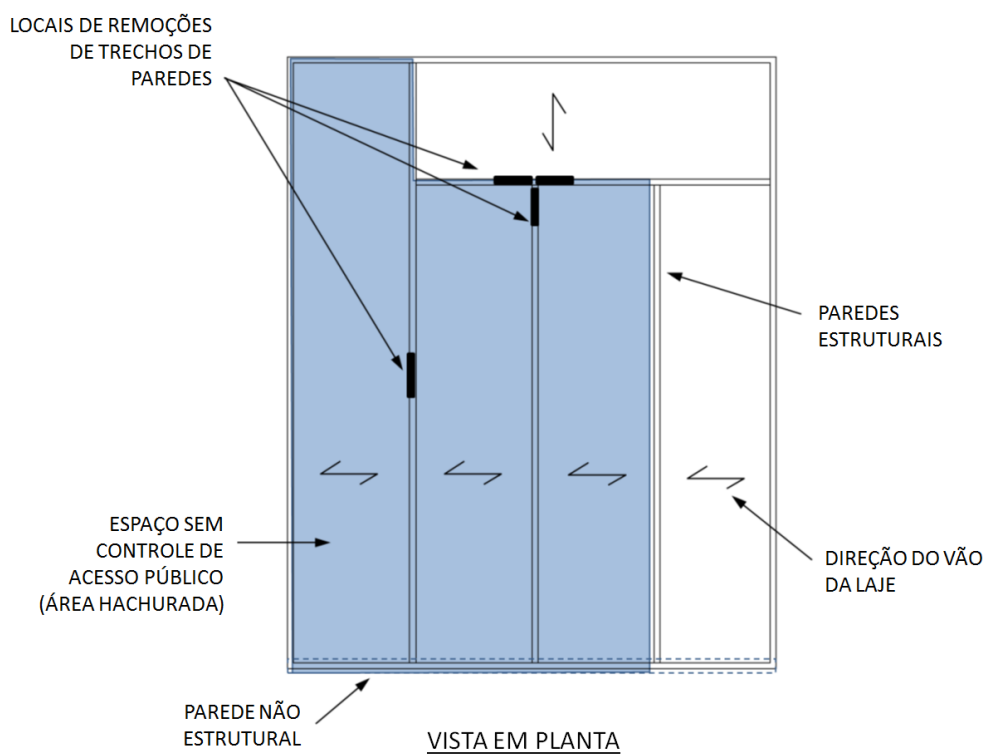


Figura 2.5 – Exemplo de localização dos trechos de paredes internas a serem removidos. Fonte: adaptado de GSA (2016).

De acordo com a GSA (2016), para os três tipos de análise (LSP, NSP e NDP), o edifício satisfaz os requisitos do MCAC se nenhum de seus elementos estruturais, componentes ou conexões excedem os critérios de aceitação estabelecidos neste documento.

A GSA (2016) sugere, ainda, que nada em seu documento deve ser interpretado como substituição a qualquer análise alternativa que seja racional e baseada nos princípios fundamentais da mecânica e da dinâmica, inclusive, cita que métodos simplificados podem ser apropriados e mais eficientes para alguns tipos de edifícios, tais como em edifícios de alvenaria estrutural. De fato, cada tipo de estrutura deve apresentar uma realidade diferente de análise que seja mais racional. Para informações mais detalhadas sobre estes procedimentos, deve-se consultar os Capítulos 3 e 6 da GSA (2016).

Já o Anexo A da NBR 15961-1 (2011), sobre os danos acidentais, recomenda que se deve dar atenção especial aos elementos estruturais que possam estar sujeitos a quaisquer ações fora do conjunto que normalmente é considerado para as estruturas de alvenaria. Esses elementos devem receber basicamente três tipos de cuidados, que podem ser superpostos ou não:

- Proteção contra a atuação das ações excepcionais através de estruturas auxiliares;
- Reforço com armaduras construtivas que possam aumentar a ductilidade;
- Consideração da possibilidade de ruptura de um elemento, computando-se o efeito dessa ocorrência nos elementos estruturais da vizinhança.

Ainda sobre os danos acidentais, este anexo recomenda que devem ser tomadas precauções especiais quanto aos elementos para os quais não seja desprezível a possibilidade de choques provocados por veículos ou equipamentos, bem como a possibilidade de dano decorrente de explosões. De fato, conforme comentado por Parsekian (2012), em todas as situações deve-se tomar o cuidado de prever detalhes para prevenir o colapso progressivo em caso de dano acidental nas paredes onde haja maior possibilidade dessa ocorrência. Entre estas paredes incluem-se:

- Paredes da cozinha e/ou área de serviço com risco de explosão de gás;
- Paredes do térreo em regiões de estacionamento ou acesso de veículos.

Já a respeito da verificação do colapso progressivo, o anexo prescreve que “no caso de dano acidental a um elemento estrutural, deve-se garantir que sua ruptura não possa levar à ruptura de parte significativa da estrutura como um todo”. Por fim, recomenda a utilização dos coeficientes γ_m igual a 1,0 para a alvenaria e para o aço γ_f igual a 1,0 quanto ao carregamento produzido pela suposição de retirada de um elemento danificado. No caso de pavimentos em concreto armado, os elementos de suporte devem ser retirados um de cada vez para a análise.

Parsekian (2012) recomenda ainda, a respeito do detalhamento de laje maciça moldada no local, que sobre os apoios intermediários deve-se fazer o detalhe de emenda das armaduras positivas e dimensionar o painel considerando a possibilidade de o apoio não existir (colapso de uma parede), bem como prover uma armadura concentrada sob cada parede, conforme ilustrado pela Figura 2.6. A armadura positiva deve ser verificada caso um dos apoios tenha de ser removido. Nessa verificação, os coeficientes de segurança das ações e materiais são estes:

- Do material alvenaria = 1,5;
- Do material aço = 1,0;
- Das ações permanentes = 1,0;
- Das ações acidentais = 0,7.

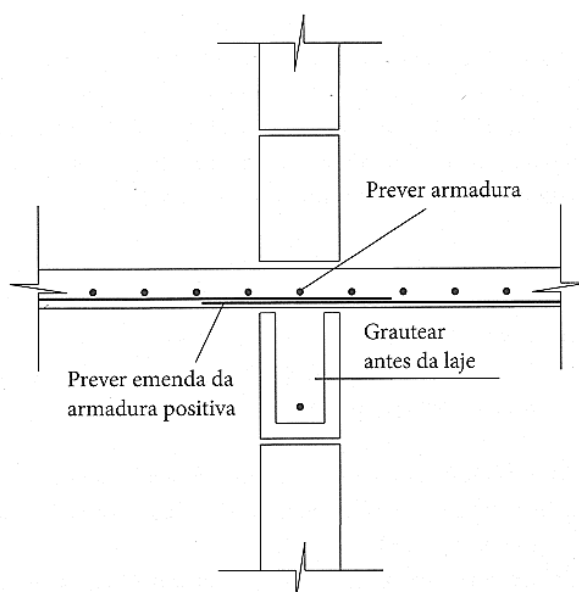


Figura 2.6 – Detalhe da armadura de laje maciça sobre apoios.

Para o caso das lajes pré-moldadas, de acordo com Parsekian (2012), deve-se tomar as seguintes precauções:

- Dimensionar cada painel prevendo a possibilidade de remoção de um dos apoios (as mesmas considerações para laje maciça podem ser feitas aqui);
- Dimensionar a cinta de respaldo incorporando uma viga armada, prevendo que esta pode ser o apoio caso a parede seja removida, conforme ilustrado pela Figura 2.7 e pela Figura 2.8. Nesse caso, o uso de armadura treliçada pode ser eficiente por conter armadura de combate à flexão e cisalhamento. No caso de a ligação da laje ser feita conforme os detalhes da Figura 2.9(b), é possível ainda incorporar esse trecho da laje na viga formando uma seção “T”, desde que a armadura negativa da treliça chegue à região comprimida da viga.

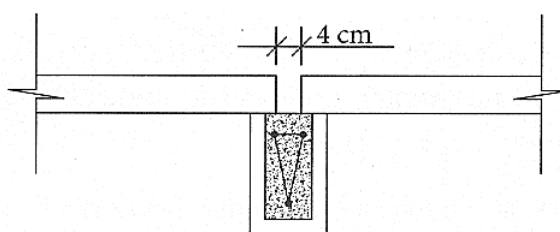


Figura 2.7 – Opção para detalhe contra colapso progressivo em painéis de lajes pré-moldadas sem ligação entre estes. Fonte: Parsekian (2012).

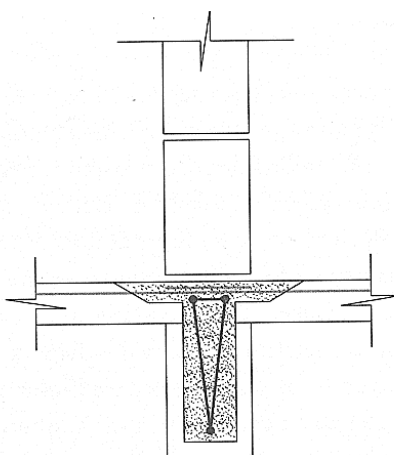


Figura 2.8 – Opção para detalhe contra colapso progressivo em painéis de lajes pré-moldadas com ligação entre estes (a armadura negativa deve ser maior que $1,5 \text{ cm}^2/\text{m}$). Fonte: Parsekian (2012).

Em outros casos, alguns detalhes são indicados na Figura 2.9, cuja opção (b) é a recomendada (pode-se considerar a laje como diafragma rígido na maioria dos casos).

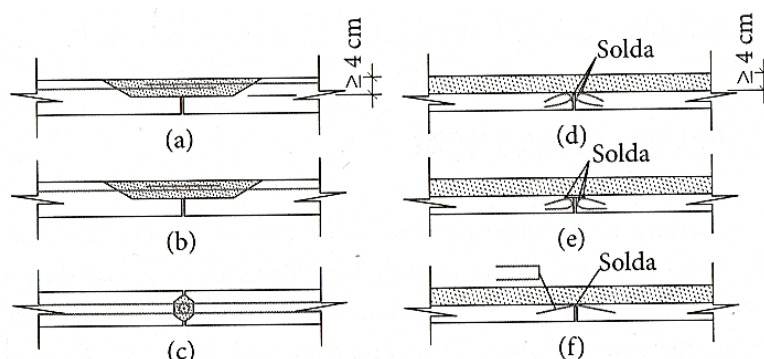


Figura 2.9 – Detalhe da ligação entre painéis de lajes pré-moldadas. Fonte: Parsekian (2012).

Alguns pesquisadores realizaram estudos a respeito do colapso progressivo nos diversos tipos de estruturas. Bittarello (2013) apresentou uma metodologia de estudo do colapso progressivo em pórticos planos de concreto pré-moldado baseada em uma análise geometricamente não linear estática e dinâmica. Em seu trabalho, considerou a remoção arbitrária de elementos de uma estrutura íntegra de modo a simular um colapso local e, assim, estudou a redistribuição dos esforços na estrutura. A metodologia foi verificada em pórticos de três e seis pavimentos, apresentando resultados satisfatórios.

Longo (2014) analisou a ocorrência de colapso progressivo de uma estrutura de concreto armado por meio do MCAC, utilizando as Diretrizes de Projeto para Colapso Progressivo da Administração Geral de Serviços dos Estados Unidos (GSA, 2003), e considerando uma relação demanda-capacidade como critério de aceitação, definida na própria GSA (2003). Foi constatado que a prescrição de uma armadura de proteção distribuída nos bordos inferior e superior da viga, na região dos apoios com os pilares, pode atenuar os efeitos do colapso progressivo.

Para o caso da alvenaria estrutural, Felipe (2017) desenvolveu uma metodologia para avaliar o risco de ocorrência do colapso progressivo neste sistema estrutural, denominada *Rysk Analysis of the Collapse Progressive* (RAPC), sem a necessidade de se preocupar com a causa que gerou o colapso, utilizando uma

abordagem que se baseia na Teoria de Confiabilidade de Sistema. O autor explica que, neste método, a estrutura é idealizada em subsistemas com componentes formados em série e em paralelo. Dessa forma, os eventos que correspondem a uma sequência de falhas estão associados em paralelo, enquanto que as diferentes sequências de falha formam eventos em série. A Figura 2.10 ilustra a idealização destes subsistemas em série e em paralelo.

De acordo com Nogueira (2010) apud Felipe (2017), a falha de um elemento em um sistema em série conduz à falha da estrutura e, portanto, a probabilidade de sobrevivência da idealização em série é medida pela confiabilidade do elemento mais frágil. Já na idealização em paralelo, a resistência do sistema é definida pela resistência de todos os seus elementos, ou seja, se um dos elementos não falha, o sistema também não falha. Neste caso, o elemento com maior confiabilidade controla a falha do sistema.



Figura 2.10 – Idealização de sistemas (a) em série e (b) em paralelo. Fonte: adaptado de Nogueira (2010) apud Felipe (2017).

Então, a ocorrência do colapso progressivo é caracterizada quando a falha de um subsistema levar à falha do sistema (estrutura do edifício), ou seja, a probabilidade de colapso do sistema é dada pelo somatório das probabilidades de colapso dos subsistemas individuais (FELIPE, 2017). Em resumo, o método proposto visa calcular o risco (probabilidade) de colapso progressivo da estrutura e identificar o elemento

chave (EC). De acordo com Felipe (2017), o EC é o elemento estrutural que é ao mesmo tempo vulnerável e importante. Tal conceito é definido conforme coeficientes calculados na formulação do método proposto, tais como coeficiente de vulnerabilidade (CV) e coeficiente de importância (CI). A Figura 2.11 representa o conceito de elemento chave por meio do diagrama de Venn.

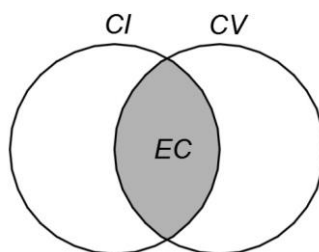


Figura 2.11 – Representação do diagrama de Venn para a determinação do EC. Fonte: Felipe (2017).

Felipe (2017) considerou a ocorrência de falha nas paredes e nas lajes. No caso das paredes estruturais, foi considerado o modo de falha por compressão axial, enquanto que, no caso das lajes, foi adotado o modo de falha por formação de charneiras plásticas. Assim, foram escritas as equações de estados limites para esses modos de falha em termos da Teoria da Confiabilidade de Sistemas. O autor realizou as análises de confiabilidade via FORM (*First Order Reliability Method*) e ISMC (*Importance Sampling Monte Carlo*) através do software StRAnD (*Structural Risk Analysis Design*). Já a análise numérica foi realizada utilizando o software de elementos finitos DIANA®, adotando o modelo estrutural de pórtico tridimensional. Foi implementado um algoritmo em *Fortran* para acoplamento dos softwares DIANA® e StRAnD. A Figura 2.12 ilustra a planta do edifício em estudo utilizado na validação do RAPC, enquanto que a Figura 2.13 apresenta os valores dos coeficientes de vulnerabilidade para o colapso estrutural (CVC) obtidos por Felipe (2017). De acordo com o autor, a partir das definições estabelecidas na pesquisa, a falha do elemento W20 (W21, em simetria) dá início ao caminho mais provável para o colapso progressivo.

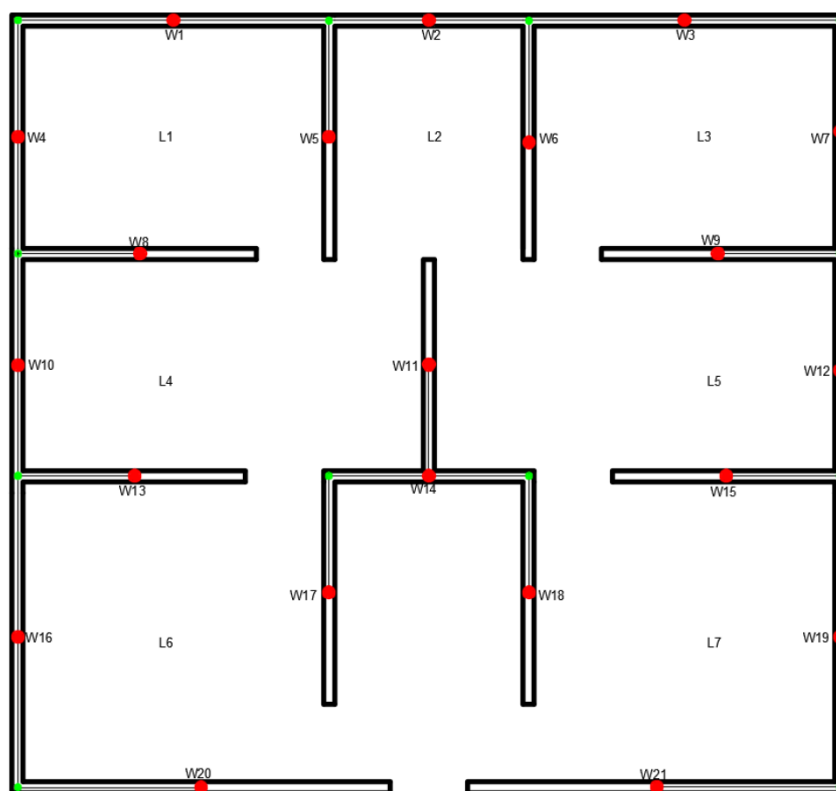


Figura 2.12 – Diagrama unifilar das paredes em planta. Fonte: Felipe (2017).

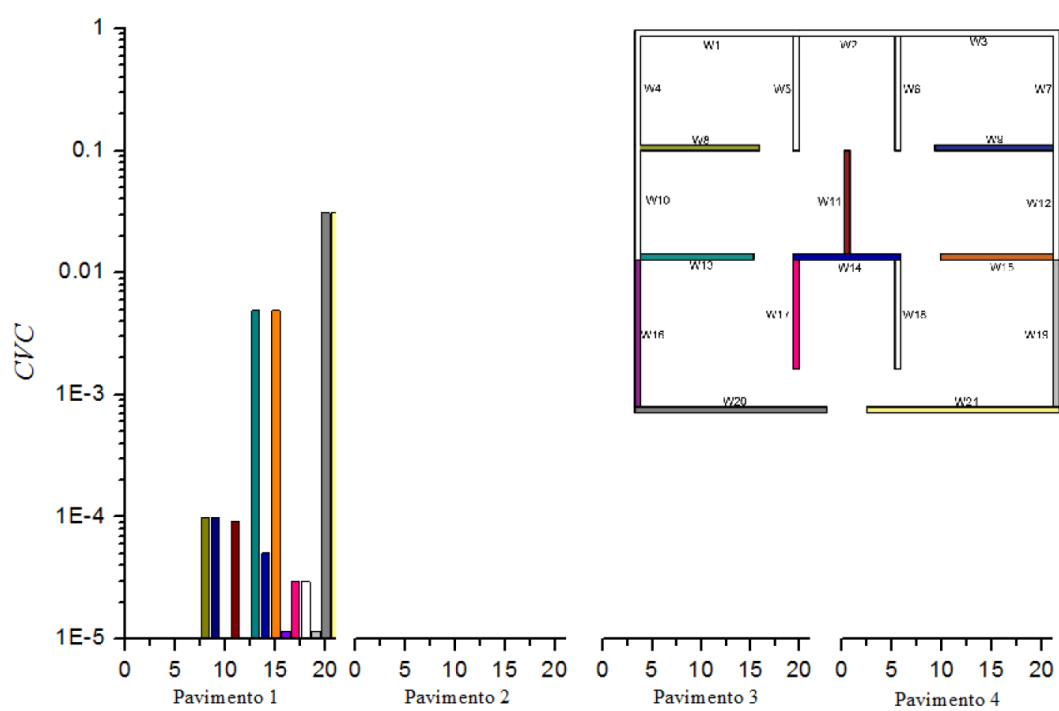


Figura 2.13 – Coeficiente de vulnerabilidade para o colapso estrutural (CVC) via FORM. Fonte: Felipe (2017).

Ressalta-se que, para mais resultados e análises, deve-se consultar Felipe (2017), considerando ser este um trabalho com bastante densidade de informação. Felipe (2017) comenta que a formulação apresentada nesta pesquisa pode ser aplicada para qualquer sistema construtivo, desde que seja possível escrever as equações de estados limites para seus respectivos modos de falha. Entretanto, verifica-se que a mesma se torna complexa para ser aplicada diretamente em escritórios de projetos estruturais. Isso porque as análises de confiabilidade requerem conhecimentos prévios específicos por parte dos projetistas. Além do mais, faz-se necessário a utilização de um software que realize tais análises. Apesar disso, a metodologia se mostrou como uma ferramenta na determinação do colapso progressivo nas estruturas de alvenaria.

2.2 Características do sistema parede-viga

Para possibilitar a existência dos vãos livres em edifícios de alvenaria estrutural, torna-se necessária a utilização de pilotis em concreto armado, conforme ilustrado pela Figura 2.14. Os apoios discretos também podem acontecer em prédios de alvenaria estrutural construídos em solos que não suportam fundações diretas. Nestes casos, as paredes de alvenaria se apoiam em vigas baldrame, que transmitem a carga para estacas ou tubulões (MEDEIROS, 2015).

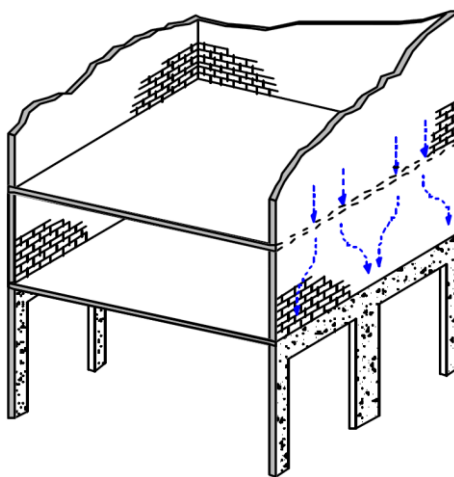


Figura 2.14 – Edificação em alvenaria estrutural sobre pilotis em concreto armado. Fonte: Barbosa (2000).

Conforme descrito por Barbosa (2000), a transferência de carga vertical da parede para a fundação depende do tipo de apoio. Numa parede sobre apoio contínuo, a carga vertical se distribui de forma praticamente uniforme na sua base, com pequena transferência de carga do centro para as extremidades do vão. Em apoios discretos, a carga da parede tende a caminhar para os apoios de forma bem mais evidente tornando elevada as concentrações de tensões nesta região: é o chamado efeito arco, ilustrado na Figura 2.15. De acordo com Paes (2008), uma parede de alvenaria estrutural sobre uma viga de concreto armado se comporta como um arco atirantado, em que o arco se forma na parede e a viga exerce a função do tirante.

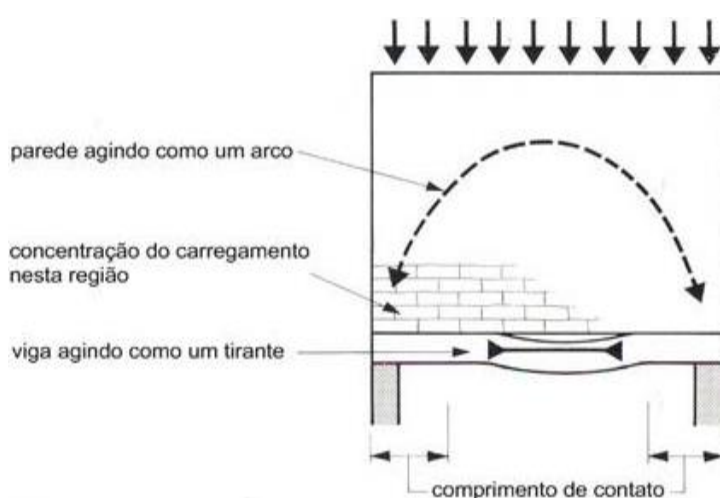


Figura 2.15 – Ação conjunta do sistema parede-viga. Fonte: adaptado de Haseltine & Moore (1981).

É importante atentar para a região central da interface parede-viga, pois pode surgir ali a necessidade de utilizar armaduras para combater esforços de tração nos blocos e evitar o descolamento entre a parede e a viga, prevenindo, assim, o surgimento de fissuras indesejáveis que podem prejudicar o desempenho do sistema como um todo (MEDEIROS, 2015). A Figura 2.16 ilustra a separação que pode ocorrer na interface parede-viga.

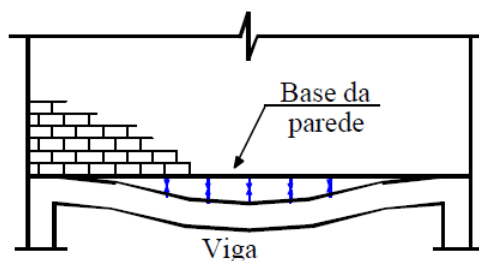
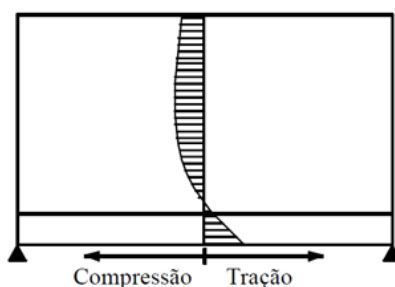


Figura 2.16 – Tensões verticais de tração na interface parede-viga. Fonte: Barbosa (2000).

A configuração do arco interfere na distribuição do carregamento que atua na viga de suporte, de modo que as cargas localizadas no centro da viga migram e se concentram na região dos apoios. A Figura 2.17 ilustra a distribuição de tensões no sistema parede-viga.



(a) Concentrações de tensões na base da parede



(b) Tensões normais ao longo da seção transversal no meio do vão do sistema parede-viga.

Figura 2.17 – Distribuição de tensões no sistema parede-viga. Fonte: adaptado de Barbosa (2000).

Devido a esta configuração, a tração na viga atinge seu máximo no meio do vão e os momentos fletores sofrem alívio nesta região. A Figura 2.18 ilustra os esforços na viga de um sistema parede-viga.

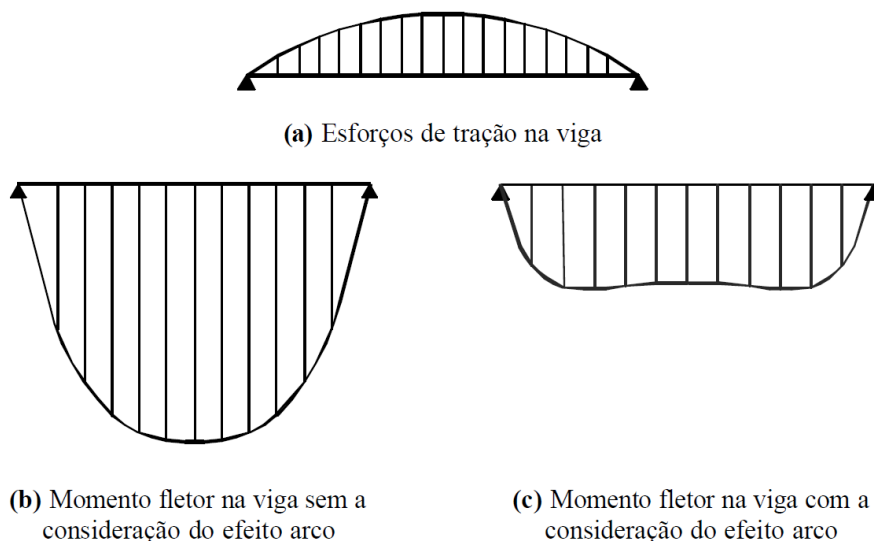


Figura 2.18 – Esforços na viga de um sistema parede-viga. Fonte: Barbosa (2000).

Segundo Barbosa (2000), a linha neutra pode estar localizada dentro da viga ou na parte inferior da parede, sendo basicamente o carregamento e a relação H/L (relação entre altura da parede e comprimento da viga) os fatores que influenciam nesta posição.

Wood (1952) *apud* Medeiros (2015) indica que o arco se forma a partir de uma relação H/L maior ou igual a 0,60, enquanto que Riddington e Stafford Smith (1977) e Tomazela (1995) *apud* Medeiros (2015) indicam que este valor é de 0,70.

Tendo em vista que as construções usuais em alvenaria estrutural têm pé-direito da ordem de 2,80m, seriam necessários vãos superiores a 4,0m para comprometer o comportamento descrito. Logo, pode-se dizer que, para a correta consideração do efeito arco nos esforços na estrutura, a modelagem de apenas um pé-direito de paredes já é suficiente para permitir a atuação desse fenômeno (MEDEIROS, 2015).

Pesquisadores como Wood (1952), Rosenhaupt (1962) e Burhouse (1969) *apud* Barbosa (2000) discutiram os mecanismos de interação do sistema parede-viga. Além destes, Stafford Smith e Riddington (1973) e Davies e Ahmed (1977) *apud* Barbosa (2000) propuseram modelos simplificados para o dimensionamento das vigas. A Figura 2.19, por exemplo, ilustra as distribuições de tensões aproximadas do modelo aproximado de Davies e Ahmed (1977), em que, baseado em resultados de análises numéricas em elementos finitos, adotaram o comprimento de contato das

tensões cisalhantes l_c como sendo o dobro do comprimento de contato das tensões verticais l_v .

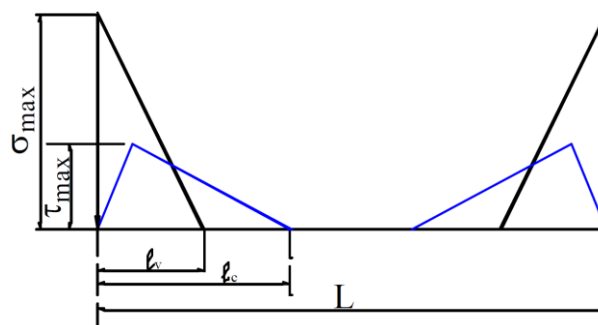


Figura 2.19 – Distribuições aproximadas de tensões adotadas por Davies e Ahmed. Fonte: Barbosa (2000).

Entretanto, de acordo com Nascimento Neto et al. (2012), não se recomenda a aplicação de tais modelos simplificados em situações usuais de projeto devido às suas limitações. A aplicação destes modelos pode ser contra a segurança, especialmente nos casos de aberturas excêntricas em relação ao vão da viga de suporte.

2.3 Modelagem Numérica

Têm-se conhecimento de vários modelos para análise e dimensionamento de paredes estruturais de concreto armado e em alvenaria, como por exemplo, modelos de bielas e tirantes, analogias de treliça, o uso de elementos finitos lineares ou planos e os modelos de barras equivalentes. Entende-se que, a partir desses modelos, simulações numéricas são fundamentais para proporcionar a compreensão do comportamento estrutural e auxiliar no desenvolvimento de formulações eficientes que aperfeiçoem o projeto. Não obstante, para se obter modelos numéricos seguros é necessária uma descrição completa dos materiais e uma validação através de comparações com resultados experimentais (MEDEIROS, 2015).

Page (1978) comenta que, até a década de 80, era frequente considerar a alvenaria como uma associação entre os blocos e a argamassa, assim, assumindo suas propriedades médias e comportamento elástico e isotrópico. Entretanto, estas hipóteses não fornecem bons resultados para níveis elevados de tensões, quando

ocorre a maior parte da redistribuição das mesmas. Em seu trabalho, considerou um modelo com duas fases distintas para caracterizar a alvenaria: blocos com comportamento elástico e argamassa com comportamento inelástico. O autor realizou ensaios experimentais de flexão no plano de um painel para comparar os resultados do modelo e encontrou distribuição de tensões com razoável grau de precisão, mesmo para carregamentos mais elevados.

Hamid (1981) considerou o comportamento da alvenaria sob estado biaxial de tensões, baseando-se na Teoria de Hoffman, e os possíveis modos de ruptura, tais como: ruptura por cisalhamento ao longo das juntas horizontais e verticais e ruptura por tração do bloco (vazado ou grauteado), da argamassa ou de ambos. Para comparação dos resultados, o autor conduziu experimentos com prismas grauteados e não-grauteados, para tração e compressão axiais. O modelo proposto pelo autor apresentou bons resultados para o caso de compressão axial dos blocos grauteados e não-grauteados, porém, não muito satisfatórios para o caso de tração axial.

Santos (2016) realizou análises estruturais de edifícios de parede de concreto moldadas no local e de alvenaria estrutural considerando a interação solo-estrutura e sequência construtiva, sendo uma estrutura de 15 pavimentos sobre pilotis. As modelagens foram feitas com elementos finitos de casca para as paredes; elementos finitos de barra para os pilares, vigas, estacas e blocos; e elementos finitos sólidos isoparamétricos para o maciço de solo, através do software DIANA[®]. O autor evidenciou, a partir dos resultados, a necessidade de se considerar a interação com o solo, e concluiu que a rigidez mais significativa do edifício de parede de concreto colabora para uma uniformização dos recalques de apoio. Na alvenaria estrutural, estrutura mais flexível, a tendência observada é de maiores recalques diferenciais.

De acordo com Lourenço (1996), pode-se classificar a modelagem da alvenaria em:

- Micro-modelagem detalhada: unidades e juntas de argamassa discretizadas por elementos finitos contínuos e a interface por elementos descontínuos, como ilustra a Figura 2.20(b);
- Micro-modelagem simplificada: unidades discretizadas por elementos finitos contínuos, sendo a junta representada por uma interface média entre duas interfaces unidade/argamassa, conforme ilustra a Figura 2.20(c);

- Macro-modelagem: consiste na representação de uma porção da alvenaria por um único elemento finito contínuo que leva em consideração as propriedades ortotrópicas do material composto, como ilustra a Figura 2.20(d).

Logo, para aumentar a precisão desses modelos, quando comparados com os resultados experimentais, deve-se levar em consideração uma descrição dos materiais mais detalhada, ou seja, uma discretização isolada dos componentes constituintes da alvenaria: as unidades e juntas de argamassa são discretizadas por elementos finitos contínuos, e a interface unidade/argamassa por elementos descontínuos. Neste caso, leva-se em consideração o módulo de deformação, o coeficiente de Poisson e, opcionalmente, as propriedades inelásticas, tanto da unidade quanto da argamassa (NASCIMENTO NETO, 2003).

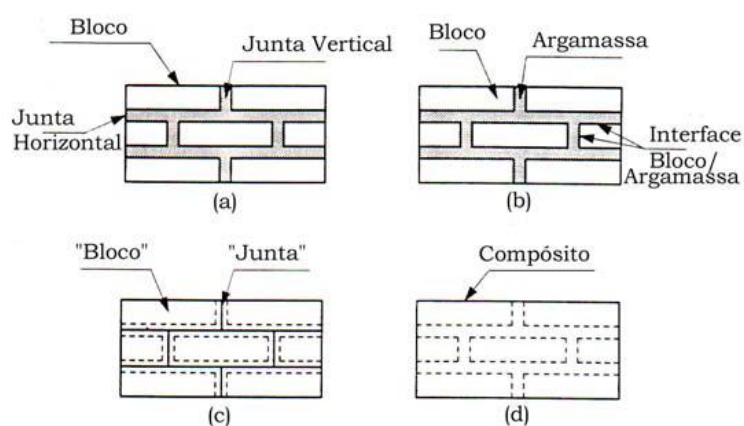


Figura 2.20 – Modelagens típicas para alvenaria estrutural. (a) Trecho de uma estrutura em alvenaria; (b) Micro-modelagem detalhada; (c) Micro-modelagem simplificada; (d) macro-modelagem. Fonte: adaptado de Lourenço (1996).

Ferreira (2017) avaliou a influência do não preenchimento das juntas verticais na resistência à compressão e ao cisalhamento da alvenaria por meio simulações numéricas. Foram feitas simulações, em elementos finitos através do software DIANA®, de pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica e de concreto, com e sem juntas verticais. O autor concluiu que, apesar da ausência das juntas verticais não ter influenciado a resistência à compressão da alvenaria, não se pôde avaliar quantitativamente esta influência na resistência ao cisalhamento.

Nascimento Neto (1999) avaliou os efeitos causados pela ação do vento em edifícios de alvenaria estrutural utilizando o modelo de pórtico tridimensional, tais como a deformação de cisalhamento e a torção nas paredes de contraventamento, mostrando a importância de se considerar estes efeitos. Este modelo é discretizado por elementos de barra que devem possuir as mesmas características geométricas das respectivas paredes que representam e posicionadas no centro de gravidade da seção da parede. As paredes que se interceptam são interligadas por barras horizontais rígidas e as extremidades comuns a duas paredes são consideradas articuladas. Já os lintéis são incluídos conectando as barras horizontais rígidas nos trechos das aberturas. A Figura 2.21 ilustra um exemplo da disposição destas barras, em planta.

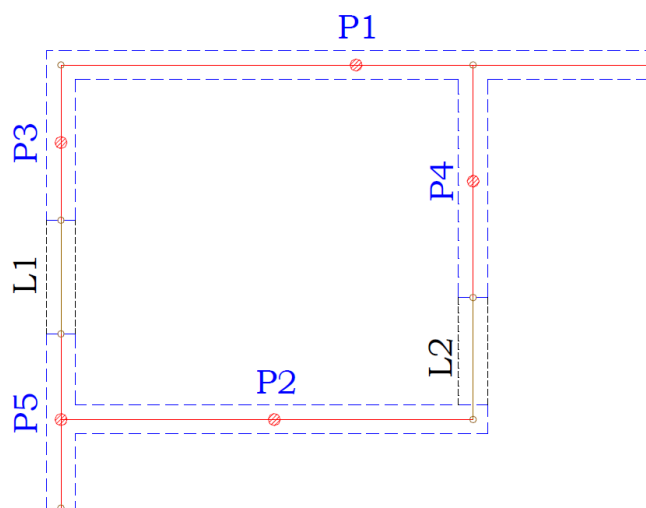


Figura 2.21 – Planta baixa da modelagem tridimensional dos painéis de contraventamento com elementos de barra. Fonte: Nascimento Neto (1999).

De maneira resumida, um trecho de parede sem abertura situado entre pavimentos consecutivos é discretizado por elementos de barra diferenciados por barras verticais flexíveis e barras horizontais rígidas, conforme a Figura 2.22.

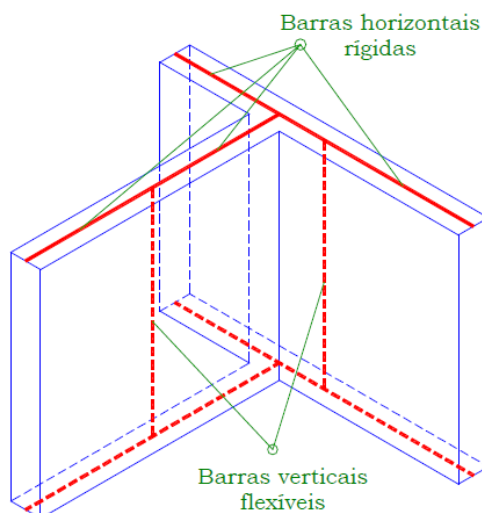


Figura 2.22 – Modelagem das paredes do pórtico tridimensional. Fonte: Nascimento Neto (1999).

Segundo Testoni (2013), o modelo de pórtico tridimensional consegue representar bem a alvenaria estrutural, pois representa de maneira adequada a distribuição vertical e horizontal das ações, gerando bons resultados a partir de um modelo simples.

Nascimento Neto et al. (2014) propôs um modelo de barras equivalentes, posteriormente validado por Medeiros (2015), como alternativa prática aos modelos de casca, que são considerados mais refinados. Neste modelo, admite-se que as barras são posicionadas aproximadamente no centro de gravidade dos furos dos blocos, conforme esquema de modelo plano ilustrado na Figura 2.23. Dessa forma, é considerado o efeito do graute, por meio do módulo de deformação, em cada barra que corresponde ao grauteamento e, também, o comportamento ortotrópico da alvenaria a partir da diferenciação entre as barras verticais e horizontais quanto ao módulo de deformação. É importante comentar que tal modelo era, até então, denominado “modelo de pórtico equivalente”. Entretanto, os autores consideraram o termo “modelo de barras equivalentes” mais adequado. Trata-se, portanto, do mesmo modelo utilizado por Nascimento et al. (2014) e Medeiros (2015).

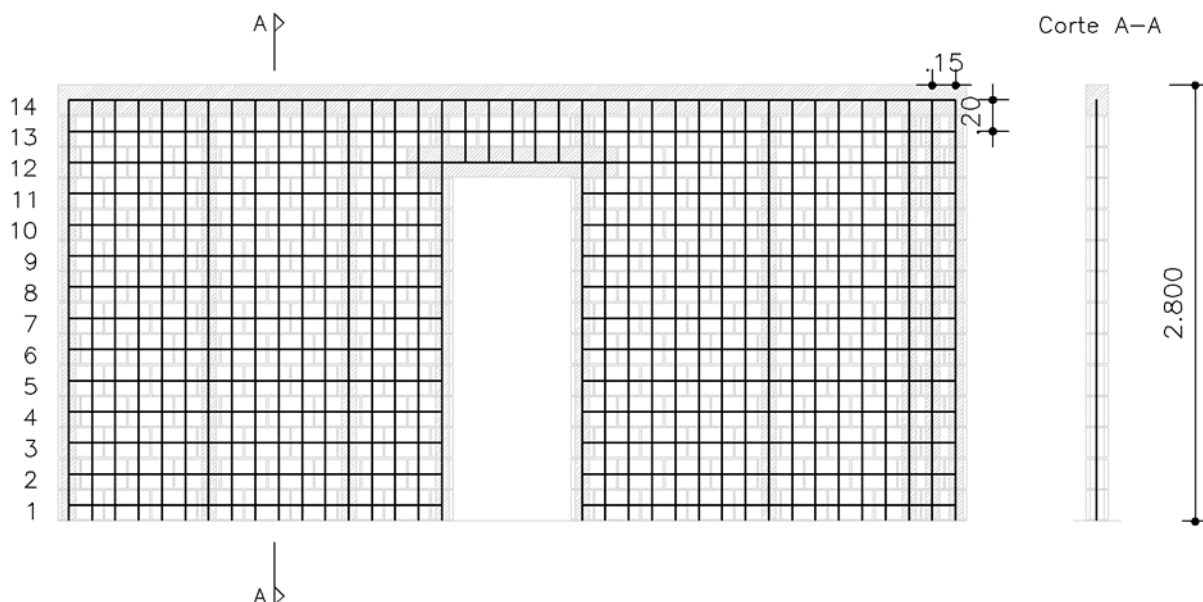


Figura 2.23 – Esquema de disposição das barras do modelo de barras equivalentes (dimensões em metros).

Desse modo, as paredes são representadas por barras nos planos das paredes que, vinculados entre si, conferem ao modelo as características tridimensionais do edifício. A Figura 2.24 ilustra a discretização do primeiro pavimento tipo juntamente com a estrutura de transição em concreto armado do edifício exemplo 1, na qual se observam o modelo de barras equivalentes para as paredes estruturais no primeiro pavimento e o pórtico representativo da estrutura de transição em concreto armado na base do edifício.

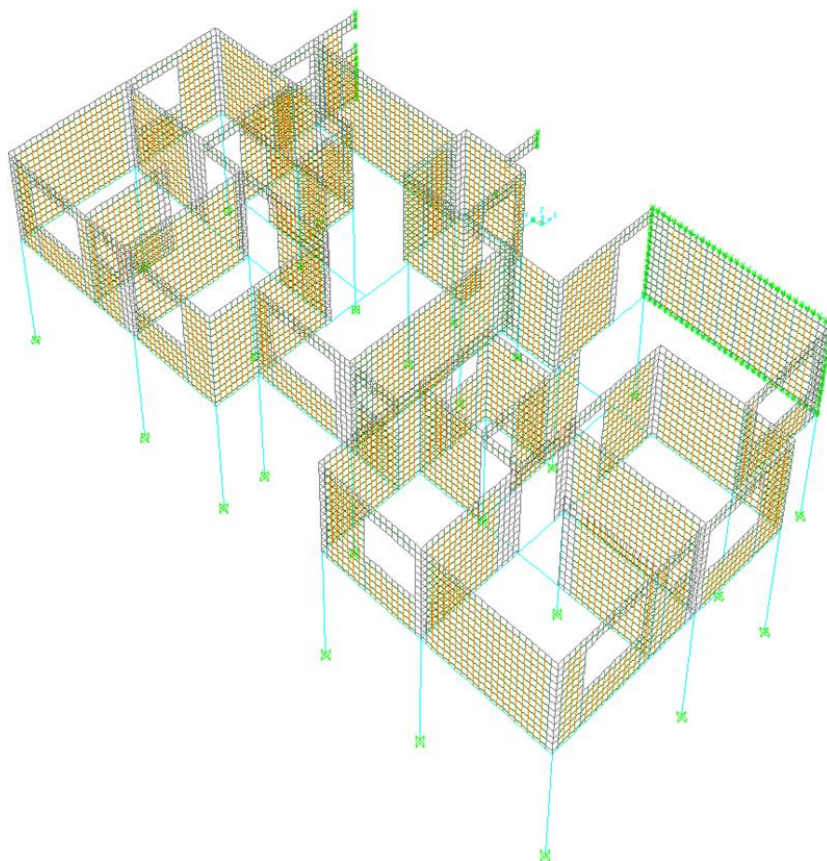


Figura 2.24 – Ilustração do modelo tridimensional em barras equivalentes discretizado no SAP2000®.

Barbosa (2017) utilizou o modelo de barras equivalentes para avaliar a influência dos lintéis de alvenaria na distribuição de cargas verticais no edifício. Nesta pesquisa, sugeriu-se uma calibração deste modelo quando discretizado no software de elementos finitos SAP2000®, no que se refere às deformações por cisalhamento. O autor modelou três lintéis de diferentes dimensões e comparou os resultados das deformações com resultados analíticos. As deformações foram tomadas na extremidade do lintel, considerando que uma extremidade é engastada e a outra tem liberdade de deslocamentos verticais, com aplicação de uma carga concentrada unitária nesta extremidade, conforme ilustrado pela Figura 2.25. Os lintéis considerados receberam as seguintes denominações (considerando a primeira dimensão na vertical e a segunda na horizontal):

- Lintel A: 160 cm x 120 cm;
- Lintel B: 220 cm x 60 cm;
- Lintel C: 160 cm x 150 cm.

A Figura 2.26 ilustra a discretização utilizada do lintel A em modelo de barras equivalentes.

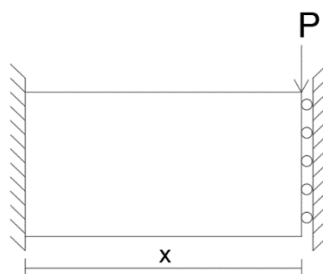


Figura 2.25 – Modelo do lintel adotado na análise. Fonte: Barbosa (2017).

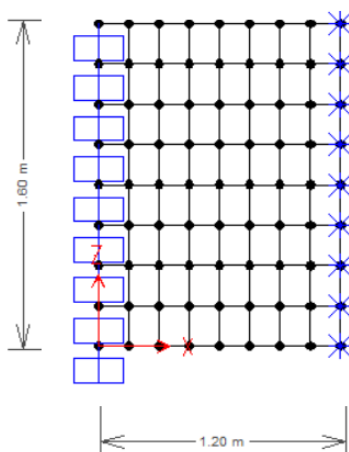


Figura 2.26 – Discretização do lintel A em modelo de barras equivalentes via SAP2000®. Fonte: Barbosa (2017).

A partir dos resultados, constatou-se que na discretização em barras equivalentes utilizando o SAP2000®, pela própria discretização do elemento (barras verticais e horizontais), o efeito das deformações por cisalhamento já é levado em consideração automaticamente. A Tabela 2.1 apresenta as deformações obtidas por Barbosa (2017) nestes modelos.

Dessa forma, quando adicionados os deslocamentos por cisalhamento da formulação do elemento finito barra do programa, este efeito fica superposto. Sendo assim, Barbosa (2017) propôs uma calibração do parâmetro do SAP2000® que, em sua configuração padrão, sempre considera as deformações por cisalhamento na formulação do elemento finito barra. Caso o usuário deseje desconsiderar tal deformação é necessário modificar um fator que influencia na área de cisalhamento

considerada no cálculo das deformações, chamado “*Shear Area*”, que tem valor igual a 1,0 por padrão. Caso esse fator seja aumentado, a área de cisalhamento aumenta e, conseqüentemente, a deformação por cisalhamento diminui. A Figura 2.27 ilustra a janela de configuração deste parâmetro no SAP2000®, nas configurações das seções transversais.

Tabela 2.1 – Deformações dos lintéis A, B e C obtidas com o modelo de barras equivalentes. Fonte: adaptado de Barbosa (2017).

Lintel	Sem cisalhamento	Com cisalhamento	Deformação esperada (analítica)
Lintel A	$2,122 \cdot 10^{-3}$ mm	$6,321 \cdot 10^{-3}$ mm	$2,848 \cdot 10^{-3}$ mm
Lintel B	$3,315 \cdot 10^{-4}$ mm	$1,492 \cdot 10^{-3}$ mm	$8,871 \cdot 10^{-4}$ mm
Lintel C	$3,093 \cdot 10^{-3}$ mm	$8,621 \cdot 10^{-3}$ mm	$3,891 \cdot 10^{-3}$ mm

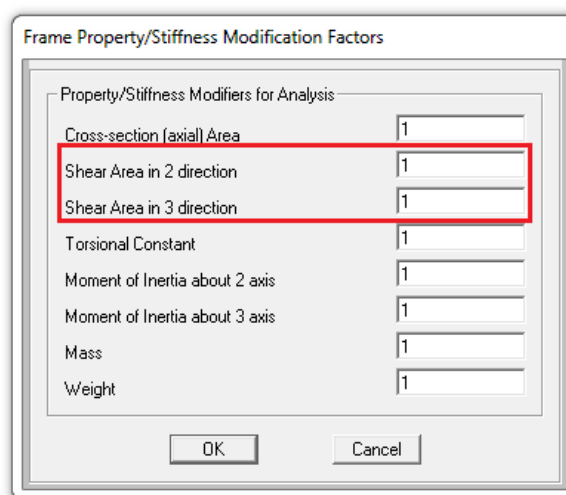


Figura 2.27 – Janela de configuração do fator de modificação da rigidez das seções transversais.

Fonte: SAP2000®.

A Tabela 2.2 apresenta os fatores utilizados para alcançar resultados satisfatórios em relação às deformações analíticas.

Barbosa (2017) concluiu que fatores da ordem de 70 já eliminam completamente o efeito da deformação por cisalhamento. No entanto, caso o usuário não queira verificar valores para esse parâmetro a fim de eliminar esse tipo de

deformação da formulação do elemento finito, pode-se adotar um valor muito alto (10.000, por exemplo) surtindo o mesmo efeito. Para mais detalhes sobre esta pesquisa, consultar Barbosa (2017).

Tabela 2.2 – Fator de cisalhamento necessário em cada lintel. Fonte: adaptado de Barbosa (2017).

Lintel	Fator de cisalhamento	Deformação encontrada	Deformação esperada (analítica)	Diferença
Lintel A	5,8	$2,85 \cdot 10^{-3}$ mm	$2,848 \cdot 10^{-3}$ mm	0,7%
Lintel B	2,2	$8,7 \cdot 10^{-4}$ mm	$8,71 \cdot 10^{-4}$ mm	0,11%
Lintel C	6,1	$4,0 \cdot 10^{-3}$ mm	$3,891 \cdot 10^{-3}$ mm	2,72%

CAPÍTULO 3

Metodologia de análise

3.1 Descrição do modelo computacional

O modelo computacional foi desenvolvido no software comercial de elementos finitos SAP2000® considerando o modelo de barras equivalentes proposto por Nascimento Neto et al. (2014). Conforme descrito no item 2.3, o modelo de barras equivalentes é constituído por barras verticais e horizontais para simular a rigidez das paredes estruturais. Em virtude da comprovação de sua eficiência, as análises desenvolvidas nessa pesquisa utilizarão este modelo para discretizar a estrutura tridimensional dos edifícios exemplos.

Dessa forma, a discretização consistiu na disposição de barras verticais espaçadas a cada 15 cm e barras horizontais a cada 20 cm, com seções transversais medindo 14 cm x 15 cm e 14 cm x 20 cm, respectivamente. Admitiu-se, no caso da alvenaria não-grauteada, o comportamento ortotrópico, sendo o módulo de deformação longitudinal das barras horizontais metade do módulo de deformação longitudinal das barras verticais. Para o caso da alvenaria grauteada, tanto as barras horizontais como as barras verticais foram consideradas como material isotrópico. O efeito do graute foi considerado a partir da relação entre as resistências de prisma grauteado e prisma não-grauteado, tomada igual a 1,7.

Os blocos foram considerados de concreto, na modulação M15 e com resistências características (f_{bk}) variando de acordo com os pavimentos do edifício estudado. O carregamento foi aplicado no topo das paredes de cada pavimento, o qual consiste nas cargas provenientes das lajes e peso próprio das paredes, sendo todas obtidas a partir da análise estrutural do edifício. É importante comentar que esse carregamento vertical se refere às cargas dos grupos de paredes, de maneira que cada grupo recebeu sua respectiva carga uniformemente distribuída no topo das paredes. Tais cargas foram calculadas e obtidas através do software TQS®. Maiores detalhes sobre cada edifício podem ser encontrados no item 3.2 a seguir.

3.2 Edifícios exemplos

No estudo foram modelados dois edifícios altos de alvenaria estrutural sobre estrutura de transição em concreto armado. A definição dos trechos de parede a serem removidos foi realizada com base em situações ocorridas em edifícios reais, nos quais os proprietários realizaram reformas acidentais no apartamento.

Esta análise encontra respaldo nas diretrizes estabelecidas pela GSA (2016), uma vez que é aqui considerada uma análise racional de acordo com o contexto estabelecido para as análises da pesquisa. As características de cada edifício são descritas a seguir.

3.2.1 Caso I

O Caso I consiste em um edifício com 21 pavimentos, sendo destes modelados o total de 11 pavimentos, além da estrutura de transição. A planta do edifício tem simetria em apenas uma direção e é constituída por quatro apartamentos por andar, conforme ilustrado pela Figura 3.1. Para as análises, foi modelada a metade simétrica do edifício e as simulações de remoção de paredes foram feitas em um dos apartamentos.

As resistências características dos blocos (f_{bk}), além das demais propriedades elasto-mecânicas, tais como o módulo de deformação, obtido de acordo com a NBR 15961-1 (2011) e a eficiência do prisma ($\eta = f_{pk}/f_{bk}$) estão detalhados na Tabela 3.1.

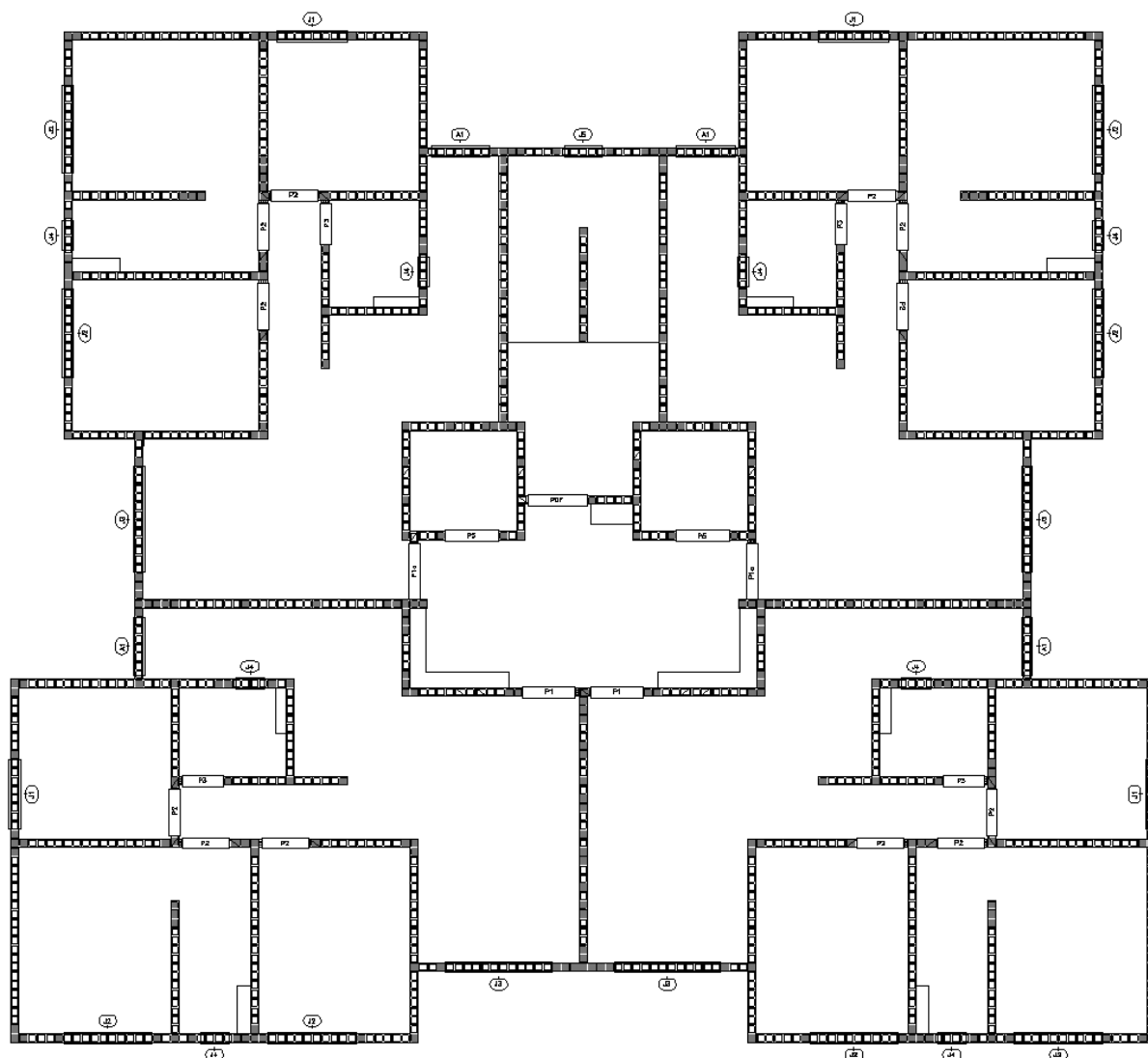


Figura 3.1 – Planta de fiadas do edifício do Caso I.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas adotadas de acordo com os pavimentos do Caso I.

Pavimentos modelados	Resist. caract. do bloco, f_{bk} (MPa)	Eficiência do prisma, η	Resist. caract. do prisma não-grauteado, f_{pk} (MPa)	Módulo de def. long. da alvenaria, E (MPa)		
				Alvenaria não-grauteada (barras verticais)	Alvenaria não-grauteada (barras horizontais)	Alvenaria grauteada
01 e 02	20,0	0,6	12,0	9600	4800	16320
03 e 04	18,0	0,6	10,8	8640	4320	14688
05 e 06	16,0	0,6	9,6	7680	3840	13056
07 e 08	14,0	0,7	9,8	7840	3920	13328
09 e 10	12,0	0,7	8,4	6720	3360	11424
11	10,0	0,7	7,0	5600	2800	9520

A estrutura de transição, ilustrada pela Figura 3.2, apresenta as seguintes características:

- Concreto armado com f_{ck} igual a 25 MPa e módulo de elasticidade igual a 24 GPa, obtido de acordo com a NBR 6118 (2014);
- Vigas de concreto armado com seção transversal de dimensões 35 cm x 90 cm;
- Pilares de concreto armado considerando base engastada.

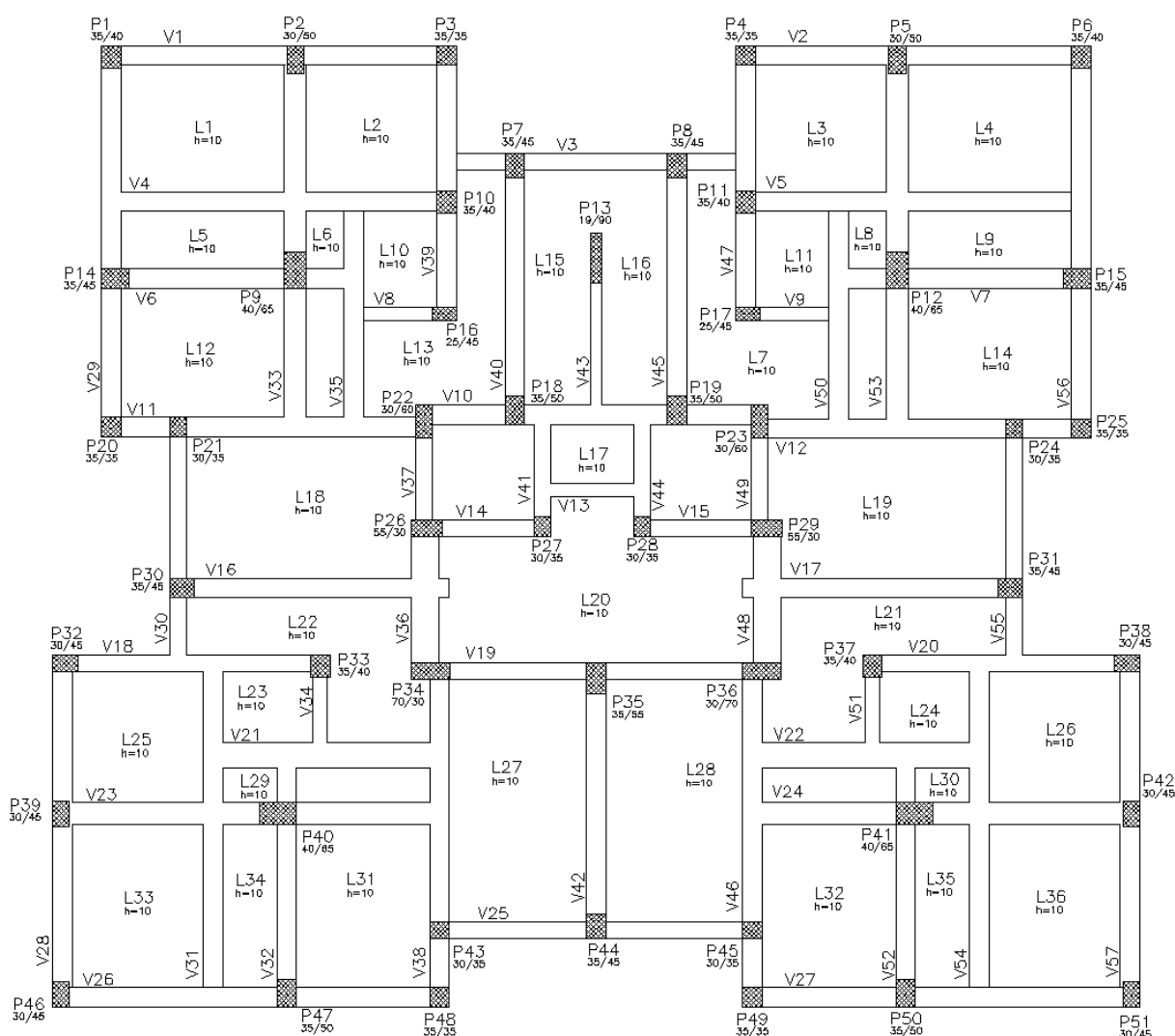


Figura 3.2 – Fôrma da estrutura de transição do Caso I.

A Figura 3.3 ilustra as intensidades das cargas verticais uniformemente distribuídas, por pavimento, dos grupos de paredes, em unidade kN/m. A carga

equivalente aos demais pavimentos não modelados foi aplicada no topo do 11º pavimento.

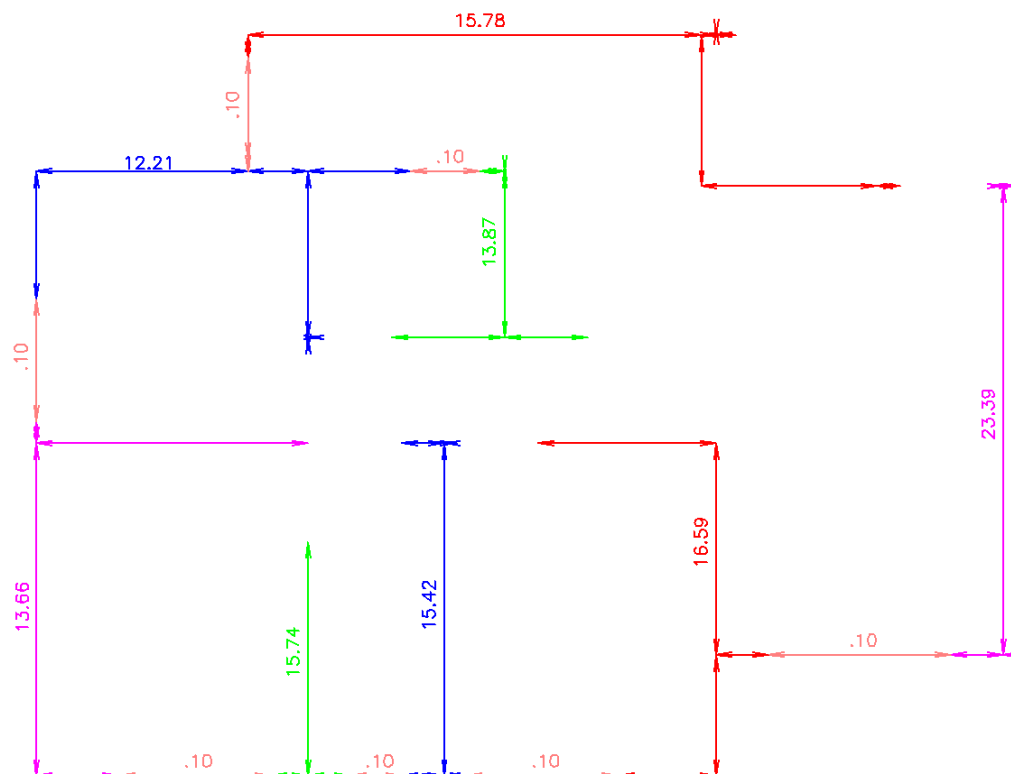


Figura 3.3 – Intensidade (kN/m) das cargas verticais uniformemente distribuídas aplicadas no topo de cada pavimento do Caso I.

Os pavimentos escolhidos para simular a retirada de paredes foram o primeiro e o sexto, analisados em situações separadamente, de modo que se pudesse permitir e avaliar a redistribuição de esforços tanto nas paredes acima destes, como abaixo. Os modelos elaborados para comparação dos resultados da análise foram denominados da seguinte forma:

- Modelo 1, que consiste no edifício com todas as paredes estruturais íntegras;
- Modelo 2a, que corresponde à remoção parcial da parede da sala, unindo-a com o quarto;
- Modelo 2b, que consiste na remoção total da parede limite entre um dos quartos e a sala, e;
- Modelo 3, com remoção apenas da parede que divide dois dos quartos.

A Figura 3.4 ilustra, em planta, os trechos removidos nos Modelos 2a, 2b e 3, bem como indica as faces das paredes que foram consideradas como vistas para interpretação dos resultados.

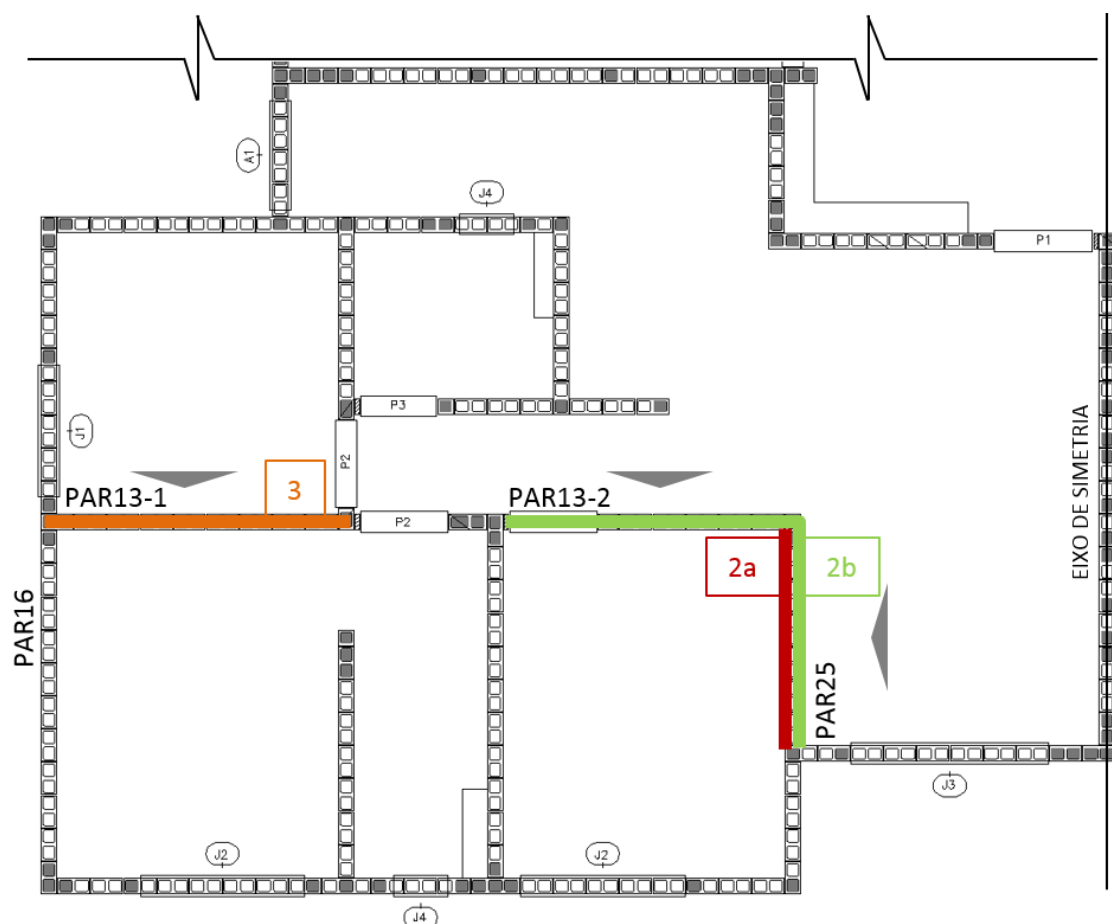


Figura 3.4 – Indicação das paredes removidas nos Modelos 2a, 2b e 3, em planta.

É relevante comentar que, neste caso, os Modelos 2a e 2b não ocorrem em simultaneidade com o Modelo 3, ou seja, a análise das simulações de remoção que ampliam a sala do apartamento foi feita separadamente da análise da simulação de remoção que une os quartos. Os resultados destes três modelos foram comparados ao Modelo 1, que se refere às paredes íntegras.

3.2.2 Caso II

O Caso II consiste em um edifício com 10 pavimentos, sendo todos modelados, além da estrutura de transição. A planta do edifício é constituída por seis apartamentos por andar, conforme ilustrada pela Figura 3.5. Para as análises deste caso, foi modelada a porção da planta correspondente a um dos apartamentos, ilustrada pela Figura 3.6, onde foram feitas as simulações de remoção de paredes.

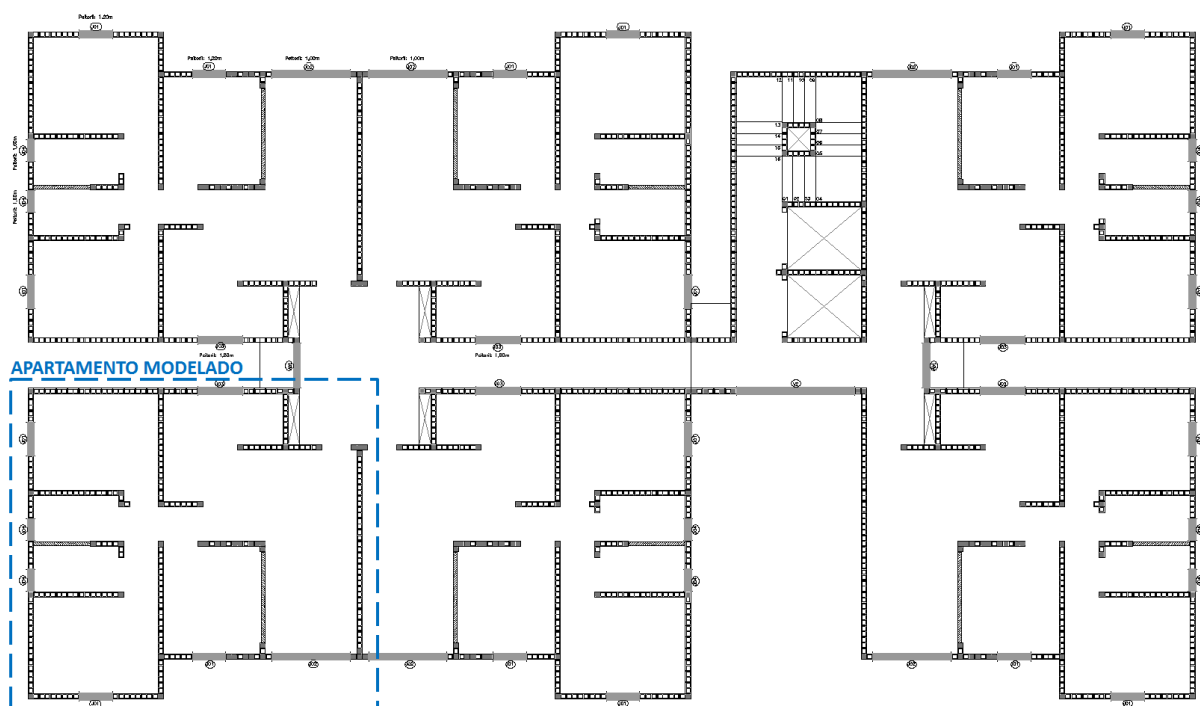


Figura 3.5 – Planta de fiadas do edifício do Caso II.

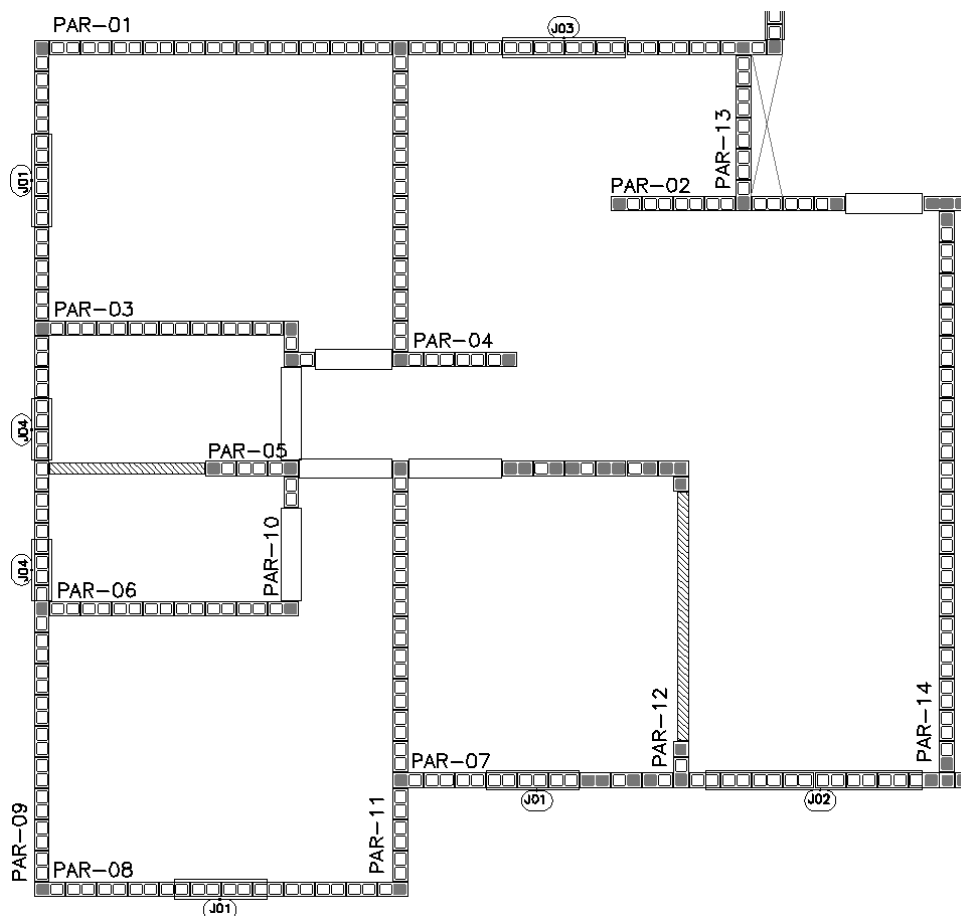


Figura 3.6 – Planta de fiadas do apartamento do Caso II.

A resistência característica do prisma (f_{pk}) e o módulo de deformação obtido de acordo com a NBR 15961-1 (2011) estão detalhados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas adotadas de acordo com os pavimentos do Caso II.

Pavimentos modelados	Resist. caract. do prisma não-grauteado, f_{pk} (MPa)	Módulo de def. long. da alvenaria, E (MPa)		
		Alvenaria não-grauteada (barras verticais)	Alvenaria não-grauteada (barras horizontais)	Alvenaria grauteada
01, 02 e 03	8,0	6400	3200	11520
04 e 05	6,4	5120	2560	9216
06 e 07	4,8	3840	1920	6912
08, 09 e 10	3,2	2560	1280	4608

Conforme apresentado no Capítulo 2, em sua configuração padrão o software SAP2000® considera as deformações por cisalhamento. Para uma melhor calibração

do modelo de barras equivalentes discretizado neste programa, deve-se desconsiderar tais deformações da formulação do elemento barra. Dessa forma, no modelo deste edifício, foi considerado o ajuste do parâmetro de cisalhamento proposto por Barbosa (2017), de modo que foi necessário atribuir o fator multiplicador (“*Shear Area*”) nas configurações das seções. De acordo com Barbosa (2017), fatores da ordem de 70 já eliminam consideravelmente o efeito da deformação por cisalhamento na formulação do elemento finito, ficando somente o efeito que se refere à própria discretização. Portanto, foi utilizado um fator igual a 100.

A estrutura de transição, ilustrada pela Figura 3.7, apresenta as seguintes características:

- Concreto armado com f_{ck} igual a 25 MPa e módulo de elasticidade igual a 24 GPa, obtido de acordo com a NBR 6118 (2014);
- Pilares e vigas de concreto armado com seções transversais indicadas na Figura 3.7, sendo os pilares perfeitamente engastados nos apoios.

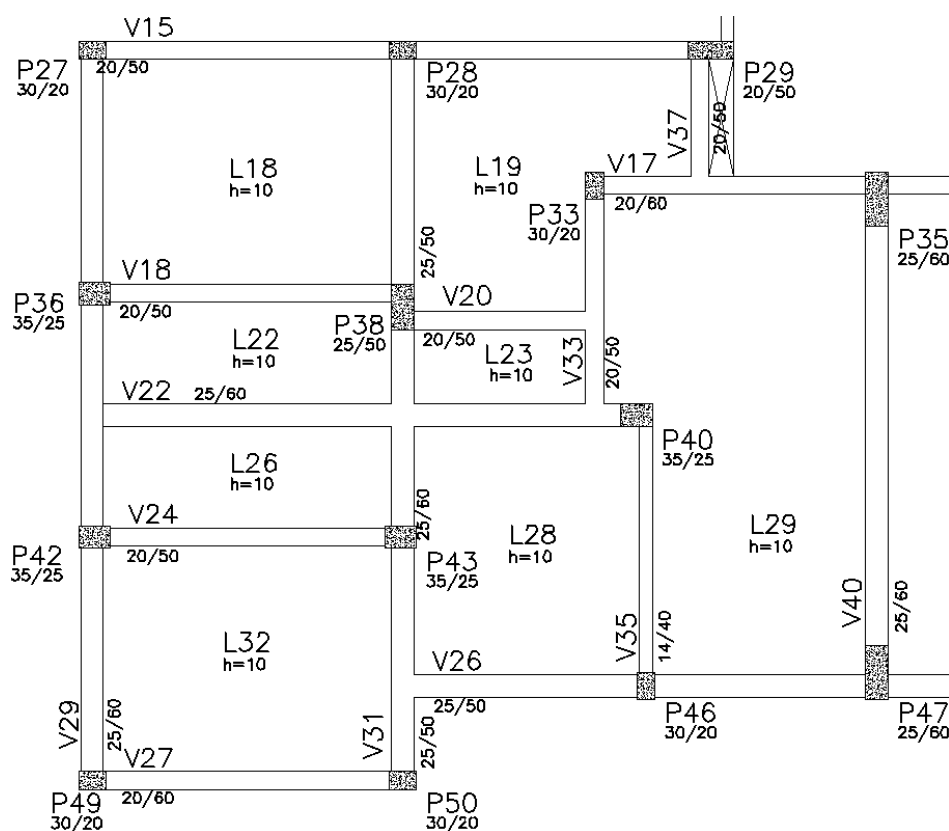


Figura 3.7 – Estrutura de transição no trecho do apartamento modelado.

A Figura 3.8 ilustra a intensidade, em unidade de kN/m, das cargas distribuídas uniformes, de cada grupo de paredes por pavimento, aplicadas no topo dos pavimentos do modelo.

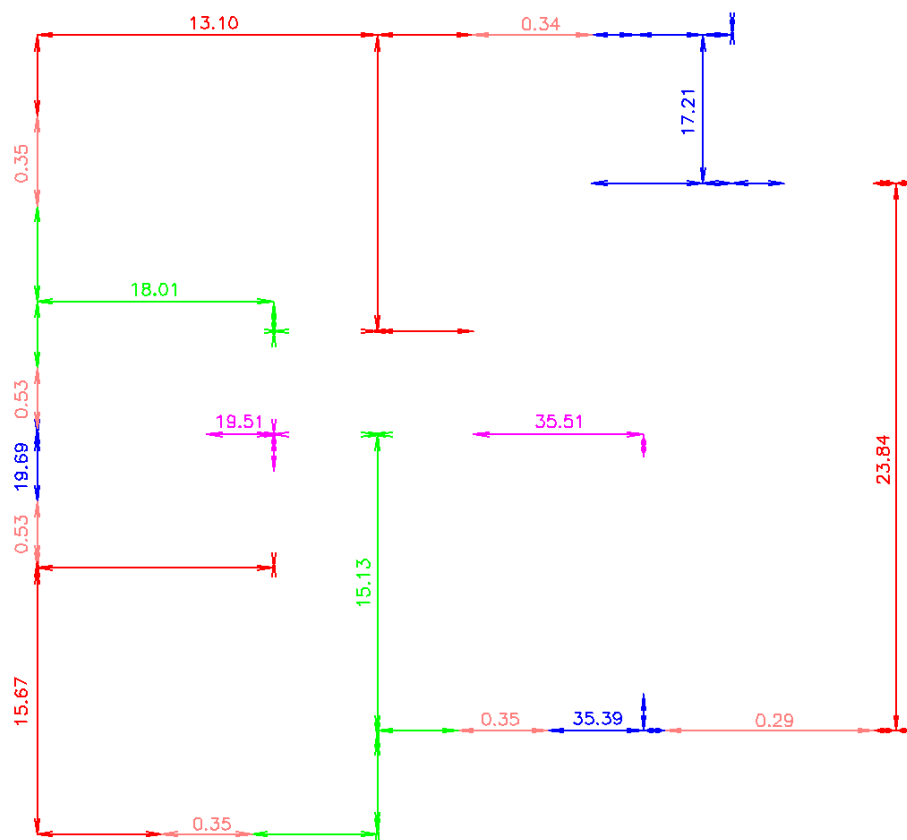


Figura 3.8 – Intensidade (kN/m) das cargas verticais uniformemente distribuídas aplicadas no topo de cada pavimento do Caso II.

Os pavimentos escolhidos para simular a retirada de paredes foram o primeiro, o quinto e o nono, analisados separadamente. Os modelos analisados para comparação dos resultados foram denominados da seguinte forma:

- Modelo 1, que consiste no modelo com todas as paredes estruturais íntegras;
- Modelo 2, que corresponde à remoção da parede estrutural da sala, unindo-a com o quarto, e;
- Modelo 3, que consiste na remoção citada no Modelo 2 somada à remoção do trecho de parede que divide a sala do quarto. Neste caso, considerou-

se que pudesse haver uma reforma accidental no sentido de mudar de local este trecho de parede.

A Figura 3.9 ilustra, em planta, os trechos removidos nos Modelos 2 e 3, bem como indica as faces das paredes que foram consideradas como vistas para interpretação dos resultados.

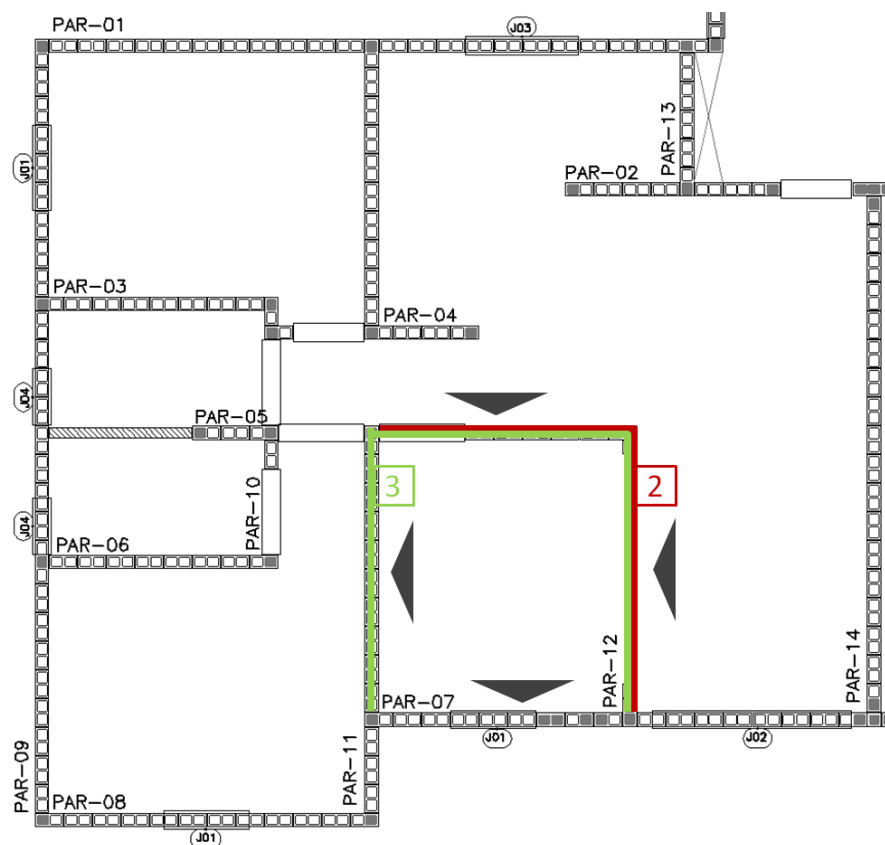


Figura 3.9 – Indicação das paredes removidas nos Modelos 2 e 3, em planta.

CAPÍTULO 4

Análise dos resultados

Este capítulo se refere às discussões dos resultados de ambos os edifícios descritos no Capítulo 3. O item 4.1 se refere aos resultados do edifício do Caso I, enquanto que o item 4.2 se refere aos resultados do edifício do Caso II.

4.1 Análise dos resultados do Caso I

Conforme descrito no item 3.2.1, o edifício do Caso I foi submetido a duas situações distintas de remoções de paredes, que foram analisadas separadamente: a primeira situação, em que as remoções foram consideradas no primeiro pavimento, e; a segunda situação, em que as remoções foram consideradas no sexto pavimento.

Sendo assim, em ambas as situações foram realizadas as seguintes verificações:

- Tensões normais e de cisalhamento na base das paredes, sendo do primeiro ao quarto pavimento para o caso da primeira situação, e do terceiro ao nono pavimento para o caso da segunda situação;
- Forças normais nas cintas de respaldo na base e no topo, sendo as cintas do segundo pavimento para o caso da primeira situação, e as cintas do sétimo pavimento para o caso da segunda situação;
- Tensões normais e de cisalhamento em seções verticais predeterminadas, consideradas no segundo pavimento para o caso da primeira situação, e no sétimo pavimento para o caso da segunda situação.

As tensões normais que se referem às bases das paredes são tensões normais verticais e, por outro lado, as tensões normais que se referem às seções transversais verticais são tensões normais horizontais segundo o plano da respectiva parede. Em planta, optou-se por realizar estas verificações em paredes próximas aos trechos que sofreram remoções. Sendo assim, para o caso dos Modelos 2a e 2b, foram avaliadas

as Paredes 25 e 13-2, enquanto que, para o caso do Modelo 3, foram verificadas as Paredes 13-1 e 16, conforme ilustrado pela Figura 3.4.

4.1.1 Análise da redistribuição de tensões ao longo dos pavimentos

Considerando a relevância de compreender o alcance da redistribuição das tensões a partir da remoção de trechos de alvenaria ocorrida em um determinado pavimento, esta análise teve por objetivo investigar a influência da remoção de trechos de parede ao longo dos pavimentos do edifício. Para tanto, foram analisadas as tensões normais e de cisalhamento na base das paredes nas duas situações descritas anteriormente.

4.1.1.1 Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento

A Figura 4.1 ilustra os trechos onde foram analisadas as tensões para a situação de remoções no primeiro pavimento, para os Modelos 2a e 2b.

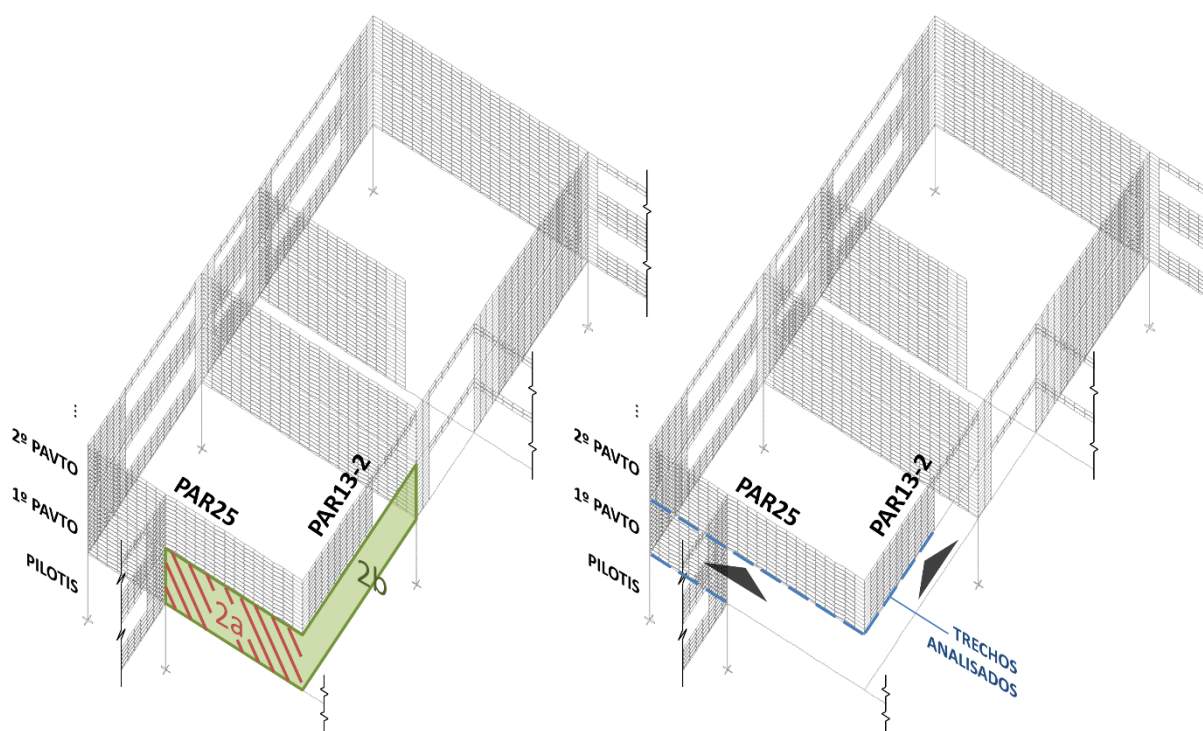


Figura 4.1 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

As tensões foram calculadas dividindo a força obtida na análise do SAP2000®, em sua direção considerada, pela área bruta da seção da barra empregada no modelo de barras equivalentes. É relevante reforçar que o efeito do graute foi considerado no módulo de deformação das barras, conforme descrito anteriormente no item 3.2.1.

A Figura 4.2 ilustra as tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 25, do primeiro ao quarto pavimento.

Inicialmente, é interessante comentar a respeito da uniformização das tensões normais no Modelo 1 à medida que se observam os resultados nos pavimentos acima do primeiro. Nota-se que no primeiro pavimento há uma diminuição das tensões normais que ocorre ao longo do vão da viga da estrutura de transição. Esta diminuição ocorre devido à interação entre a alvenaria estrutural do primeiro pavimento e a viga sobre a qual está apoiada, característica do sistema parede-viga. Neste caso, as tensões normais tendem a se concentrar nas regiões dos apoios, aliviando o carregamento ao longo do vão da viga. Assim, à medida que se observa os pavimentos acima deste, as tensões tendem a se uniformizar. Também é importante comentar que os picos que aparecem, mesmo nos pavimentos superiores, se referem às barras correspondentes ao grauteamento que, naturalmente, concentra maiores tensões devido ao acréscimo de rigidez.

Com a remoção do trecho de alvenaria referente ao Modelo 2a, nota-se a ocorrência do efeito arco, especialmente no segundo pavimento: há concentração de tensões na região dos apoios remanescentes e, além disso, ao longo do vão formado pela remoção da parede, as tensões normais passam a ficar praticamente nulas.

Considerando o Modelo 2b, o comportamento se mantém semelhante, com um acréscimo da concentração de tensões normais nos apoios remanescentes, uma vez que no Modelo 2b há uma perda maior de suporte para o segundo pavimento do que no Modelo 2a. Neste caso, a base de todo o vão formado permanece com tensões normais praticamente nulas.

As tensões de cisalhamento apresentam picos elevados com a remoção das paredes, especialmente no segundo pavimento, assim como ocorre com as tensões normais. É interessante observar a inversão de sinal/sentido ocorrida apenas no Modelo 2a, mais notadamente no segundo pavimento, o que também, assim como no

caso das tensões normais, pode ser associado à existência de apoios nas duas extremidades da parede.

É pertinente observar que, à medida que se observa os pavimentos acima da ocorrência das remoções, as tensões normais e de cisalhamento tendem a se uniformizar rapidamente, aproximando-se da condição de paredes estruturais íntegras.

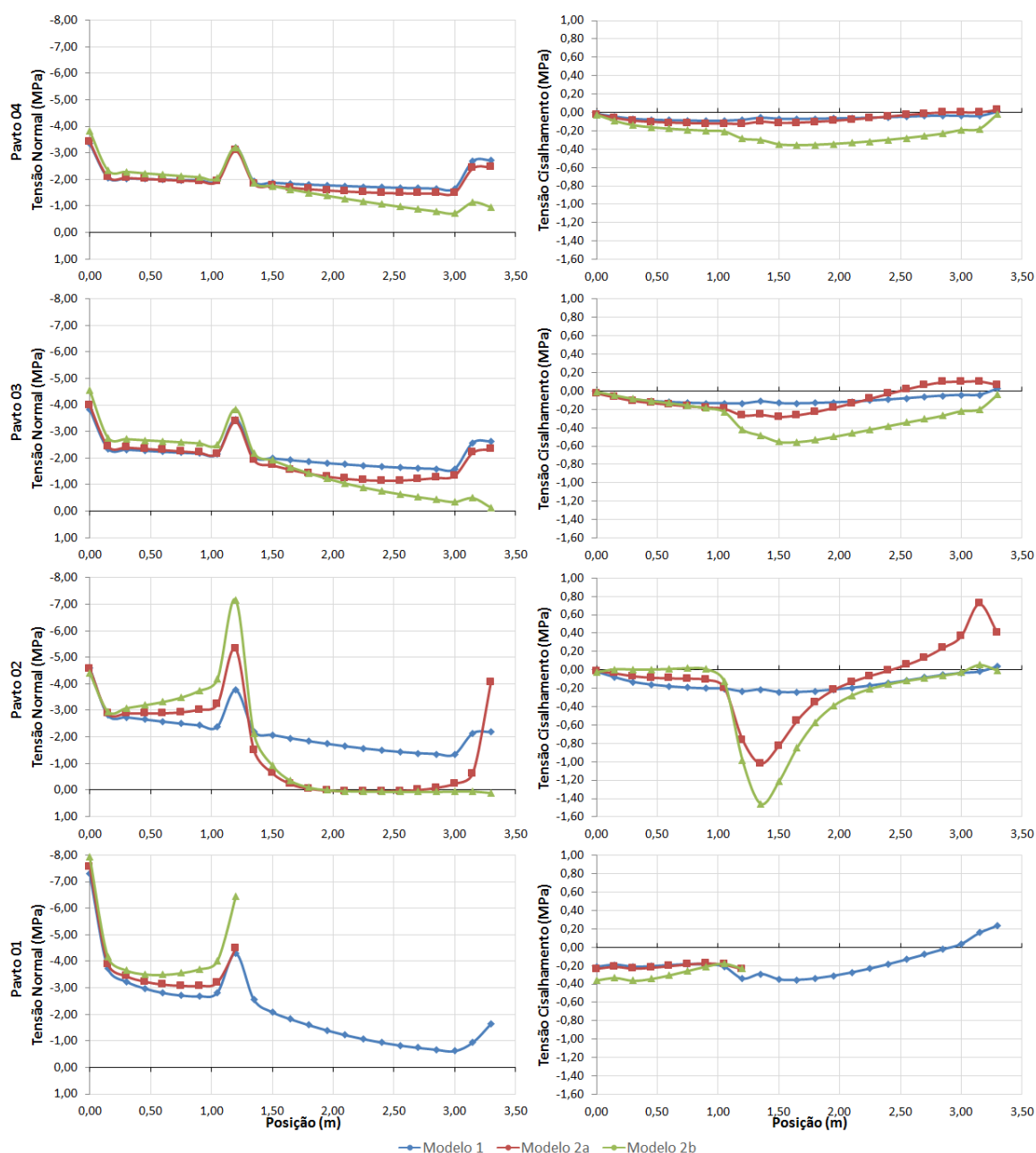


Figura 4.2 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 25, do primeiro ao quarto pavimento.

A Tabela 4.1 apresenta as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base da Parede 25 de acordo com os pavimentos.

As diferenças notadamente relevantes são as que apresentam valores positivos, uma vez que é de interesse conhecer a que acréscimos de tensões a estrutura passa a ser submetida com a remoção das paredes. No caso da Parede 25, tem-se, com o Modelo 2b, maior valor percentual de 90,2 %, que corresponde à mudança da tensão de compressão de 3,77 MPa para 7,17 MPa, claramente na região de apoio remanescente do segundo pavimento.

Tabela 4.1 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 25, com remoções de parede no primeiro pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-3,35	-	-3,43	2,4%	-3,82	14,0%
3	-3,82	-	-4,00	4,8%	-4,54	19,0%
2	-4,60	-	-4,57	-0,8%	-4,42	-4,0%
1	-7,30	-	-7,56	3,6%	-7,94	8,8%
Valores no pico intermediário (1,20 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-3,19	-	-3,09	-3,0%	-3,20	0,6%
3	-3,46	-	-3,38	-2,3%	-3,84	11,1%
2	-3,77	-	-5,31	40,9%	-7,17	90,2%
1	-4,30	-	-4,49	4,5%	-6,44	49,9%
Valores na extremidade direita (3,30 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-2,72	-	-2,47	-9,1%	-0,96	-64,8%
3	-2,63	-	-2,34	-10,9%	-0,13	-94,9%
2	-2,18	-	-4,06	86,0%	0,11	-104,8%
1	-1,65	-	-	-	-	-

Estes valores também indicam a rápida redistribuição de tensões à medida que se consideram pavimentos superiores. No quarto pavimento, observa-se na extremidade esquerda um acréscimo de 14,0 % do Modelo 2b em relação ao Modelo 1, representado pela variação na intensidade das tensões de 3,35 MPa para 3,82

MPa. Com relação ao pico intermediário, correspondente à maior concentração de tensões, verificou-se diferença de apenas 0,6 %, caracterizando intensidades de tensões praticamente iguais.

A Figura 4.3 ilustra as tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 13-2, do primeiro ao quarto pavimento.

De maneira semelhante ao verificado durante a análise da Parede 25, observa-se uma uniformização das tensões normais à medida em que se avança nos pavimentos, afastando-se da estrutura de transição. Da mesma forma, se observa um pico de tensão normal à direita por se tratar de uma região da viga de transição próxima de um apoio. No restante do comprimento, observa-se um esperado alívio de tensões por se tratar de regiões distantes de apoios em pilares e surgimento de pico de baixa intensidade na extremidade esquerda por se tratar de interseção entre vigas, conforme pode ser observado na Figura 3.2.

Os efeitos da interação parede-viga já são percebidos, como era de se esperar, nos Modelos 1 e 2a, sendo que no 2a ocorreu um acréscimo de tensões na extremidade esquerda, região que serve de apoio na concepção desse modelo. Ao ser removido o trecho da Parede 13-2, constituindo o Modelo 2b, verifica-se a ocorrência de tensões normais praticamente nulas ao longo do vão formado com a remoção, apresentando pico de tensão junto à abertura, porém com intensidade menor que aquela dos Modelos 1 e 2a. Comportamento semelhante pode ser verificado para as tensões de cisalhamento, sendo que o pico junto à abertura foi bem maior que os verificados nos Modelos 1 e 2a.

Nota-se uma rápida aproximação entre os Modelos 1 e 2a à medida que se observa os pavimentos acima da ocorrência das remoções de parede. Além disso, o Modelo 2b apresentou tensões com intensidade abaixo daquelas do Modelo 1.

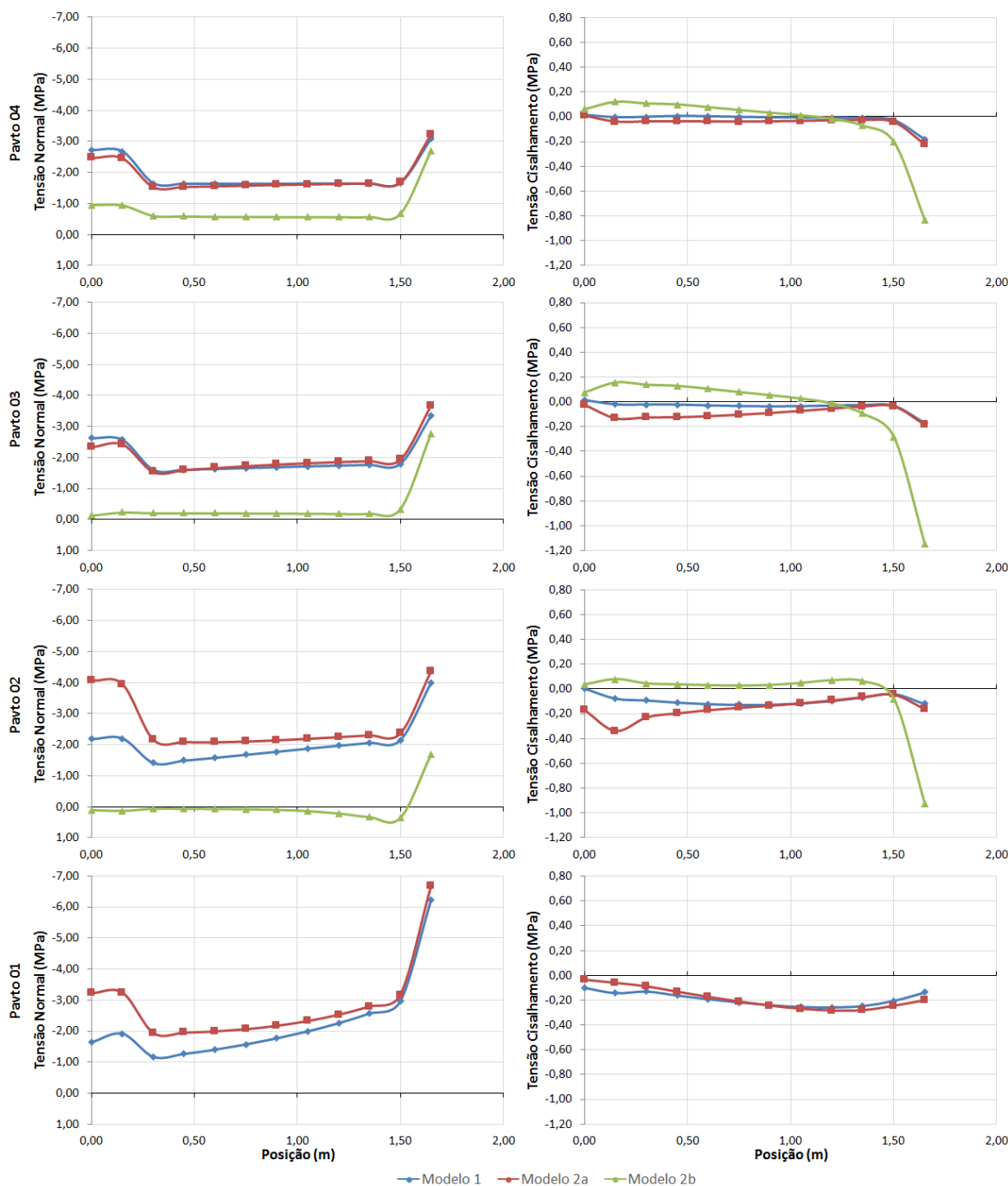


Figura 4.3 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-2, do primeiro ao quarto pavimento.

A Tabela 4.2 apresenta as diferenças percentuais, nos picos de tensões normais na base da Parede 13-2 de acordo com os pavimentos. No caso da Parede 13-2, tem-se, com o Modelo 2a, o maior valor percentual igual a 95,5 %, que corresponde ao aumento de 1,65 MPa para 3,22 MPa. É relevante comentar que a

Parede 13-2 interage com a Parede 25 por meio da amarração, de modo que a extremidade esquerda da Parede 13-2 corresponde exatamente à extremidade direita da Parede 25. Sendo assim, era esperado um grande acréscimo de tensão nesta região, uma vez que a mesma serve de apoio à Parede 25 no Modelo 2a. Relativamente ao Modelo 2b, a nulidade das tensões normais na base das paredes avaliadas, também pode ter sua explicação fundamentada na interação entre a Parede 25 e a Parede 13-2, em que os dois trechos teriam a tendência de funcionar como se estivessem em balanço. Tal aspecto se torna relevante porque pode justificar, por exemplo, a ocorrência de mecanismos internos de redistribuição de tensões que impeçam a eventual propagação de um colapso.

Por outro lado, as tensões rapidamente decrescem ao longo dos pavimentos. Na extremidade direita, o Modelo 2a apresenta uma diferença percentual em relação ao Modelo 1 de apenas 4,6 % no quarto pavimento.

Tabela 4.2 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 13-2, com remoções de parede no primeiro pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-2,72	-	-2,47	-9,1%	-0,96	-64,8%
3	-2,63	-	-2,34	-10,9%	-0,13	-94,9%
2	-2,18	-	-4,06	86,0%	0,11	-104,8%
1	-1,65	-	-3,22	95,5%	-	-
Valores na extremidade direita (1,65 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-3,09	-	-3,23	4,6%	-2,69	-12,9%
3	-3,36	-	-3,67	9,4%	-2,75	-18,0%
2	-3,99	-	-4,35	9,0%	-1,69	-57,8%
1	-6,23	-	-6,67	7,1%	-	-

A Figura 4.4 ilustra os trechos onde foram analisadas as tensões para a situação de remoções no primeiro pavimento correspondentes aos Modelos 1 e 3. Reforça-se que, neste caso, não é considerada a ocorrência dos Modelos 2a e 2b.

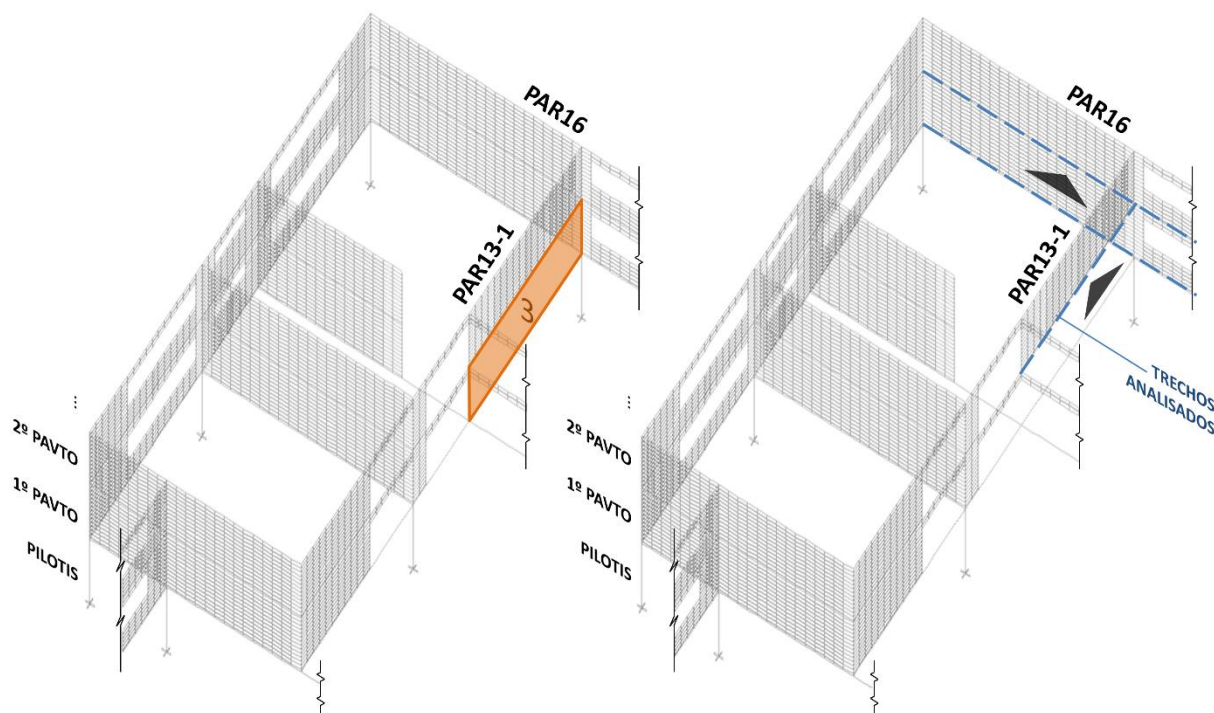


Figura 4.4 – Indicação do trecho removido no Modelo 3 (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para remoção no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

A Figura 4.5 ilustra as tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 13-1, do primeiro ao quarto pavimento. Observa-se, novamente no primeiro pavimento, a configuração do efeito arco devido à ocorrência do sistema parede-viga.

A Configuração do Modelo 3 representa a perda quase que total do suporte da parede localizada acima do trecho removido. Dessa maneira, as cargas tendem a migrar para as regiões rígidas: neste caso, para a extremidade direita, onde há a interação com a Parede 16 e, para a extremidade esquerda, onde há apoio sobre os lintéis remanescentes. Ao longo de praticamente todo o comprimento, as barras permanecem com tensões nulas ou mesmo levemente tracionadas devido à perda de suporte mencionada. É importante destacar que os picos de tensões observados no segundo pavimento, segundo o Modelo 3, apresentam intensidades maiores que aquelas obtidas com o Modelo 1. Considerando, entretanto, os resultados do Modelo 1 no primeiro pavimento, as concentrações de tensões normais observadas no Modelo 3 são da mesma ordem de grandeza, com intensidades ligeiramente inferiores.

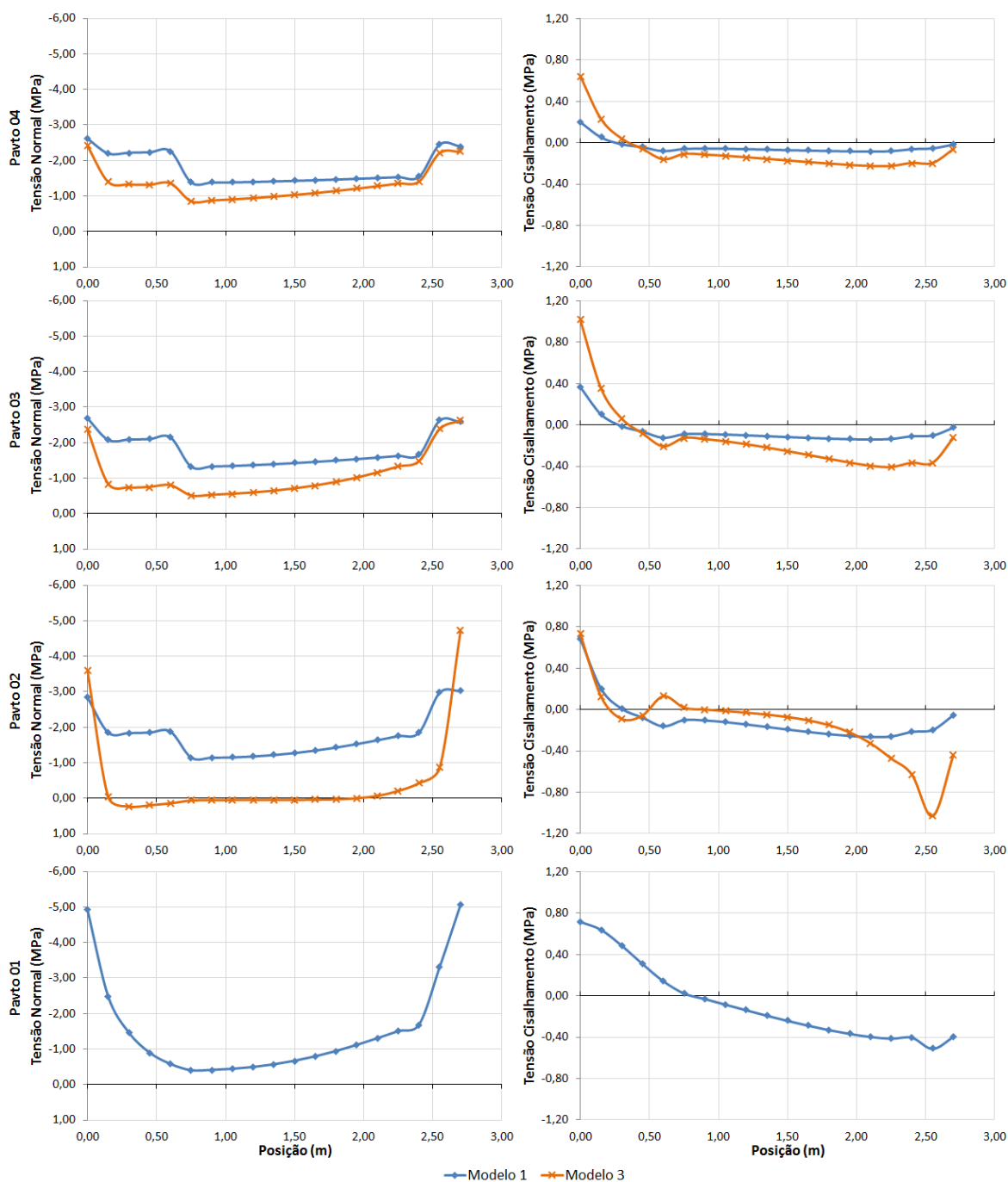


Figura 4.5 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-1, do primeiro ao quarto pavimento.

Com relação às tensões de cisalhamento, verificam-se máximas intensidades e leves picos no primeiro pavimento nas regiões dos apoios, segundo o Modelo 1, como já era esperado devido à interação parede-viga. Além disso, é muito importante destacar que no segundo pavimento, o Modelo 3 resultou em tensões com pico na extremidade direita de intensidade muito superior ao obtido com o Modelo 1, tanto no

segundo quanto no primeiro pavimento. Entretanto, considerando os demais pavimentos, verifica-se que as tensões de cisalhamento tendem a se regularizar rapidamente, aproximando-se do Modelo 1. Tal comportamento também ficou caracterizado para o caso das tensões normais.

A Tabela 4.3 apresenta as diferenças percentuais, nos picos observados, das tensões normais na base da Parede 13-1 de acordo com os pavimentos. O maior valor de diferença percentual obtido foi de 56,3 % na extremidade direita, correspondente ao aumento na tensão de compressão de 3,02 MPa para 4,72 MPa, na base do segundo pavimento. Percebe-se também que nos demais pavimentos as intensidades das tensões normais obtidas com o Modelo 3 são muito próximas daquelas obtidas com o Modelo 1, indicando haver uma rápida dissipação das perturbações ocorridas pela remoção do trecho de parede.

Tabela 4.3 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 13-1, com remoção de parede no primeiro pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-2,61	-	-2,41	-7,3%
3	-2,69	-	-2,37	-11,9%
2	-2,84	-	-3,60	26,6%
1	-4,92	-	-	-
Valores na extremidade direita (2,70 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-2,39	-	-2,25	-5,7%
3	-2,59	-	-2,63	1,6%
2	-3,02	-	-4,72	56,3%
1	-5,06	-	-	-

A Figura 4.6 ilustra as tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 16, do primeiro ao quarto pavimento.

Observando a figura, verifica-se que ocorreu alteração na distribuição das tensões normais apenas no segundo pavimento, e ficando praticamente restrito à região de interseção com a Parede 13-1. Nos demais pisos, mesmo no primeiro

pavimento, que corresponde ao pavimento no qual foi removido o trecho de parede, não se verificou alteração na distribuição de tensões normais.

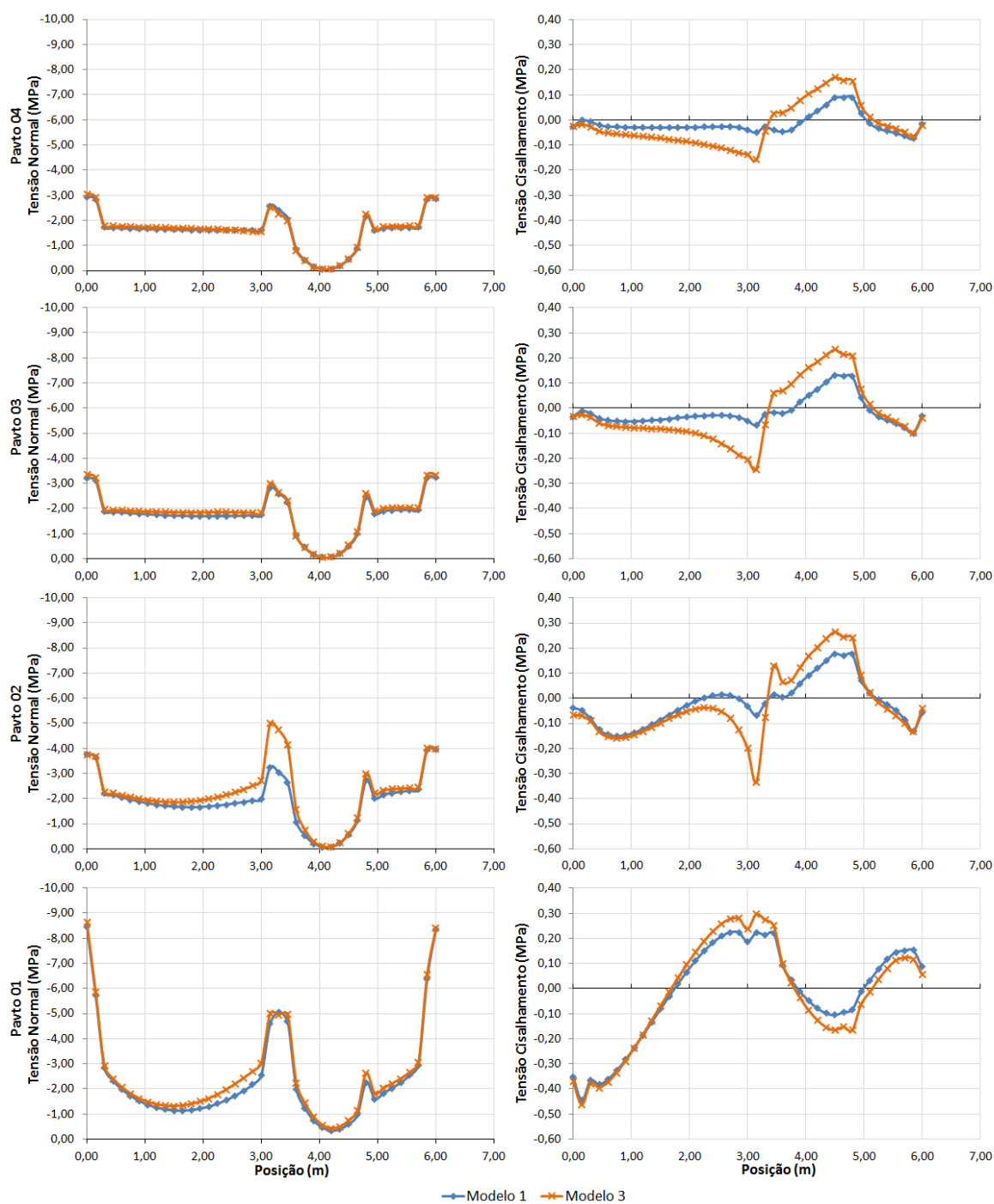


Figura 4.6 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 16, do primeiro ao quarto pavimento.

Um pouco diferente, verifica-se que ocorreu modificação na distribuição de tensões de cisalhamento, mais pronunciado do segundo pavimento, cujas diferenças em relação do Modelo 1 se reduzem rapidamente nos pavimentos superiores. É importante destacar que, no caso específico da Parede 16, foram verificadas alterações mais significativas na distribuição de tensões de cisalhamento, e não na distribuição das tensões normais, como se verificou nas paredes anteriormente avaliadas.

Um aspecto relevante a ser observado no caso da Parede 16 é que a mesma pertence a dois grupos de paredes. Os grupos de paredes são constituídos por trechos de alvenaria estrutural em que se considera a atuação de uma carga vertical uniformizada, sendo limitados, geralmente, pelas aberturas de porta e de janela. A Figura 4.7 ilustra os grupos dos quais a Parede 16 está inserida.

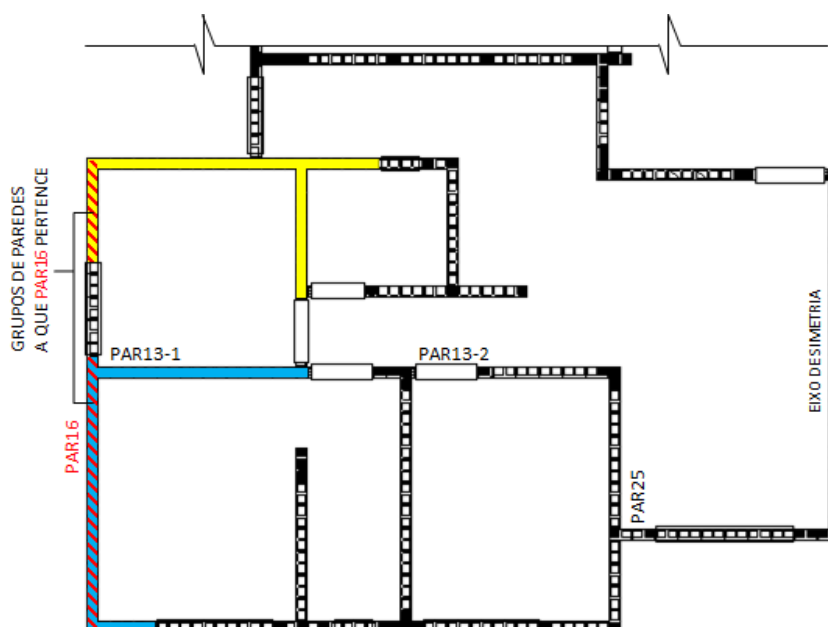


Figura 4.7 – Grupos de paredes da Parede 16.

Levando em consideração esse aspecto, é pertinente observar que, na base do segundo pavimento, o pico de tensões normais do Modelo 3 tende a se redistribuir ao longo do comprimento à esquerda, dado que o pico de tensões, ocasionado pela remoção da Parede 13-2, acontece dentro deste grupo.

A Tabela 4.4 apresenta as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base da Parede 16 de acordo com os pavimentos. A maior diferença percentual, de fato, se refere ao pico intermediário localizado na base do segundo pavimento, com 54,0 %, referente ao aumento de 3,24 MPa para 4,98 MPa. Nota-se que nos demais pavimentos as diferenças percentuais são baixas, especialmente na extremidade direita, a qual não pertence ao grupo de paredes afetado pela remoção, conforme comentado anteriormente.

Tabela 4.4 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 16, com remoção de parede no primeiro pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-2,92	-	-3,05	4,5%
3	-3,22	-	-3,35	4,3%
2	-3,75	-	-3,74	-0,3%
1	-8,44	-	-8,62	2,1%
Valores no pico intermediário (3,15 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-2,57	-	-2,52	-1,9%
3	-2,80	-	-2,98	6,5%
2	-3,24	-	-4,98	54,0%
1	-5,06	-	-5,00	-1,1%
Valores na extremidade direita (6,00 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
4	-2,84	-	-2,92	2,7%
3	-3,22	-	-3,33	3,4%
2	-3,95	-	-3,96	0,5%
1	-8,35	-	-8,40	0,6%

4.1.1.2 Situação de remoções de paredes no sexto pavimento

Também foram analisadas as tensões normais e de cisalhamento na base das paredes do terceiro ao nono pavimento considerando a situação de remoção de painéis no sexto pavimento. É importante comentar que esta situação de análise não se deu concomitantemente com a anterior, na qual foram removidos trechos de

alvenaria no primeiro pavimento. Dessa forma, considerou-se a remoção de paredes no sexto pavimento, permanecendo íntegro o primeiro pavimento. Tal situação foi definida para as análises em função de duas razões principais: a natural variação de resistência empregada nos pavimentos dos edifícios de alvenaria estrutural; e as diferentes condições de contorno das paredes na base em relação às do primeiro pavimento devido à presença da estrutura de transição.

A Figura 4.8 ilustra os trechos onde foram analisadas as tensões para a situação de remoções no sexto pavimento, para os Modelos 2a e 2b. Nesta nova situação, os Modelos 2a, 2b e 3 são idênticos aos empregados anteriormente no primeiro pavimento. Por outro lado, foram analisados também três pavimentos abaixo do pavimento onde ocorreu a remoção dos trechos de alvenaria.

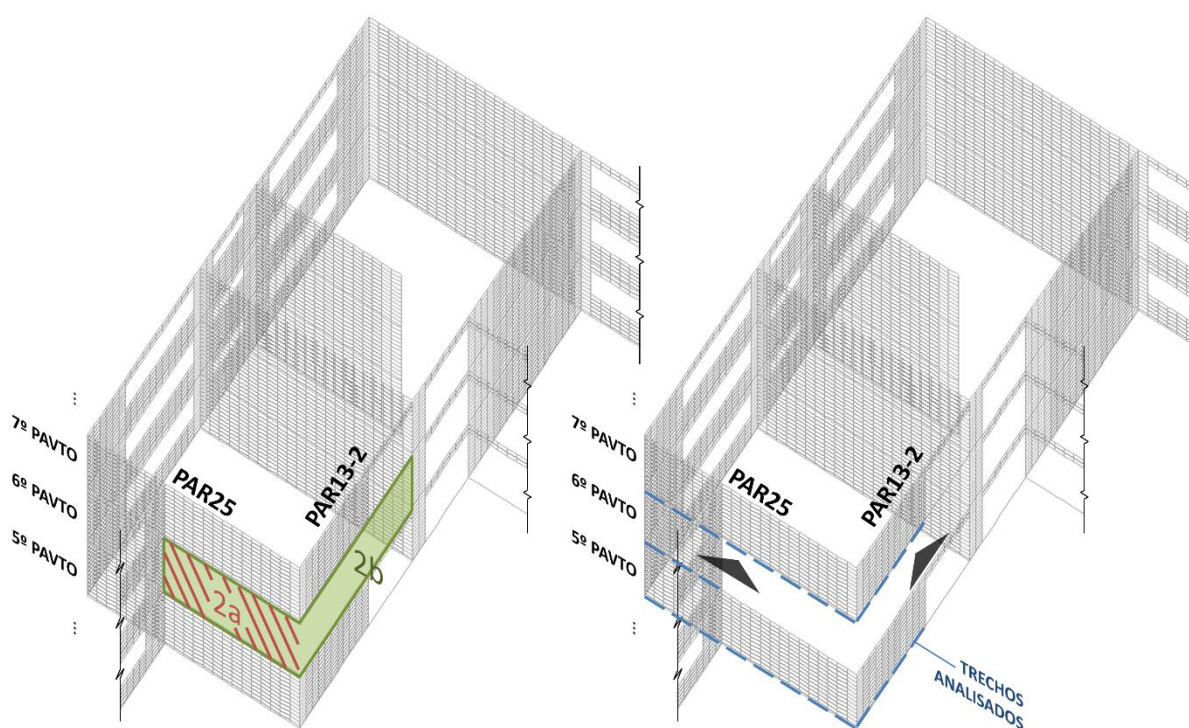


Figura 4.8 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para as remoções no sexto pavimento, em vista tridimensional.

A Figura 4.9 ilustra as tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 25, do terceiro ao nono pavimento.

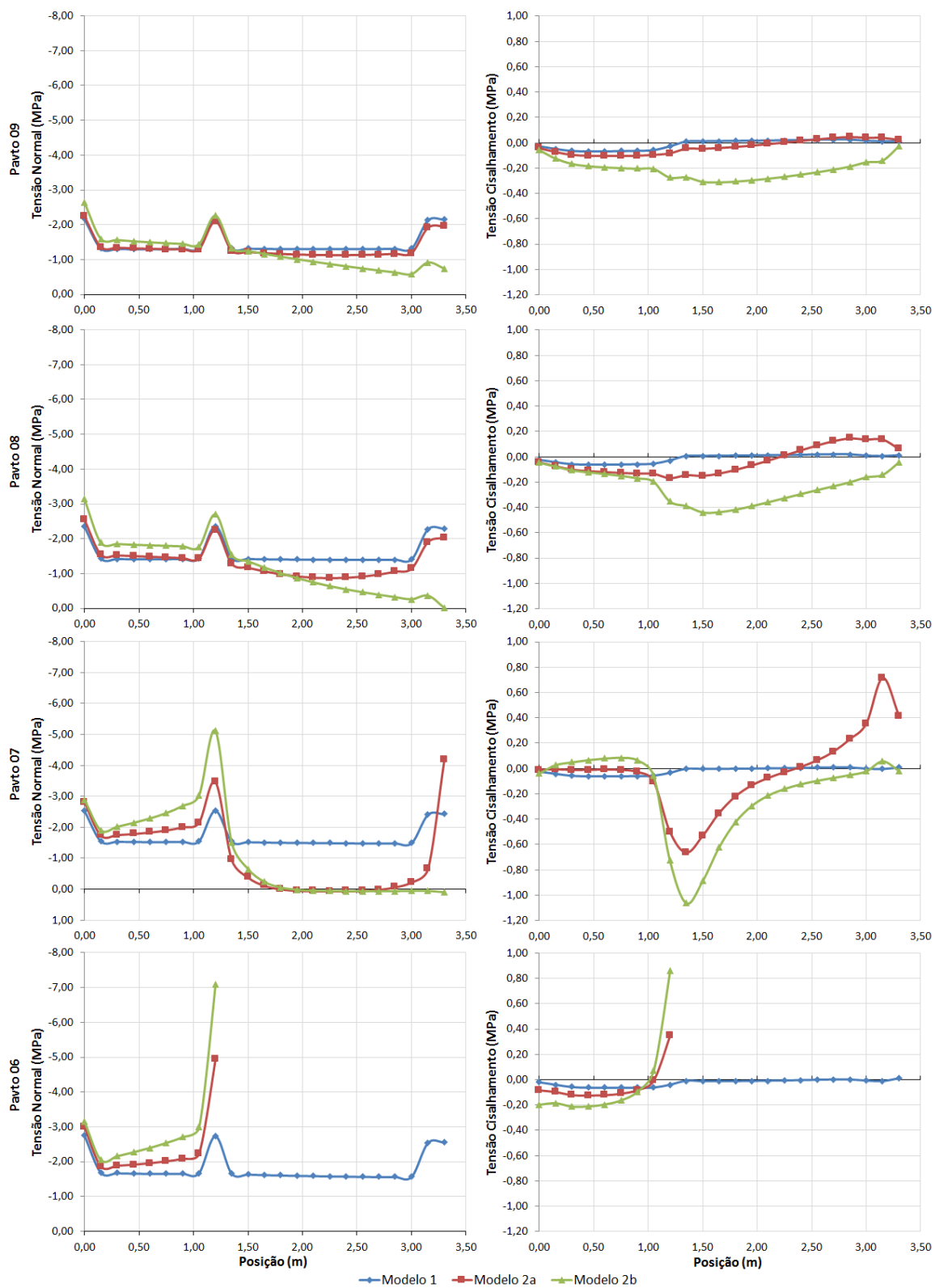


Figura 4.9 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 25, do terceiro ao nono pavimento.

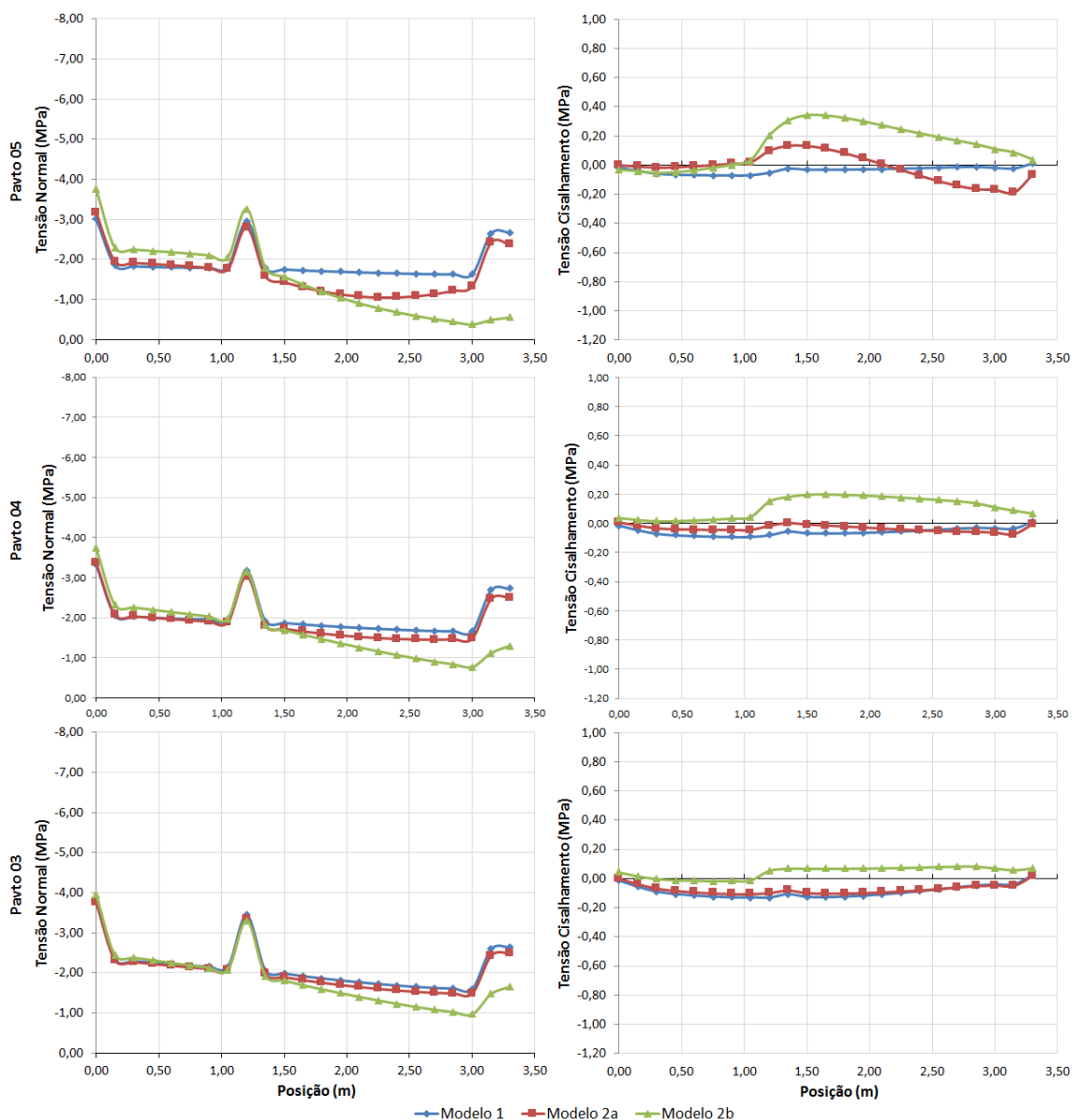


Figura 4.9 (continuação) – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 25, do terceiro ao nono pavimento.

De uma forma geral, a distribuição das tensões acima do sexto pavimento apresenta comportamento semelhante ao que foi observado na situação anterior. Nos pavimentos abaixo do sexto, percebe-se um alívio na intensidade das tensões normais apenas no quinto pavimento, no caso do Modelo 2a, e se estendendo até o terceiro pavimento, no caso do Modelo 2b.

É possível perceber a formação do arco no sétimo pavimento, com a migração das tensões normais para a região dos apoios remanescentes. Além disso, é notável o acréscimo de tensões de cisalhamento, tanto nos pavimentos acima como nos

pavimentos abaixo do sexto, em comparação ao Modelo 1 que apresenta tensões praticamente nulas.

A Tabela 4.5 apresenta as diferenças percentuais, nos picos observados, das tensões normais na base da Parede 25 de acordo com os pavimentos. A maior diferença percentual observada é de 159,8 %, que se refere à mudança na intensidade da tensão de 2,73 MPa para 7,10 MPa, com o Modelo 2b.

Tabela 4.5 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 25, com remoção de parede no sexto pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-2,17	-	-2,24	3,3%	-2,65	21,8%
8	-2,35	-	-2,54	8,1%	-3,14	33,8%
7	-2,54	-	-2,81	10,6%	-2,89	13,7%
6	-2,76	-	-3,00	8,7%	-3,16	14,4%
5	-3,01	-	-3,18	5,5%	-3,76	24,8%
4	-3,34	-	-3,37	1,0%	-3,75	12,5%
3	-3,79	-	-3,77	-0,7%	-3,95	4,1%
Valores no pico intermediário (1,20 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-2,19	-	-2,10	-4,4%	-2,27	3,3%
8	-2,36	-	-2,25	-4,9%	-2,70	14,5%
7	-2,54	-	-3,47	36,6%	-5,11	101,3%
6	-2,73	-	-4,95	81,2%	-7,10	159,8%
5	-2,94	-	-2,81	-4,6%	-3,26	10,9%
4	-3,18	-	-3,03	-4,6%	-3,15	-0,8%
3	-3,45	-	-3,33	-3,2%	-3,30	-4,2%
Valores na extremidade direita (3,30 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-2,15	-	-1,96	-9,1%	-0,73	-65,9%
8	-2,29	-	-2,03	-11,6%	-0,01	-99,4%
7	-2,43	-	-4,19	72,6%	0,10	-104,0%
6	-2,56	-	-	-	-	-
5	-2,67	-	-2,39	-10,6%	-0,56	-79,0%
4	-2,73	-	-2,51	-8,2%	-1,30	-52,4%
3	-2,65	-	-2,50	-5,6%	-1,66	-37,5%

De fato, com a remoção conjunta das Paredes 25 e 13-2, a região onde aparece esta concentração de tensões tende a receber considerável contribuição das cargas devido à perda de suporte destas paredes.

É pertinente resgatar que na situação anteriormente discutida tem-se na mesma região uma diferença percentual de 90,2 %, que se refere ao aumento na tensão normal de 3,77 MPa para 7,17 MPa. Nota-se, portanto, nos resultados obtidos segundo o Modelo 2b, que esta situação apresentou maior aumento percentual do que a situação anterior. Neste caso, levando em consideração que, nos edifícios de alvenaria estrutural, é prática de projeto adotar resistências características decrescentes ao longo dos pavimentos, tal como apresentado na Tabela 3.1, é razoável pensar que há a possibilidade de uma remoção de painéis em pavimentos mais elevados oferecer um risco maior à estrutura.

A Figura 4.10 ilustra a distribuição das tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 13-2, do terceiro ao nono pavimento. Novamente, é notável o pico de tensões na extremidade direita, na base do sétimo pavimento, que se refere à concentração de tensões advindas da remoção do trecho do Modelo 2a. De uma forma geral, o Modelo 2a resultou em acréscimos de tensões normais apenas no sexto e sétimo pavimentos, permanecendo praticamente iguais ao Modelo 1 nos demais pavimentos. Quando ao Modelo 2b, os resultados indicam o alívio de tensões normais no correspondente trecho de parede, notadamente no sétimo e oitavo pavimentos ficaram praticamente isentos de tensões, voltando a receber carregamento apenas no nono pavimento.

No caso das tensões de cisalhamento, é possível observar picos de tensões nas regiões próximas à abertura, especialmente segundo o Modelo 2b. Além disso, percebe-se também o surgimento desse tipo de tensão ao longo do comprimento da parede do quinto, no sétimo e no oitavo pavimento, segundo o Modelo 2a, e no oitavo e nono pavimento, segundo o Modelo 2b.

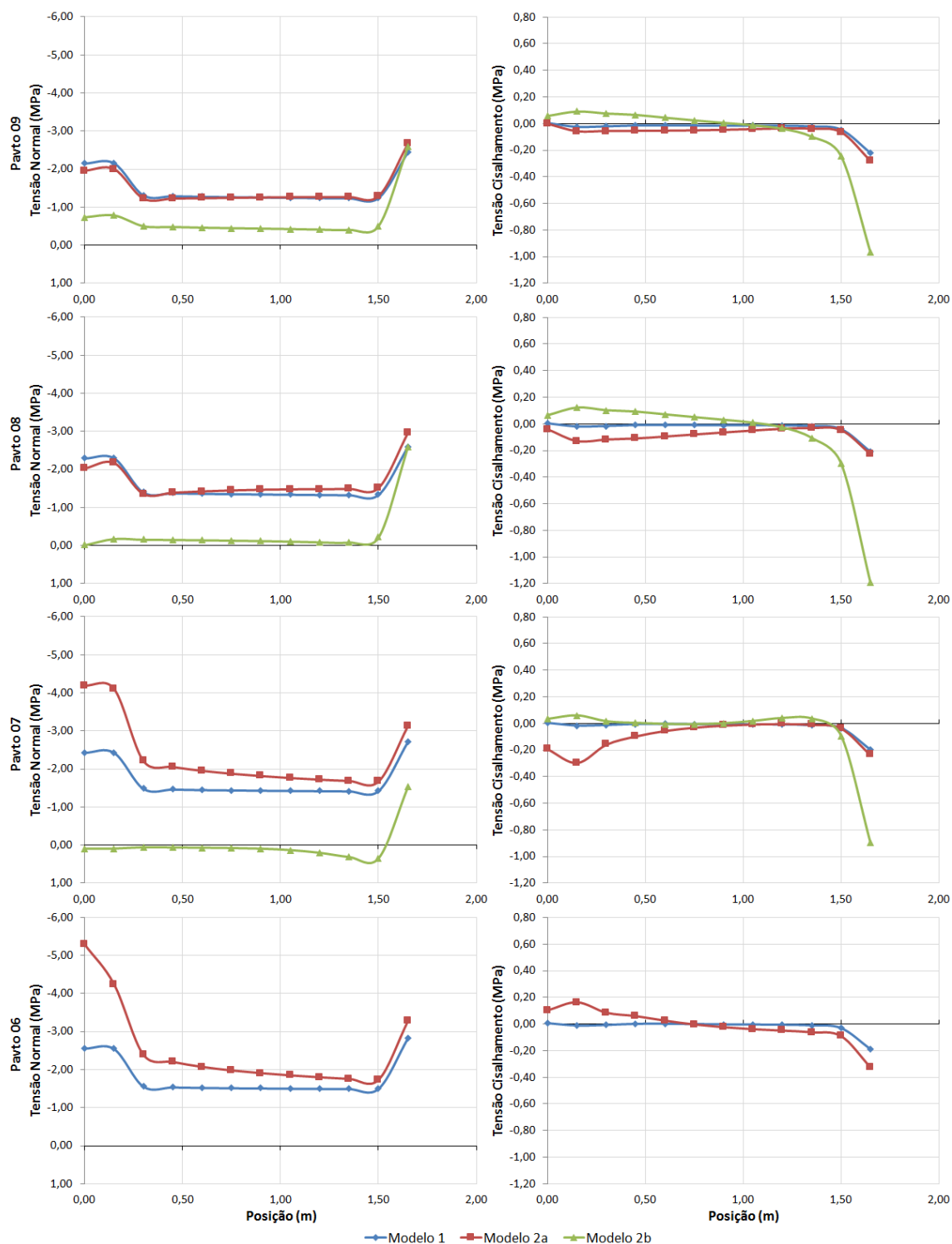


Figura 4.10 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-2, do terceiro ao nono pavimento.

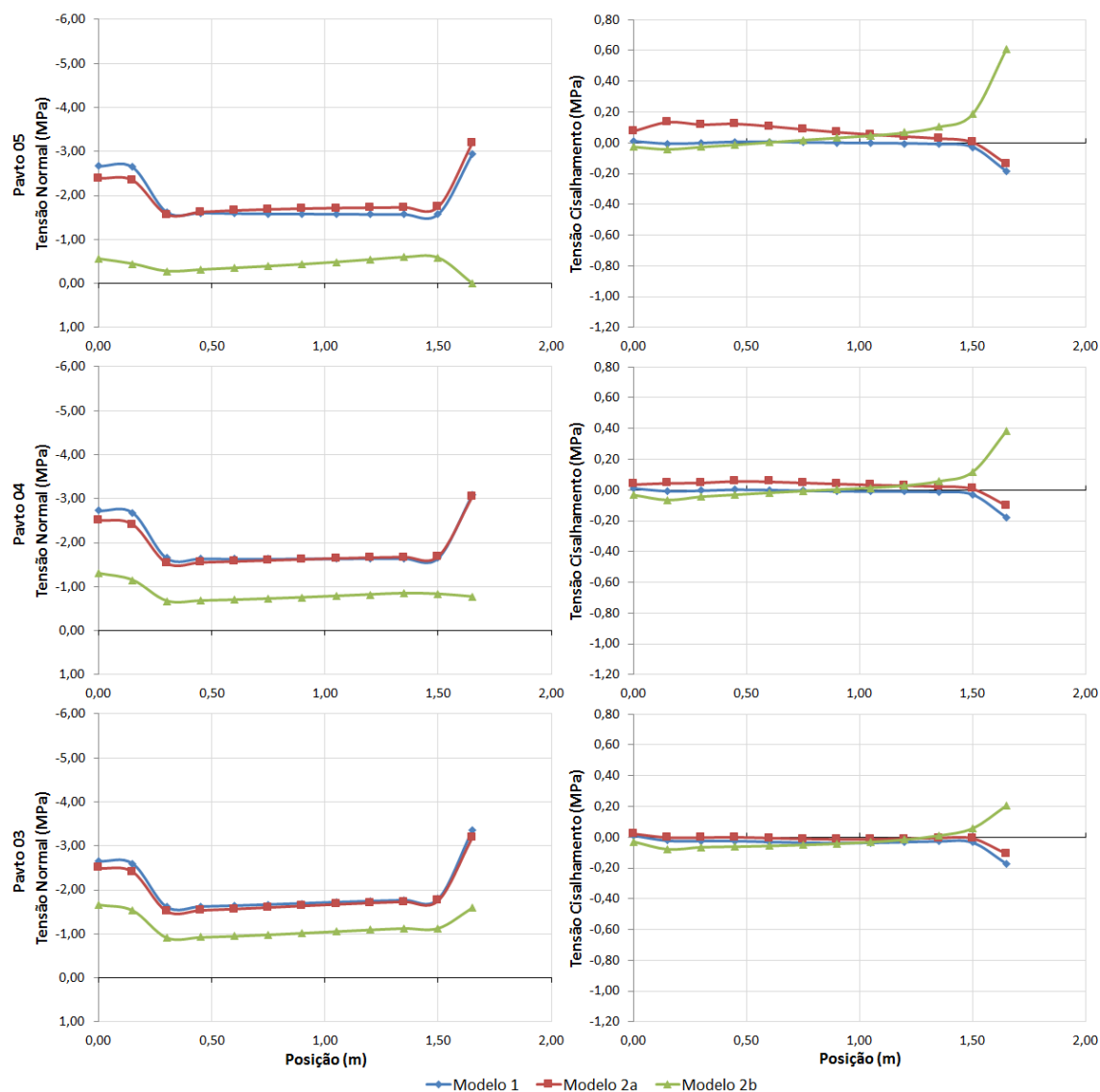


Figura 4.10 (continuação) – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-2, do terceiro ao nono pavimento.

A Tabela 4.6 apresenta as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base da Parede 13-2 de acordo com os pavimentos. Observa-se nos resultados a partir do Modelo 2a uma maior diferença percentual na extremidade esquerda da Parede 13-2 que, de fato, recebe considerável carga com a remoção do trecho da Parede 25. Verifica-se que a tensão normal muda a intensidade de 2,56 MPa para 5,28 MPa, correspondendo à diferença percentual de 106,4 %.

Neste caso, também é interessante comparar a situação anteriormente discutida com a atual, nos resultados do Modelo 2a: na situação de remoções de painéis no primeiro pavimento, obteve-se um pico de 3,22 MPa (aumento percentual

de 95,5 %) na mesma região onde se observa o valor de 5,28 MPa (aumento percentual de 106,4 %) com a remoção de painéis no sexto pavimento. Dessa forma, nota-se que na segunda situação houve maior aumento percentual na concentração de tensões normais. Atenta-se, portanto, para a possibilidade de risco maior na remoção de trechos de alvenaria em pavimentos mais elevados.

Tabela 4.6 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 13-2, com remoções de parede no sexto pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-2,15	-	-1,96	-9,1%	-0,73	-65,9%
8	-2,29	-	-2,03	-11,6%	-0,01	-99,4%
7	-2,43	-	-4,19	72,6%	0,10	-104,0%
6	-2,56	-	-5,28	106,4%	-	-
5	-2,67	-	-2,39	-10,6%	-0,56	-79,0%
4	-2,73	-	-2,51	-8,2%	-1,30	-52,4%
3	-2,65	-	-2,50	-5,6%	-1,66	-37,5%
Valores na extremidade direita (1,65 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2a		Modelo 2b	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-2,45	-	-2,67	8,7%	-2,60	5,9%
8	-2,59	-	-2,97	14,6%	-2,58	-0,3%
7	-2,72	-	-3,13	15,3%	-1,53	-43,6%
6	-2,83	-	-3,28	15,6%	-	-
5	-2,95	-	-3,19	8,2%	0,00	-100,1%
4	-3,09	-	-3,04	-1,6%	-0,77	-75,1%
3	-3,35	-	-3,20	-4,6%	-1,59	-52,6%

A Figura 4.11 ilustra os trechos onde foram analisadas as tensões para a situação de remoções no sexto pavimento, no caso dos Modelos 1 e 3.

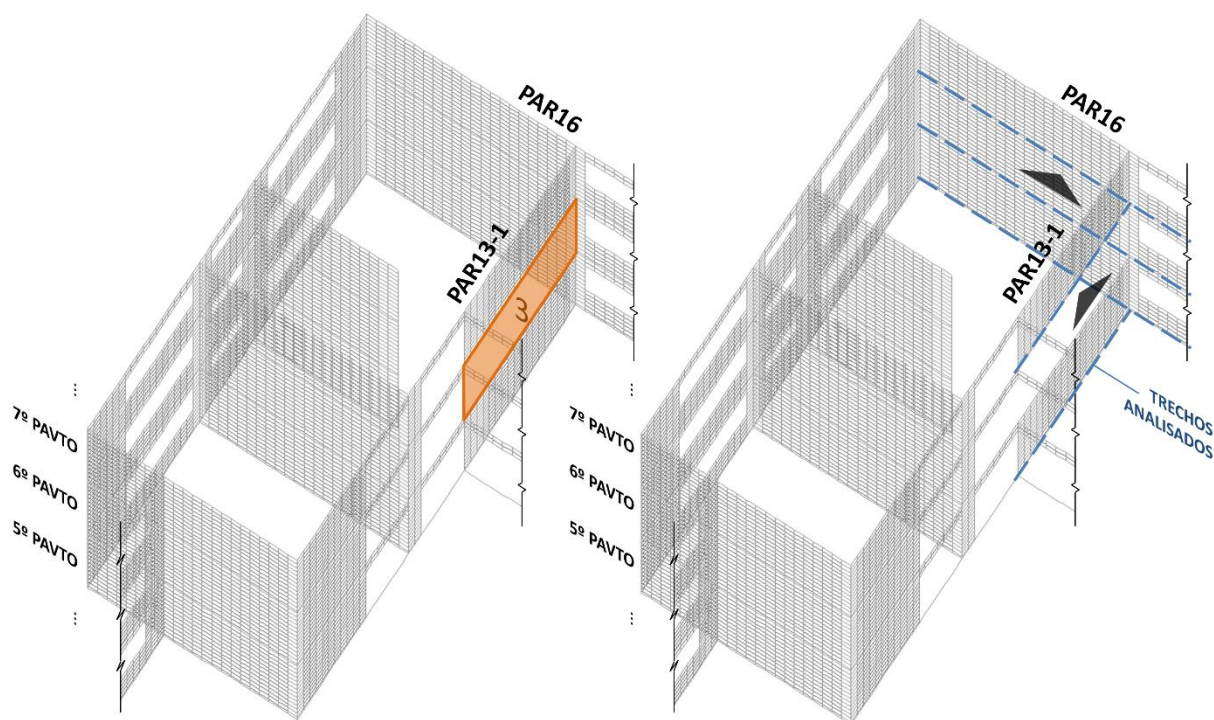


Figura 4.11 – Indicação do trecho removido no Modelo 3 (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para remoção no sexto pavimento, em vista tridimensional.

Os resultados obtidos estão ilustrados pela Figura 4.12 por meio das tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 13-1, do terceiro ao nono pavimento. Com a remoção da parede 13-1 no sexto pavimento, nota-se a concentração de tensões normais nas extremidades da base no sétimo pavimento devido à migração da carga para estas regiões, que servem de apoio para a parede que se encontra sem suporte. Dessa forma, ocorreram tensões praticamente nulas ao longo do vão formado pela remoção. Por outro lado, retoma-se a proximidade rapidamente com os resultados do Modelo 1 ao longo dos pavimentos, tanto acima como abaixo do trecho de alvenaria removido. É importante comentar que a situação crítica a ser analisada consiste nos picos ocorridos no sétimo pavimento, pois os demais apresentaram tensões com intensidades inferiores às do Modelo 1. Vale também o comentário que os trechos com maiores intensidades de tensões no Modelo 1 correspondem ao efeito do grauteamento da parede.

No que se refere às tensões de cisalhamento, segundo o Modelo 3, ocorreram picos nas extremidades da Parede 13-1, notadamente no sétimo e no oitavo

pavimento, originalmente não existentes no Modelo 1. É importante destacar também o surgimento dessas tensões no quinto pavimento.

Portanto, no geral, tem-se comportamento semelhante ao apresentado na situação de remoções no primeiro pavimento.

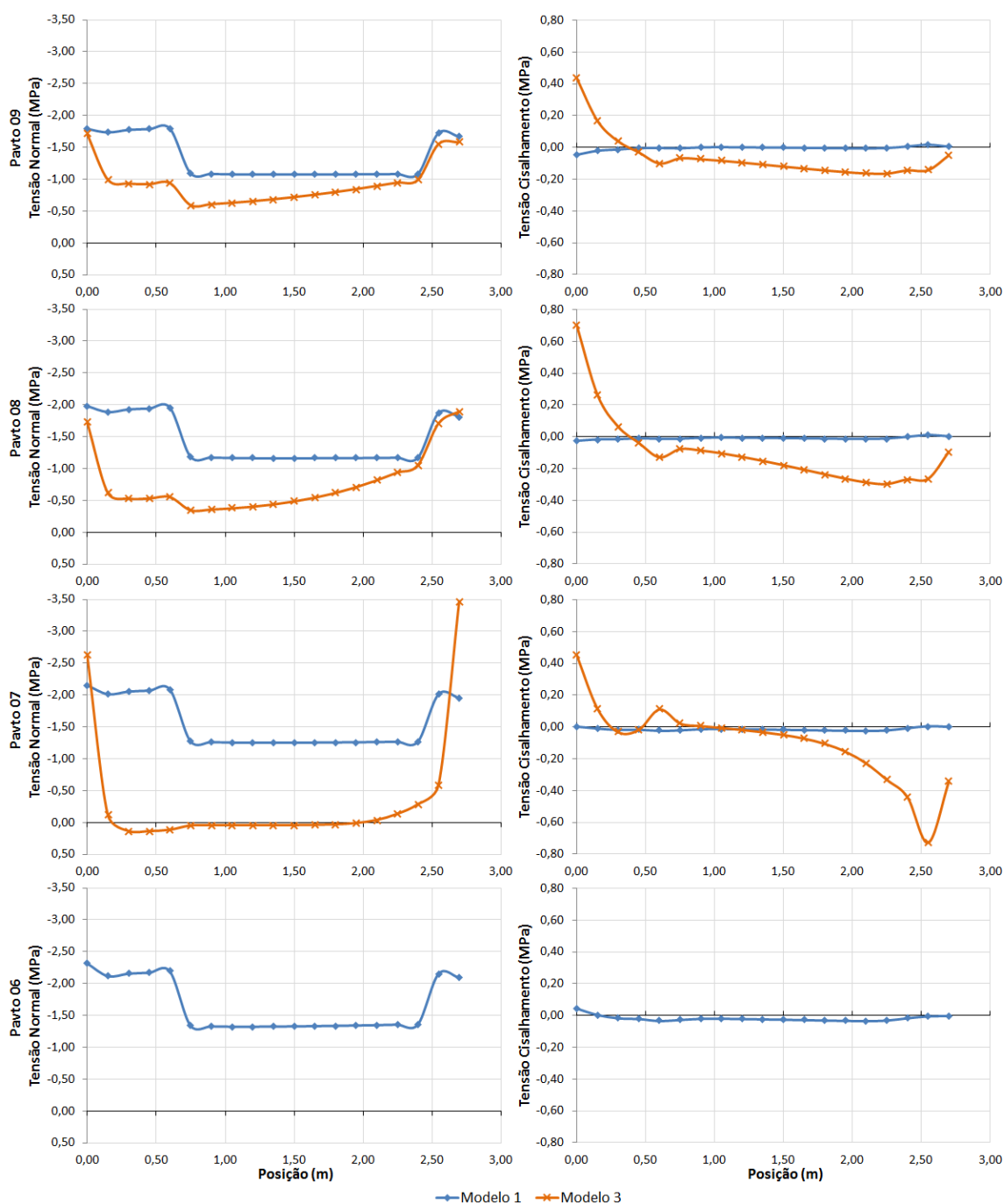


Figura 4.12 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-1, do terceiro ao nono pavimento.

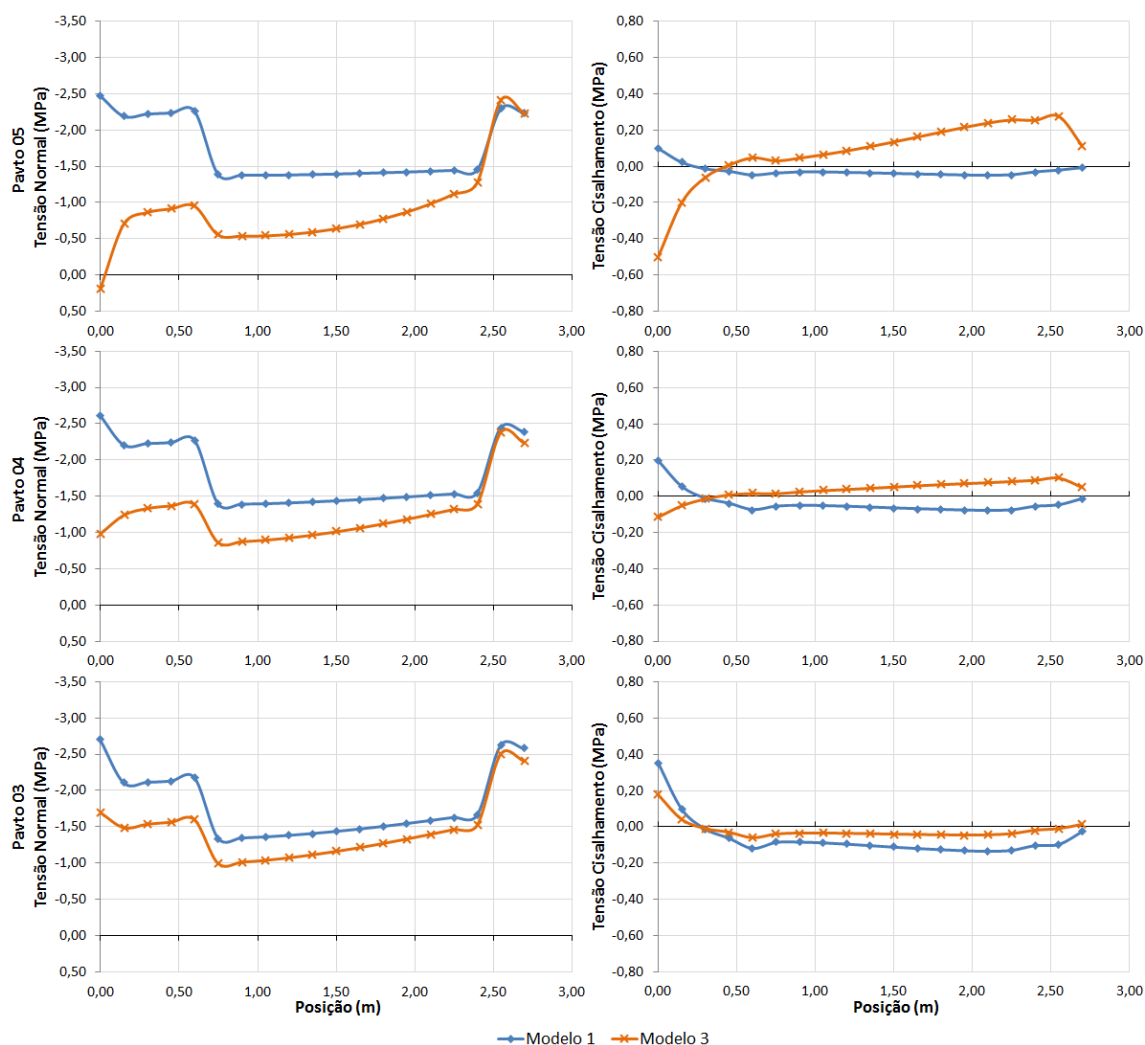


Figura 4.12 (continuação) – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 13-1, do terceiro ao nono pavimento.

A Tabela 4.7 apresenta as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base da Parede 13-1 em cada pavimento. A maior diferença observada se refere à extremidade direita, região da parede de fachada onde a Parede 13-1 do sétimo pavimento, que perdeu suporte, se apoia. De fato, se trata do ponto de maior rigidez para o qual as cargas convergem com a retirada do trecho da parede no sexto pavimento. Neste ponto, tem-se uma diferença percentual de 77,2 %, que se refere ao acréscimo na tensão normal de 1,95 MPa para 3,46 MPa. Na extremidade esquerda também é notável o acréscimo de tensão, com diferença percentual igual a 22,4 % referente ao acréscimo na tensão normal de 2,15 MPa para 2,64 MPa.

Novamente, é pertinente comparar estes resultados aos obtidos na situação de remoção de painéis no primeiro pavimento. Na primeira situação, Tabela 4.3, as extremidades esquerda e direita apresentaram picos de tensão de 3,60 MPa e 4,72 MPa contra 2,64 MPa e 3,46 MPa, respectivamente, na segunda situação, Tabela 4.7. Diferentemente dos resultados das Paredes 25 e 13-2, a Parede 13-1 apresentou, nos picos, tensões maiores na situação de remoção no primeiro pavimento. Nota-se que não só não é trivial considerar que pavimentos mais carregados devam necessariamente gerar situações de risco maior no caso de uma remoção inadvertida de painéis estruturais, como também não é trivial a situação contrária.

Tabela 4.7 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 13-1, com remoções de parede no sexto pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-1,79	-	-1,72	-4,2%
8	-1,98	-	-1,73	-12,5%
7	-2,15	-	-2,64	22,4%
6	-2,32	-	-	-
5	-2,48	-	0,19	-107,7%
4	-2,61	-	-0,99	-62,3%
3	-2,70	-	-1,70	-37,1%
Valores na extremidade direita (2,70 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-1,67	-	-1,58	-5,1%
8	-1,81	-	-1,89	4,4%
7	-1,95	-	-3,46	77,2%
6	-2,09	-	-	-
5	-2,24	-	-2,23	-0,2%
4	-2,38	-	-2,23	-6,3%
3	-2,58	-	-2,41	-6,6%

A Figura 4.13 ilustra a distribuição das tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 16, do terceiro ao nono pavimento. Com a remoção da Parede 13-1 no sexto pavimento, assim como ocorre na situação anterior do primeiro pavimento, conforme ilustrado na Figura 4.6, surge um pico de tensões normais no pavimento onde ocorreu a remoção e no imediatamente acima. Neste caso, fica ainda mais

evidente a redistribuição de tensões ao longo do trecho da Parede 16, pertencente ao mesmo grupo de paredes da Parede 13-1.

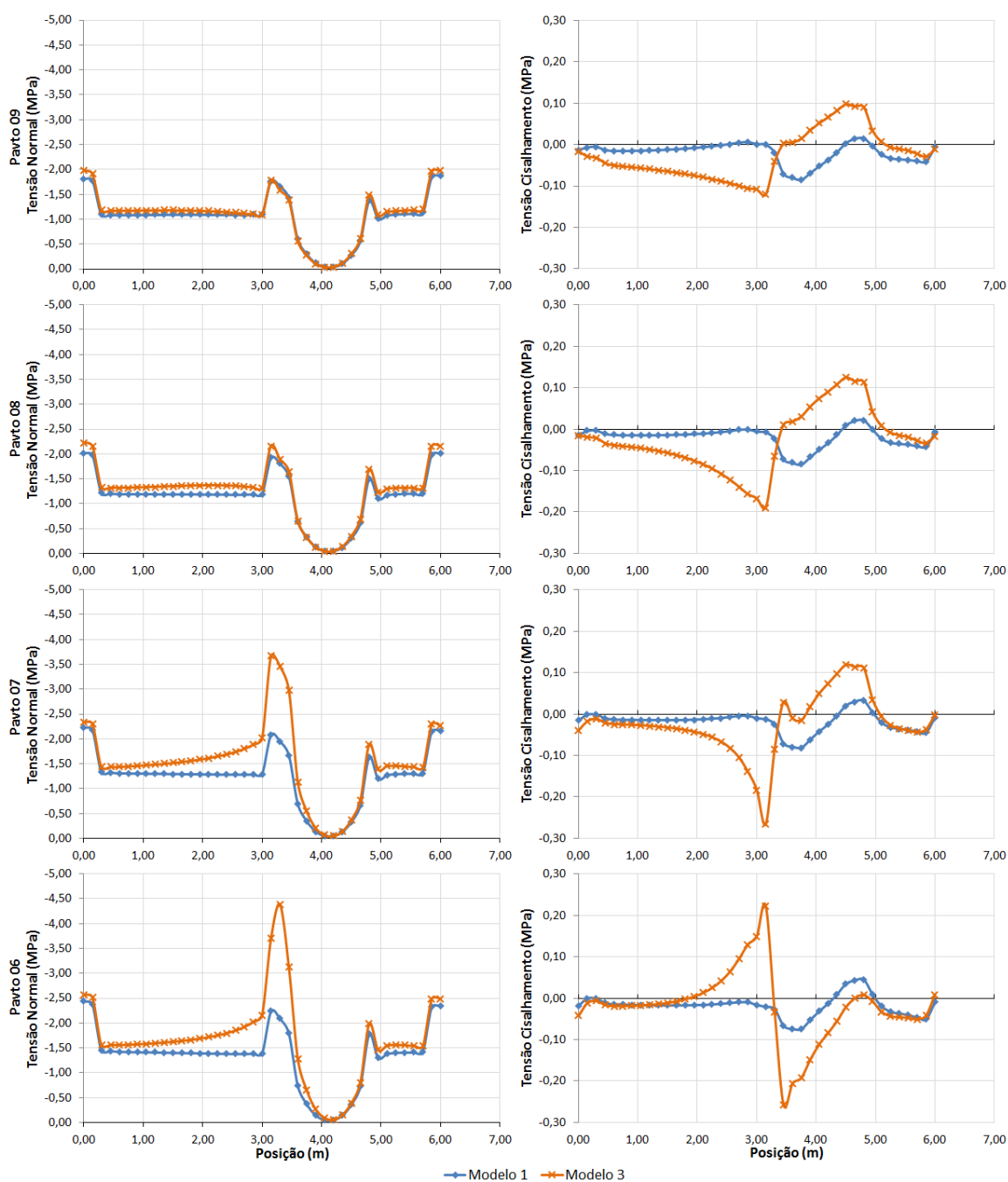


Figura 4.13 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 16, do terceiro ao nono pavimento.

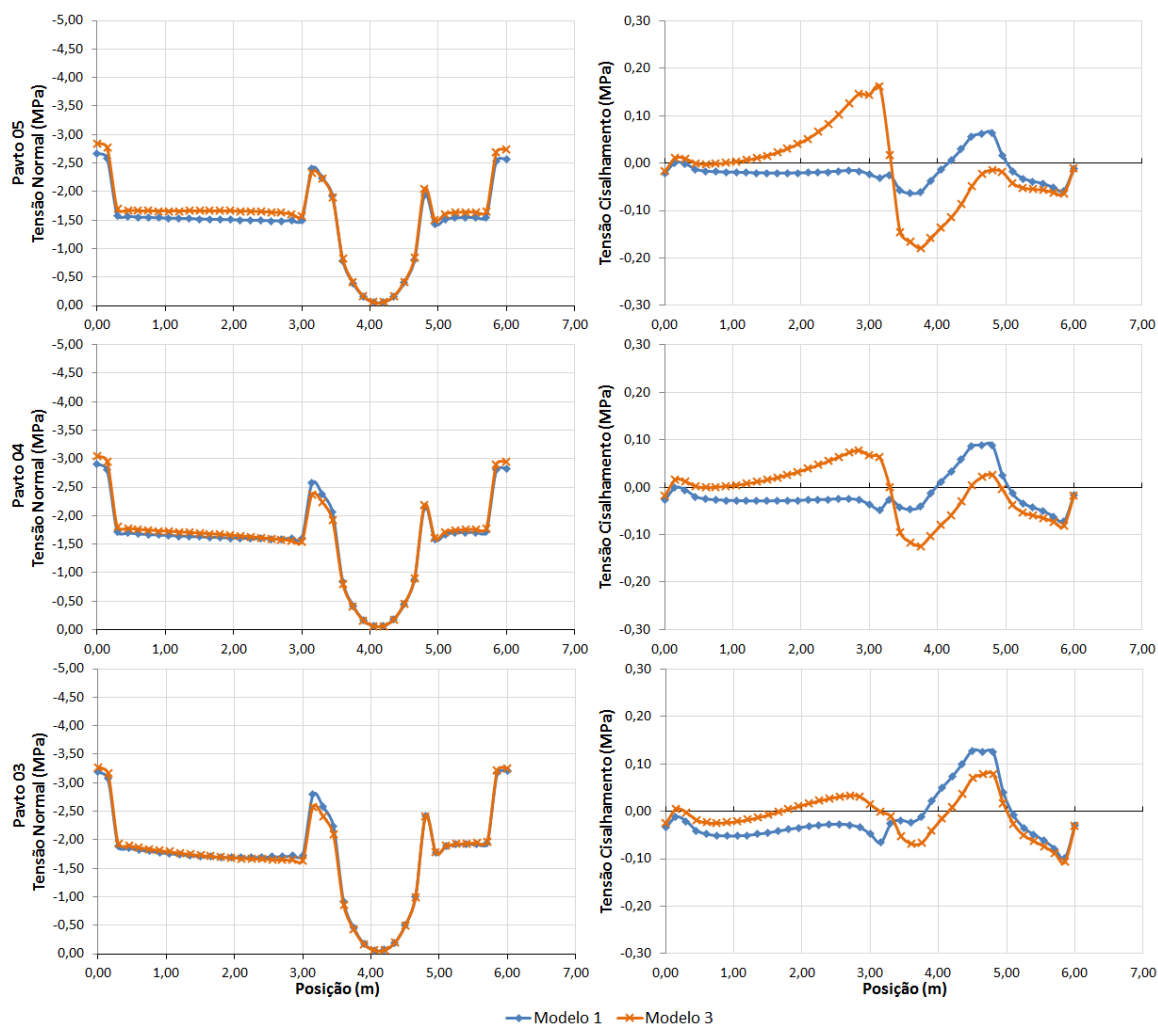


Figura 4.13 (continuação) – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 16, do terceiro ao nono pavimento.

Também é notável a reaproximação na intensidade das tensões normais entre os Modelos 1 e 3 ao longo dos pavimentos, tanto acima como abaixo do sexto pavimento. Outro aspecto de destaque se refere a uma possível mobilização do lintel para redistribuir as tensões para o grupo de paredes vizinho. O trecho entre as coordenadas 3,50 m e 4,50 m, com as menores intensidades de tensões, representa o lintel. Verifica-se que o trecho compreendido entre as coordenadas 4,50 m e 6,0 m não sofreu qualquer influência na distribuição das tensões, indicando que lintel não foi mobilizado na redistribuição das tensões normais.

No caso das tensões de cisalhamento, tem-se a típica concentração de tensões na proximidade de onde ocorrem os picos de tensão normal, que tendem a retornar ao nível de intensidade do Modelo 1 ao longo dos pavimentos.

A Tabela 4.8 apresenta as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base da Parede 16 em cada pavimento. Percebe-se que as maiores diferenças ocorreram no sexto e sétimo pavimento, no ponto de encontro entre as Paredes 16 e 13-1. De fato, com a remoção da Parede 13-1, este ponto serve de apoio para as demais paredes acima do sexto pavimento que ficaram sem suporte.

Tabela 4.8 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 16, com remoções de parede no sexto pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-1,82	-	-1,99	9,4%
8	-2,02	-	-2,23	10,2%
7	-2,23	-	-2,34	4,8%
6	-2,44	-	-2,57	5,1%
5	-2,66	-	-2,84	6,7%
4	-2,91	-	-3,04	4,5%
3	-3,20	-	-3,28	2,4%
Valores no pico intermediário (3,15 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-1,77	-	-1,78	0,9%
8	-1,92	-	-2,16	12,2%
7	-2,08	-	-3,67	76,1%
6	-2,24	-	-4,39	96,0%
5	-2,40	-	-2,34	-2,6%
4	-2,57	-	-2,36	-8,0%
3	-2,79	-	-2,58	-7,6%
Valores na extremidade direita (6,00 m)				
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
9	-1,88	-	-1,98	5,5%
8	-2,01	-	-2,16	7,2%
7	-2,17	-	-2,27	4,7%
6	-2,35	-	-2,49	6,2%
5	-2,56	-	-2,73	6,8%
4	-2,83	-	-2,94	3,9%
3	-3,20	-	-3,26	1,7%

É notável também a diferença de comportamento entre as duas situações analisadas. Na primeira situação, com a remoção da parede no primeiro pavimento,

não houve perturbação significativa no mesmo pavimento onde ocorreu a remoção, somente aparecendo o pico de tensões no segundo pavimento. Já na segunda situação, a concentração de tensões ocorre a partir do mesmo pavimento onde há a remoção da Parede 13-1 e segue diminuindo ao longo dos pavimentos.

Outro ponto a ser observado é que as diferenças percentuais na extremidade direita se mantêm a valores baixos. Tal fato se justifica pelo lintel mencionado anteriormente não ter sido mobilizado na redistribuição de tensões.

4.1.1.3 Comentários

A partir da análise de redistribuição de tensões nos vários pavimentos foi possível observar características pertinentes no comportamento das tensões, de maneira que se pode concluir que:

- De uma forma geral, na ocorrência de uma remoção de painéis estruturais em um determinado pavimento “x”, as tensões normais e de cisalhamento analisadas na base das paredes tenderam a retornar rapidamente aos níveis da estrutura íntegra, sendo os pavimentos “x” e “x + 1” os mais afetados pela remoção considerada, no caso da redistribuição de tensões normais, e os pavimentos “x”, “x + 1” e “x – 1”, no caso da distribuição de tensões de cisalhamento;
- Não é verdadeira a pressuposição de que, dada uma situação de remoção de paredes estruturais, pavimentos mais carregados proporcionam maiores diferenças percentuais nas regiões de concentrações de tensões geradas. Na realidade, pavimentos menos carregados, portanto os mais altos, podem apresentar diferenças percentuais superiores às obtidas na ocorrência da remoção de um trecho de alvenaria em pavimentos mais baixos. Um aspecto que pode justificar esse resultado se refere à adoção de uma estrutura de transição no edifício avaliado que, em sua essência já introduz concentração de tensões nas paredes devido ao fenômeno da interação parede-viga;
- Em muitas das análises, o acréscimo de tensões observado foi mais significativo para as tensões de cisalhamento, especialmente no caso de remoção de parede em pavimentos superiores;

- Um aspecto interessante a ser observado diz respeito ao princípio de Saint-Venant. De fato, as perturbações das tensões tenderam a se concentrar em regiões próximas às remoções, se aproximando rapidamente do Modelo 1 ao longo dos pavimentos.

4.1.2 Análise das cintas de respaldo no pavimento superior à remoção dos trechos de alvenaria

No item 4.1.1 foram identificadas características peculiares na constituição do arco de tensões nas paredes imediatamente acima dos trechos de alvenaria removidos, mesmo sem existência física de uma viga em sua base. Conforme comentado no item 2.2, além da formação de um arco de tensões, também é característica de um sistema parede-viga, a ocorrência de forças de tração axial na viga de suporte. Dessa forma, torna-se pertinente avaliar a contribuição da cinta de respaldo remanescente sob o aspecto do comportamento de tirante no sistema parede-viga. As análises seguintes tratam exatamente da verificação dessas forças considerando a mesma sequência de análise adotada nos itens anteriores.

4.1.2.1 Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento

A Figura 4.14 ilustra os trechos onde foram analisadas as forças normais ao longo das cintas de respaldo na base e no topo do segundo pavimento, para a situação de remoções no primeiro pavimento, correspondentes aos Modelos 2a e 2b.

A Figura 4.15 ilustra as forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 25 e 13-2, no segundo pavimento, ao longo dos trechos indicados na Figura 4.14. Julgou-se conveniente ilustrar os resultados das Paredes 25 e 13-2 em continuidade no comprimento. Inicialmente, no Modelo 1 observa-se que as cintas permanecem praticamente em valores baixos ou nulos de força normal, exceto na região da abertura localizada na Parede 13-2.

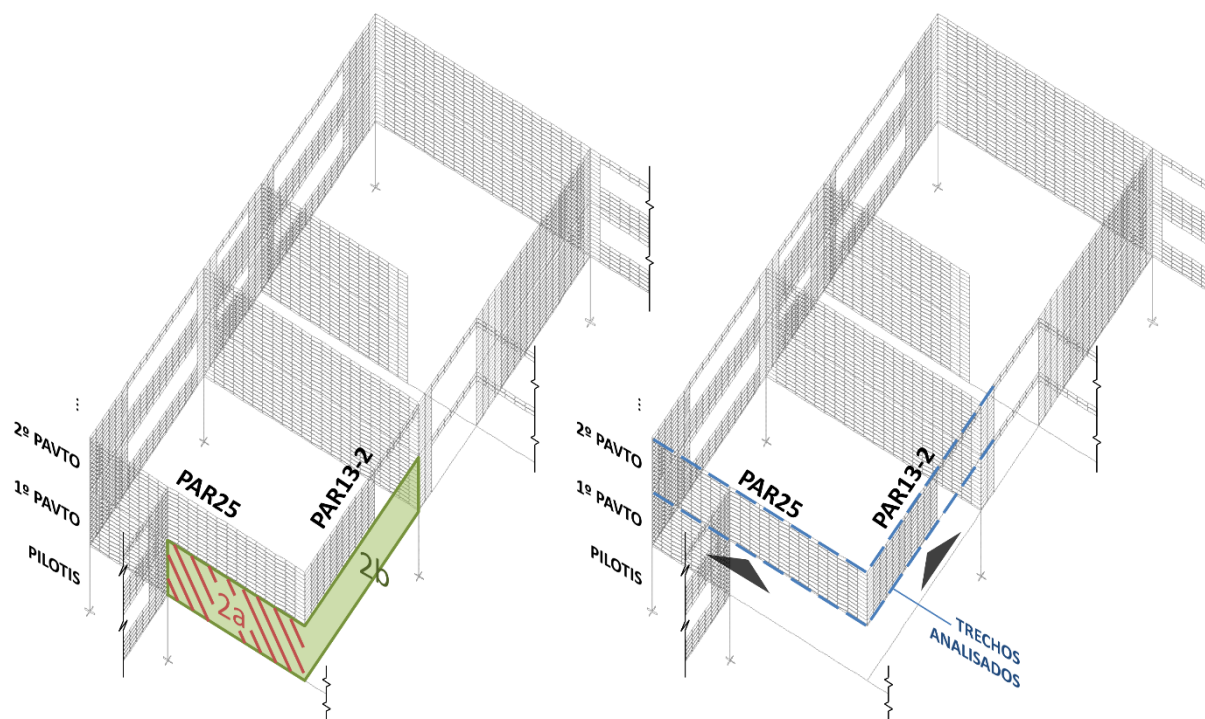


Figura 4.14 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e dos trechos de análise das forças normais nas cintas de respaldo (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

Considerando agora o Modelo 2a, percebe-se na cinta inferior o surgimento de forças de tração no trecho compreendido entre as coordenadas 1,5 m e 3,3 m, correspondente à extensão do trecho removido no pavimento imediatamente inferior. Tal aspecto é característico da formação do tirante na base da parede. Da mesma forma, observa-se o surgimento de forças de compressão no trecho entre as coordenadas 0,0 m e 1,5 m, correspondente ao trecho de alvenaria remanescente no pavimento imediatamente inferior. Tais resultados corroboram com o comportamento de um sistema parede-viga, no qual ocorrem forças de tração no vão da viga e possíveis forças de compressão na região próxima aos apoios, dependendo da rigidez desses apoios. A região esquerda, que se refere ao trecho da Parede 25 que permanece íntegro, recebe com maior intensidade os esforços de compressão. Tal fato se justifica por este trecho oferecer maior rigidez que a outra extremidade disponível, à direita.

A partir dos resultados do Modelo 2b, percebe-se uma intensificação da compressão à esquerda da cinta, com um consequente alívio na tração ao longo do

vão formado na Parede 25. Por outro lado, a maior parte do comprimento da cinta em balanço, ao longo das Paredes 25 e 13-2, permanece tracionada, tendo a Parede 13-2 como apoio a região da abertura, na extremidade direita.

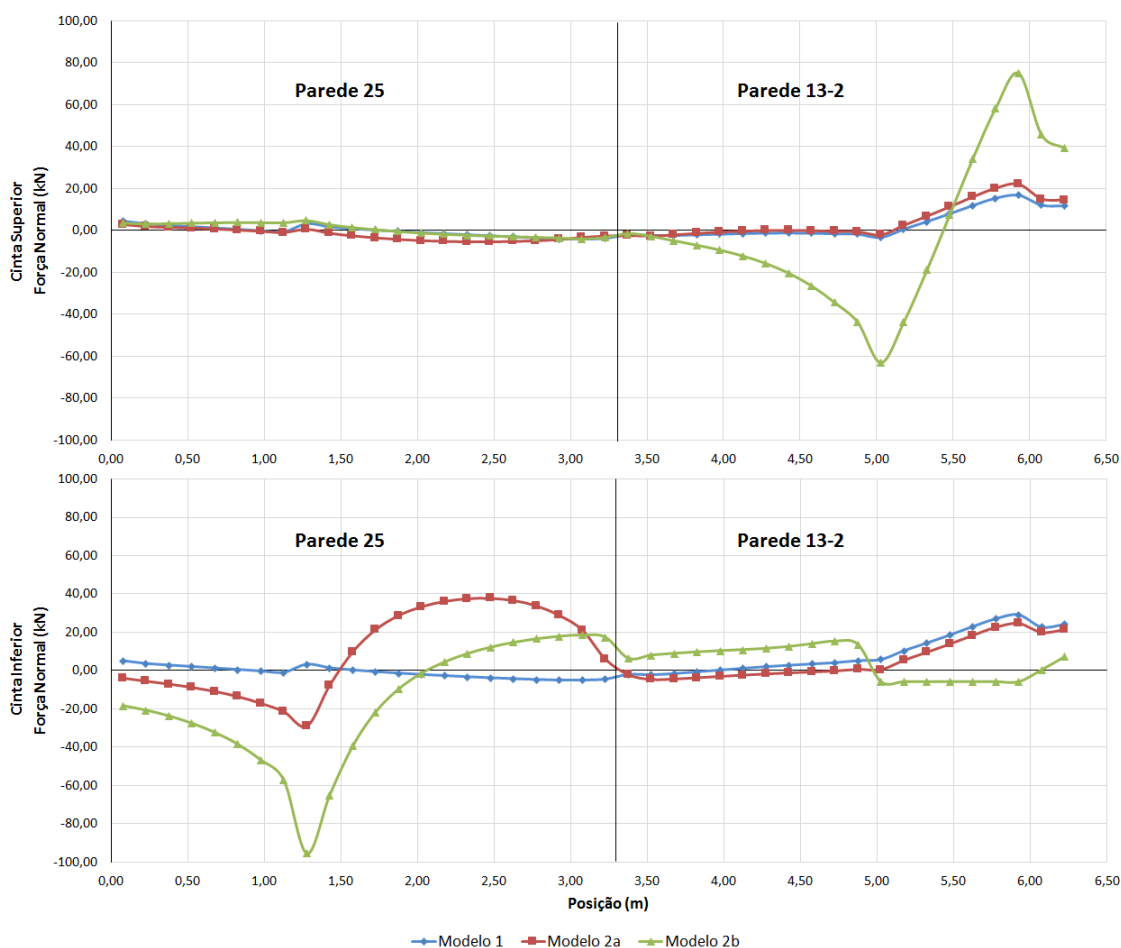


Figura 4.15 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 25 e 13-2, no segundo pavimento, ao longo do comprimento.

Os resultados da cinta superior (topo da parede) indicam que não há formação de binário com a cinta inferior (base da parede) no trecho da Parede 25, o que sugeriria um comportamento de viga-parede. Entretanto, é interessante notar as forças de compressão e tração na região que se refere ao lintel da abertura da Parede 13-2, na análise do Modelo 2b. Tal comportamento se justifica pela migração da carga que ocorre através do lintel, como pode ser melhor observado na Figura 4.16, que ilustra os esforços normais nas barras da Parede 13-2. Dessa forma, a compressão indicada na cinta superior, Figura 4.15, e a distribuição de tensões ilustrada na Figura

4.16, sugerem que a Parede 13-2 tende a se apoiar no lintel para transferir seu carregamento para o trecho de alvenaria à direita da abertura de porta. Além disso, se percebe uma leve concentração de tensões de compressão no final do trecho de alvenaria à esquerda da abertura, o que indica a existência de uma suposta biela. Tal aspecto justifica a inversão de força normal de tração para compressão na cinta inferior, um pouco antes da coordenada 5,0 m, e que pode ser associada à componente horizontal da suposta biela. Neste caso, é possível afirmar que tudo se passa como se a Parede 13-2 se apoiasse no lintel na sua extremidade direita e na Parede 25 em sua extremidade esquerda. Neste caso, é muito importante que a ligação entre essas paredes se mantenha íntegra, caso contrário esse mecanismo não poderá ser formado.

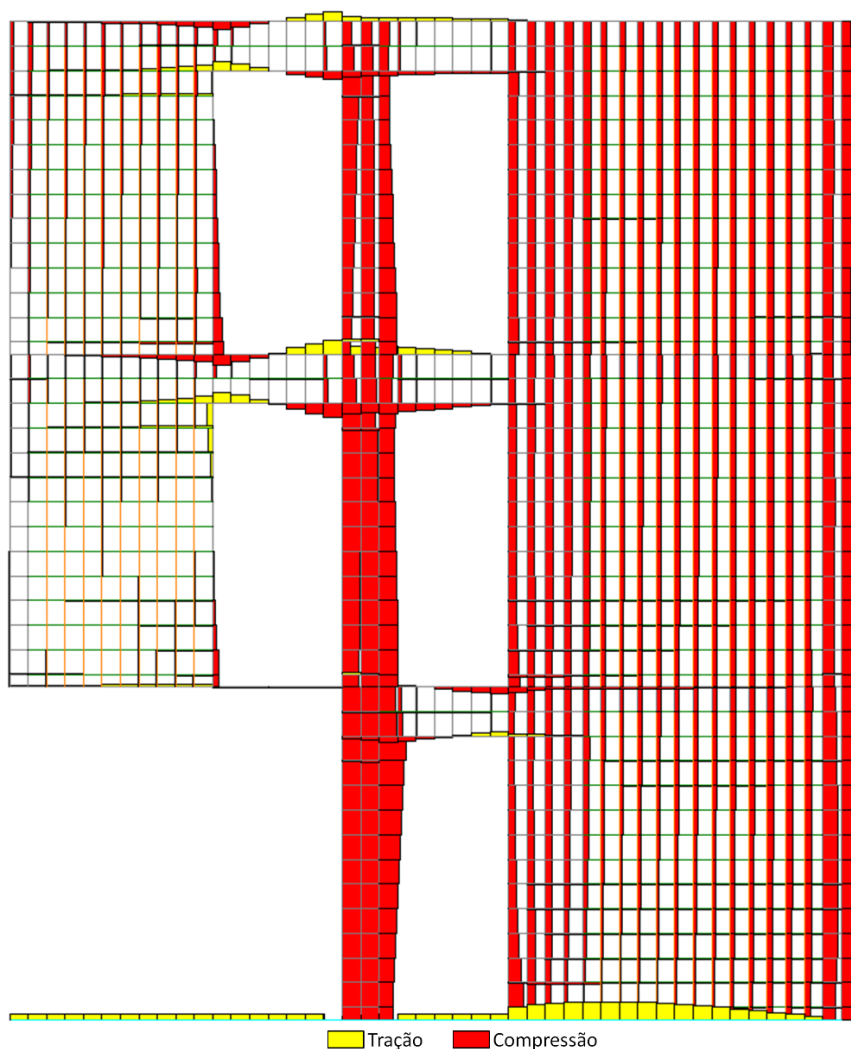


Figura 4.16 – Esforços de tração e compressão nas barras da Parede 13-2, Modelo 2b, segundo pavimento.

A Figura 4.17 ilustra os trechos onde foram analisadas as forças normais ao longo das cintas de respaldo na base e no topo do segundo pavimento na configuração do Modelo 3.

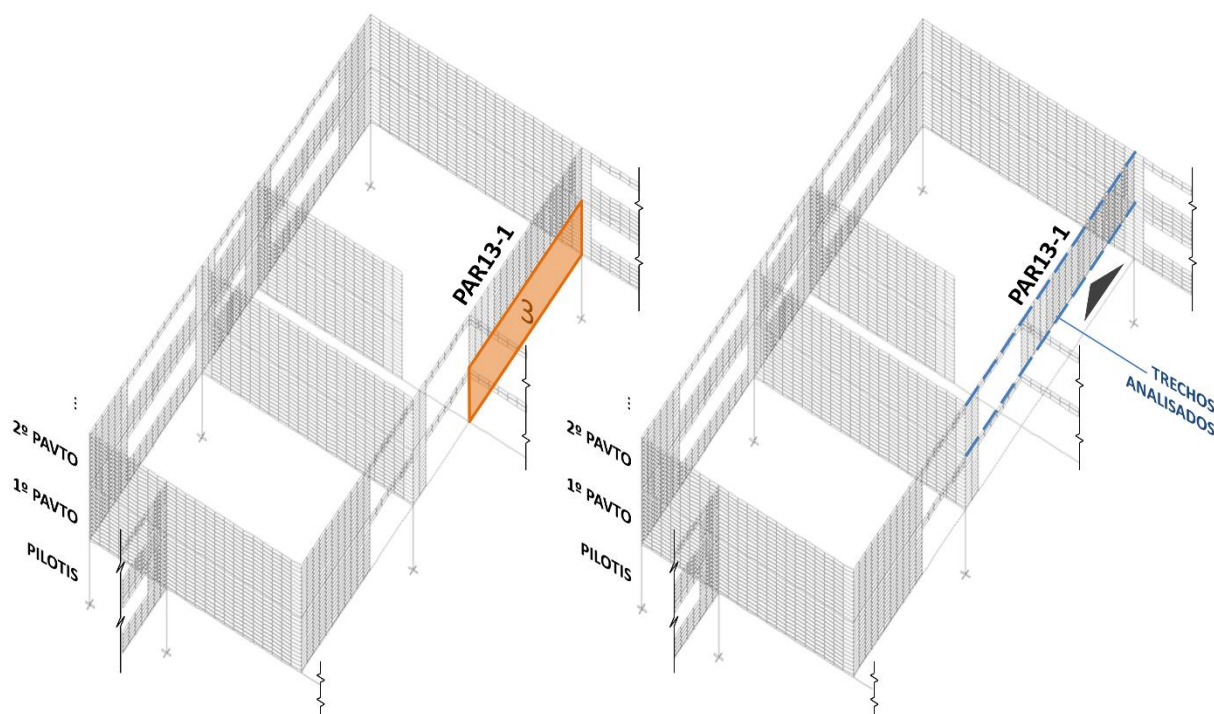


Figura 4.17 – Indicação dos trechos removidos no Modelo 3 (à esquerda) e dos trechos de análise das forças normais nas cintas de respaldo (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

Analisou-se, no caso do Modelo 3, as cintas de respaldo inferior (base) e superior (topo) da Parede 13-1, não havendo necessidade de se analisar a Parede 16, uma vez que esta não apresenta características do comportamento parede-viga com a remoção da Parede 13-1. A Figura 4.18 ilustra as forças normais nas cintas da Parede 13-1, no segundo pavimento, ao longo do comprimento indicado na Figura 4.17. De maneira análoga, no Modelo 3, é possível observar a cinta inferior tracionada na maior parte do trecho livre, sendo comprimida em um trecho muito curto na extremidade direita, que corresponde ao ponto de apoio na Parede 16. A baixa intensidade e a pequena extensão do trecho sob compressão se justificam pela mobilização da flexão fora do plano da Parede 16 e, mais importante, indica a necessidade de verificação dessa parede para esta condição de solicitação. Também

é possível notar as forças de compressão e tração no trecho da cinta superior correspondente à extensão do lintel, que se referem à migração da carga através desse elemento estrutural, conforme também ilustrado pela Figura 4.19.

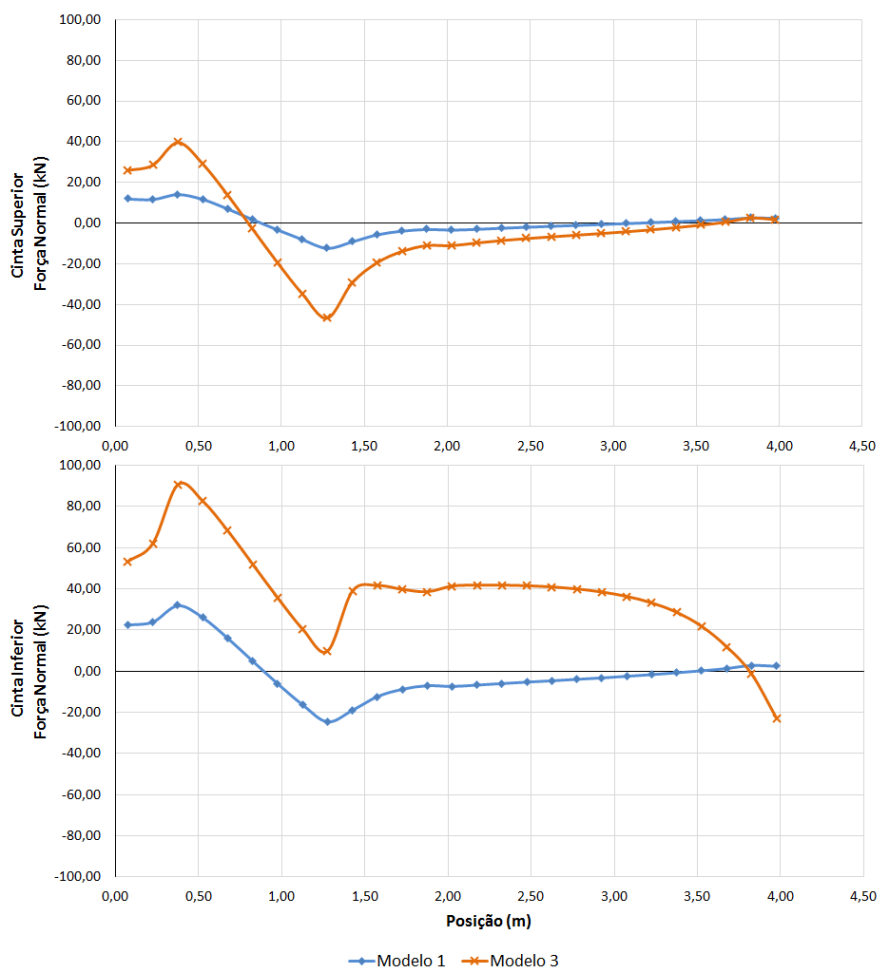


Figura 4.18 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 25 e 13-2, no segundo pavimento, ao longo do comprimento.

Além dos aspectos já mencionados, a partir da Figura 4.19, se percebe uma leve concentração de tensões de compressão no final do trecho de alvenaria à direita da abertura, o que indica a existência de uma suposta biela. Tal aspecto justifica a redução da força normal de tração na cinta inferior, aproximadamente na coordenada 1,25 m, e que pode ser associada à componente horizontal da suposta biela.

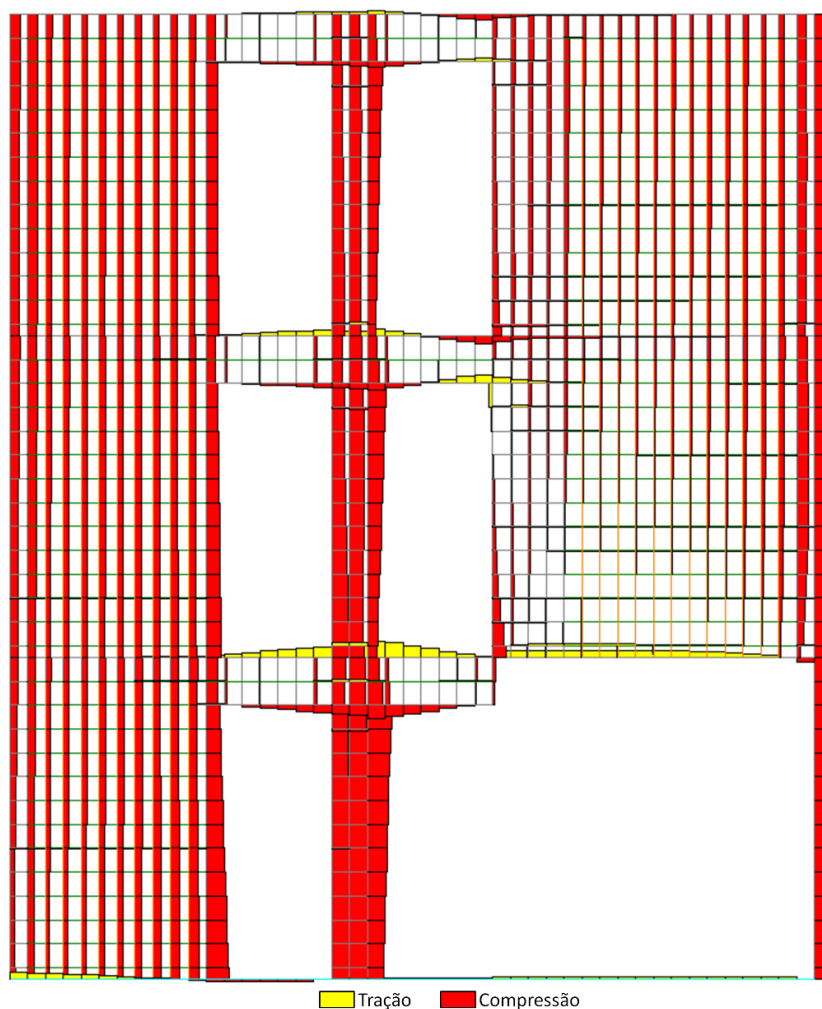


Figura 4.19 – Esforços de tração e compressão nas barras da Parede 13-1, Modelo 3, segundo pavimento.

4.1.2.2 Situação de remoções de paredes no sexto pavimento

A Figura 4.20 ilustra os trechos onde foram analisadas as forças normais ao longo das cintas de respaldo na base e no topo do sétimo pavimento, para a situação de remoções no sexto pavimento, correspondentes aos Modelos 2a e 2b, e a Figura 4.21 correspondente ao Modelo 3.

De uma forma geral, nota-se que as duas situações analisadas apresentam a mesma tendência de comportamento descrita no subitem anterior, variando apenas a intensidade das forças. Na ocorrência de remoção no primeiro pavimento, a distribuição das forças ocorreu com maiores intensidades em relação aos resultados da remoção no sexto pavimento, exceto pelas forças de tração na cinta inferior das Paredes 25 e 13-2, de acordo com os Modelos 2a e 2b. Nestes casos, a cinta de

respaldo da base permaneceu praticamente submetida à mesma intensidade de tração da verificada para a remoção do primeiro pavimento.

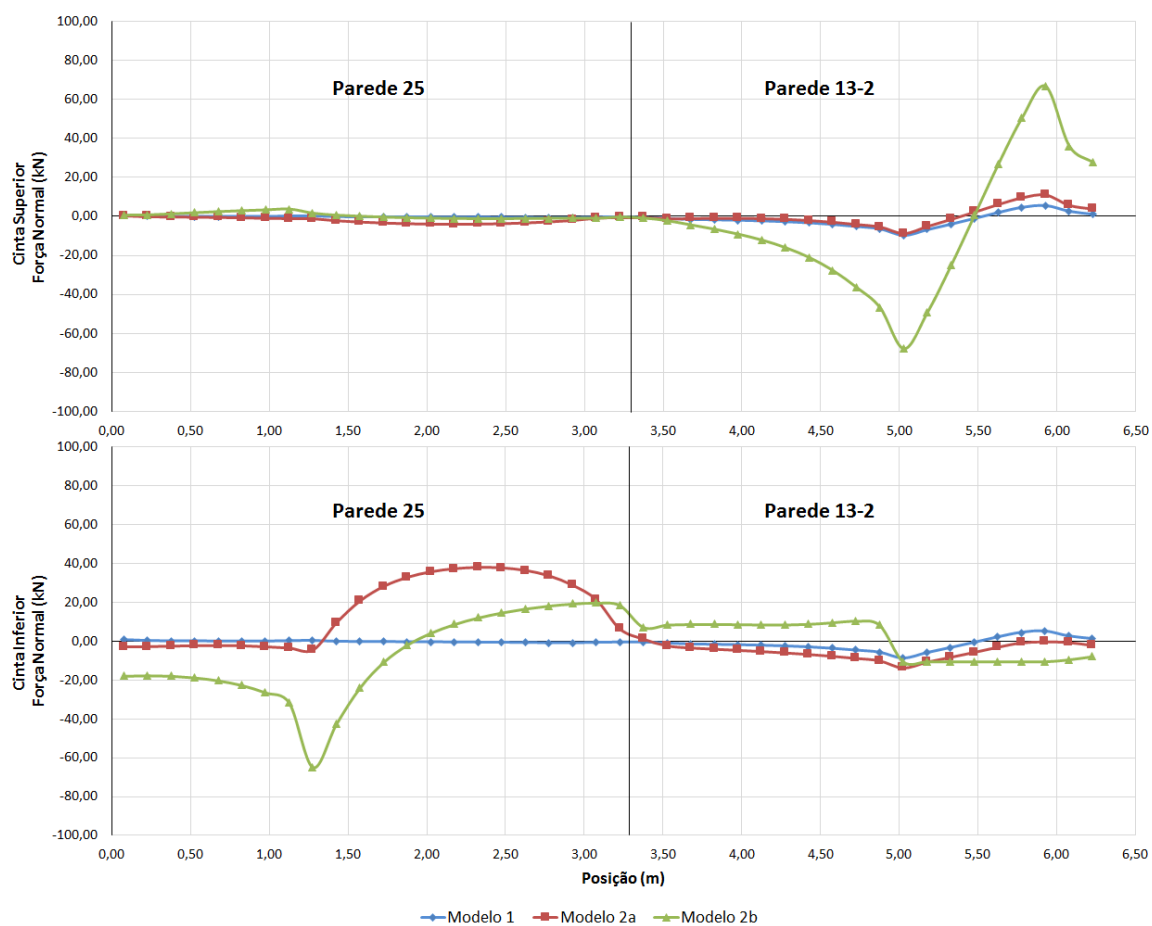


Figura 4.20 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 25 e 13-2, no sétimo pavimento, ao longo do comprimento.

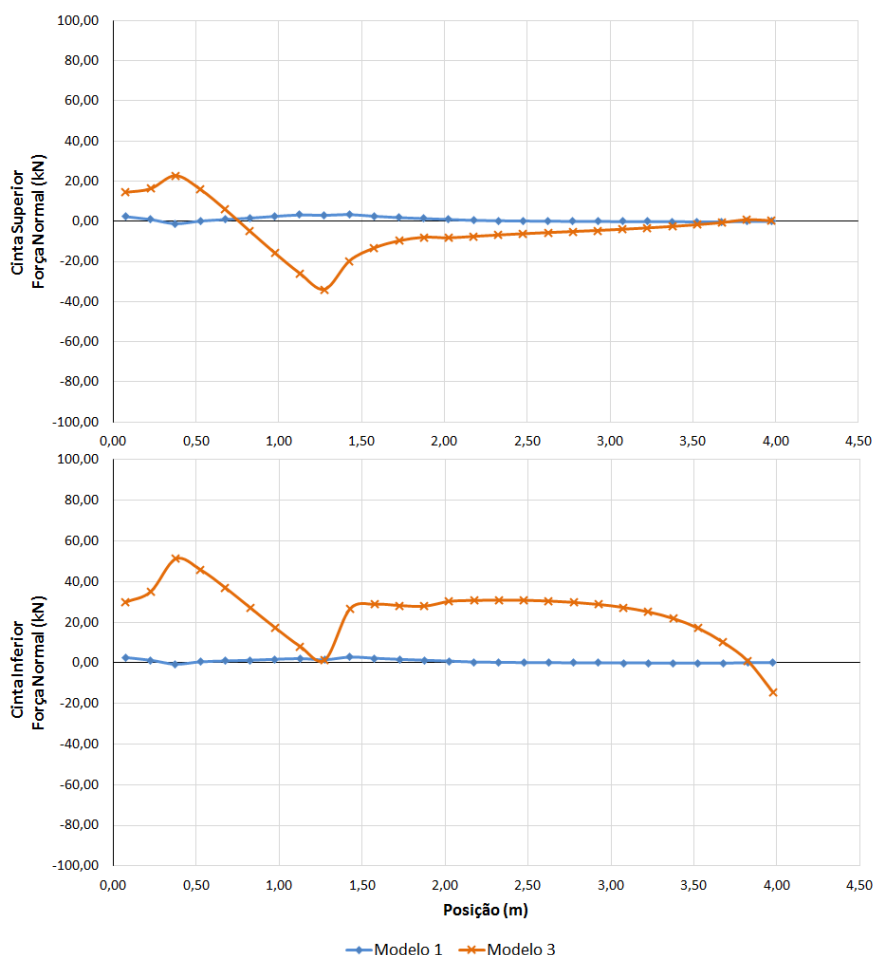


Figura 4.21 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) da Parede 13-1, no sétimo pavimento, ao longo do comprimento.

4.1.2.3 Comentários

A partir da análise das cintas de respaldo aqui estudadas foi possível compreender seu comportamento mediante uma inadvertida remoção de paredes estruturais, de modo que é possível concluir parcialmente o seguinte:

- Uma vez configuradas as características de um sistema parede-viga, as cintas de respaldo tendem a trabalhar sob tração ao longo do vão gerado e sob compressão nas regiões onde a parede remanescente se apoia.
- Verificou-se que nas aberturas os lintéis são mobilizados, de modo a garantir a redistribuição das tensões de compressão no plano da parede. Tais comportamentos remetem à formação de um modelo de bielas e tirantes nos planos das paredes. Dessa forma, fica caracterizada a obrigatoriedade da verificação desses elementos não mais como simples

cintas e vergas, e sim como um lintel de alvenaria que demandará adequadas armaduras de flexão e de cisalhamento.

- Os pares de cintas de respaldo (inferior e superior) dos pavimentos que perderam suporte não formaram binários. Tal fato se justifica pela continuidade das paredes ao longo da altura do edifício.

4.1.3 Análise das tensões normais em seções transversais verticais no pavimento superior à remoção dos trechos de alvenaria

No item 4.1.2, foi constatada a ocorrência das características típicas de um sistema parede-viga e a formação de bielas e tirantes na redistribuição das tensões a partir da ocorrência de uma inadvertida remoção de parede estrutural. Com o objetivo de compreender o comportamento das tensões normais horizontais no plano das paredes localizadas imediatamente acima da remoção do trecho de alvenaria, estabeleceram-se seções verticais para análise dessas tensões em cada situação de remoção estudada.

4.1.3.1 Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento

A Figura 4.22 ilustra os trechos de alvenaria removidos nos Modelos 2a e 2b e as seções estabelecidas para análise das tensões normais nas Paredes 25 e 13-2, considerando a ocorrência de remoção no primeiro pavimento.

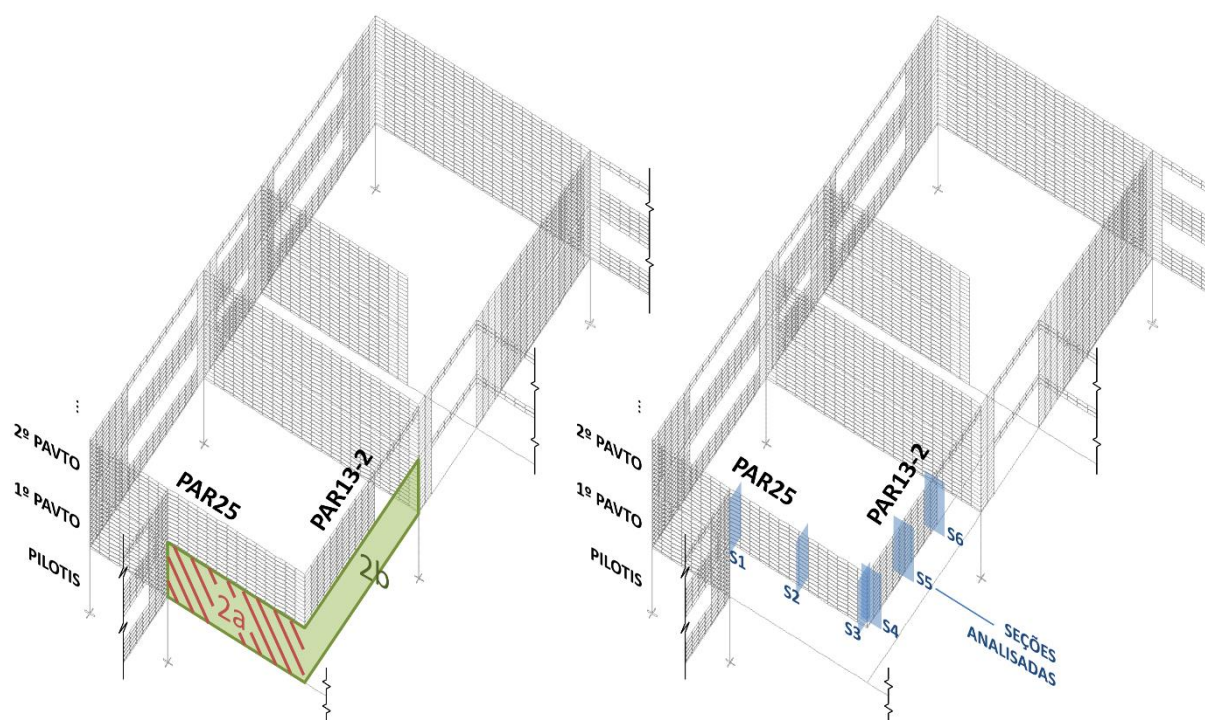


Figura 4.22 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e das seções verticais estabelecidas para análise das tensões normais (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

Inicialmente, é necessário considerar que a um comportamento análogo ao de viga-parede é possível associar um diagrama característico para a distribuição das tensões normais. De acordo com Araújo (2014), tal como ilustrado pela Figura 4.23, as tensões não possuem uma variação linear como ocorre nas vigas esbeltas. Além disso, o braço de alavanca Z , formado pela resultante das tensões de tração R_t , é considerado igual a $0,62 h$. A Figura 4.23 ilustra a distribuição de tensões normais em uma seção transversal vertical no meio do vão de uma viga-parede com relação $l/h = 1$, sendo " l " o comprimento da viga e " h " a altura da viga. Os resultados aqui obtidos indicam correspondência parcial com este sistema.

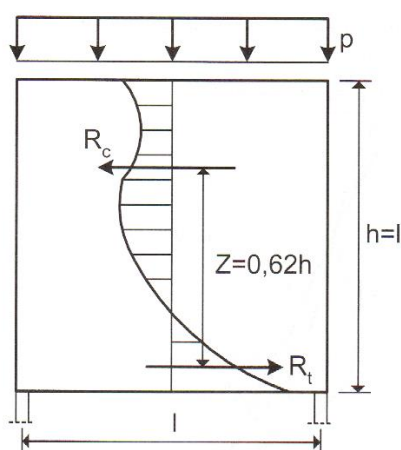


Figura 4.23 – Tensões em viga-parede com $l/h = 1$. Fonte: Araújo (2014).

A Figura 4.24 ilustra as tensões normais nas seções de S1 a S6, indicadas na Figura 4.22. Os resultados ilustrados na Figura 4.24 indicam que é razoável assumir as Paredes 25 e 13-2 em continuidade, de modo a se formar um suposto sistema tridimensional de bielas e tirantes. Alerta-se, entretanto, que tal aspecto só pode ser considerado desde que seja garantida resistência adequada na ligação entre as paredes. Observa-se que na seção S1 ocorreu compressão na base, que corresponderia ao nó de convergência de uma suposta biela, enquanto que nas seções S2, S3 e S4 ocorreu tração na base, que se refere à cinta de respaldo atuando como tirante no trecho da parede que teve remoção no pavimento inferior. Já nas seções S5 e S6 verifica-se a ocorrência tanto de tração quanto de compressão no trecho superior, com maior intensidade na seção S6, o que pode ser atribuído à mobilização do lintel na transferência das tensões da parede. Tal aspecto ficou bem

caracterizado e ilustrado pela Figura 4.16. Os resultados obtidos no topo das seções apresentaram valores de baixa intensidade, descaracterizando um comportamento típico de viga-parede. Isto pode ser justificado pela continuidade das paredes ao longo dos pavimentos superiores, não definindo uma altura útil tal como ocorre no caso de uma viga.

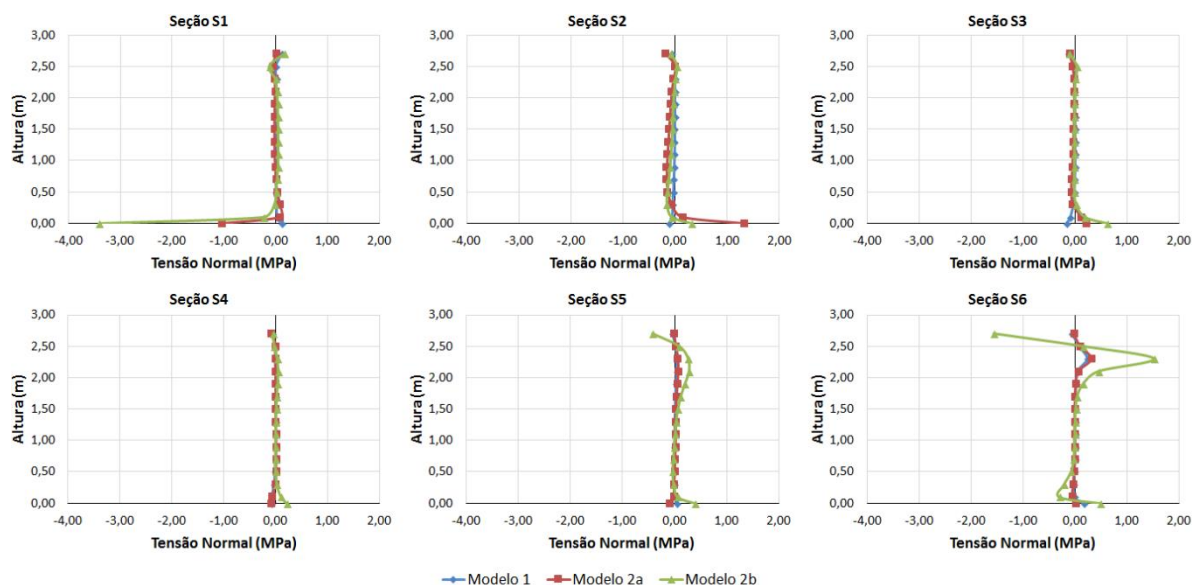


Figura 4.24 – Tensões normais nas seções das Paredes 25 e 13-2, para remoções no primeiro pavimento.

Por outro lado, na seção S2, o Modelo 2a forneceu resultado que se aproxima parcialmente do diagrama ilustrado pela Figura 4.23. A Figura 4.25 ilustra os resultados desta seção com escala apropriada para a mesma. Observa-se que o Modelo 2a apresenta tração na base e compressão na região intermediária e no topo.

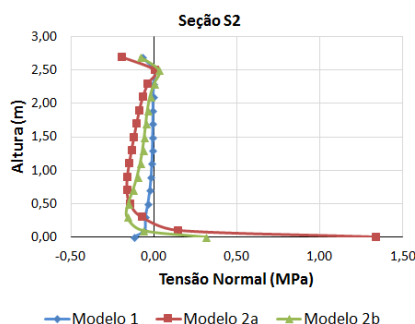


Figura 4.25 – Tensões normais na seção S2 da Parede 25, para remoções no primeiro pavimento.

A Figura 4.26 ilustra o trecho de alvenaria removido no Modelo 3 e as seções verticais estabelecidas para análise das tensões normais na Parede 13-1, considerando a ocorrência de remoção no primeiro pavimento.

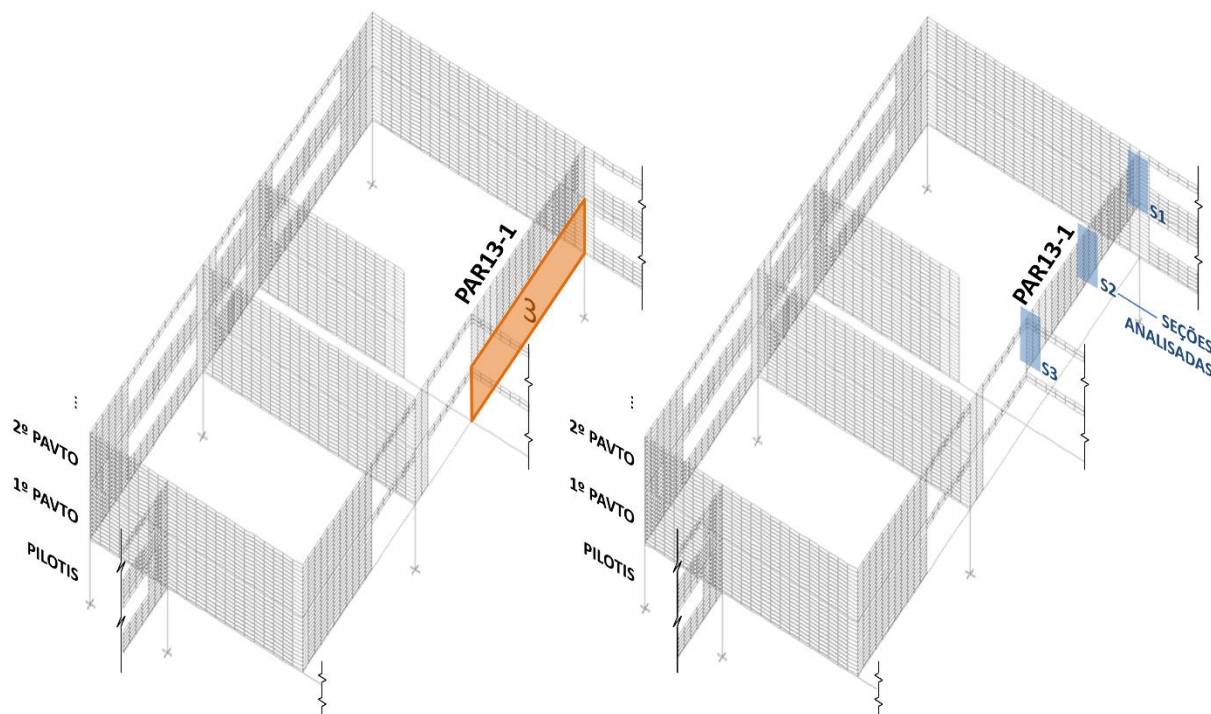


Figura 4.26 – Indicação dos trechos removidos no Modelo 3 (à esquerda) e das seções verticais estabelecidas para análise das tensões normais (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

A Figura 4.27 ilustra as tensões normais nas seções S1, S2 e S3. De maneira similar ao ocorrido na Parede 25, verifica-se o surgimento de compressão na base da seção S1, que corresponderia ao nó de convergência de uma suposta biela, enquanto que as seções S2 e S3 apresentam tanto tração quanto compressão na parte superior, caracterizadas pela mobilização do lintel na transferência das tensões da parede. Essa mobilização ficou muito bem ilustrada pela Figura 4.19. O topo da Parede 13-1, assim como nas Paredes 25 e 13-2, não apresenta grandes variações na tensão normal, o que descaracterizaria um comportamento típico de uma viga-parede e que pode ter sua justificativa associada à continuidade da parede nos pavimentos superiores.

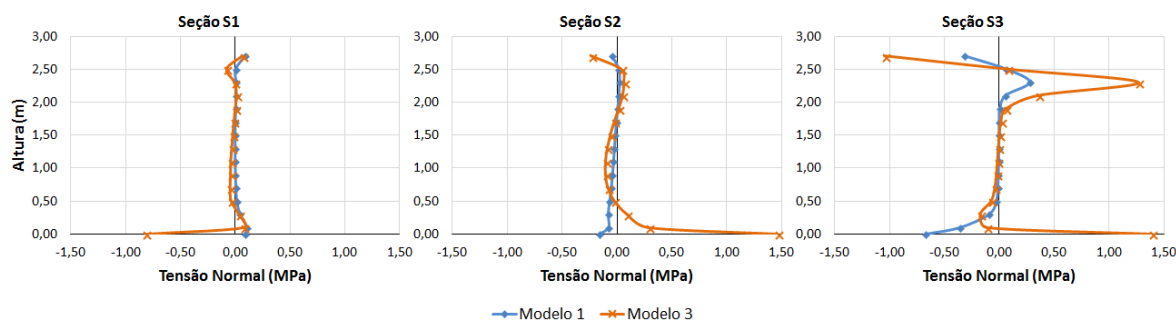


Figura 4.27 – Tensões normais nas seções da Parede 13-1, no Modelo 3, para remoções no primeiro pavimento.

4.1.3.2 Situação de remoções de paredes no sexto pavimento

As seções verticais definidas para avaliação das tensões normais nos Modelos 2a e 2b foram as mesmas indicadas na Figura 4.22, considerando a ocorrência de remoção no sexto pavimento e as seções posicionadas no sétimo pavimento.

A Figura 4.28 ilustra as tensões normais nas seções de S1 a S6. Em comparação com a Figura 4.24, verifica-se que as remoções no primeiro e no sexto pavimento apresentam resultados praticamente idênticos, a não ser pela compressão na base da Seção 1, que na primeira situação resultou em intensidade igual a 3,4 MPa e na indicada na Figura 4.28 igual a 2,3 MPa.

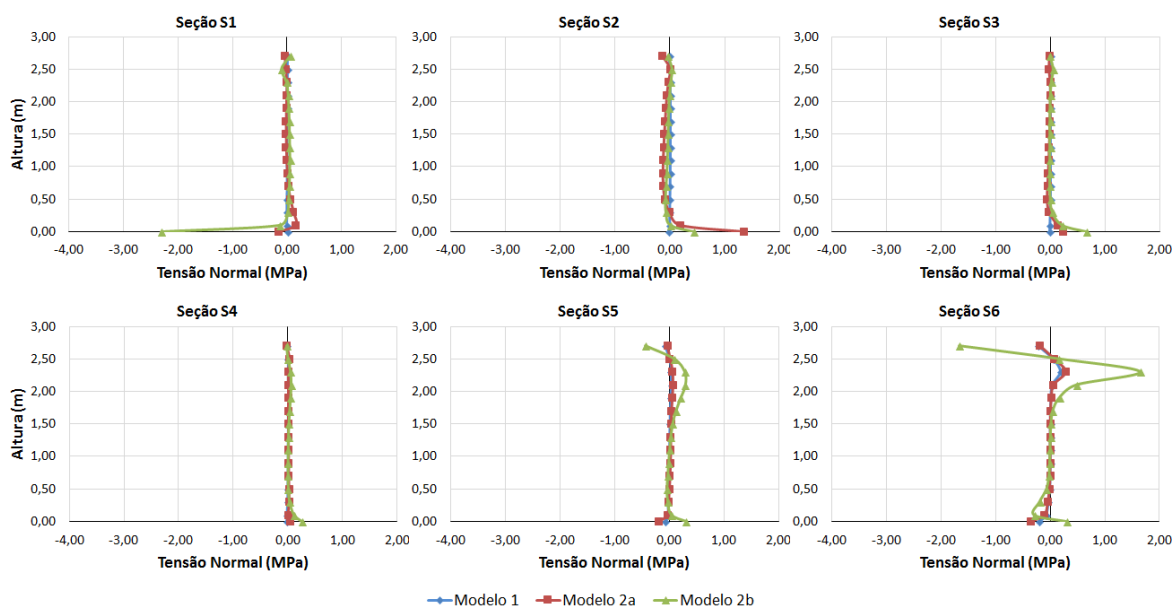


Figura 4.28 – Tensões normais nas seções das Paredes 25 e 13-2, nos Modelos 2a e 2b, para remoções no sexto pavimento.

Os mesmos comentários a respeito da formação das supostas bielas e o papel desempenhado pelos lintéis também são aplicáveis aos resultados deste item.

As seções verticais definidas para avaliação das tensões normais no Modelo 3 foram as mesmas indicadas na Figura 4.26, considerando a ocorrência de remoção no sexto pavimento e as seções posicionadas no sétimo pavimento.

A Figura 4.29 ilustra as forças normais nas seções de S1 a S3. Comparando estes resultados com os ilustrados pela Figura 4.27, observa-se que as duas situações analisadas apresentam comportamento muito semelhante, exceto por uma pequena diferença na intensidade das tensões, sendo a situação de remoções no primeiro pavimento a que apresenta maiores intensidades, especialmente na seção S3. Novamente, os comentários a respeito da formação das supostas bielas e o papel desempenhado pelos lintéis também são pertinentes neste item.

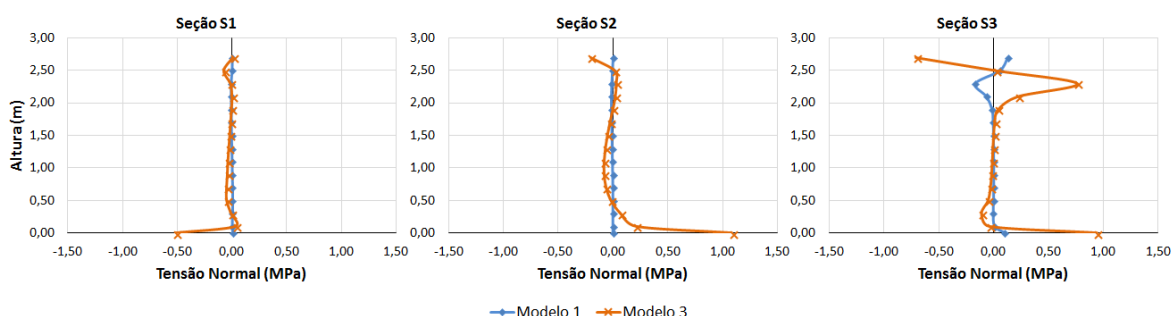


Figura 4.29 – Tensões normais nas seções da Parede 13-1, no Modelo 3, para remoções no sexto pavimento.

4.1.3.3 Comentários

Com base nestes resultados, é possível estabelecer as seguintes conclusões parciais:

- Reforça-se a importância dos lintéis contribuindo para a redistribuição de tensões nas paredes no caso de remoção de um trecho de parede estrutural. Tal comportamento também havia sido observado no item 4.1.2.
- Nas duas situações estudadas (remoções no primeiro e no sexto pavimento), as tensões normais nas seções verticais apresentaram, de uma forma geral, intensidades muito próximas entre si. Na base de

determinadas seções, a situação de remoção de paredes no primeiro pavimento apresentou intensidades maiores. Tal fato pode ser justificado pela proximidade com os pilares da estrutura de transição que, devido à maior rigidez, naturalmente induzirá maior nível de tensões.

4.1.4 Análise das tensões de cisalhamento em seções transversais verticais no pavimento superior à remoção dos trechos de alvenaria

Por fim, também foram analisadas as tensões de cisalhamento em algumas das seções definidas no item 4.1.3. Neste caso, relativamente ao Modelo 2a foram analisadas as seções S1 e S3, enquanto que para o Modelo 2b foi analisada apenas a seção S1, conforme ilustrado pela Figura 4.22. Já no caso do Modelo 3, foi analisada, conforme ilustrado pela Figura 4.26.

4.1.4.1 Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento

A Figura 4.30 ilustra as tensões de cisalhamento nas seções S1 e S3 da Parede 25, indicadas na Figura 4.22. Inicialmente, é possível notar que as tensões de cisalhamento no Modelo 1 são praticamente nulas, especialmente na seção S3. Isto acontece porque na aplicação das cargas nos modelos foram consideradas as cargas dos grupos de paredes aplicadas nos topos dos pavimentos, tal como descrito item 3.1 do Capítulo 3. A partir dos resultados dos Modelos 2a e 2b, verifica-se a maior intensidade das tensões de cisalhamento na base das seções S1 e S3, que tende a ser aliviada nas fiadas superiores da parede. No Modelo 2a, surgiram maiores intensidades de tensões na base para a seção S1, que se justifica pela maior rigidez do apoio nesta região. Sob esse aspecto, ressalta-se a expressiva diferença no valor das tensões na base da seção S1 em relação às demais fiadas da parede, o que sugere maior cuidado nessa região no momento das verificações a serem feitas na ocasião de uma eventual remoção de trechos de parede. Além disso, verificam-se intensidades superiores ao valor limite prescrito no texto da revisão da norma brasileira de alvenaria estrutural, igual a 0,60 MPa para a resistência característica ao cisalhamento na interface vertical de paredes amarradas. É importante destacar que as intensidades indicadas na Figura 4.30 representam valores característicos e não de cálculo.

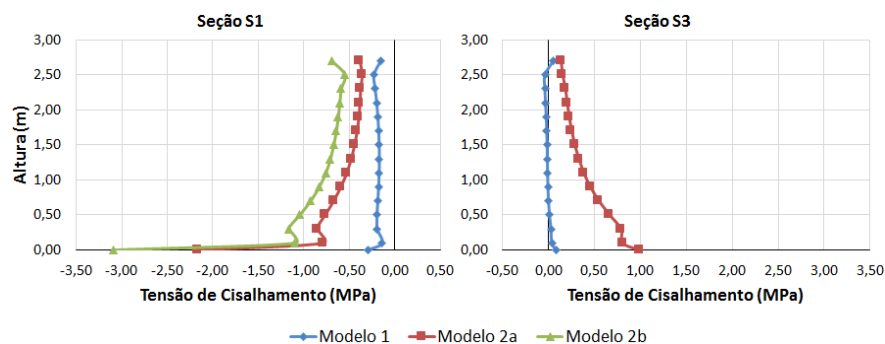


Figura 4.30 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura na Parede 25, considerando os Modelos 2a e 2b, para remoções no primeiro pavimento.

A Figura 4.31 ilustra as tensões de cisalhamento na seção S1 da Parede 13-1, indicada na Figura 4.26. Da mesma maneira, com a remoção da Parede 13-1 no primeiro pavimento, verifica-se a tendência de mobilização na interface da seção S1, que provoca o aparecimento de tensões de cisalhamento, as quais tendem a diminuir de intensidade nas fiadas superiores da parede. Além disso, verificam-se intensidades acima da resistência característica ao cisalhamento prescrita no texto de revisão da norma brasileira de alvenaria estrutural.

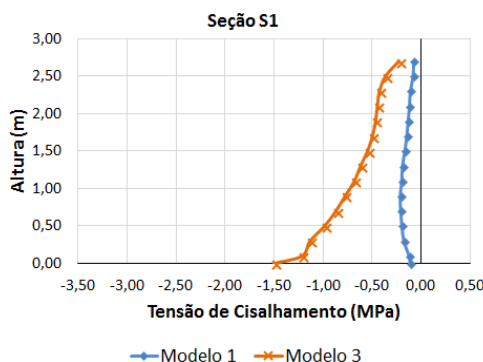


Figura 4.31 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura na Parede 13-1, considerando o Modelo 3, para remoções no primeiro pavimento.

4.1.4.2 Situação de remoções de paredes no sexto pavimento

A Figura 4.32 ilustra as tensões de cisalhamento nas seções S1 e S3 da Parede 25, indicadas na Figura 4.22, considerando a ocorrência de remoção no sexto pavimento e as seções posicionadas no sétimo pavimento. Novamente, percebe-se

que no Modelo 1 as tensões de cisalhamento são nulas devido à simplificação adotada para os carregamentos no topo dos painéis, conforme mencionado anteriormente. Comparando estes resultados com aqueles da Figura 4.30, tem-se para a seção S1 maior intensidade de tensões na situação anterior, enquanto que na seção S3 as duas situações apresentam valores praticamente idênticos.

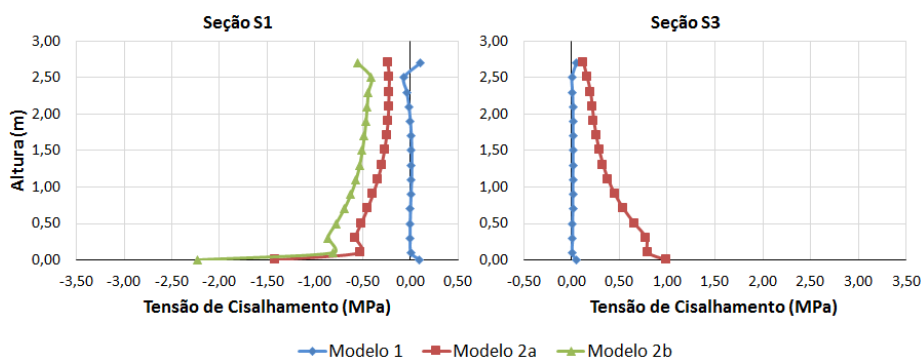


Figura 4.32 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura na Parede 25, considerando os Modelos 2a e 2b, para remoções no sexto pavimento.

A Figura 4.33 ilustra as tensões de cisalhamento na seção S1 da Parede 13-1, indicada na Figura 4.26. Comparando-se estes resultados com a Figura 4.31, verifica-se o comportamento similar, porém sendo a situação anterior com maior intensidade de tensões. De fato, a situação de remoção no primeiro pavimento tem como particularidade a proximidade com a estrutura de transição, o que justifica a maior concentração de tensões nas regiões próximas aos pilares do pilotis.

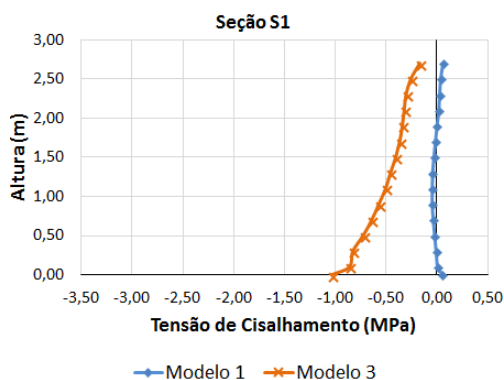


Figura 4.33 – Tensões de cisalhamento ao longo da altura na Parede 13-1, considerando o Modelo 3, para remoções no sexto pavimento.

4.1.4.3 Comentários

Com base não só na comparação entre os modelos, mas também entre as duas situações de remoções analisadas, é razoável estabelecer as seguintes conclusões parciais:

- Dada uma remoção inadvertida de um painel estrutural, a parede que perde suporte tende a se mobilizar verticalmente gerando tensões de cisalhamento na interface das seções verticais dos trechos remanescentes de parede. Estas tensões têm intensidades maiores na base das seções por ser a primeira região de mobilização da parede que teve a continuidade com o pavimento inferior removida.
- Para a situação de remoções no primeiro pavimento, é notável a interferência da estrutura de transição nos resultados das tensões de cisalhamento nas seções analisadas. Em regiões próximas aos pilares, tem-se tensões com maior intensidade devido à maior rigidez, inclusive no Modelo 1, correspondente a todas as paredes íntegras. No Modelo 1, isto ocorre porque a deflexão das vigas da estrutura de transição gera a mobilização das paredes, resultando no surgimento de tensões de cisalhamento em seções verticais. Este e outros aspectos discutidos no estudo, podem ser correlacionados ao comportamento de um sistema parede-viga, amplamente discutido por Medeiros (2015).

4.2 Análise dos resultados do Caso II

Conforme descrito no item 3.2.2, as simulações de remoção de paredes no edifício do Caso II foram realizadas no primeiro, no quinto e no nono pavimento, que foram analisadas separadamente.

Desse modo, em todas as situações foram realizadas as seguintes verificações:

- Tensões normais e de cisalhamento na base das paredes, sendo no mesmo pavimento da remoção considerada e no pavimento imediatamente acima deste;
- Forças normais nas cintas de respaldo na base e no topo do pavimento imediatamente acima daquele no qual foram realizadas as remoções de paredes estruturais, e;
- Tensões normais e de cisalhamento em seções verticais predeterminadas, consideradas no pavimento imediatamente acima daquele no qual foram realizadas as remoções de paredes estruturais.

Assim como no Caso I, optou-se por verificar as paredes próximas aos trechos que sofreram as remoções. Sendo assim, foram avaliadas as Paredes 05, 07, 11 e 12, conforme ilustrado pela Figura 3.9.

4.2.1 Redistribuição de tensões normais na base das paredes

Nesta análise, foram analisadas as tensões normais e de cisalhamento na base das paredes nas três situações descritas anteriormente. Assim como no Caso I, as tensões foram calculadas dividindo a força obtida na análise do SAP2000®, em sua direção considerada, pela área bruta da seção da barra empregada no modelo. Além disso, o efeito do graute foi considerado no módulo de deformação das barras, tal como descrito na Tabela 3.2.

4.2.1.1 *Situação de remoções de paredes no primeiro pavimento*

A Figura 4.34 ilustra os trechos onde foram analisadas as tensões para a situação de remoções no primeiro pavimento. Nesta situação foram avaliadas as tensões na base das Paredes 05, 07 e 11.

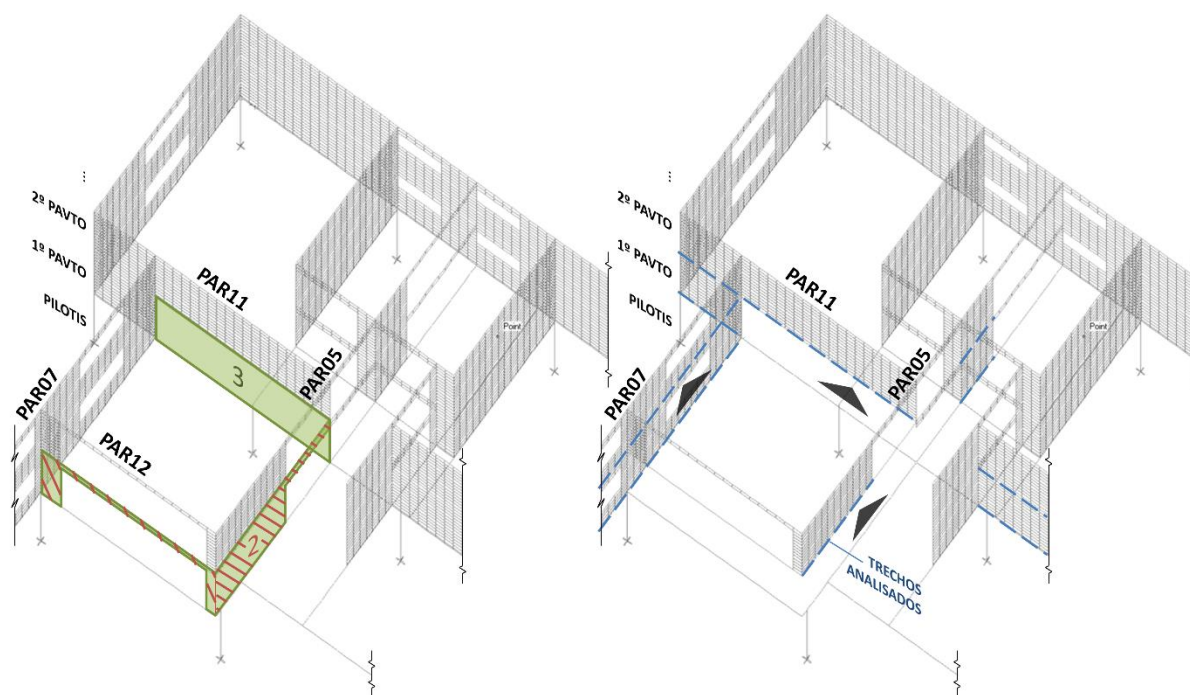


Figura 4.34 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2a e 2b (à esquerda) e dos trechos de análise de tensões (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

A Figura 4.35 ilustra as tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 05, no primeiro e no segundo pavimento.

Nota-se que, na base da parede no primeiro pavimento, para o caso do Modelo 1, há interação entre a alvenaria estrutural e a viga, o que remonta ao sistema parede-viga. Logo acima, no segundo pavimento, este comportamento se dissipa. Com a remoção do trecho de alvenaria que se refere ao Modelo 2, as tensões na base do segundo pavimento imediatamente acima deste trecho tendem a se anular, uma vez que há uma perda de suporte. Tal comportamento é semelhante ao discutido anteriormente sobre a Figura 4.2. Nos Modelos 2 e 3, há um pico de compressão na posição 1,65 m, onde possivelmente há concentração da carga de compressão advinda do pavimento superior provocando a mobilização da cinta de respaldo. As tensões de cisalhamento apresentam picos em conformidade com o diagrama de tensões normais.

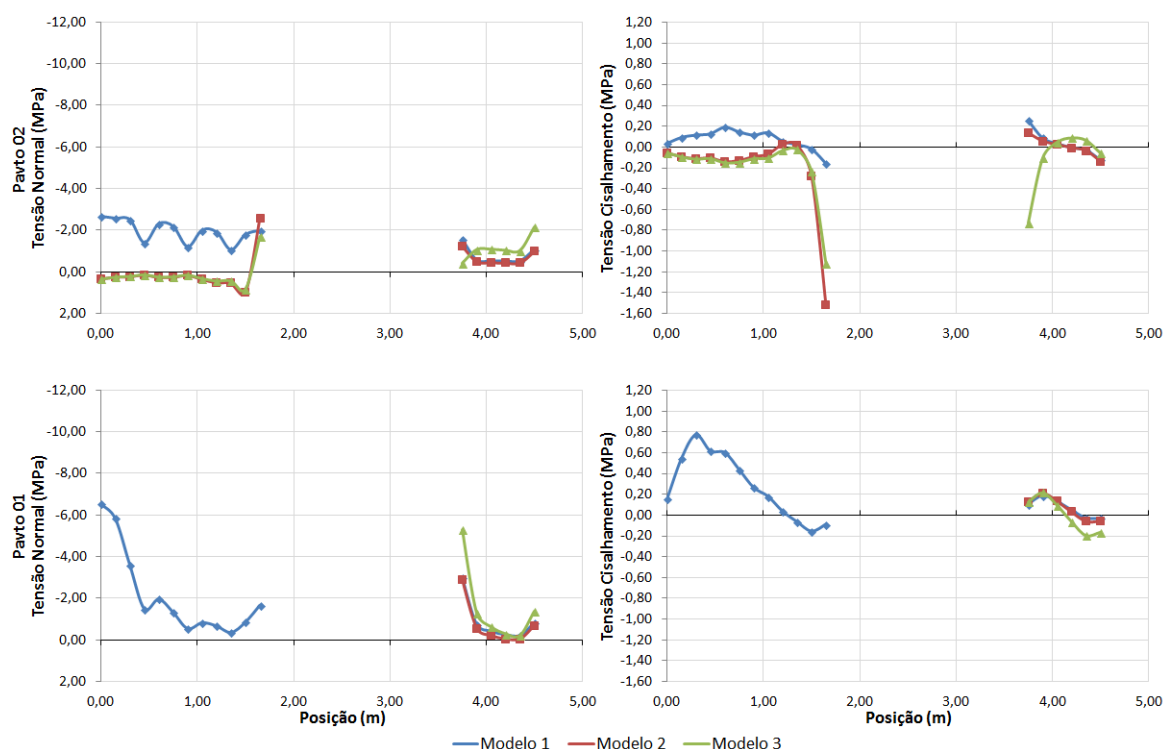


Figura 4.35 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 05 no primeiro e no segundo pavimento.

A Tabela 4.9 apresenta as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base da Parede 05 de acordo com os pavimentos.

A Figura 4.36 ilustra as tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 07, no primeiro e no segundo pavimento. Novamente, o Modelo 1, no primeiro pavimento, apresenta as características da interação entre a parede de alvenaria estrutural e a estrutura de transição. Notam-se os picos de tensão normal à esquerda e na posição 2,70 m, onde há a presença dos apoios da estrutura de transição, conforme observado na Figura 3.7. Nos demais trechos, há um alívio das tensões provocado pela presença das aberturas.

Em ambos os pavimentos, há acréscimos de tensões na região destes picos. No Modelo 2, nota-se maior acréscimo no trecho compreendido entre 2,70 m e 3,60 m. Isto acontece devido às remoções da Parede 12 e do trecho da Parede 05, previstas neste modelo. No caso do Modelo 3, verifica-se, além do acréscimo na região central, o pico de tensões na extremidade direita, que se refere à região mais próxima da remoção do trecho da Parede 11.

Tabela 4.9 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 05, com remoções de parede no primeiro pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-2,65	-	0,33	-112,4%	0,35	-113,4%
1	-6,56	-	-	-	-	-
Valores na coordenada 1,65 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-1,98	-	-2,59	31,1%	-1,69	-14,4%
1	-1,66	-	-	-	-	-
Valores na coordenada 3,75 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-1,57	-	-1,26	-20,0%	-0,41	-73,9%
1	-3,01	-	-2,87	-4,5%	-5,28	75,6%
Valores na extremidade direita (4,50 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-1,07	-	-0,98	-7,9%	-2,14	100,5%
1	-0,81	-	-0,68	-15,8%	-1,36	69,0%

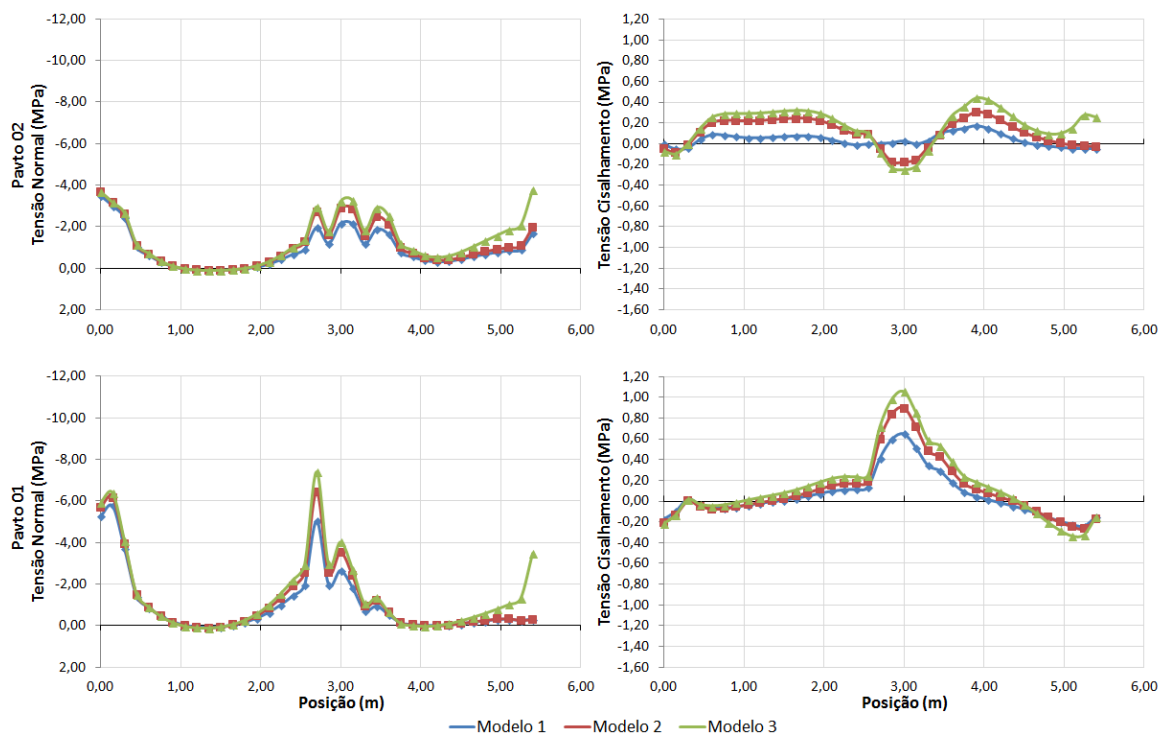


Figura 4.36 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 07 no primeiro e no segundo pavimento.

A Tabela 4.10 apresenta as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base da Parede 07 de acordo com os pavimentos.

A Figura 4.37 ilustra as tensões normais e de cisalhamento na base da Parede 11, no primeiro e no segundo pavimento. Assim como nas Paredes 05 e 07, o Modelo 1 apresenta as características da interação parede-viga no primeiro pavimento. Observa-se, neste caso, a inversão do sinal dos valores de tensão de cisalhamento associada à existência dos apoios da estrutura de transição. No mesmo pavimento, nota-se na posição aproximada de 1,0 m o pico de tensões normais, extremidade formada com a remoção do trecho da Parede 11.

Tabela 4.10 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 07, com remoções de parede no primeiro pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-3,49	-	-3,70	6,0%	-3,69	5,8%
1	-5,27	-	-5,68	7,6%	-5,92	12,2%
Valores no pico intermediário (2,70 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-1,96	-	-2,71	38,6%	-2,96	51,0%
1	-5,06	-	-6,43	27,3%	-7,38	45,9%
Valores na extremidade direita (5,40 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-1,68	-	-1,99	18,4%	-3,77	124,4%
1	-0,31	-	-0,31	-0,1%	-3,48	1028,5%

No segundo pavimento, o Modelo 3 apresenta configuração que representa a perda do suporte da parede localizada acima do trecho removido. Assim, as cargas tendem a migrar para as regiões rígidas remanescentes: no caso, o trecho de aproximadamente 1,0 m à esquerda. Ao longo de praticamente todo o comprimento que se refere ao trecho removido, as tensões permanecem em valores praticamente nulos devido a esta perda de suporte.

Um aspecto importante a ser observado na Figura 4.37 é que o trecho da Parede 11 localizado à direita praticamente não apresentou variações nos resultados entre os modelos. Isto pode ser explicado pelo fato de que estes dois trechos não são interligados nem por lintel e nem por laje, uma vez que as lajes não foram discretizadas nos modelos. Uma certa variação nestes resultados seria esperada no caso de um modelo com lajes discretizadas.

A Tabela 4.11 apresenta as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base da Parede 11 de acordo com os pavimentos.

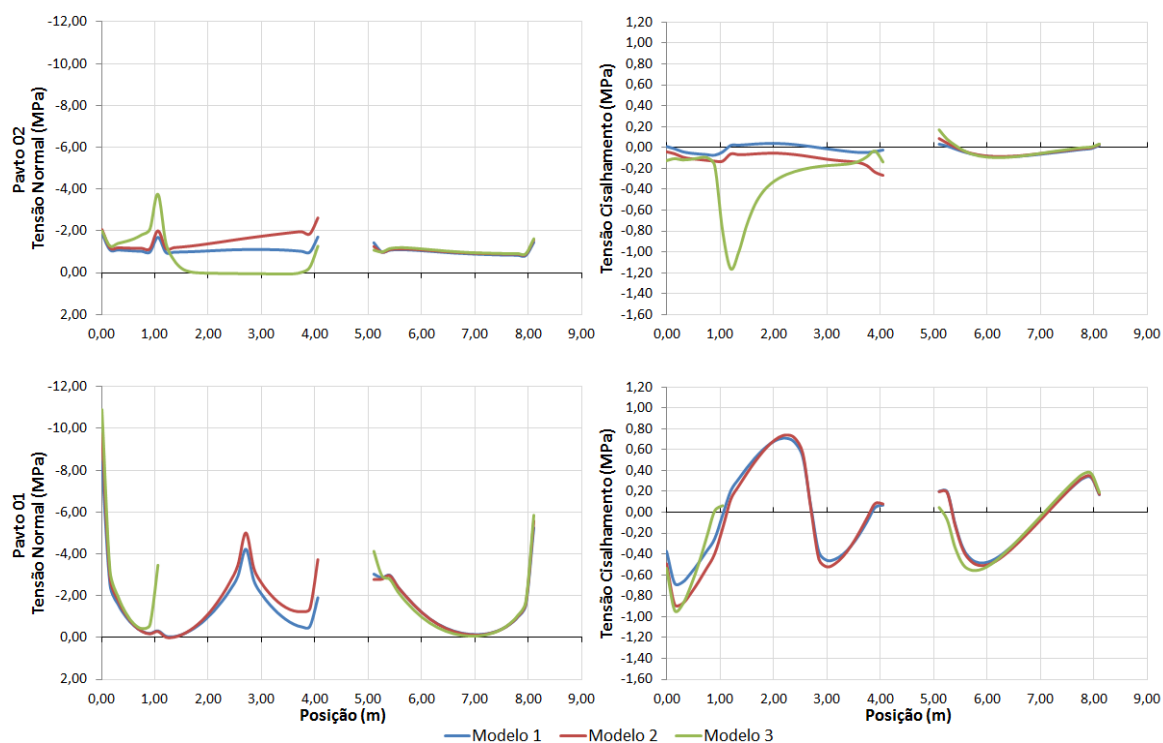


Figura 4.37 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 11 no primeiro e no segundo pavimento.

Tabela 4.11 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 11, com remoções de parede no primeiro pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-1,87	-	-2,05	10,0%	-2,00	7,4%
1	-8,40	-	-9,73	15,9%	-10,92	30,0%
Valores na coordenada 1,05 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-1,68	-	-1,99	18,4%	-3,77	124,4%
1	-0,31	-	-0,31	-0,1%	-3,48	1028,5%
Valores na coordenada 4,05 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
2	-1,70	-	-2,60	53,6%	-1,27	-25,3%
1	-1,90	-	-3,73	97,0%	-	-

4.2.1.2 Situações de remoções de paredes no quinto e no nono pavimento

Também foram analisadas as tensões normais e de cisalhamento na base das paredes do quinto e do nono pavimento. Reforça-se que, as situações mencionadas foram analisadas separadamente. Em outras palavras, não foram consideradas remoções de paredes ocorrendo em mais de um pavimento simultaneamente. Os trechos analisados são idênticos aos ilustrados na Figura 4.34, correspondentes às bases das Paredes 05, 07 e 11.

As Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 ilustram as tensões normais e de cisalhamento na base das Paredes 05, 07 e 11, respectivamente, no quinto e no sexto pavimento.

Comparando-se estes resultados aos ilustrados pela Figura 4.35, pela Figura 4.36 e pela Figura 4.37, nota-se comportamento semelhante das tensões, exceto pelas tensões no primeiro pavimento, onde há ocorrência da interação parede-viga. De maneira geral, a avaliação da redistribuição de tensões nestas paredes é similar à realizada no item 4.2.1.1 anterior.

Um ponto pertinente a ser observado no Modelo 3 se trata do pico de tensão normal formado na posição de aproximadamente 1,0 m, no quinto pavimento, conforme ilustrado pela Figura 4.40. Apesar deste resultado se referir ao quinto pavimento, tem-se neste ponto praticamente o mesmo valor de tensão que o registrado na situação de remoções de paredes no primeiro pavimento, ilustrado pela Figura 4.37. Nota-se, portanto, a possível interferência da estrutura de transição na intensidade destas tensões por meio da interação parede-viga, já mencionada nos comentários do item 4.1.1.3.

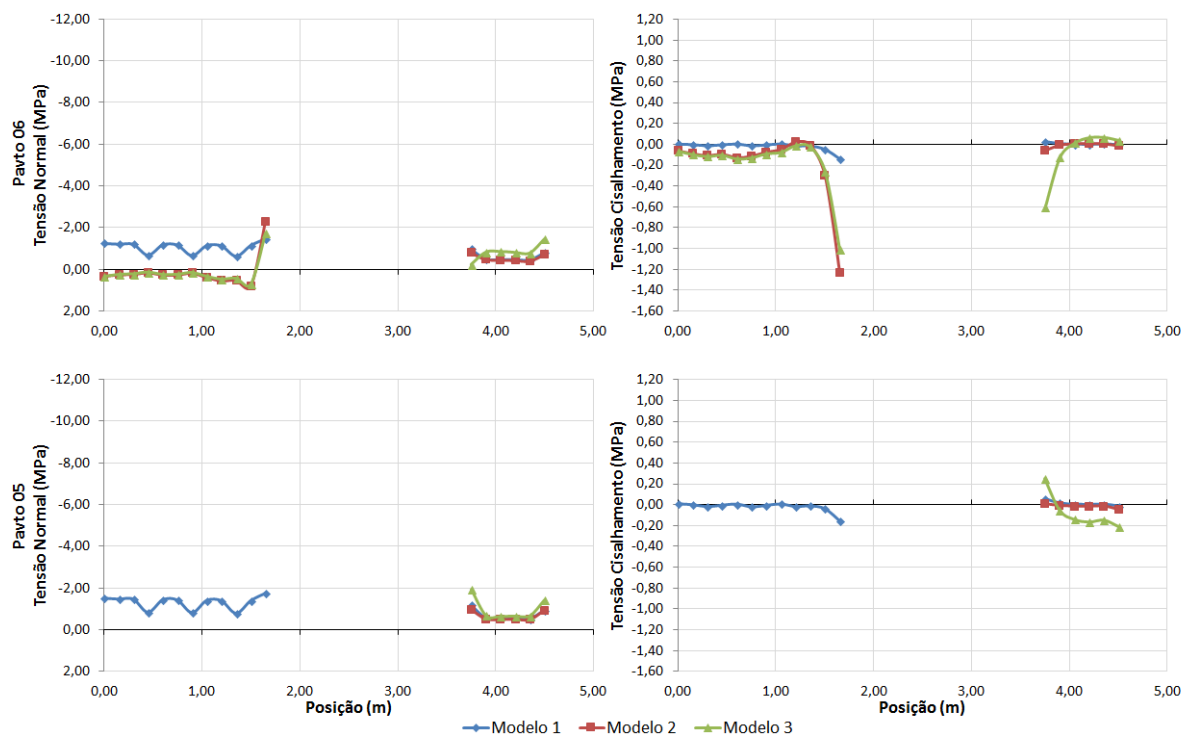


Figura 4.38 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 05 no quinto e no sexto pavimento.

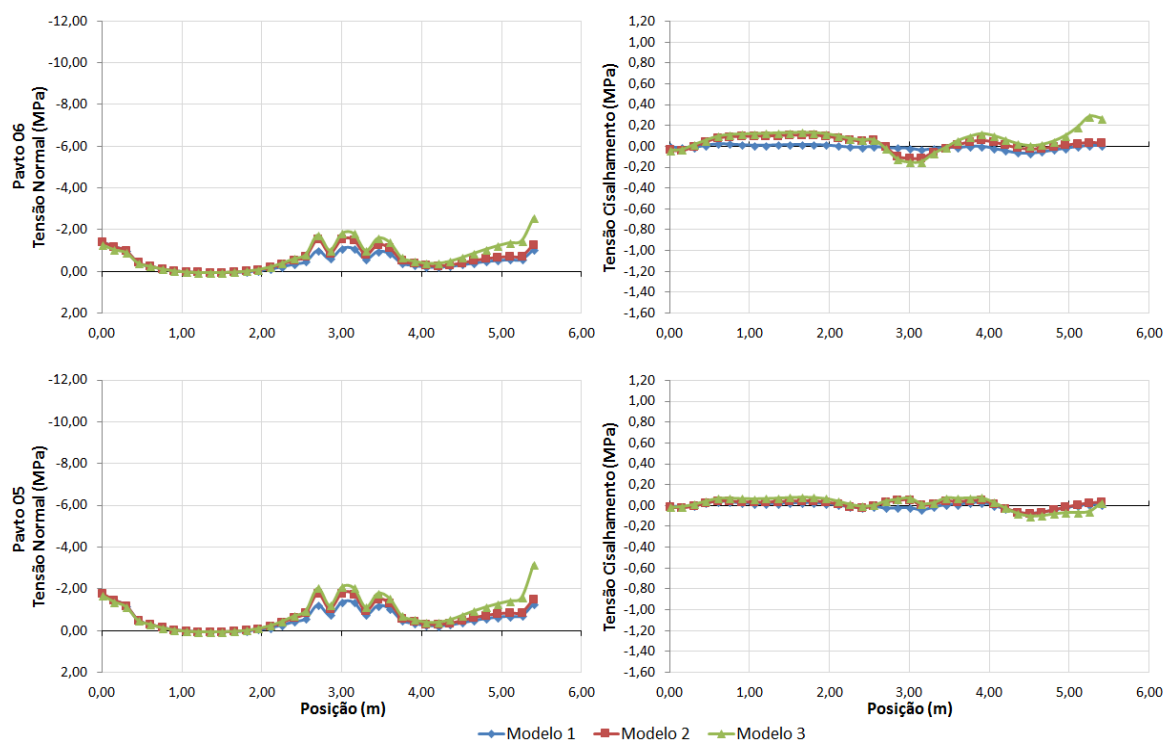


Figura 4.39 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 07 no quinto e no sexto pavimento.

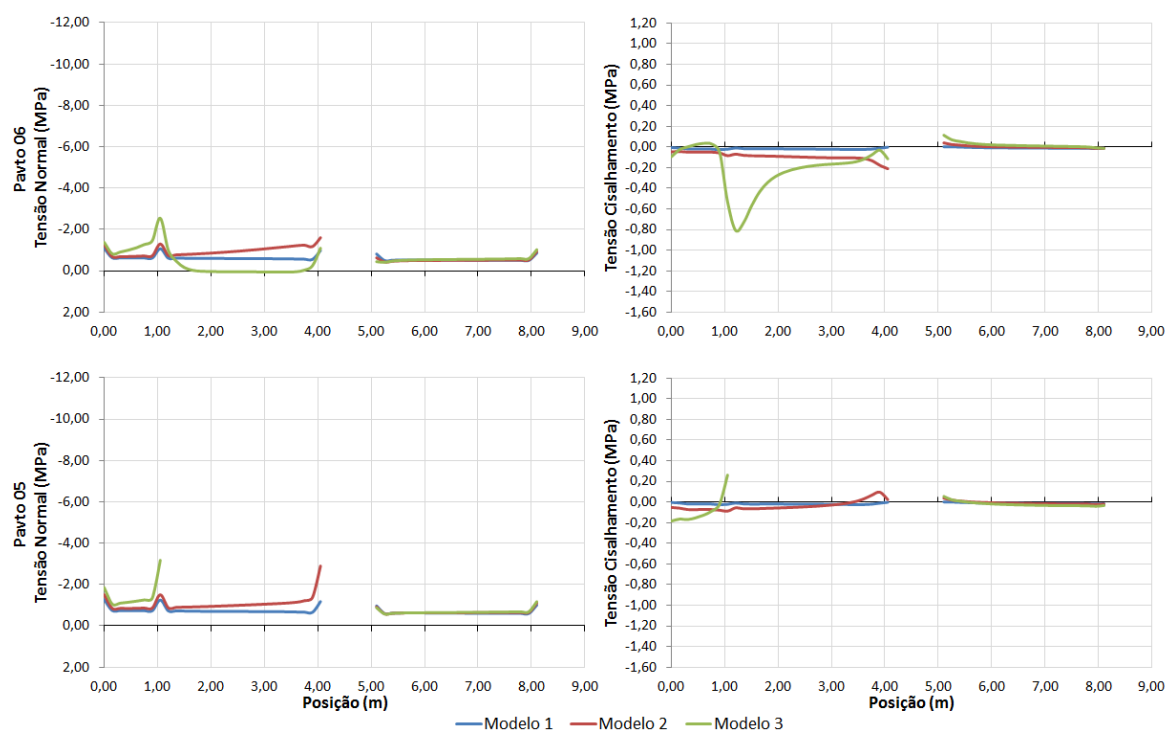


Figura 4.40 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 11 no quinto e no sexto pavimento.

As Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base das Paredes 05, 07 e 11, respectivamente, de acordo com os pavimentos, considerando a ocorrência das remoções no quinto pavimento.

Tabela 4.12 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 05, com remoções de parede no quinto pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-1,26	-	0,32	-125,3%	0,35	-128,2%
5	-1,51	-	-	-	-	-
Valores na coordenada 1,65 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-1,49	-	-2,31	55,4%	-1,74	16,9%
5	-1,74	-	-	-	-	-
Valores na coordenada 3,75 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-0,99	-	-0,81	-18,1%	-0,22	-77,3%
5	-1,18	-	-0,96	-18,6%	-1,95	64,7%
Valores na extremidade direita (4,50 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-0,81	-	-0,72	-11,1%	-1,46	79,7%
5	-0,93	-	-0,94	0,8%	-1,43	53,7%

Tabela 4.13 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 07, com remoções de parede no quinto pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-1,43	-	-1,42	-0,9%	-1,29	-9,8%
5	-1,72	-	-1,76	2,7%	-1,71	-0,7%
Valores no pico intermediário (2,70 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-1,02	-	-1,54	51,2%	-1,76	72,6%
5	-1,22	-	-1,77	45,2%	-2,05	67,9%
Valores na extremidade direita (5,40 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-1,06	-	-1,30	22,7%	-2,56	142,5%
5	-1,27	-	-1,50	18,0%	-3,18	149,5%

Tabela 4.14 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 11, com remoções de parede no quinto pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-1,08	-	-1,26	16,3%	-1,38	27,4%
5	-1,30	-	-1,51	16,4%	-1,85	43,1%
Valores na coordenada 1,05 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-1,06	-	-1,30	22,7%	-2,56	142,5%
5	-1,27	-	-1,50	18,0%	-3,18	149,5%
Valores na coordenada 4,05 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
6	-0,97	-	-1,60	64,3%	-1,09	12,6%
5	-1,19	-	-2,89	142,4%	-	-

As Figuras 4.41, 4.42 e 4.43 ilustram as tensões normais e de cisalhamento na base das Paredes 05, 07 e 11, respectivamente, no nono e no décimo pavimento.

Analogamente, as tensões normais e de cisalhamento na base destas paredes apresentam comportamento similar ao discutido anteriormente, exceto pela diminuição na intensidade das tensões por se referirem aos últimos pavimentos do edifício, portanto, menos carregados.

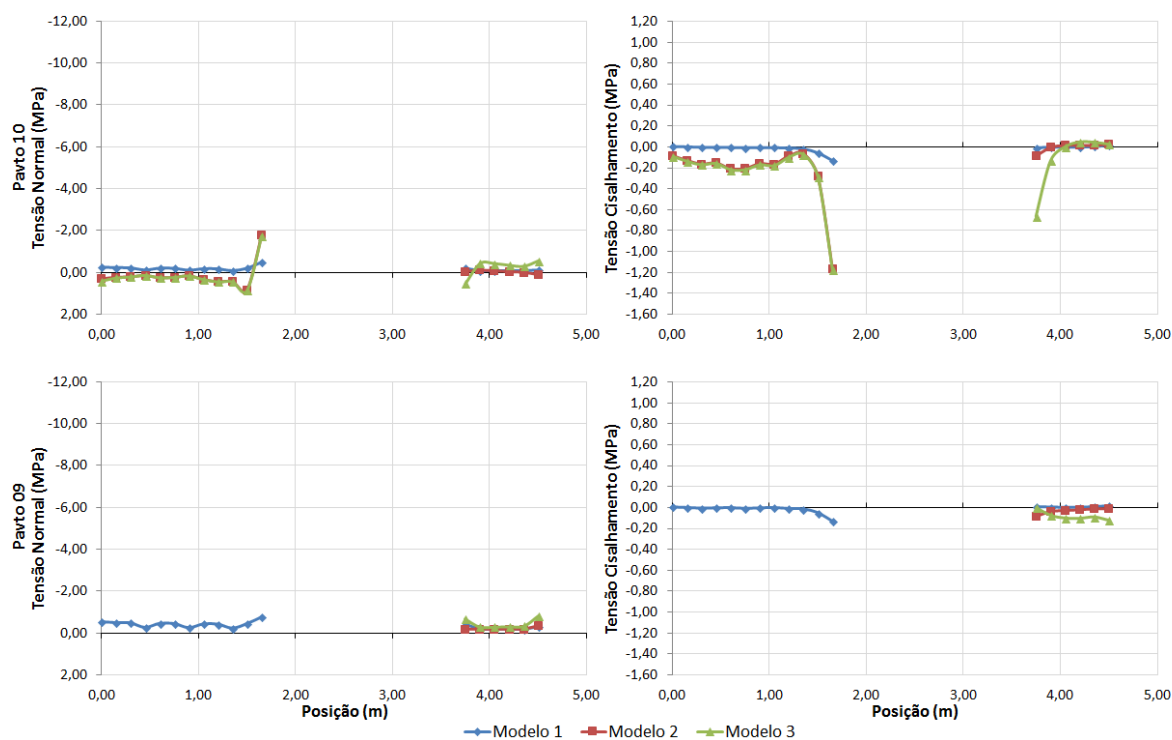


Figura 4.41 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 05 no nono e no décimo pavimento.

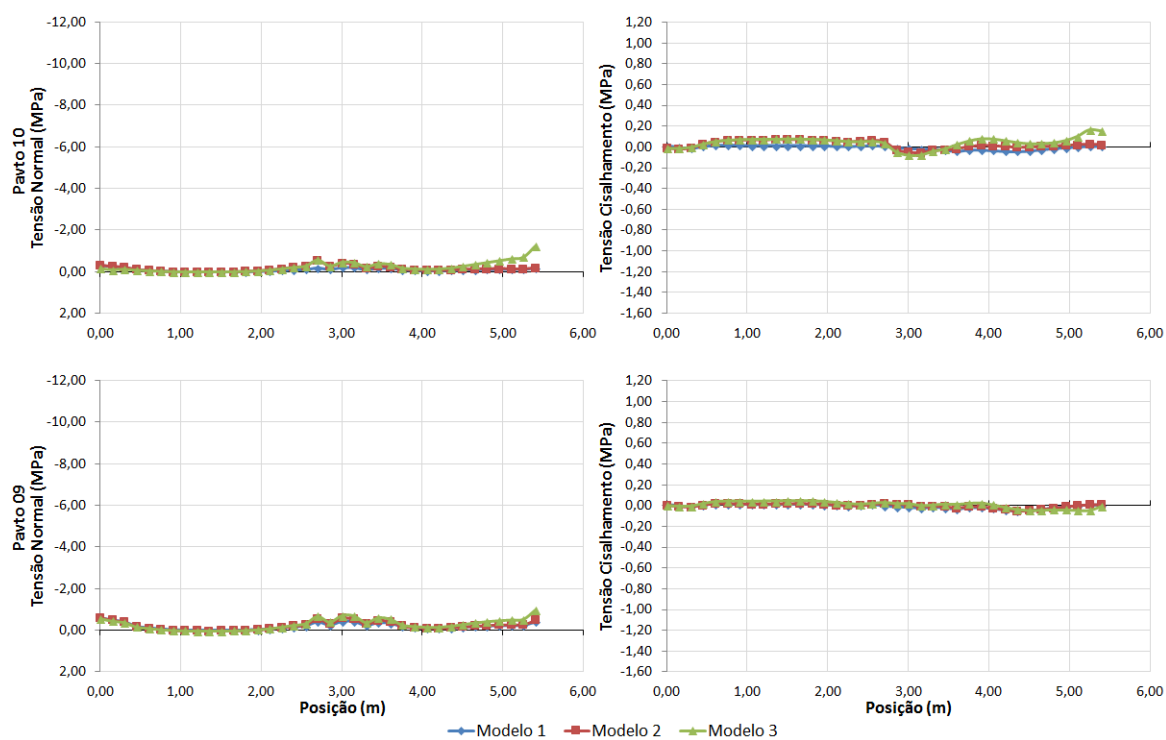


Figura 4.42 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 07 no nono e no décimo pavimento.

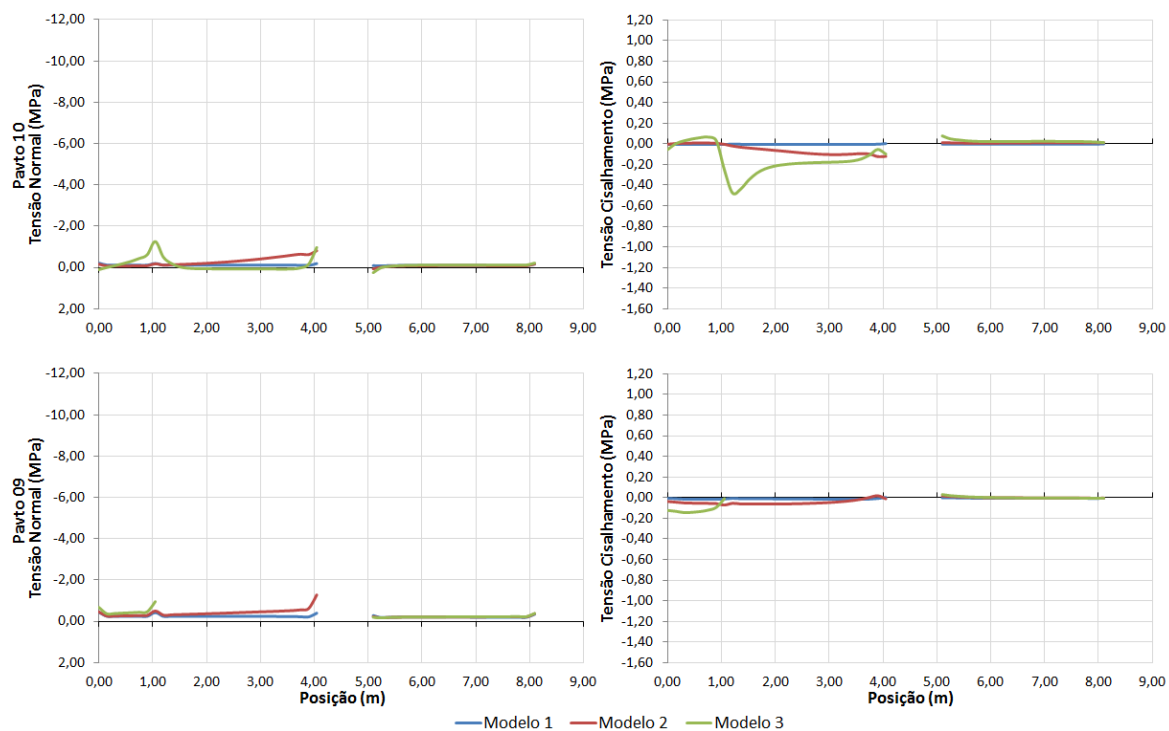


Figura 4.43 – Tensões normais (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) na base da Parede 11 no nono e no décimo pavimento.

As Tabelas 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam as diferenças percentuais nos picos de tensões normais na base das Paredes 05, 07 e 11, respectivamente, de acordo com os pavimentos, considerando a ocorrência das remoções no nono pavimento.

Tabela 4.15 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 05, com remoções de parede no nono pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,26	-	0,31	-216,0%	0,41	-256,3%
9	-0,53	-	-	-	-	-
Valores na coordenada 1,65 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,51	-	-1,79	252,2%	-1,73	240,3%
9	-0,76	-	-	-	-	-
Valores na coordenada 3,75 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,20	-	-0,05	-75,4%	0,53	-357,7%
9	-0,41	-	-0,18	-56,2%	-0,67	62,3%
Valores na extremidade direita (4,50 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,12	-	0,10	-186,1%	-0,55	362,9%
9	-0,30	-	-0,37	24,4%	-0,81	167,7%

Tabela 4.16 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 07, com remoções de parede no nono pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,33	-	-0,32	-2,6%	-0,17	-49,5%
9	-0,62	-	-0,63	0,5%	-0,57	-7,7%
Valores no pico intermediário (2,70 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,19	-	-0,52	174,8%	-0,57	198,7%
9	-0,41	-	-0,56	36,2%	-0,68	63,3%
Valores na extremidade direita (5,40 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,19	-	-0,19	0,5%	-1,25	562,7%
9	-0,41	-	-0,49	20,5%	-0,97	138,6%

Tabela 4.17 – Diferenças percentuais das tensões normais na base da Parede 11, com remoções de parede no nono pavimento.

Valores na extremidade esquerda (0,00 m)						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,21	-	-0,18	-13,8%	0,10	-149,6%
9	-0,43	-	-0,45	6,7%	-0,69	61,9%
Valores na coordenada 1,05 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,19	-	-0,19	0,5%	-1,25	562,7%
9	-0,41	-	-0,49	20,5%	-0,97	138,6%
Valores na coordenada 4,05 m						
Pavimentos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)	Intensidade (MPa)	Variação (%)
10	-0,18	-	-0,80	335,6%	-0,96	423,0%
9	-0,38	-	-1,27	235,0%	-	-

4.2.1.3 Comentários

De maneira geral, nas três situações avaliadas (remoções de paredes no primeiro, quinto e nono pavimento), exceto para os valores verificados na base do primeiro pavimento, as tensões normais e de cisalhamento verificadas na base das paredes analisadas apresentaram comportamento semelhante entre si, variando na intensidade de acordo com o pavimento analisado. Outros comentários relevantes:

- Assim como já comentado anteriormente no item 4.1.1.3, os resultados verificados na base do primeiro pavimento podem ser justificados pela existência de uma estrutura de transição no edifício, havendo interferência nas tensões devido ao fenômeno da interação parede-viga;
- Os modelos analisados nesta pesquisa não contemplam as lajes, de modo que a discretização destes elementos pode fornecer resultados mais refinados e próximos da realidade.

4.2.2 Análise das cintas de respaldo no pavimento superior às remoções dos trechos de alvenaria

Tal como justificado no item 4.1.2, uma vez configuradas as características inerentes a um sistema parede-viga, mesmo não havendo uma viga na base das paredes, torna-se pertinente avaliar a contribuição das cintas de respaldo no que diz respeito ao comportamento de tirante no sistema parede-viga.

Foram avaliadas as cintas da base e topo das Paredes 05, 11 e 12, para remoções no primeiro, quinto e nono pavimento.

4.2.2.1 *Situações de remoções de paredes no primeiro e no quinto pavimento*

A Figura 4.44 ilustra os trechos onde foram analisadas as forças normais ao longo das cintas de respaldo na base e no topo do segundo pavimento, para a situação de remoções no primeiro pavimento, correspondentes aos Modelos 2 e 3.

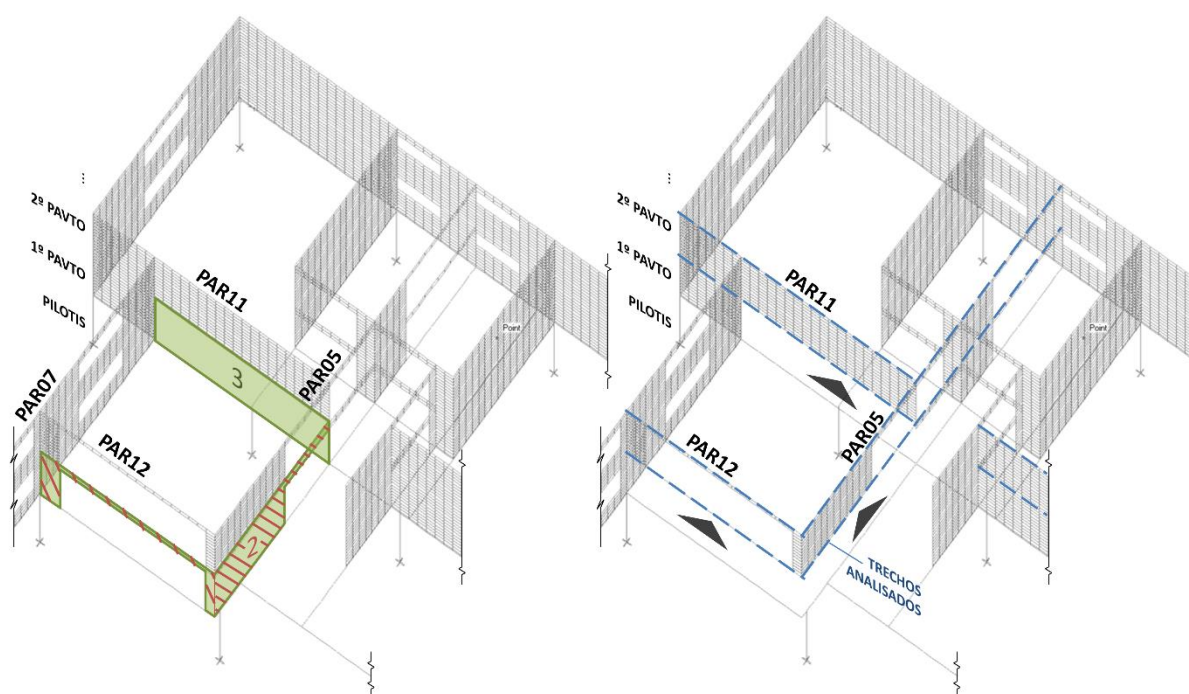


Figura 4.44 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2 e 3 (à esquerda) e dos trechos de análise das forças normais nas cintas de respaldo (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

A Figura 4.45 ilustra as forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 12 e 05, no segundo pavimento, ao longo do trecho indicado na Figura 4.44. Neste caso, optou-se por ilustrar estes resultados em continuidade no comprimento.

Inicialmente, é importante lembrar que os intervalos de coordenadas entre 0,4 m e 2,8 m da Parede 12 e entre 7,6 m e 9,1 m da Parede 05, aproximadamente, se referem às vigas de alvenaria estrutural responsáveis por suportar trechos de paredes não-estruturais previstos em projeto, conforme ilustra a Figura 3.6. A respeito do Modelo 1, pode-se observar em ambas as cintas valores de pequena intensidade de força normal praticamente em todo o comprimento ilustrado. Por outro lado, é possível notar uma leve compressão nos trechos da viga de alvenaria. De fato, a cinta de respaldo nestes trechos corresponde ao bordo superior da viga de alvenaria, que está naturalmente comprimido.

Na avaliação da cinta inferior, nota-se uma compressão de aproximadamente 40 kN no trecho de coordenadas entre 4,7 m e 5,6 m em ambos os Modelos 2 e 3. Isto acontece em decorrência da remoção do trecho da Parede 05. Com a perda de suporte deste trecho no segundo pavimento, as tensões tendem a se redistribuir através dos lintéis e da cinta inferior na região das aberturas, gerando esta compressão mencionada. No Modelo 3, tem-se uma região com inversão do sinal de esforço normal, compreendida entre as coordenadas de 5,6 m e 6,7 m, que se justifica pela migração das tensões através do lintel remanescente. Já na avaliação da cinta superior, é possível observar dois trechos que se referem à transferência das tensões: a transferência ocorrendo através da viga de alvenaria na Parede 12, e; a transferência ocorrendo através dos lintéis na região das aberturas da Parede 05. O arco formado, em ambos os pavimentos, no trecho compreendido entre 2,9 m e 4,7 m não se configurou o suficiente para gerar tração considerável nas cintas. A redistribuição das forças ao longo do plano das Paredes 12 e 05 pode ser melhor observada na Figura 4.46 e na Figura 4.47, para os Modelos 2 e 3, respectivamente.

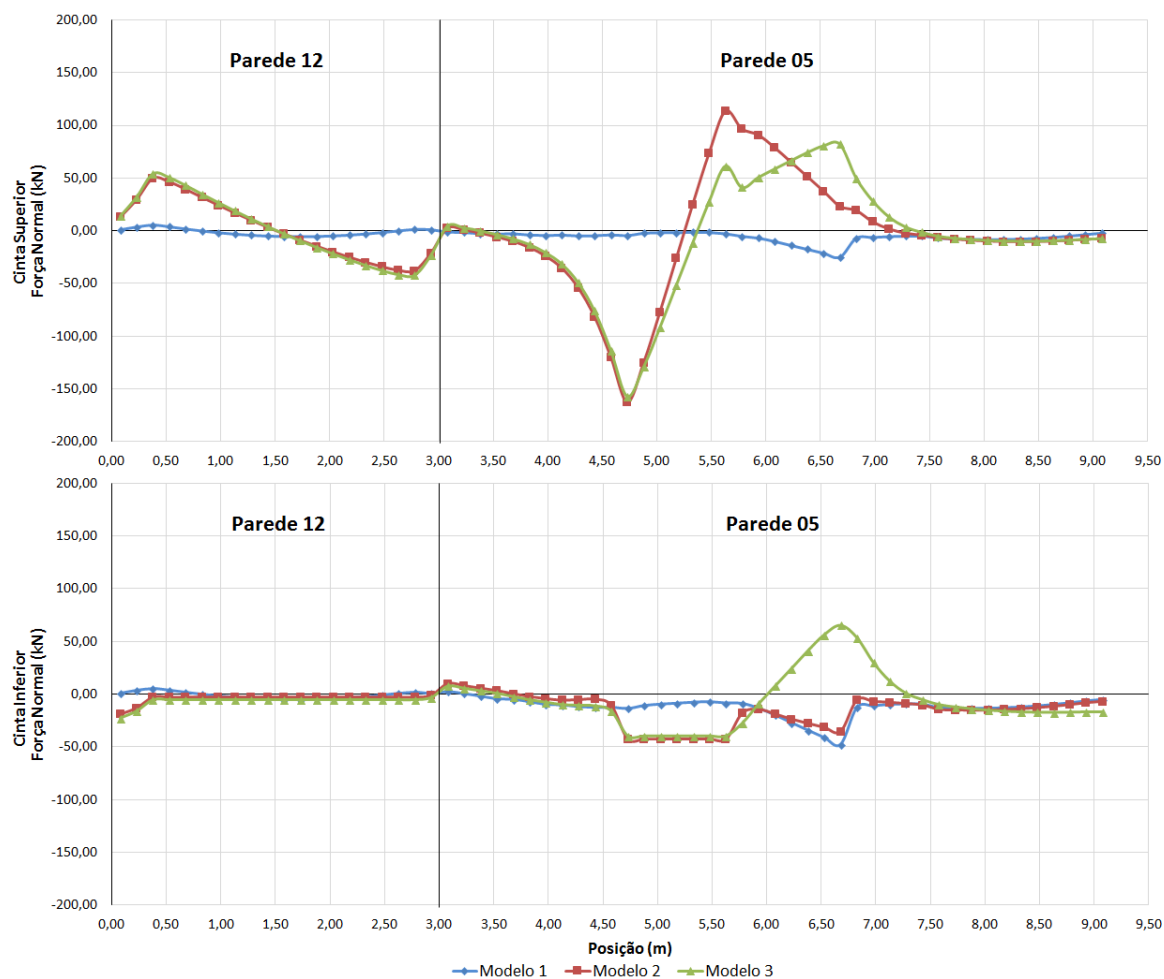


Figura 4.45 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 12 e 05, no segundo pavimento, ao longo do comprimento.

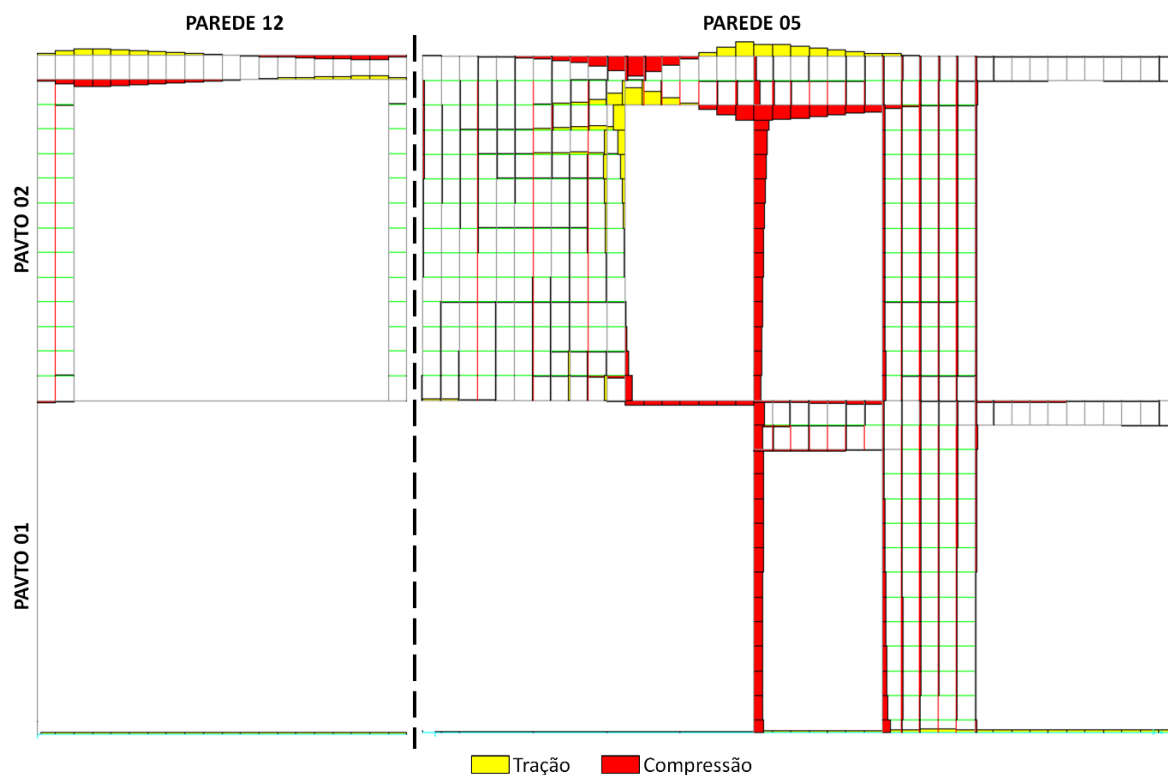


Figura 4.46 – Esforços de tração e compressão nas barras das Paredes 12 e 05, Modelo 2, para remoções no primeiro pavimento.

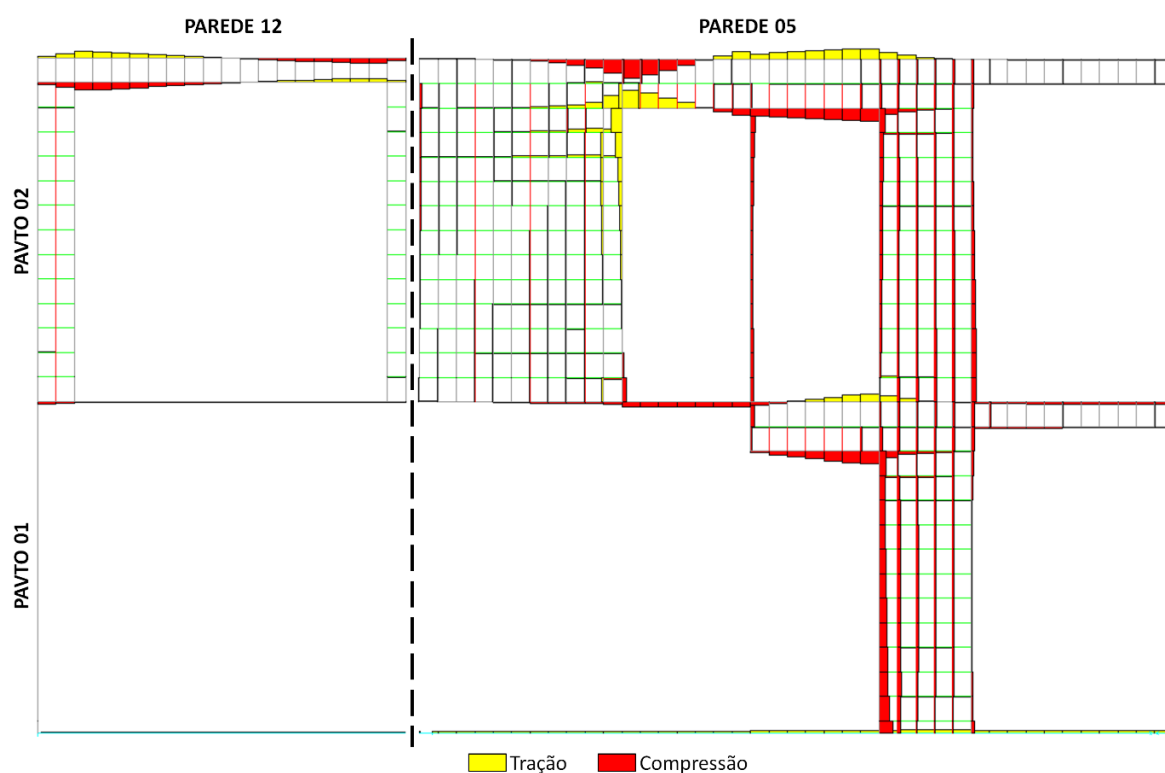


Figura 4.47 – Esforços de tração e compressão nas barras das Paredes 12 e 05, Modelo 3, para remoções no primeiro pavimento.

A Figura 4.48 ilustra as forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) da Parede 11, no segundo pavimento, ao longo do trecho indicado na Figura 4.44.

Percebe-se que os Modelos 1 e 2 apresentaram forças normais de intensidade praticamente nulas ao longo de toda a extensão das cintas. De fato, com a remoção do trecho de alvenaria da Parede 05, praticamente não há interferência no plano da Parede 11. Já o Modelo 3, na cinta inferior, apresenta o surgimento de compressão entre as coordenadas de 0,0 m e 1,7 m e tração no restante até o ponto de descontinuidade da cinta, correspondente a 4,0 m.

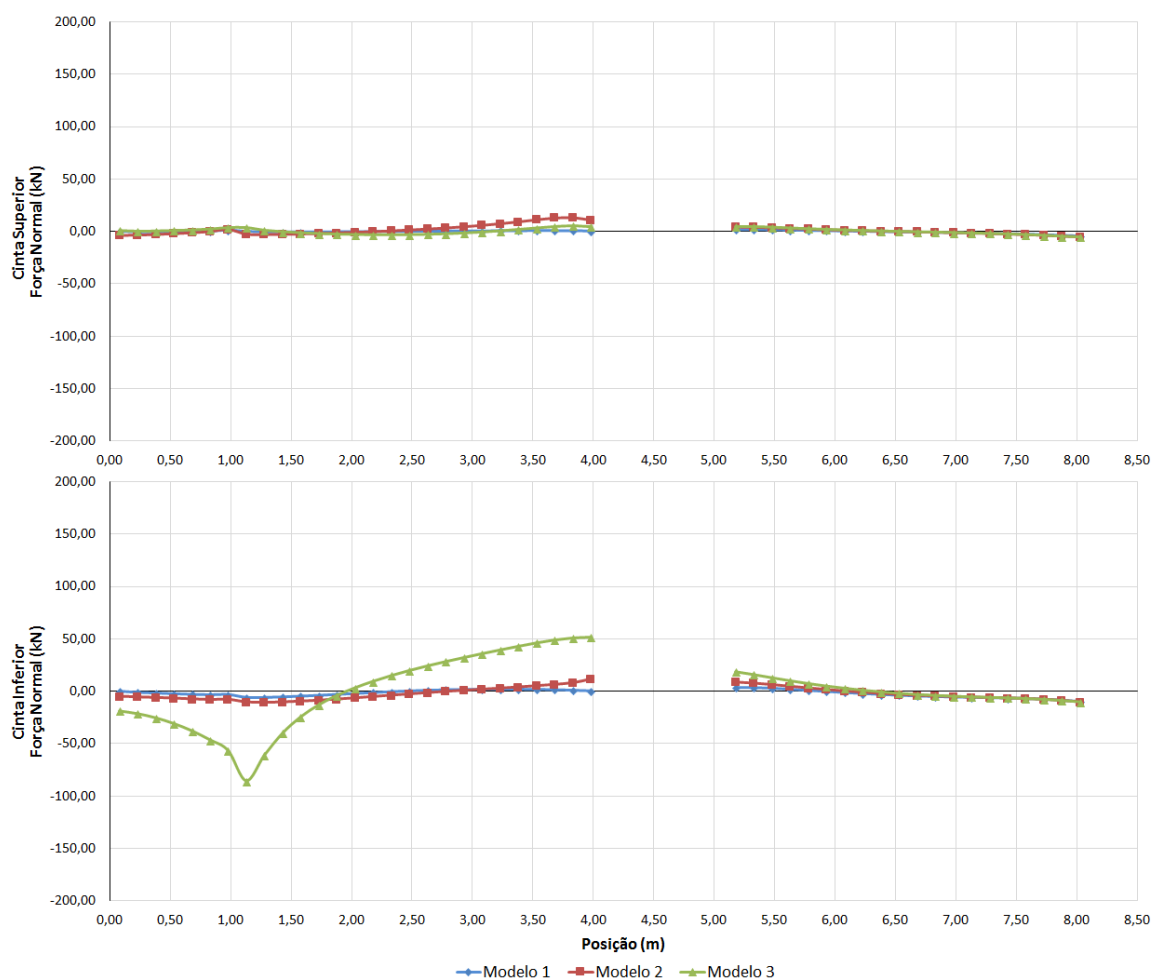


Figura 4.48 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) da Parede 11, no segundo pavimento, ao longo do comprimento.

Nota-se a similaridade entre este resultado e os resultados obtidos no Caso I, ilustrados na Figura 4.15. Sendo assim, tal comportamento pode ser justificado pela formação da suposta biela que transfere as cargas de compressão à região esquerda da parede, provocando, conseqüentemente, a tração mencionada. A redistribuição das forças, neste pavimento ao longo do plano da Parede 11 pode ser melhor observada na Figura 4.49, considerando o Modelo 3.

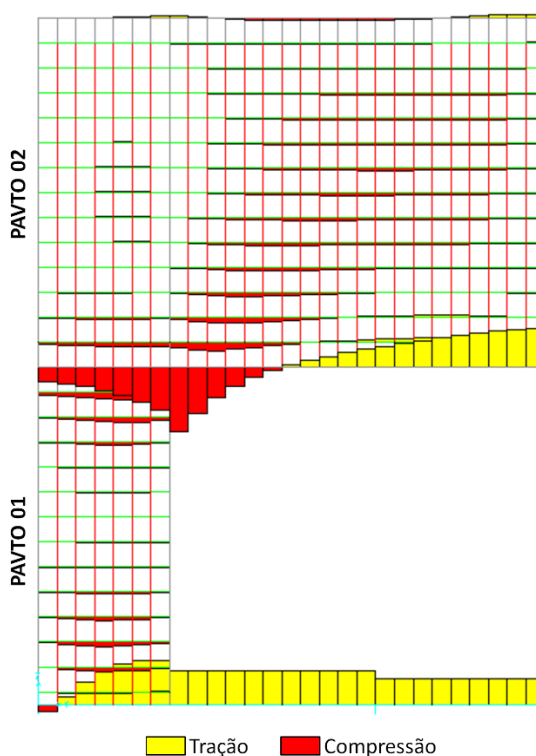


Figura 4.49 – Esforços de tração e compressão nas barras da Parede 11, Modelo 3, para remoções no primeiro pavimento.

Os trechos analisados na situação de remoções no quinto pavimento são idênticos aos ilustrados na Figura 4.44. A Figura 4.50 ilustra as forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 12 e 05, enquanto que a Figura 4.51 se refere à Parede 11. Nota-se que estes resultados apresentam comportamento similar ao ilustrado pela Figura 4.45 e pela Figura 4.48. Além disso, também apresentam praticamente a mesma intensidade de forças normais, o que indica que, em termos da avaliação dos esforços normais nas cintas de respaldo, dada uma

remoção inadvertida de trecho de parede estrutural, o pavimento analisado pode não ser relevante.

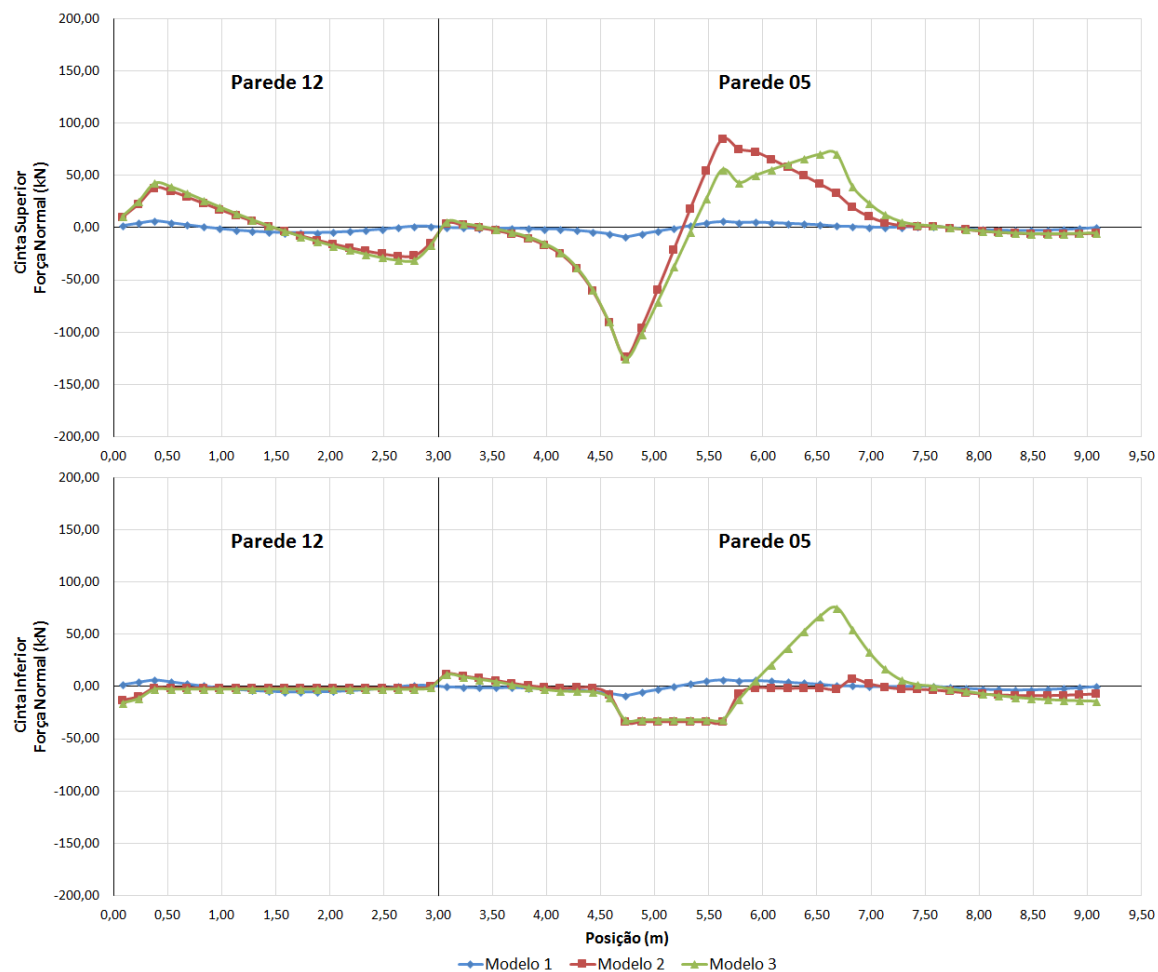


Figura 4.50 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 12 e 05, no sexto pavimento, ao longo do comprimento.

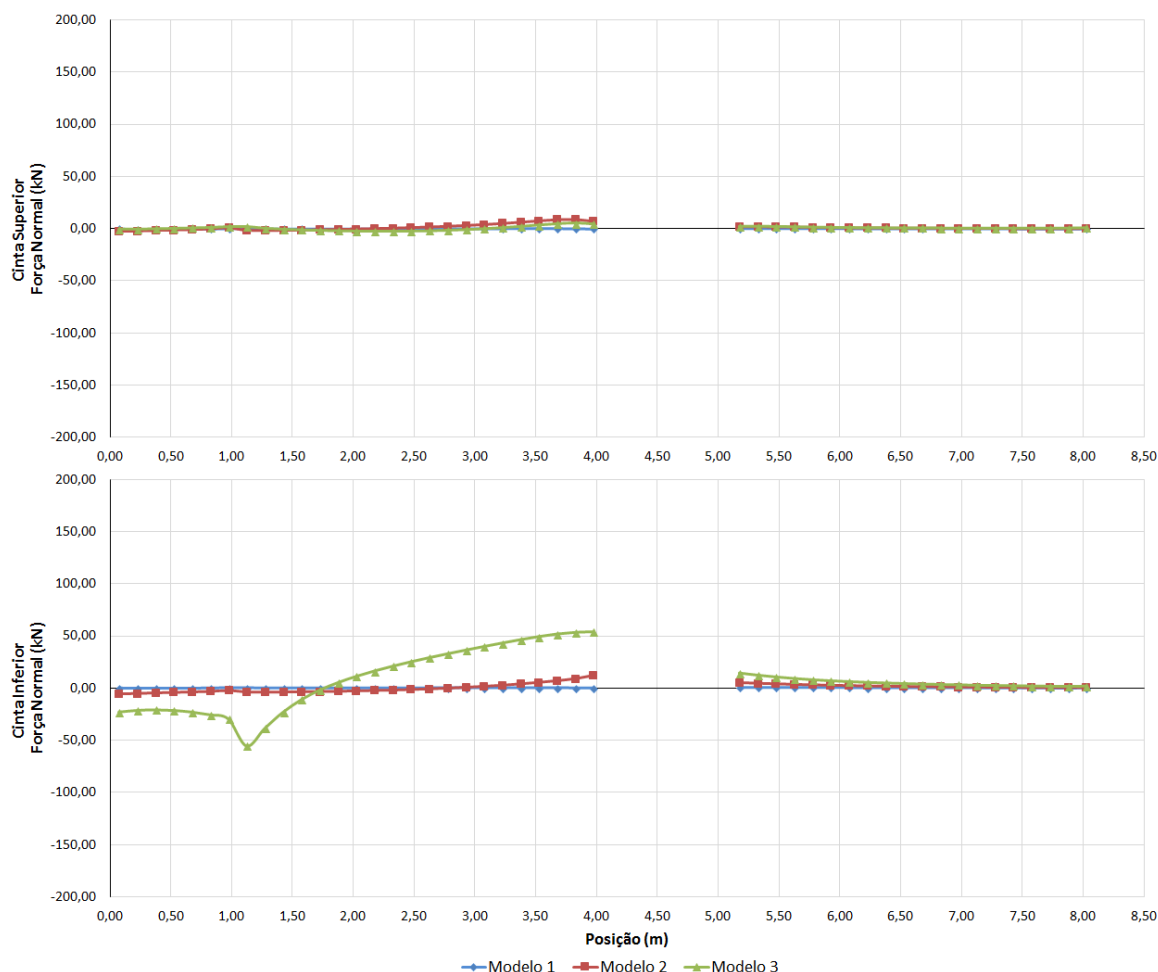


Figura 4.51 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) da Parede 11, no sexto pavimento, ao longo do comprimento.

4.2.2.2 Situação de remoções de paredes no nono pavimento

Também foram analisadas as forças normais nas cintas da base e do topo do décimo pavimento, considerando as remoções de trechos de alvenaria no nono pavimento. A avaliação das forças normais nas cintas deste pavimento teve como objetivo verificar a influência das condições de contorno no topo do edifício. Anteriormente foi comentado sobre o comportamento parcial de viga-parede assumido pelas paredes analisadas, de modo que se fez necessário avaliar a situação em que não há continuidade de alvenaria no topo do pavimento. Os modelos e trechos analisados nesta situação são idênticos aos ilustrados pela Figura 4.44.

A Figura 4.52 ilustra as forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 12 e 05, no décimo pavimento. Nota-se comportamento semelhante ao discutido no item 4.2.2.1, mesmo em termos de intensidade das forças.

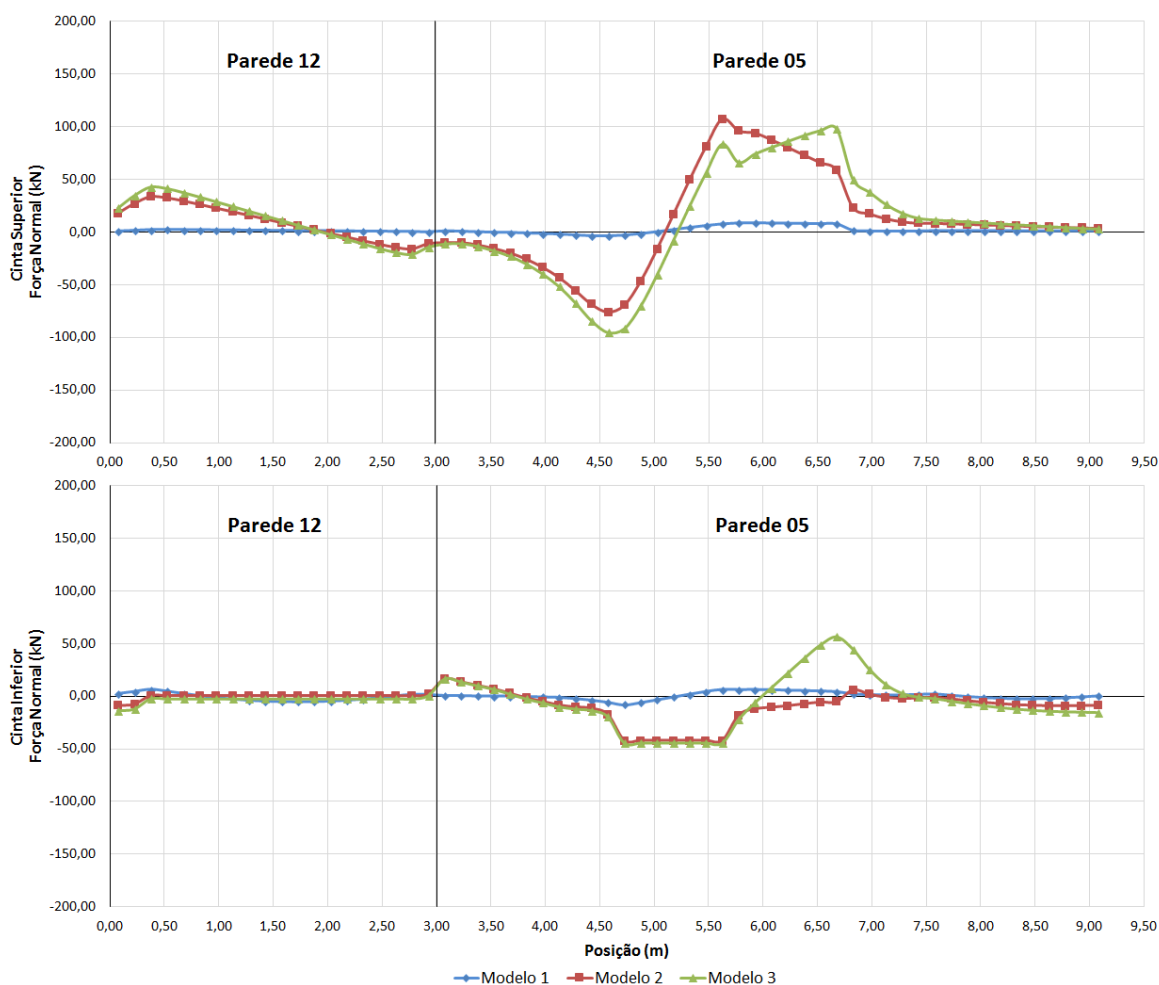


Figura 4.52 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) das Paredes 12 e 05, no décimo pavimento, ao longo do comprimento.

Já a Figura 4.53 ilustra as forças normais nas mesmas cintas sendo, entretanto, correspondentes à Parede 11 no décimo pavimento. Neste caso, é bastante pertinente observar a formação dos binários de força atuando na base e no topo do décimo pavimento, considerando os resultados do Modelo 3 no trecho à esquerda. Estes resultados reforçam a suposição de que paredes remanescentes, localizadas acima do trecho de alvenaria estrutural removido, podem apresentar parcialmente o comportamento de uma viga-parede. Tal parcialidade se dá quando existe

continuidade acima da parede analisada, ou seja, basta que este pavimento não seja o último do edifício. Uma vez que o pavimento analisado apresenta a parte superior sem continuidade, como é o caso do último pavimento, a parede remanescente apresenta formação de binário de forças normais nas cintas, sugerindo um comportamento análogo ao de viga-parede.

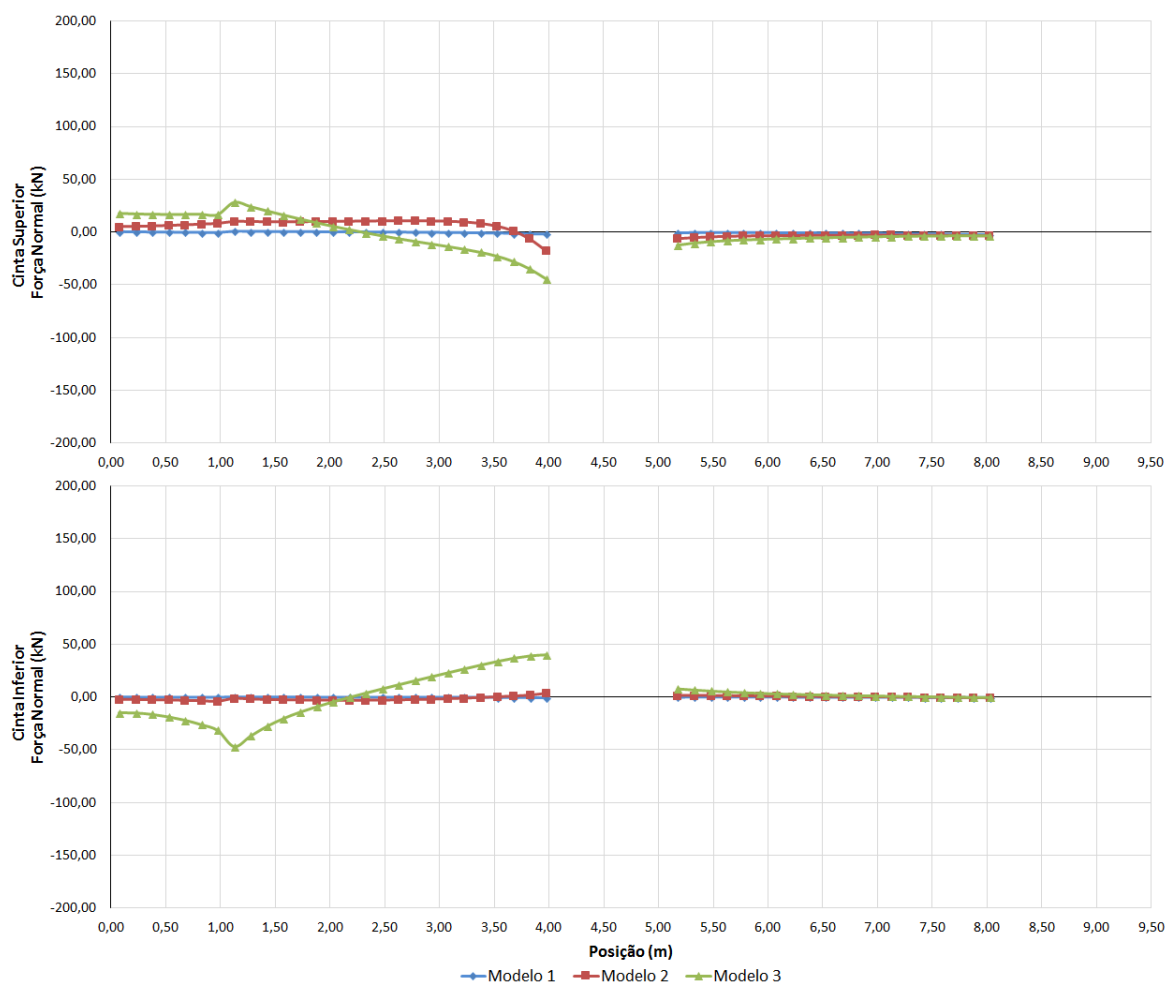


Figura 4.53 – Forças normais nas cintas inferior (base) e superior (topo) da Parede 11, no décimo pavimento, ao longo do comprimento.

A redistribuição das forças, neste pavimento, ao longo do plano da Parede 11 pode ser melhor observada na Figura 4.54, considerando o Modelo 3. É perceptível a formação de uma suposta biela entre as extremidades inferior esquerda e superior direita. Da mesma forma, verifica-se que as máximas forças normais horizontais ocorreram nas cintas superior e inferior, com intensidades de tração e compressão da

mesma ordem de grandeza, reforçando a ocorrência de um comportamento análogo ao de viga-parede.

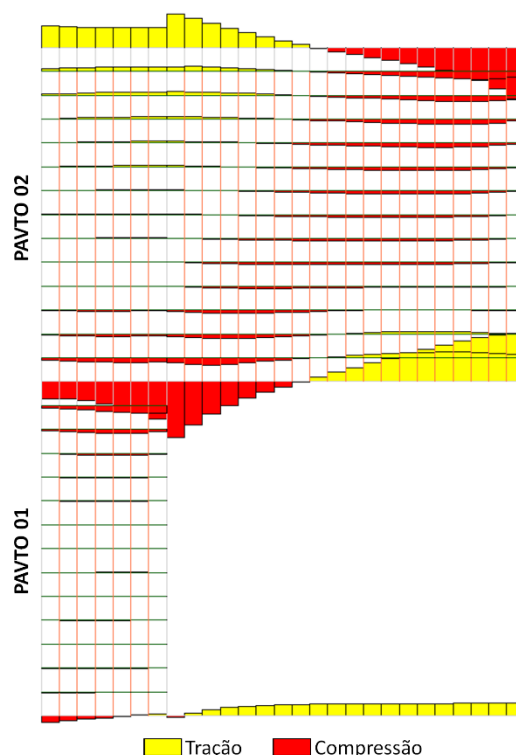


Figura 4.54 – Esforços de tração e compressão nas barras da Parede 11, Modelo 3, para remoções no nono pavimento.

4.2.2.3 Comentários

A partir da análise das cintas do Caso II, foi possível observar diferenças e semelhanças em relação ao Caso I, de modo que é possível concluir o seguinte:

- As cintas e lintéis são mobilizados de modo a garantir a redistribuição das tensões de compressão no plano da parede formando bielas e, assim, as cintas tendem a trabalhar sob tração ao longo do vão gerado e sob compressão nas regiões onde a parede se apoia.
- A formação de binários com os pares de cintas de respaldo (inferior e superior) depende da existência de continuidade no contorno da parede analisada. No caso da avaliação do Modelo 3 na Parede 11, foi possível perceber que a formação do binário ocorre quando o topo do pavimento

não apresenta continuidade, induzindo a um comportamento análogo ao de viga-parede.

4.2.3 Análise das tensões normais em seções verticais nas paredes do pavimento superior à remoção do trecho de alvenaria

Assim como no item 4.1.3, estabeleceram-se seções verticais para avaliação das tensões normais com o objetivo de verificar a formação de bielas e tirantes na redistribuição de tensões a partir de uma remoção inadvertida de trecho de parede estrutural. Nesta análise, foram avaliados os Modelos 1 e 3 na Parede 11, onde os resultados anteriores demonstraram tal comportamento com maior clareza. Foram analisadas separadamente as situações de remoções no primeiro, no quinto e no nono pavimento.

4.2.3.1 Situações de remoção de parede no primeiro e no quinto pavimento

A Figura 4.55 ilustra os modelos analisados e as seções verticais estabelecidas para análise das tensões normais no plano da Parede 11, considerando a ocorrência de remoção no primeiro pavimento.

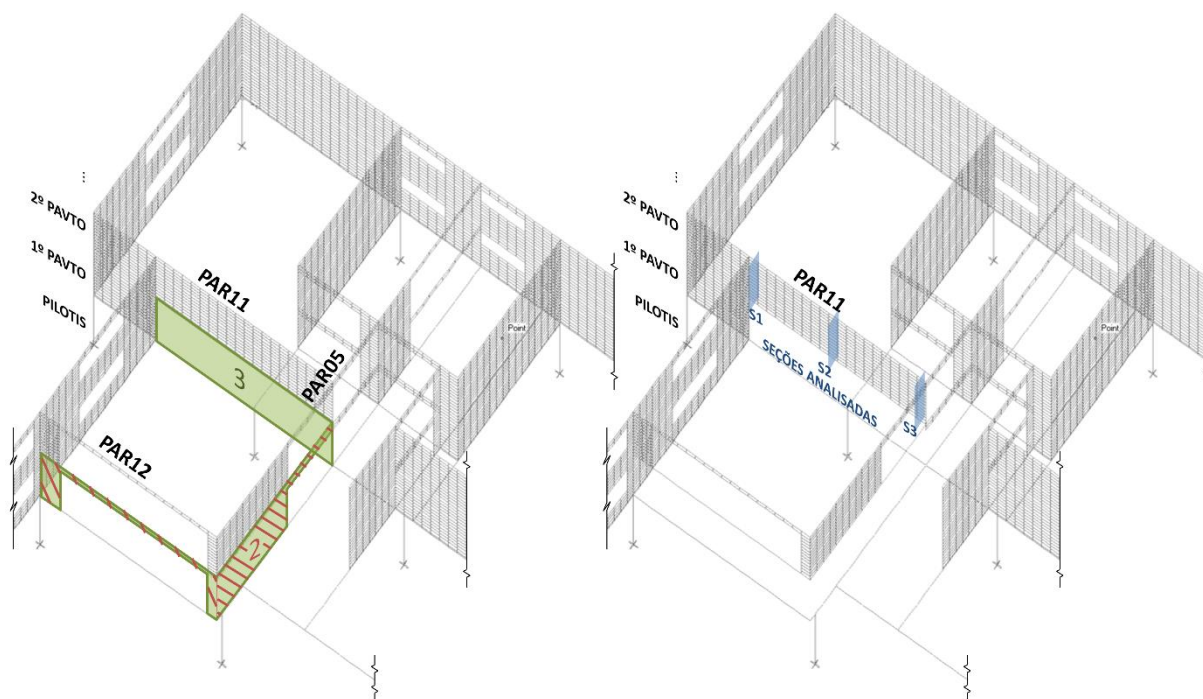


Figura 4.55 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2 e 3 (à esquerda) e das seções verticais estabelecidas para análise das tensões normais (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

A Figura 4.56 ilustra as tensões normais nas seções S1, S2 e S3 do segundo pavimento, indicadas na Figura 4.55, para a situação de remoção no primeiro pavimento. Já a Figura 4.57 ilustra estas mesmas seções no sexto pavimento para a situação de remoção no quinto pavimento.

Nota-se que estes resultados são similares aos apresentados no Caso I. Na base da seção S1 ocorreu compressão, que corresponderia ao nó de convergência de uma suposta biela, enquanto que na base das seções S2 e S3 ocorreu tração, que se refere à atuação da cinta como tirante no vão gerado pela remoção do trecho de parede no pavimento inferior. Os resultados obtidos no topo das seções apresentaram valores de baixa intensidade, descaracterizando um comportamento típico de viga-parede, justificados pela continuidade das paredes ao longo dos pavimentos superiores.

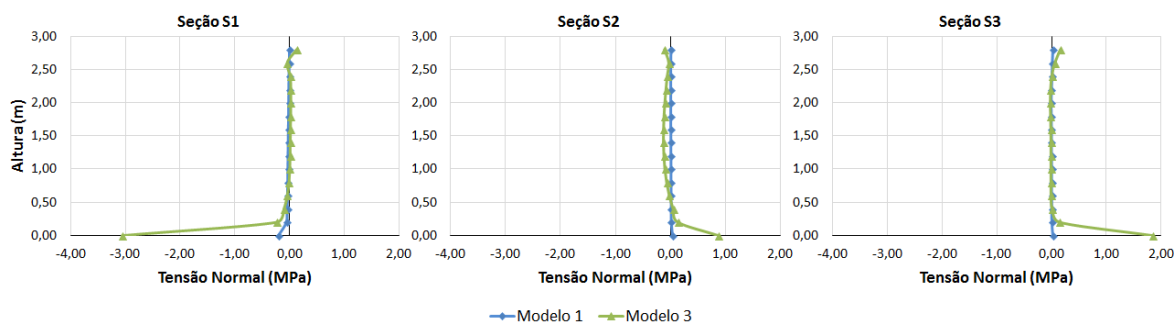


Figura 4.56 – Tensões normais nas seções verticais da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para remoção no primeiro pavimento.

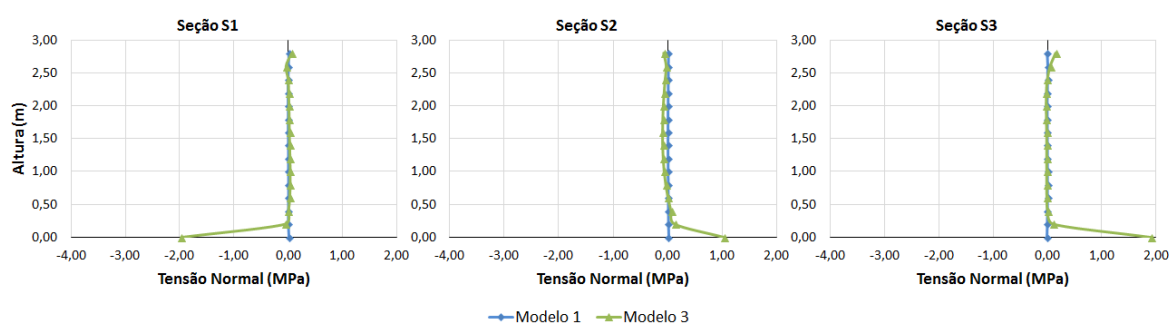


Figura 4.57 – Tensões normais nas seções verticais da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para remoção no quinto pavimento.

Por outro lado, a Figura 4.58 ilustra os resultados da S2 com escala apropriada para a mesma, considerando, separadamente, as remoções no primeiro e no quinto pavimento. Observa-se que o Modelo 3 apresenta tração na base e compressão na região intermediária e no topo, se aproximando do comportamento das tensões apresentadas na Figura 4.23 (página 86).

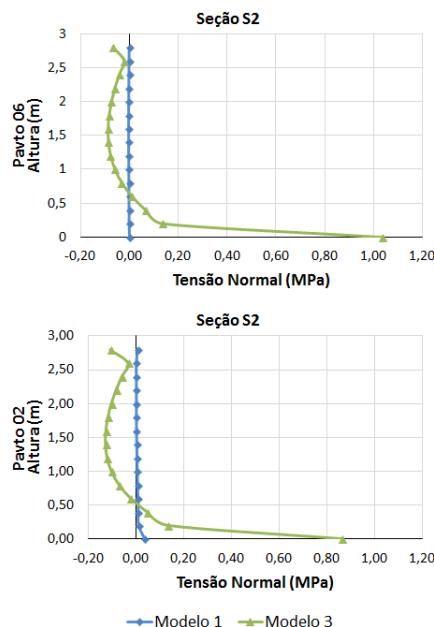


Figura 4.58 – Tensões normais na seção vertical S2 da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para as remoções no quinto e no nono pavimento ocorridas separadamente.

4.2.3.2 Situação de remoção de parede no nono pavimento

A Figura 4.59 ilustra as tensões normais nas seções S1, S2 e S3 do décimo pavimento, indicadas na Figura 4.55, para a situação de remoção no nono pavimento. Nesta situação, observa-se que as seções S1 e S3 apresentam os binários formados pelos pares topo e base, ilustrados anteriormente pela Figura 4.53. A seção S2 fornece diagrama de tensões similar aos da situação anterior, embora com sutil acréscimo de tensão de compressão no topo do pavimento, se aproximando do diagrama de viga-parede da Figura 4.23.

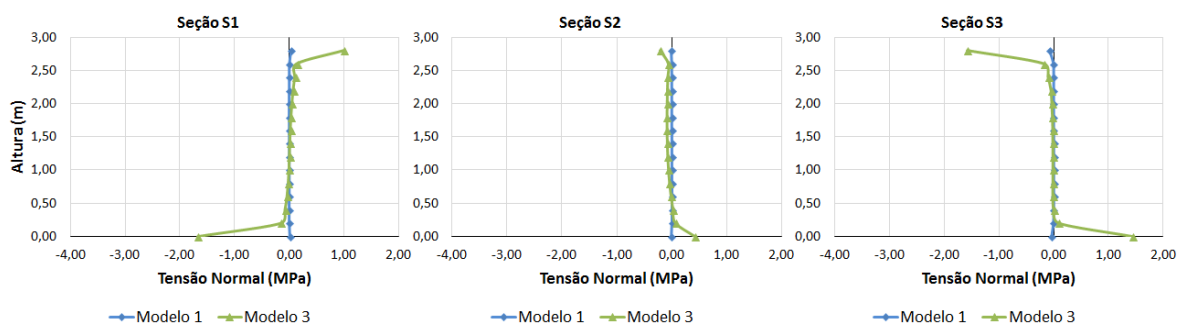


Figura 4.59 – Tensões normais nas seções verticais da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para remoção no nono pavimento.

De fato, observando a seção S2 em escala apropriada para a mesma, conforme ilustrado pela Figura 4.60, o diagrama se assemelha ao diagrama de tensões no meio do vão de uma viga-parede. Entretanto, é necessário realizar estudos mais aprofundados para se confirmar tal analogia.

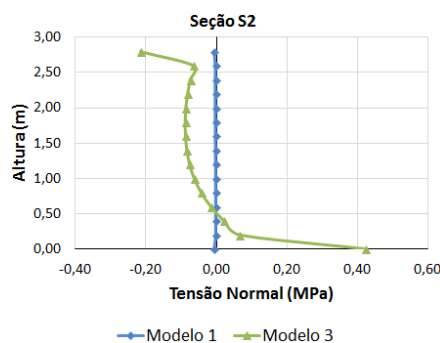


Figura 4.60 – Tensões normais na seção vertical S2 da Parede 11 nos Modelos 1 e 3, para remoção no nono pavimento.

4.2.3.3 Comentários

A partir destes resultados, é razoável admitir as seguintes conclusões parciais:

- Na avaliação das tensões na parede remanescente, as condições de contorno da mesma interferem nos resultados obtidos no topo da parede. Quando há continuidade, as tensões tendem a se manter próximo à nulidade, enquanto que, no caso de não haver continuidade, tende-se a formar binários com as cintas de respaldo.
- A parede remanescente, dada uma remoção de trecho de alvenaria abaixo desta, apresenta diagrama de tensões ligeiramente semelhante ao de uma viga-parede. Entretanto, tal afirmação precisaria de mais análises para ser confirmada, tais como verificações da posição da linha neutra, comprimento do braço de alavanca e altura útil.

4.2.4 Análise das tensões de cisalhamento em seções transversais verticais no pavimento superior à remoção do trecho de alvenaria

Finalmente, também foram avaliadas as tensões de cisalhamento na Seção S1 da Parede 11. Foram analisados os Modelos 1 e 3 nas situações de remoções no primeiro, no quinto e no nono pavimento.



Figura 4.61 – Indicação dos trechos removidos nos Modelos 2 e 3 (à esquerda) e da seção vertical estabelecida para análise das tensões normais (à direita) para as remoções no primeiro pavimento, em vista tridimensional.

Neste item, os resultados das três diferentes situações (remoções no primeiro, no quinto e no nono pavimento) são ilustrados juntos, de modo que se permita uma melhor comparação entre eles, embora a análise de cada situação tenha sido feita separadamente. Assim, a Figura 4.62 ilustra as tensões de cisalhamento na seção S1 da Parede 11, no pavimento imediatamente acima da remoção, para as diferentes situações de remoções do trecho de alvenaria da Parede 11.

Nota-se que, assim como observado no Caso I, as tensões de cisalhamento no Modelo 1 são praticamente nulas devido ao modo de aplicação das cargas no topo dos pavimentos, sendo estas consideradas como cargas dos grupos de paredes,

conforme descrito no item 3.1. Também se verifica a maior intensidade das tensões na base da seção que tende a ser aliviada nas fiadas superiores da parede que, aliás, apresenta expressiva diferença em relação às demais fiadas nas três situações de remoção.

Observa-se, comparando-se as três situações, que há uma diminuição na intensidade das tensões de cisalhamento na seção analisada ao se considerar as remoções ocorrendo em pavimentos mais elevados. De fato, em pavimentos mais carregados haverá maior esforço cortante na seção analisada, provocando maior tendência de mobilização entre as paredes.

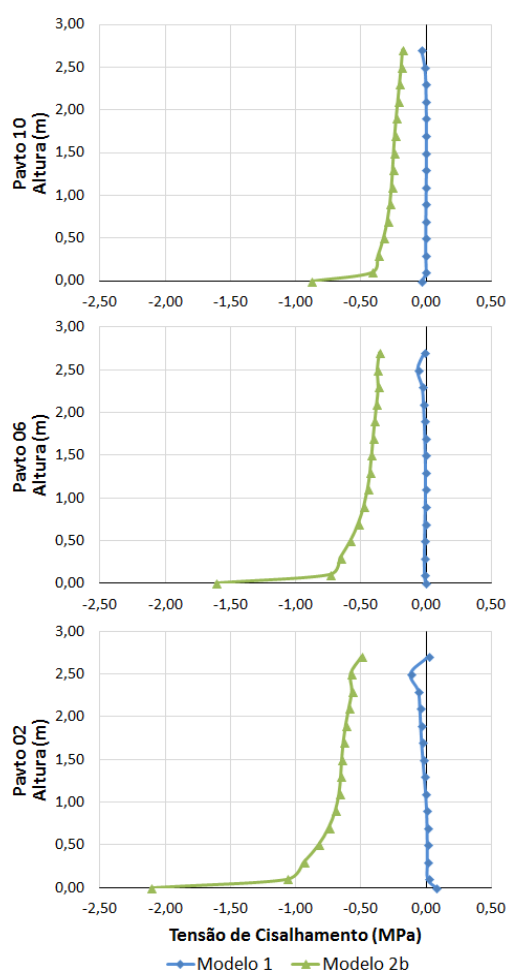


Figura 4.62 – Tensões de cisalhamento nos Modelos 1 e 3 ao longo da altura na Parede 11, para remoções no primeiro, no quinto e no nono pavimento.

4.2.4.1 Comentários

De maneira geral, a respeito das tensões de cisalhamento em seções verticais aqui analisadas, o Caso II apresentou resultados semelhantes aos observados no Caso I, de modo que os mesmos comentários podem ser reportados para esta seção. Também foi possível notar que os pavimentos com maior carregamento vertical acumulado fornecem maiores intensidades para essas tensões de cisalhamento.

4.2.5 Verificações preliminares

Com o objetivo de ter um panorama sobre as verificações de tensões no novo estado da estrutura após as remoções dos trechos de paredes, fez-se verificações das tensões normais verticais na base da parede quanto aos valores de cálculo para compressão simples, de acordo com o item 6.2.5 da NBR 15961-1 (2011). Sendo assim, foi considerado um valor de cálculo de resistência à compressão simples estimado em 70 % da resistência característica de compressão simples de prisma (f_{pk}) e um coeficiente de ponderação γ_m igual a 1,0, conforme o item A.3.2 do Anexo A da NBR 15961-1 (2011).

Avaliou-se as Paredes 05 e 07, do presente caso (Caso II), considerando as situações de remoções de trechos de paredes no primeiro, quinto e nono pavimentos. Foram calculados os valores resistentes de cálculo considerando a alvenaria não-grauteada, $f_{d(\tilde{n}-g)}$, e grauteada, $f_{d(g)}$. As Figuras 4.63, 4.64 e 4.65 ilustram os resultados da Parede 05 para remoções no primeiro, quinto e nono pavimentos, respectivamente.

Nota-se que, no geral, mesmo com uma nova configuração de tensões normais após as remoções, estes valores permanecem abaixo dos valores resistentes de cálculo. No caso do Modelo 1 na Figura 4.63, a tensão na extremidade esquerda do primeiro pavimento supera o valor resistente de cálculo da alvenaria não-grauteada, $f_{d(\tilde{n}-g)}$. Entretanto, neste trecho há grauteamento considerado, devendo-se, portanto, comparar com o valor resistente de cálculo da alvenaria grauteada, $f_{d(g)}$.

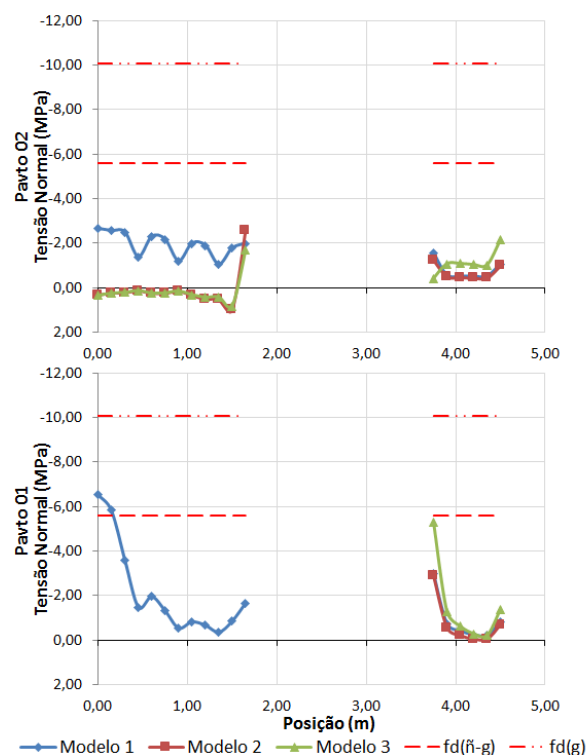


Figura 4.63 – Tensões normais na base da Parede 05 no primeiro e no segundo pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no primeiro pavimento.

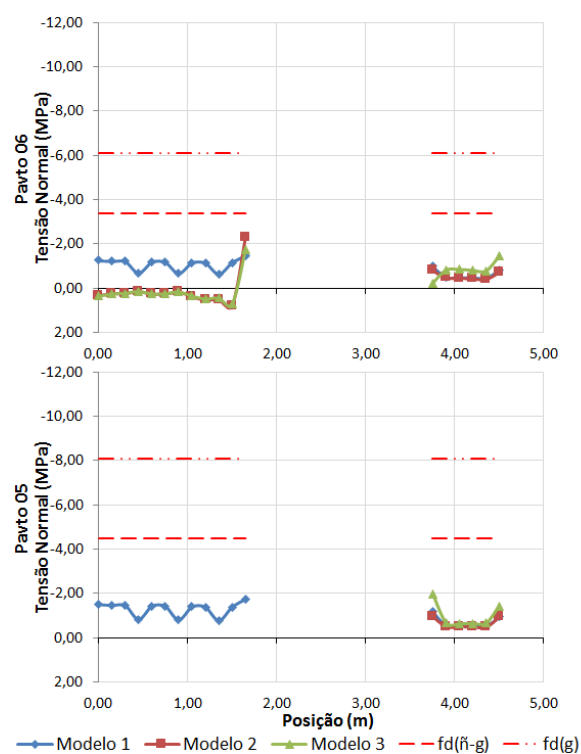


Figura 4.64 – Tensões normais na base da Parede 05 no quinto e no sexto pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no quinto pavimento.

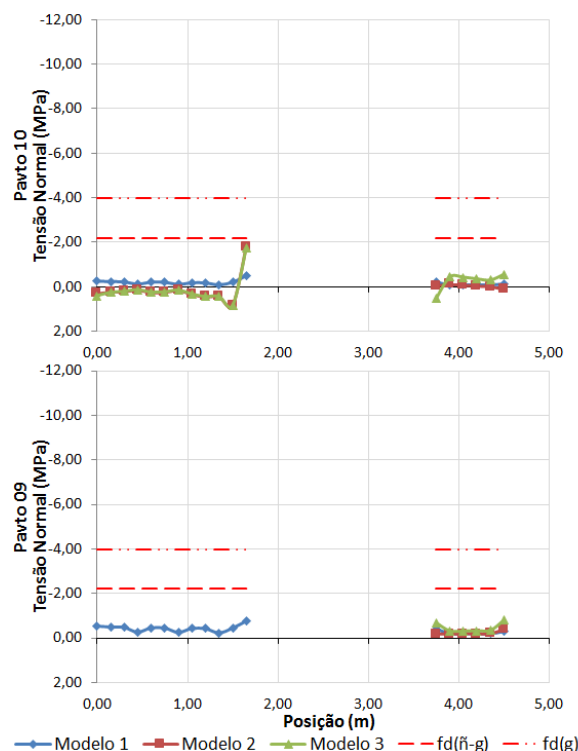


Figura 4.65 – Tensões normais na base da Parede 05 no nono e no décimo pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no nono pavimento.

As Figuras 4.66, 4.67 e 4.68 ilustram os resultados da Parede 07 para remoções no primeiro, quinto e nono pavimentos, respectivamente. Assim como na Parede 05, no geral, as tensões permaneceram abaixo dos valores de cálculo após a remoção dos trechos de parede. No caso dos Modelos 2 e 3 na Figura 4.66, as tensões normais superam o valor de cálculo para alvenaria não-grauteada, $f_{d(n-g)}$. Entretanto, assim como na Parede 05, este trecho tem grauteamento, de modo que se deve comparar com o valor de cálculo para alvenaria grauteada, $f_{d(g)}$.

É pertinente reforçar que estes resultados devem ser tomados apenas como um panorama inicial acerca destas intensidades de tensões em relação aos valores resistentes de cálculo. É preciso analisar as demais paredes nos demais pavimentos, além de analisar as demais verificações, como no caso das tensões de cisalhamento de ligação que, na maioria dos casos, não atende aos requisitos de norma após as remoções dos trechos de paredes, conforme já discutido anteriormente.

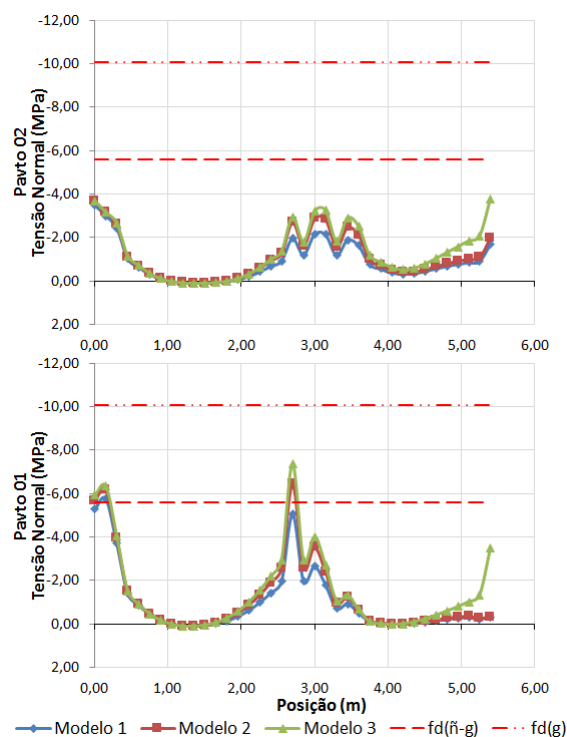


Figura 4.66 – Tensões normais na base da Parede 07 no primeiro e no segundo pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no primeiro pavimento.

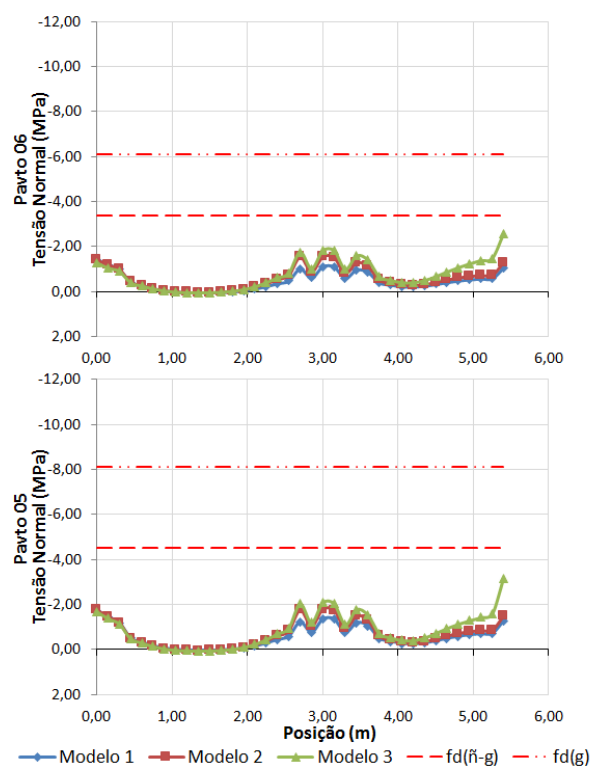


Figura 4.67 – Tensões normais na base da Parede 07 no quinto e no sexto pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no quinto pavimento.

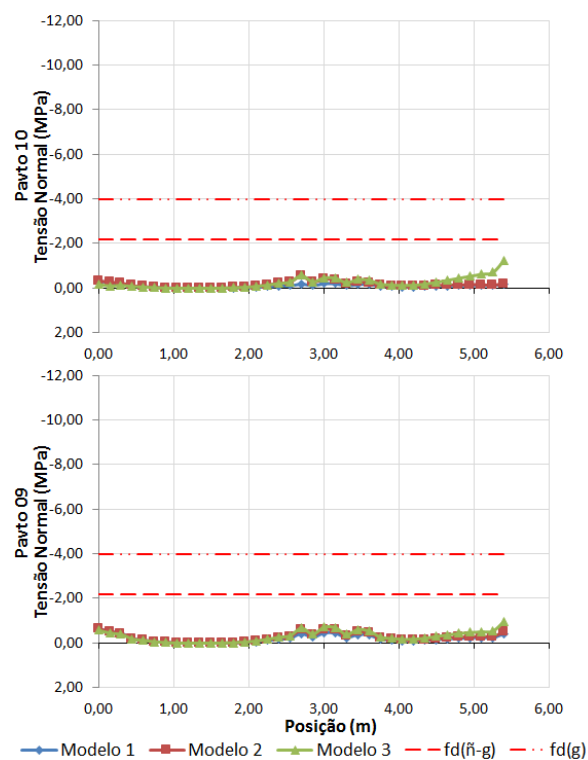


Figura 4.68 – Tensões normais na base da Parede 07 no nono e no décimo pavimento, com valores resistentes de cálculo, para remoções no nono pavimento.

CAPÍTULO 5

Conclusões

5.1 Comentários iniciais

É largamente difundido que as estruturas de alvenaria apresentam como principal desvantagem a dificuldade de realizar reformas, de maneira que os usuários de edifícios de alvenaria estrutural precisam conhecer e respeitar esta limitação. Ainda assim, não há como garantir que a estrutura permanecerá íntegra durante sua vida útil, pois reformas acidentais podem acontecer fora da supervisão de um engenheiro civil.

Esta pesquisa foi norteadada pela necessidade de conhecimento do comportamento da estrutura, em termos de redistribuição de tensões, a partir de remoções não previstas de trechos de paredes estruturais em edifícios residenciais de alvenaria estrutural sobre estrutura de transição em concreto armado. Foram consideradas prováveis situações que poderiam acontecer em apartamentos para a definição dos modelos de análise.

A partir dos resultados, foi constatado que as cintas de respaldo e os lintéis das aberturas cumprem papel importante na transferência das tensões, bem como a formação de bielas ao longo do plano das paredes remanescentes estudadas. Por outro lado, a influência da ocorrência de remoções de paredes estruturais se dissipa rapidamente ao longo dos pavimentos. Em todas as análises foi possível observar a mobilização de uma possível biela no interior das paredes estruturais. Apesar disso, a semelhança com um típico comportamento de viga-parede ficou evidente apenas para as paredes do último pavimento do edifício.

A seguir são realizados comentários mais detalhados acerca dos resultados obtidos, indicando a tendência de comportamento observado e sugerindo as verificações a serem realizadas na situação de remoção de paredes estruturais do edifício.

5.2 Redistribuição de tensões normais e de cisalhamento nas paredes

Sobre a influência das remoções de trechos de alvenaria estrutural na redistribuição de tensões nos pavimentos superiores e inferiores aos trechos removidos, foi possível concluir que:

- As tensões normais e de cisalhamento, analisadas na base das paredes em cada pavimento, tendem a retornar rapidamente aos níveis de tensões da estrutura íntegra. De um modo geral, dada uma remoção de painéis estruturais em um determinado pavimento, tem-se este e o pavimento imediatamente acima como os mais afetados quando se trata da avaliação das tensões normais. Já no caso das tensões de cisalhamento, além do pavimento em que ocorre a remoção, os pavimentos imediatamente acima e abaixo deste compõem os pavimentos mais afetados com a redistribuição;
- Não é verdadeira a pressuposição de que pavimentos mais carregados proporcionam concentrações de tensões mais intensas, dada uma situação de remoção de paredes estruturais. Na realidade, paredes de pavimentos submetidas a menor intensidade de carga vertical, portanto, os mais altos, podem apresentar concentrações de tensões com intensidades maiores. A existência de uma estrutura de transição no edifício pode justificar este resultado, uma vez que em sua essência já introduz concentração de tensões nas paredes do primeiro pavimento devido ao fenômeno da interação parede-viga. Adicionalmente a esta situação, é procedimento comum nos projetos estruturais adotar redução da resistência do prisma (f_{pk}) ao longo da altura do edifício, o que pode potencializar uma situação mais crítica em pavimentos superiores;
- Em muitas das análises, o acréscimo de tensões observado foi mais significativo para as tensões de cisalhamento, especialmente no caso de remoção de parede em pavimentos superiores.

5.3 Importância das cintas de respaldo e dos lintéis

Em relação à participação das cintas de respaldos e dos lintéis na redistribuição das tensões, foi observado que:

- Uma vez configuradas as características de um sistema parede-viga no plano da parede estrutural remanescente, as cintas de respaldo da base tendem a trabalhar sob tração ao longo do vão gerado e sob compressão nas regiões de apoio;
- A formação de binários com os pares de cintas de respaldo (inferior e superior) depende das condições de contorno da parede analisada. Foi possível observar que a formação do binário ocorre quando o topo do pavimento não apresenta continuidade, induzindo a um comportamento análogo ao de viga-parede. No caso em que há continuidade de pavimentos, foi possível observar a ocorrência de tração na cinta e de baixas intensidades de compressão horizontal na parede, não se caracterizando, portanto, um típico comportamento de viga-parede;
- Nas aberturas, os lintéis são mobilizados de modo a garantir a redistribuição das tensões de compressão no plano da parede, dando destaque para a necessidade de verificação destes elementos não mais como simples cintas e vergas, mas sim como lintéis de alvenaria que demandam adequadas armaduras de flexão e de cisalhamento. Deve ser dado o devido destaque a este elemento estrutural, uma vez que a redistribuição de tensões verificada é inteiramente dependente de sua capacidade de resistir aos esforços solicitantes induzidos.

5.4 Tensões normais e de cisalhamento em seções transversais verticais

A respeito da avaliação das tensões normais e de cisalhamento em seções transversais verticais das paredes remanescentes, foi possível concluir que:

- De uma forma geral, para um mesmo edifício analisado nesta pesquisa, as tensões normais nestas seções apresentaram intensidades muito próximas entre si quando comparados os resultados entre os pavimentos analisados. Na base de determinadas seções, a situação de remoção de paredes no primeiro pavimento apresentou intensidades maiores tanto para as tensões normais como também para as de cisalhamento. No caso das tensões normais, tal fato se justifica pela proximidade com pilares da estrutura de transição que, devido à maior rigidez, naturalmente induzirá maior nível de

tensões. No caso das tensões de cisalhamento, isto ocorre porque a deflexão das vigas da estrutura de transição gera a mobilização das paredes, resultando no surgimento destas tensões;

- A parede remanescente localizada acima da remoção pode apresentar diagrama de tensões normais semelhante ao de uma viga-parede no meio do vão, dependendo das condições de contorno desta parede. Entretanto, tal afirmação necessita de mais análises para ser confirmada, tais como verificações da posição da linha neutra, comprimento do braço de alavanca e altura útil;
- A parede que perde suporte tende a se mobilizar verticalmente gerando tensões de cisalhamento na interface destas seções. Estas tensões têm intensidades maiores na base por ser a primeira região de mobilização da parede que teve a continuidade com o pavimento inferior removida.

5.5 Sugestões para procedimento de verificação das paredes

Considerando os resultados obtidos e as análises realizadas dos edifícios exemplos para a situação de remoção de trechos de alvenaria que configurem na ocorrência de apoios nas duas extremidades no pavimento superior, sendo um dos apoios com comprimento contido no mesmo plano da parede e o outro proveniente de uma parede transversal (Modelo 2a), sugere-se que sejam realizadas as seguintes verificações:

- Concentração de tensões normais verticais na base da parede na posição dos apoios formados com a remoção do trecho de alvenaria no pavimento inferior. Essa verificação deve ser realizada no pavimento onde ocorreu a remoção do trecho de alvenaria e no imediatamente acima, especialmente no caso de haver redução da resistência de prisma f_{pk} ;
- Concentração de tensões de cisalhamento na base da parede na região próxima aos apoios formados com a remoção do trecho de alvenaria no pavimento inferior. Essa verificação deve ser realizada no pavimento onde ocorreu a remoção do trecho de alvenaria, no imediatamente acima e, no caso de ser um pavimento intermediário do edifício, também no pavimento imediatamente abaixo;

- No caso de haver estrutura de transição, se faz necessário realizar essas verificações tanto no segundo pavimento, que fica submetido a maior intensidade de carregamento vertical, quanto em pavimentos de maior altura, especialmente naqueles que há redução da resistência característica de prisma f_{pk} ;
- Tensões/forças de tração na cinta da base da parede do pavimento acima do trecho de alvenaria removido;
- Tensões de cisalhamento em seções transversais verticais definidas no início do apoio, e/ou final do vão, para a alvenaria imediatamente acima do pavimento cujo trecho de parede foi removido.

Para o caso de remoção de trecho de alvenaria que configure na ocorrência de apenas um apoio em uma das extremidades, cuja extensão esteja contida no mesmo plano da parede e que induza a ocorrência de vínculos suficientes para garantir a estabilidade do conjunto (Modelo 2b), sugere-se que sejam realizadas as seguintes verificações:

- Concentração de tensões normais verticais na base da parede na posição do único apoio formado com a remoção do trecho de alvenaria no pavimento inferior. Essa verificação deve ser realizada no pavimento onde ocorreu a remoção do trecho de alvenaria e no imediatamente acima, especialmente no caso de haver redução da resistência de prisma f_{pk} ;
- Concentração de tensões de cisalhamento na base da parede na região próxima ao único apoio formado com a remoção do trecho de alvenaria no pavimento inferior. Essa verificação deve ser realizada no pavimento onde ocorreu a remoção do trecho de alvenaria, no imediatamente acima e, no caso de ser um pavimento intermediário do edifício, também no pavimento imediatamente abaixo;
- Tensões/forças de tração na cinta da base da parede do pavimento acima do trecho de alvenaria removido;
- Tensões de cisalhamento em seções transversais verticais definidas no início do apoio, e/ou final do vão, para a alvenaria imediatamente acima do pavimento cujo trecho de parede foi removido.

Para o caso de remoção de trecho de alvenaria que configure na ocorrência de apoios nas duas extremidades no pavimento superior, sendo um deles proveniente de uma parede transversal, cujo trecho de parede inferior também tenha sido removido, e o outro proveniente de um lintel (Modelo 2b), sugere-se que sejam realizadas as seguintes verificações:

- Concentração de tensões de cisalhamento na base da parede na região próxima ao lintel. Essa verificação deve ser realizada, no mínimo, nos dois pavimentos imediatamente acima e, no caso de ser um pavimento intermediário do edifício, também no pavimento imediatamente abaixo;
- Tensões/forças de tração na cinta do topo da parede do pavimento acima do trecho de alvenaria removido, seja para remoção no primeiro ou em outro pavimento qualquer;
- Por ter desempenhado papel fundamental na redistribuição das tensões, os lintéis devem ser criteriosamente verificados tanto com relação às solicitações de flexão quanto às solicitações de cisalhamento. Essas verificações devem ser realizadas, no mínimo, para dois pavimentos acima do trecho de parede removido, independentemente da remoção ter ocorrido no primeiro ou em pavimento intermediário;
- Concentração de tensões normais na base dos trechos de alvenaria que tenham ligação com o lintel e que não tenham sofrido qualquer tipo de intervenção.

Para o caso de remoção de trecho de alvenaria que configure na ocorrência de apoios nas duas extremidades no pavimento superior, sendo um deles proveniente de uma parede transversal, cujo trecho de parede inferior não tenha sido removido, e o outro proveniente de um lintel (Modelo 3), sugere-se que sejam realizadas as seguintes verificações:

- Concentração de tensões normais verticais na base da parede na posição do apoio proveniente da parede transversal no pavimento inferior. Essa verificação deve ser realizada no pavimento imediatamente acima daquele que ocorreu a remoção do trecho de alvenaria, especialmente no caso de haver redução da resistência de prisma f_{pk} ;

- Concentração de tensões normais na parede transversal que serve de apoio. Essa verificação deve ser realizada no pavimento imediatamente acima daquele cujo trecho de alvenaria foi removido e, no caso de pavimentos intermediários, também no mesmo pavimento onde ocorreu a remoção;
- Concentração de tensões de cisalhamento na base da parede tanto na região próxima ao apoio da parede transversal quanto naquela próxima ao lintel. Essa verificação deve ser realizada, no mínimo, nos dois pavimentos imediatamente acima e, no caso de ser um pavimento intermediário do edifício, também no pavimento imediatamente abaixo;
- Por ocasião da concentração de tensões de cisalhamento na região próxima ao apoio conferido pela parede transversal, recomenda-se, à priori, também verificar essa parede para uma flexão fora do seu plano, de modo a verificar uma possível ocorrência de fissuração;
- Concentração de tensões de cisalhamento na parede transversal que serve de apoio. Essa verificação deve ser realizada, no mínimo, em dois pavimentos imediatamente acima daquele cujo trecho de alvenaria foi removido e, no caso de pavimentos intermediários, também no pavimento onde ocorreu a remoção e no imediatamente abaixo;
- Tensões/forças de tração na cinta da base da parede do pavimento acima do trecho de alvenaria removido, seja para remoção no primeiro ou em outro pavimento qualquer;
- Verificação criteriosa dos lintéis tanto com relação às solicitações de flexão quanto às solicitações de cisalhamento. Essas verificações devem ser realizadas, no mínimo, para dois pavimentos acima do trecho de parede removido, independentemente da remoção ter ocorrido no primeiro ou em pavimento intermediário;
- Concentração de tensões normais na base dos trechos de alvenaria que tenham ligação com o lintel e que não tenham sofrido qualquer tipo de intervenção.

5.6 Continuidade da pesquisa

Sugere-se os modelos aqui analisados sejam avaliados incluindo outras situações e tipos de análises, tais como:

- Discretizar a laje de cada pavimento para verificar o papel deste elemento na redistribuição das tensões entre parede que não são interligadas por lintéis;
- Considerar na combinação de ações a ação do vento;
- Realizar as demais análises (estática não-linear e dinâmica não-linear) e verificações constantes no GSA (2016);

Além disso, é pertinente enfatizar a importância de realizar ensaios experimentais necessários para validação e calibração dos modelos.

Referências

ARAÚJO, J. M (2014) **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014. 360 p. V. 4.

ASCE 7-10 (2013) **Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**, American Society of Civil Engineers, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400.

ASCE 41-13 (2014) **Seismic Rehabilitation of Existing Buildings** - American Society of Civil Engineers, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro, 2017. 86 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural - blocos cerâmicos Parte 1: Projeto. 1 ed. Rio de Janeiro, 2010. 41 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-1**: Alvenaria estrutural – Bloco de concreto. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2011. 42 p.

BARBOSA, M. P. (2017) **Estudo da interação entre grupos de paredes na distribuição das cargas verticais em edifícios de alvenaria estrutural**. 2017. 79 f. Monografia - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

BARBOSA, P. C. (2000) **Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com vigas de concreto armado**. São Carlos, 2000. 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BITTARELLO, G. (2013) **Colapso progressivo de estruturas de concreto pré-moldado**. Monografia – UTFPR, Pato Branco, 2013.

EL DEBS, M. K. (2000) **Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações**. São Carlos: EESC - USP, 2000.

FELIPE, T. R. C. (2017) **Novo Método para a Avaliação do Risco de Colapso Progressivo em Edifícios de Alvenaria Estrutural**. 2017. 148p. Dissertação de mestrado (Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

FERREIRA, A. A. (2017) **Modelagem computacional para avaliação do efeito do não preenchimento das juntas verticais na resistência da alvenaria estrutural**. 2017. 171 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

GENERAL SERVICES ADMINISTRATION. GSA (2016) **Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance**. Washington, DC, 2016.

HAACH, V. G. (2015) **Construções em alvenaria estrutural: materiais, projeto e desempenho. Cap. 7 Dados acidentais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2015. p. 219-231.

HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. (1981) **Proposed failure criteria for concrete block masonry under biaxial stresses**. Journal of the Structural Division, ASCE, v.107, n.ST8, August.

HASELTINE, B.A.; MOORE, J.F.A. (1981) Handbook to BS-5628: **Structural use of masonry**. Part 1: Unreinforced masonry. The Brick Development Association.

IBDA, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura. **Por que construir em alvenaria estrutural?**. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=7&Cod=895>>. Acesso em 01 de dezembro de 2016.

KHANDELWAL, K. (2008) **Multi-Scale Computational Simulation Of Progressive Collapse Of Steel Frames**. Dissertation of Doctor. University of Michigan – USA, 2008.

LARANJEIRAS, A. C. R. (2011) **Colapso progressivo dos edifícios: Breve introdução**. TQSNews. [s.i.], p. 36-47. ago. 2011. Disponível em: <tqs.com.br/tqs-news>. Acesso em: 01 dez. 2016.

LONGO, H. I. (2014) **Análise da Estrutura para Avaliação do Colapso Progressivo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 7., 2014, Rio de Janeiro. Anais... . Rio de Janeiro: Abece, 2014.

LOURENÇO, P. J. B. B. (1996) **Computational strategies for masonry structures**. Delf University Press. – III. Thesis Delft University of Technology.

MEDEIROS, K. A. S. (2015) **Modelagem Computacional para Avaliação da Interação entre Painéis de Alvenaria e Estrutura de Suporte em Concreto Armado**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MELO, C. D. R. (2015) **Estudo do colapso progressivo de pórticos planos de concreto armado via análise não linear**. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

NAIR, R. S. (2007) **Progressive Collapse Basics**. North American Steel Construction Conference, March 24-27, Long Beach, 2007.

NASCIMENTO NETO, J. A. (1999) **Investigação das solicitações de cisalhamento em edifícios de alvenaria estrutural submetidos a ações horizontais**. 127p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NASCIMENTO NETO, J. A. (2003) **Estudo de painéis com abertura constituídos por alvenaria estrutural de blocos**. São Carlos. 320p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NASCIMENTO NETO, J. A., LACERDA, E. G. M.L., FLORÊNCIO, D. A. (2012) **Modelagem da Interação entre Painéis de Alvenaria e Estrutura de Suporte: O Efeito Arco**; IBRACON. Maceió – AL.

NASCIMENTO NETO, J. A.; MEDEIROS, K. A. S.; QUIM, F. (2014) **Nova modelagem para análise da interação entre painéis de alvenaria e estrutura de suporte**. In: Revista Prisma. 2014. 20 p.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, U.S. (2007) **Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings**. NISTIR 7396. February 2007, 216 p.

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

PAGE, A. W. (1978) **Finite element model for masonry**. Journal of Structural Division, ASCE, v.104, n.ST8, August.

PARSEKIAN, G. A. (2012) **Parâmetros de projeto de alvenaria estrutural com blocos de concreto** / organizador: Guilherme Aris Parsekian. – São Carlos: EdUFSCar, 2012. 85 p.

SANTOS, P. V. S. (2016) **Ações evolutivas em edifícios de paredes de concreto e de alvenaria, considerando a interação com o solo**. 174 p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

WOOD, R.H. (1952) **Studies in composite construction. Part 1: The composite action of brick panel walls supported on reinforced concrete beams**. London, Her Majesty's Stationery Office. 25p. (National Building Studies, Research Paper n.13).