

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

**FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Raphael Saverio Spozito

**ANÁLISE NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS VERTICAIS
EM PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

Ilha Solteira

2017

Raphael Saverio Spozito

**ANÁLISE NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS VERTICAIS
EM PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

Defesa apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Estruturas, UNESP - Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira, como requisito para a obtenção do título de mestre.

Orientador:

Prof. Dr. Jefferson Sidney Camacho

Coorientador:

Prof. Dr. Rogério de Oliveira Rodrigues

Ilha Solteira

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S765a Spozito, Raphael Saverio.
Análise numérica da distribuição de forças verticais em paredes de alvenaria estrutural / Raphael Saverio Spozito. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
135 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2017

Orientador: Jefferson Sidney Camacho

Coorientador: Rogério de Oliveira Rodrigues

Inclui bibliografia

1. Alvenaria estrutural. 2. Modelagem numérica. 3. Taxa de interação.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise numérica da distribuição de forças verticais em paredes de alvenaria estrutural

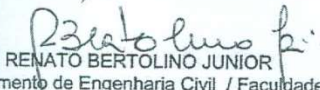
AUTOR: RAPHAEL SAVERIO SPOZITO

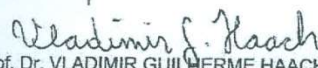
ORIENTADOR: JEFFERSON SIDNEY CAMACHO

COORIENTADOR: ROGÉRIO DE OLIVEIRA RODRIGUES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL,
área: ESTRUTURAS pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ROGÉRIO DE OLIVEIRA RODRIGUES
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RENATO BERTOLINO JUNIOR
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. VLADIMIR GUILHERME HAACH
Departamento de Engenharia de Estruturas / Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

Ilha Solteira, 09 de novembro de 2017

Dedico esse trabalho aos meus pais, irmãos, minha esposa Katia R. O. Spozito, e ao meu filho Leonardo de Oliveira Spozito, pois sem eles este trabalho e muitos sonhos não seriam possíveis.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela oportunidade da vida e encaminhamento de minha trajetória de modo a ter oportunidade de desenvolvimento intelectual tão preciosa.

Ao orientador, professor Jefferson Sidney Camacho, que aceitou o desafio da orientação. Agradeço pela sua compreensão e paciência durante nossas conversas visando alcançar os objetivos propostos na pesquisa, bem como alguns momentos em que me ajudou (e muito) a refletir sobre críticas e sugestões desse trabalho, sempre de forma ponderada.

Agradeço também ao Prof. Dr. Rogério de Oliveira Rodrigues, co-orientador deste trabalho, pelos ensinamentos na área de elementos finitos.

À minha esposa, tão amada, Katia Rodrigues de Oliveira Spozito, pelo carinho e compreensão nos momentos que necessitei me ausentar para a conclusão desta fase acadêmica.

Ao meu filho Leonardo, mesmo com seus poucos anos de vida, busco compensar as horas que necessitei me ausentar para a realização deste trabalho.

A minha sobrinha Maria Eduarda Renzi Spozito, pessoa tão importante e amada, que hoje, em sua trajetória de vida, é referência de dedicação.

Aos meus pais, Jose Saverio Spozito e Soeli Aparecida Ferreira Spozito, por toda dedicação com meu filho Leonardo, ajudando nas horas de estudos, trabalhos e viagens, sendo referências de conhecimentos e dedicação aos filhos.

Ao meu irmão mais velho Daniel Saverio Spozito, também padrinho do meu filho Leonardo, por ser referência pessoal e profissional. A minha cunhada Sonia Regina Corrêa Fernandes, referência de dedicação e exemplo de fé.

Aos meus tios e padrinhos Eliseu Savério Sposito e Maria Encarnação Beltrão Sposito, referências familiares na academia.

Ao Prof. Dr. Educado Cesar Catanozi, pela revisão ortográfica e oportunidade de trabalho em conjunto no Instituto Federal de São Paulo – Votuporanga / SP.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, pelos ensinamentos nas disciplinas cursadas e orientação em momentos de dúvidas.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal a análise entre os modelos simplificados de paredes individuais (PI), grupos isolados de paredes (GIP), grupos de paredes com interação (GPCI) e simulações numéricas (elementos finitos) para determinação da distribuição dos esforços verticais na alvenaria estrutural. Para tal, inicialmente foi efetuado uma revisão bibliográfica para estudo do comportamento da distribuição dos esforços verticais nas paredes e suas interfaces de ligação além de conceitos de discretização da alvenaria estrutural em elementos finitos e os modelos simplificados de dimensionamento. A discretização do modelo em elementos finitos foi realizada utilizando o conceito de macromodelagem e as características dos materiais foram adotadas de acordo com as normas vigentes. Em relação aos grupos de paredes isolados, foi possível identificar um comportamento de uniformização das forças verticais de acordo com o número de pavimentos. Buscou-se também, uma caracterização da uniformização das forças verticais relacionadas com as medidas geométricas dos grupos de parede com interação. Dentre os valores obtidos pelo modelo simplificado de grupos de paredes com interação e a simulações numéricas, considerando o modelo arquitetônico adotado, verificou-se que as taxas de interação tendem a valores de 20%, além da identificação de alguns fenômenos que devem ser melhores investigados.

Palavras Chaves: Alvenaria estrutural. Modelagem numérica. Taxa de interação.

ABSTRACT

This work has the main objective of analyzing the simplified models of individual walls (IW), of isolated wall groups (IWG) and of interacting wall groups (IAWG) and also numerical simulations (finite element) to determine the distribution of the vertical forces in structural masonry. To do this, first, reviewed literature provided a study of the behavior of vertical forces distributed on the walls and their connection interfaces and also concepts for discretization of structural masonry for finite element analysis and simplified models. The concept of macro-modeling was used for model discretization into finite elements and characteristics of the materials were adopted in accordance with current regulations. In relation to the isolated wall groups, it was possible to identify behavior of uniformization of the vertical forces according to the number of floors. Characterization of the uniformization of vertical forces related to the geometric measurements of the interacting wall groups was also looked for. Among the values obtained by the simplified model of interacting wall groups and the numerical simulations for the architectural model adopted, the interaction rates tend to values of 20%. Some other phenomena were also identified that need to be investigated further.

Key words: Structural masonry. Numerical modeling. Interaction rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sistema estrutural de paredes transversais	29
Figura 2 Sistema estrutural de paredes celulares	30
Figura 3 Sistema estrutural complexo	31
Figura 4 Áreas de Influência para paredes isoladas.....	33
Figura 5 Exemplo de Grupo de Paredes	34
Figura 6 Interação de forças entre aberturas de paredes.....	35
Figura 7 Modelos para alvenaria estrutural (a) Elemento alvenaria (b) modelo Micro detalhado (c) modelo micro simplificado e (d) modelo macro	38
Figura 8 Modelagem de elementos finitos quadrangulares de 4 e 8 nós	39
Figura 9 Deformações medidas na parede do edifício por Stockbridge	40
Figura 10 Painéis de alvenarias ensaios por Capuzzo (2000)	41
Figura 11 Espalhamento de força concentrada em painéis.....	42
Figura 12 Painéis para ruptura e esquema geral do ensaio	43
Figura 13 Tipos de paredes ensaiadas por Mauricio (2005) - análise de transferência de carga	44
Figura 14 Edifício em (a) em escala (b) e modelo numérico por Elementos Finitos.....	46
Figura 15 Carregamento das paredes com aberturas de portas e janelas.....	47
Figura 16 Modelo de interseção de paredes	48
Figura 17 Uniformização de cargas de paredes conforme método de Franco e Parsekian	50
Figura 18 Distribuição de cargas entre aberturas.....	51
Figura 19 Distribuição de carga vertical em níveis de alvenaria.....	53
Figura 20 Macro modelagem para análise de distribuição de forças verticais e tensões de cisalhamento	53
Figura 21 Modelagem numérica com elementos finitos (a) edifício e (b) interação de paredes	54
Figura 22 Distribuição de cargas verticais	55
Figura 23 Modelo de edificação adotado.....	60
Figura 24 Modelo para análise de interação de grupos.....	61

Figura 25 Nomenclatura das reações de apoio do modelo adotado para o nível de fundação.....	62
Figura 26 Nomenclatura das reações de apoio do modelo adotado para o nível de respaldo.....	64
Figura 27 Modelo tridimensional para estudo de transferência de cargas em (a) vista isométrica e (b) detalhe do pavimento tipo.....	64
Figura 28 Modelos tridimensionais (vista isométrica) de (a) G1, (b) G2, (c) G3, (d) G4, (e) G5 e (f) G6	66
Figura 29 Centroides de carregamento e paredes (Grupo 01 a Grupo 06).....	67
Figura 30 Elemento SHELL181 (a) característica do elemento e (b) saída de dados	71
Figura 31 Configuração padrão elemento SHELL181	71
Figura 32 Identificação dos vértices limites dos elementos de apoio.	73
Figura 33 Modelo numérico com interação de grupos de paredes com (a) malha discretizado e (b) carregamento da laje no quarto pavimento.....	74
Figura 34 Modelos numéricos dos grupos de paredes individuais (a) G1, (b) G2, (c) G3, (d) G4, (e) G5.	74
Figura 35 Cargas lineares em paredes (kN/m) com peso próprio e carga acidental (G1, G2 e G3).....	77
Figura 36 Cargas lineares em paredes (kN/m) com peso próprio e carga acidental (G4, G5 e G6).....	77
Figura 37 Cargas lineares (kN/m) médias dos grupos	77
Figura 38 Carga adicional aplicada no Grupo 02 (a) sem restrição e (b) com restrição de deslocamento no plano da laje – 4 pavimentos.....	78
Figura 39 Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) nas paredes considerando a superposição de efeitos – sem restrição de deslocamentos na laje (G1, G2 e G3)	81
Figura 40 Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) nas paredes considerando a superposição de efeitos – sem restrição de deslocamentos na laje (G4, G5 e G6)	81

Figura 41 Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) médias dos grupos considerando a superposição de efeitos – sem restrição de deslocamentos na laje	81
Figura 42 Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) nas paredes considerando a superposição de efeitos – com restrição de deslocamentos na laje (G1, G2 e G3)	82
Figura 43 Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) nas paredes considerando a superposição de efeitos – com restrição de deslocamentos na laje (G4, G5 e G6)	82
Figura 44 Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) médias dos grupos considerando a superposição de efeitos – com restrição de deslocamentos na laje	82
Figura 45 Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_1	83
Figura 46 Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_2	83
Figura 47 Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_3	83
Figura 48 Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_4	84
Figura 49 Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_5	84
Figura 50 Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_6	84
Figura 51 Deformação da estrutura no eixo Z	86
Figura 52 Área de influência de paredes individuais.	87
Figura 53 Cargas de paredes P1 - P9 (PI) – kN/m	89
Figura 54 Cargas de paredes P10 – P18 (PI) – kN/m	89
Figura 55 Área de influência de grupos de paredes individuais	90
Figura 56 Valores médios de grupos de paredes - GPI.....	91
Figura 57 Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 4º PAV ..	94
Figura 58 Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 3º PAV ..	94
Figura 59 Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 2º PAV ..	95
Figura 60 Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 1º PAV ..	95
Figura 61 Valores médios de grupos de paredes - GPI (Carregamento 02)	97
Figura 62 Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 4º PAV ..	98
Figura 63 Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 3º PAV ..	99
Figura 64 Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 2º PAV ..	99

Figura 65	Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 1º PAV ..	99
Figura 66	Caminho de tensões P9 - P1 - P7 (M.GPCI)	110
Figura 67	Caminho de tensões P8 (M.GPCI)	111
Figura 68	Caminho de tensões P2 - P10 (M.GPCI)	112
Figura 69	Caminho de tensões P11 - P3 - P12 (M.GPCI)	112
Figura 70	Caminho de tensões P4 (M.GPCI)	112
Figura 71	Caminho de tensões P13 (M.GPCI)	113
Figura 72	Caminho de tensões P17 - P5 - P16 (M.GPCI)	113
Figura 73	Caminho de tensões P15 - P6 - P18 (M.GPCI)	114
Figura 74	Espraçamento das forças adicionais e efeitos na parede P3 (a) sem e (b) com restrição de deslocamentos da laje	115
Figura 75	Caminho de tensões das paredes (a) P7, P1 e P9 e (b) P8 (M.GIP)	116
Figura 76	Caminho de tensões P7, P1 e P9 (M.GIP)	116
Figura 77	Caminho de tensões P8 (M.GIP)	116
Figura 78	Caminho de Tensões das paredes P10 - P2 (M.GIP)	117
Figura 79	Caminho de tensões das paredes (a) P12, P3 e P11 e (b) P14 (M.GIP)	118
Figura 80	Tensões do caminho P12 - P3 - P11 (M.GIP)	118
Figura 81	Tensões do caminho P14 (M.GIP)	118
Figura 82	Caminho de tensões das paredes (a) P4 (b) P13 (M.GIP)	119
Figura 83	Caminho de tensões P4 (M.GIP)	119
Figura 84	Caminho de tensões P13 (M.GIP)	119
Figura 85	Caminho de tensões P17 - P5 - P16 (M.GIP)	120
Figura 86	Caminho de tensões das paredes P18 - P6 - P15	120
Figura 87	Tensões do caminho P18 - P6 - P15	121
Figura 88	Carregamentos das paredes (kN/m) dos modelos numéricos simplificados PI e pelo MEF considerando a caracterização (G1, G2 e G3)	123
Figura 89	Carregamentos das paredes (kN/m) dos modelos numéricos simplificados PI e pelo MEF considerando a caracterização (G4, G5 e G6)	123
Figura 90	Carregamentos dos grupos (kN/m) dos modelos numéricos simplificados e pelo MEF	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração.....	26
Tabela 2-2 Dimensões dos blocos de família	27
Tabela 2-3 Resistência à compressão do bloco (processos simplificados)	37
Tabela 2-3 Cargas de ruptura de painéis com formato H	44
Tabela 2-5 Tensões Normais verticais nas Seções de Controle (kN/m ²).....	49
Tabela 3-1 Propriedades Elásticas da Alvenaria	56
Tabela 3-2 Relação entre a resistência de compressão de primas e paredes.....	57
Tabela 3-3 Intervalos da relação de resistência de prismas e blocos.....	57
Tabela 3-4 Características dos materiais e elementos adotados.....	59
Tabela 3-5 Características Geométricas do modelo	59
Tabela 3-6 Configuração das reações de apoio das paredes (nível fundação) e comprimentos.....	63
Tabela 3-7 Configuração das reações de apoio das paredes (nível respaldo) e comprimentos.....	64
Tabela 3-8 Reações de apoio das paredes de grupos individuais (nível fundação) e comprimentos.....	66
Tabela 3-9 Características geométricas dos grupos de parede.....	67
Tabela 4-1 Identificação dos modelos numéricos	70
Tabela 4-2 Opções de configuração do elemento SHELL181	72
Tabela 4-3 Coordenadas dos vértices dos elementos de apoio (m).....	72
Tabela 4-4 Dimensões dos elementos das malhas x nº pavimento.....	73
Tabela 5-1 Valores de solicitações nas reações de apoio M.GPCI	76
Tabela 5-2 Valores de solicitações nas reações de apoio M.GPCI sem restrição de deslocamentos da laje do último pavimento com carga adicional no Grupo 02	79
Tabela 5-3 Valores de solicitações nas reações de apoio M.GPCI com restrição de deslocamentos da laje do último pavimento com carga adicional no Grupo 02	80
Tabela 6-1 Cargas lineares resultantes pelos modelos propostos.....	85

Tabela 6-2 Carga linear das paredes por pavimento – PI (Carregamento 01).....	88
Tabela 6-3 Carga linear grupos de parede – GIP (Carregamento 01).....	91
Tabela 6-4 Cargas lineares e tensão de grupos de paredes com interação $t = 10\%$ (Carregamento 01).....	92
Tabela 6-5 Cargas lineares (kN/m) de grupos de paredes com interação e diversas taxas (Carregamento 01)	93
Tabela 6-6 Carga linear das paredes por pavimento – PI (Carregamento 02).....	96
Tabela 6-7 Carga linear grupos de parede – GIP (Carregamento 02).....	96
Tabela 6-8 Cargas lineares e tensão de grupos de paredes com interação e diversas taxas (Carregamento 02)	98
Tabela 6-9 Cargas de solicitação para cálculo da resistência das unidades	100
Tabela 6-10 Resistência de cálculo das unidades para compressão simples	100
Tabela 7-1 Interação de forças dos grupos no modelo M.GPCI	101
Tabela 7-2 Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_1	103
Tabela 7-3 Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_2.....	104
Tabela 7-4 Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_3.....	104
Tabela 7-5 Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_4.....	105
Tabela 7-6 Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_5.....	106
Tabela 7-7 Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_6.....	107
Tabela 8-1 Comparação dos resultados (Processo Simplificado de Grupo de Paredes com Interação x MEF) Carregamento 01	108
Tabela 8-2 Comparação dos resultados (Processo Simplificado de Grupo de Paredes com Interação x MEF) Carregamento 02	110
Tabela 8-3 Convergência dos carregamentos adotados pelos resultados do modelo em MEF (kN/m).....	122
Tabela 8-4 Solicitações processos numéricos simplificados x reações MEF	125
Tabela 8-5 Taxa de uniformização dos grupos pelas paredes mais solicitadas – carregamento 01	126
Tabela 8-6 Taxa de uniformização dos grupos pelas paredes mais solicitadas – carregamento 02	126
Tabela 8-7 Correlação %Tu x Características geométricas - Carregamento 01	127
Tabela 8-8 Correlação %Tu x Características geométricas - Carregamento 02	127

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações Iniciais.....	17
1.2	Motivação	18
1.3	Objetivos do trabalho.....	18
1.4	Justificativa do trabalho	19
1.5	Metodologia	19
1.6	Organização do texto	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Alvenaria Estrutural.....	22
2.1.1	Breve Histórico	22
2.1.2	Definições.....	24
2.1.2.1	Blocos	25
2.1.2.2	Argamassas	27
2.1.2.3	Graute	28
2.1.2.4	Armaduras	29
2.1.3	Concepção Estrutural	29
2.1.3.1	Paredes Transversais.....	29
2.1.3.2	Paredes Celulares	30
2.1.3.3	Sistema Complexo.....	30
2.1.4	Vantagens e Desvantagens da Alvenaria Estrutural.....	31
2.2	Modelos para determinação de forças na alvenaria estrutural	32
2.2.1	Modelos numéricos simplificados	33
2.2.1.1	Paredes Isoladas (PI)	33
2.2.1.2	Grupos Isolados de Parede (GIP).....	34
2.2.1.3	Grupos de Parede com Interação (GPCI).....	34
2.2.1.4	Considerações entre os modelos PI x GIP x GPCI	36
2.2.2	Método dos Elementos Finitos	37
2.2.2.1	Modelagem numérica da alvenaria estrutural.....	38
2.3	Distribuição das forças verticais.....	39

2.3.1	A interação de forças entre paredes.....	40
2.3.1.1	A homogeneização de forças em um edifício	40
2.3.1.2	Estudo da interação de forças com blocos cerâmicos.....	41
2.3.1.3	Estudo da interação de forças com blocos de concreto	43
2.3.1.4	Estudo da interação de forças pela ligação de paredes	45
2.3.1.5	Estudo da interação em modelos de escala reduzida	45
2.3.2	Estudos com simulação numérica	46
2.3.2.1	A distribuição de forças em painéis com aberturas e interação entre grupos...	46
2.3.2.2	Proposta de distribuição de forças pelas aberturas de paredes	49
2.3.2.3	A modelagem numérica da interação de paredes nos estados linear e não linear	51
2.3.2.4	O uso de modelos numéricos simplificados para análise global da estrutura...	52
2.3.2.5	Análise dos resultados da simulação numérica em um edifício instrumentado	54
2.3.3	A NBR 15961-1 (2011)	55
3	CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS PARA ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DAS FORÇAS VERTICAIS	56
3.1	Características dos materiais e elementos	56
3.2	Características dos modelos	59
3.2.1	Modelos com interação entre grupos (M.GPCI)	59
3.2.2	Modelos de Grupos Isolados de Parede (M.GIP_X).....	65
3.2.2.1	Características geométricas dos grupos individuais	67
4	MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS	69
4.1	Considerações iniciais	69
4.2	Considerações sobre os modelos	70
4.3	Características do elemento finito SHELL181.....	70
4.4	Modelagem de Grupos de Paredes com Interação (M.GPCI).....	72
4.5	Modelagem de Grupos de Paredes Individuais (M.GIP_X)	74
5	RESULTADOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	75
5.1	Considerações Iniciais	75

5.2	Valores obtidos nas reações de apoio	75
5.3	Modelo de Grupos de Paredes com Interação (M.GPCI).....	75
5.4	Modelo com interação entre grupos com carregamento adicional no Grupo 02 (M.GPCI).....	78
5.5	Modelos de grupos individuais de paredes (M.GIP_X)	83
6	RESULTADOS PELOS MODELOS SIMPLIFICADOS.....	85
6.1	Considerações Iniciais.....	85
6.2	Definições de forças atuantes para o Carregamento 01	87
6.2.1	Paredes Isoladas (PI) – Carregamento 01	87
6.2.2	Grupos de Paredes Isolados (GIP) - Carregamento 01.....	89
6.2.3	Grupos de Paredes com Interação (GPCI) - Carregamento 01	91
6.3	Definições de forças atuantes para Carregamento 02	95
6.3.1	Paredes Isoladas (PI) - Carregamento 02	95
6.3.2	Grupos de Paredes Isolados (GIP) - Carregamento 02.....	96
6.3.3	Grupos de Paredes com Interação (GPCI) - Carregamento 02.....	97
6.4	Determinação das unidades para solicitação a compressão simples...	99
7	INTERAÇÃO DOS MODELOS NÚMERICOS.....	101
7.1	Interação do modelo M.GPCI.....	101
7.2	Interação do modelo M.GIP_X.....	102
7.2.1	Interação do modelo M.GPI_1	102
7.2.2	Interação do modelo M.GPI_2.....	103
7.2.3	Interação do modelo M.GPI_3.....	104
7.2.4	Interação do modelo M.GPI_4.....	105
7.2.5	Interação do modelo M.GPI_5.....	106
7.2.6	Interação do modelo M.GPI_6.....	107
8	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	108

8.1	Modelo M.GPCI	108
8.2	Modelo M.GPCI com cargas adicionais	114
8.3	Modelo M.GIP_X.....	115
8.3.1	Solicitações das paredes do M.GPI_1	115
8.3.2	Solicitações das paredes do M.GPI_2.....	117
8.3.3	Solicitações das paredes do M.GPI_3.....	117
8.3.4	Solicitações das paredes do M.GPI_4.....	118
8.3.5	Solicitações das paredes do M.GPI_5.....	120
8.3.6	Solicitações das paredes do M.GPI_5.....	120
8.4	Configuração das forças verticais nas paredes pelos resultados obtidos nos modelos em elementos finitos	121
8.5	Convergência dos valores obtidos nos modelos numéricos x modelos simplificados.....	121
8.6	Comparação dos resultados dos modelos simplificados e simulação numérica.....	122
8.7	Taxa de uniformização de cargas x características geométricas dos grupos	124
9	CONCLUSÕES	128
9.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	130
	REFERÊNCIAS.....	132
	BIBLIOGRAFIA	135

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A alvenaria estrutural é considerada uma das mais antigas formas de construção adotada pelo homem, sendo que sua resistência depende da união de blocos (concreto ou cerâmico) com argamassa, resultando em um elemento de alta resistência a compressão e esforços cortantes (NASCIMENTO NETO, 1999).

No Brasil, segundo Ramalho e Corrêa (2003), a alvenaria estrutural foi inicialmente utilizada em 1966 na cidade de São Paulo. Outro marco importante para este processo construtivo foi o edifício de 16 pavimentos, também na cidade de São Paulo, ocorrido em 1972. Devido as suas características econômicas este processo foi bem aceito no mercado para a construção de edifícios residências e industriais.

Os esforços considerados no dimensionamento da alvenaria são as forças verticais, devido as cargas permanentes e acidentais, e as ações horizontais que ocorrem pela presença da ação do vento, desaprumo e sismos.

Para a determinação das forças verticais atuante nas paredes de alvenaria estrutural são utilizados modelos simplificados de cálculo. Esses modelos consistem na divisão da laje determinando uma área de influência sobre as paredes resistentes, podendo, a critério do projetista, trabalhar solidariamente, considerando a ocorrência da transferência de forças entre elas através da interface de ligação.

O conceito de interação entre paredes através da interface considera que essa tenha resistência suficiente para tal solicitação, resultando em valores de forças uniformizadas entre as paredes adjacentes.

Outro método empregado para a análise da distribuição de forças verticais, que, atualmente apresenta um grande número de pesquisas realizadas, é o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF).

O MEF divide o elemento estrutural em pequenas partes que, conectados entre si, formam o conjunto estrutural (JUNIOR, 2007).

Segundo Peleteiro (2002), o uso de análises numéricas, desde que sejam confiáveis, pode incorrer em redução da utilização de instrumentação da edificação e

também a redução do número de corpos de provas, eliminando custos de ensaios experimentais.

Um parâmetro importante para a determinação do processo de construção de um edifício é o custo que este pode gerar. O uso de alvenaria estrutural, devido aos métodos racionais de execução e menor prazo, quando comparado a sistemas com necessidade de uso de formas, tornam-se mais viáveis. No entanto, o processo para determinação da resistência das unidades (blocos) é um fator de grande impacto para a economia do sistema.

1.2 Motivação

A motivação deste trabalho gira em torno dos processos para a determinação da distribuição das forças verticais atuantes na alvenaria estrutural, os quais ainda necessitam de pesquisas, buscando assim, gerar resultados que possam auxiliar nos estudos relacionados.

Outro fator que motivou a realização do trabalho, foi a possibilidade de aprofundamento nos conhecimentos na área de alvenaria estrutural e utilização de simulações numéricas para análise da distribuição de forças verticais, visando uma contribuição nessa área da pesquisa.

1.3 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo principal a comparação da distribuição das forças verticais atuantes em edifícios de alvenaria estrutural através de simulação numérica (elementos finitos), com os valores obtidos por meio do emprego de modelos simplificados.

Os modelos simplificados foram realizados considerando os processos de paredes individuais, grupos isolados de paredes e grupos de paredes com interação.

1.4 Justificativa do trabalho

Pode-se afirmar que a transferência de forças verticais entre as interfaces de paredes ocorre de acordo com diversos autores, devido a este fenômeno, as forças possuem uma forte tendência de homogeneização em função da altura da edificação.

Uma característica importante na homogeneização das forças verticais é a interação que ocorre entre paredes sobre aberturas de portas e janelas através dos linteis presentes sob e sobre essas aberturas.

Todavia, o processo de homogeneização de forças verticais ainda é complexo quando se trata não somente da interação entre as paredes de uma edificação, mas também do comportamento referente a presença dos linteis. Esse comportamento possui diversas pesquisas para a obtenção de modelos numéricos discretizado em elementos finitos que possam ser confiáveis para determinação da distribuição das forças atuantes.

O uso de modelos numéricos em elementos finitos para a representação do comportamento da alvenaria permite a obtenção de resultados satisfatórios quando bem calibrados com modelos experimentais.

Neste contexto o trabalho se justifica para compreensão dos processos simplificados quando comparados a simulação numérica para prever a distribuição das forças verticais na alvenaria estrutural, considerando a análise global da estrutura.

1.5 Metodologia

Inicialmente, foi realizado uma revisão bibliográfica sobre o tema e os procedimentos para análise da distribuição de forças verticais e o uso do MEF para a obtenção de comportamento de distribuição de forças verticais na alvenaria estrutural.

Buscou-se, ainda na fase de levantamentos bibliográficos, uma compreensão dos elementos finitos utilizado para a discretização da alvenaria.

Para prosseguir com a modelagem numérica, foi adotado um modelo arquitetônico simplificado, baseado em medidas de um edifício real e a definição das propriedades dos materiais.

A modelagem numérica foi efetuada no software Ansys Workbench em sua versão 17.2, visando a obtenção de resultados a serem comparados com os resultados obtidos através dos modelos simplificados de paredes individuais (PI), grupos Isolados de paredes (GIP) e grupo de paredes com interação (GPCI).

Por fim, são efetuadas análises entre os procedimentos visando alcançar os objetivos propostos do trabalho.

1.6 Organização do texto

O texto possui nove capítulos, sendo o primeiro uma breve introdução ao tema abordado, motivação, metodologia e apresentação dos próximos capítulos.

O Capítulo 2 inicia com uma revisão bibliográfica sobre os conceitos e definições de alvenaria estrutural, histórico, modelos simplificados, conceitos de modelagem da alvenaria estrutural em elementos finitos e a interação entre paredes de alvenaria estrutural.

O Capítulo 3 tem como objetivo indicar o procedimento de caracterização do modelo arquitetônico a ser estudado, além da definição das propriedades dos materiais.

O Capítulo 4 indica o procedimento realizado para a discretização do modelo sugerido em elementos finitos, considerando a interação de grupos de paredes e grupos sem interação.

No Capítulo 5 são indicados os resultados obtidos pelas simulações numéricas e a aplicação dos carregamentos considerando. Nesse capítulo optou-se por uma breve investigação do comportamento da distribuição de forças considerando a sobreposição de efeitos.

Os resultados dos modelos simplificados são indicados no Capítulo 6 considerando as solicitações das paredes através do método de divisão de lajes e resultados obtidos por simulações numéricas.

O capítulo 7 indica valores de comportamento de interação de forças obtidas pela simulação numérica nos grupos de paredes com interação e grupos de paredes isolados.

No Capítulo 8 são indicadas as análises dos resultados obtidos, assim como as características geométricas dos grupos relacionando o comportamento de interação com os parâmetros geométricos dos grupos.

O capítulo 9 possui as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são indicadas as referências e bibliografias utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Alvenaria Estrutural

2.1.1 Breve Histórico

A alvenaria estrutural é utilizada, desde o início da atividade humana, para a realização de vários tipos de estrutura e os principais marcos para o emprego desta técnica são descritos a seguir (RAMALHO; CORRÊA, 2003, P. 2):

- **Pirâmides de Guizé (Egito, 2600 a.C.):** a maior delas é a Quéops, com medidas de 147 metros de altura e uma base quadrada de 230x230 metros.
- **Farol de Alexandria (Egito, 280 a.C.):** Sua altura é de 134 metros e o material utilizado foi bloco de mármore branco. Este monumento foi considerado um marco no ponto de vista estrutural devido sua magnitude. Hoje apenas a fundação é testemunho de sua grandeza devido a um terremoto ocorrido no século XIV.
- **Coliseio (Roma, 70 d.C.):** A característica desse monumento é a utilização de pórticos formados por pilares e vigas. Sua arquitetura apresentava 80 portais para acesso ao público e sua capacidade era de aproximadamente 50.000 pessoas.
- **Catedral de Reims (França, 1211-1300 d.C.):** Este monumento tem como característica estruturas com vãos relativamente grandes utilizando somente estruturas comprimidas. Neste monumento verifica-se que as técnicas de construção empíricas eram refinadas com o passar do tempo.
- **Edifício Monadnock (Estados Unidos, 1989-1991):** É considerado um edifício clássico da alvenaria estrutural, explorando, na época, os limites dimensionais da alvenaria estrutural. Sua altura é de 65 metros.
- **Edifício de Paul Haller (Suíça, 1950):** Construído com altura de 13 pavimentos com 42 metros de altura e executado com alvenaria não-armada. A alvenaria possui espessura de 37,5 centímetros para paredes externas e 15 centímetros para paredes internas. A espessura das paredes externas foi adotada para maior conforto térmico, e as internas, que recebem maior parte da carga, tiveram seu dimensionamento com procedimentos similares aos procedimentos atuais.

- **Hotel Excalibur(Las Vegas, 1998):** Este hotel possui quatro torres com 28 pavimentos. Suas paredes foram executadas com alvenaria armada de blocos de concreto com uma resistência de compressão na base de 28 MPa.

Segundo Camacho (2006), o uso da alvenaria estrutural, no final do século XIX, era um dos principais métodos construtivos utilizados. Entretanto, a sua execução seguia conhecimentos empíricos adquiridos com o tempo.

Com o surgimento de novos materiais para a construção civil no final do século XIX, a alvenaria estrutural teve um declínio em sua utilização e passou a ser utilizada somente como elemento de fechamento.

Após um período de dormência em pesquisas na área de Alvenaria Estrutural, em meados do século XX, devido a necessidades de novos métodos construtivos, a alvenaria estrutural passou a ser tema de diversas pesquisas, aumentando, significativamente, o uso desse processo na área de construção civil, tendo como consequência o surgimento de normas e critérios de cálculo com métodos racionalizados.

No Brasil, os estudos da alvenaria estrutural tiveram seu início na década de 60, na cidade de São Paulo e nos anos 80 em Porto Alegre. Uma ordem cronológica de marcos importantes no Brasil sobre a alvenaria é listada a seguir (CAMACHO, 2006):

- 1966: Construção do conjunto habitacional “Central Parque da Lapa” com Alvenaria Estrutural Armada, na cidade de São Paulo / SP;
- 1977: Construção de um edifício de 9 pavimentos com blocos de sílico calcário, em Alvenaria Estrutural Não Armada na cidade de São Paulo / SP;
- 1988: Construção de quatro edifícios de 18 pavimentos em blocos de concreto na cidade de São Paulo / SP.

Com o avanço de tecnologias empregadas em materiais de construção e as pesquisas realizadas na área de alvenaria estrutural, tornou-se possível a construção de edifícios com o uso de alvenaria estrutural em países que apresentam histórico de abalo sísmico, como Alemanha, Suíça e Estados unidos (SAMPALIO, 2010).

2.1.2 Definições

O conceito de Alvenaria Estrutural, segundo Camacho (2006), é que a alvenaria desempenha a função da estrutura da edificação, implicando em projetos que serão executados de forma racional.

A alvenaria estrutural é formada pelo conjunto de elementos que, por sua vez, são formados por um conjunto de componentes, conforme definições apresentadas pela ABNT (2011):

- a) **Componentes:** menor parte constituinte dos elementos da estrutura. Os principais são: bloco, junta de argamassa, grautes e armadura; e
- b) **Elementos:** parte da estrutura suficientemente elaborado, constituída da reunião de dois ou mais componentes;
- c) **Elemento de Alvenaria não armado:** elemento de alvenaria no qual não há armadura para resistir aos esforços solicitantes;
- d) **Elemento de Alvenaria armado:** elemento de alvenaria no qual são utilizadas armaduras passivas que são consideradas para resistir aos esforços solicitantes;
- e) **Elemento de Alvenaria Protendido:** elemento de alvenaria no qual são utilizados armaduras ativas.

Ainda segundo a ABNT (2011), os componentes da alvenaria estrutural são definidos como:

- 1 **Bloco:** Componente básico da alvenaria;
- 2 **Junta de Argamassa:** Componente utilizado na ligação dos blocos;
- 3 **Graute:** Componente utilizado para preenchimento de espaços vazios de blocos, com a finalidade de solidarizar armaduras à alvenaria ou aumentar a capacidade resistente;
- 4 **Amarração direta das paredes:** padrão de ligação de paredes por intertravamento de blocos, obtidos com a interpenetração alternada de 50% das fiadas de uma parede na outra ao longo das interfaces.

Hendry (2001) cita que as características a serem analisadas nas unidades (blocos) empregadas na alvenaria estrutural são coloração, textura da superfície, peso próprio, absorção de água, condutividade térmica, resistência ao fogo, resistência a compressão e resistência a tração. Dentre as propriedades mecânicas, a mais importante é a resistência a compressão, fator diretamente ligado a resistência do elemento alvenaria estrutural.

Outras considerações observadas por Camacho (2006), em função da resistência a compressão das alvenarias, devem-se não somente ao tipo de unidade utilizada, mas a diversos fatores, destacando-se:

- Resistência das argamassas;
- Qualidade da mão-de-obra;
- Esbeltez do elemento.

A resistência das alvenarias pode ser afetada, em ordem de importância considerando os seguintes itens:

- Resistência das Unidades;
- Resistência da argamassa de assentamento;
- Geometria da unidade;
- Espessura das juntas de assentamento;
- Características de deformação das unidades e da argamassa.

2.1.2.1 Blocos

Os blocos são os principais componentes para a execução da alvenaria estrutural, pois sua resistência a compressão é fator importante para a determinação da resistência do elemento alvenaria.

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), os componentes são classificados como blocos quando possuem um índice de vazios superior a 25% da área total, caso contrário, esse é classificado como tijolo. Esta classificação também é citada na ABNT (2007).

De acordo com os critérios da ABNT (2007), a fabricação de blocos de concreto para utilização em alvenaria estrutural deve respeitar parâmetros de resistência, absorção e retração na secagem conforme Tabela 2-1 de acordo com a Classe a ser empregada. Esta classificação é:

- Classe A: Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do solo;
- Classe B: Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima solo;
- Classe C: Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo;
- Classe D: Sem função estrutural, para uso de elementos de alvenaria acima do nível do solo.

Ainda segundo a ABNT (2007), as dimensões reais de uma família de blocos devem respeitar o que especifica a Tabela 2-2. Caso as unidades possuam dimensões diferentes da referida tabela, cabe ao fornecedor respeitar a área líquida igual ou inferior a 75% da seção bruta do concreto e também as dimensões nominais múltiplas do módulo $M = 10$ e seus submódulos $M/2$ e $M/4$, assim como possuir um conjunto de componentes necessários para o arranjo das modulações verticais e horizontais da edificação.

Tabela 2-1 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração.

Classe	(f_{bk}) MPa	Absorção média (%)		
		Agregado Normal	Agregado Leve	Retração
A	$\geq 6,0$	$\leq 10,0 \%$	$\leq 13,0 \%$	$\leq 0,065\%$
B	$\geq 4,0$		(média)	
C	$\geq 3,0$		$\leq 16,0\%$	
D	$\geq 2,0$		(individual)	

Fonte: ABNT (2007)

No quesito de resistência mecânica, os blocos de concreto devem respeitar a resistência característica (f_{bk}) mínima de acordo com a classe de fabricação, além dos

índices de absorção, bem como a retração na secagem. Para blocos cerâmicos, de acordo com a ABNT NBR 15270-2:2005, a resistência característica de compressão (f_{bk}) para blocos estruturais devem ser consideradas a partir de 3,0 MPa.

Tabela 2-2 - Dimensões dos blocos de família

Aplicação		> 2 Pavimentos			Até 2 pavimentos			1 pavimento		
Designação	Nominal	20	15		12,5			10		
	Módulo	M-20	M-15		M-12,5			M-10		
	Amarração	1/2	1/2	1/2	½	½	1/3	1/2	1/2	1/3
	Linha	20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	10x30
Comprimento (mm)	Largura (mm)	190	140	140	115	115	115	90	90	90
	Altura (mm)	190	190	190	190	190	190	190	190	190
	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	190	290
	Meio	190	190	140	190	115	-	190	90	-
	2/3	-	-	-	-	-	240	-	-	190
	1/3	-	-	-	-	-	115	-	-	90
	Amarração L	-	340	-	-	-	-	-	-	-
	Amarração T	-	540	440	-	365	365	-	290	290
	Compensador A	90	90	-	90	-	-	90	-	-
	Compensador B	40	40	-	40	-	-	40	-	-

Fonte: ABNT (2008)

2.1.2.2 Argamassas

A ABNT NBR 15961:2011, define a junta de argamassa como sendo um componente responsável pela ligação dos blocos e sua resistência deve ser, no mínimo, 70% da resistência característica especificado pelo bloco em função da área líquida.

A argamassa, que é classificada como um componente, é constituída pela mistura de cimento, areia e água em proporções definidas. O resultado da proporção da mistura para a fabricação da argamassa resulta em um componente com uma determinada resistência mecânica.

Hendry (2001), descreve que as propriedades da argamassa, apesar de ter um volume próximo a 7% do volume total da alvenaria, são tão importantes quanto a trabalhabilidade que esta deve ter. As características de aderência, baixa retração na

secagem e plasticidade devem ser compatíveis com o sistema, evitando algumas falhas que possam ocorrer como, como fissuras e interferência no desempenho do elemento alvenaria.

As principais funções da argamassa de assentamento das alvenarias são (MATA, 2006, p. 26 apud PRUDENCIO JÚNIOR, 1994):

- Unir solidamente as unidades da alvenaria;
- Distribuir as cargas atuantes por toda área dos blocos;
- Resistir a esforços mecânicos;
- Absorver as deformações naturais na qual a parede esteja submetida;
- Selar as juntas contra a penetração de água.

Segundo Mata (2006), o tipo de argamassamento das juntas interfere diretamente na resistência da alvenaria estrutural. Isso ocorre devido a propriedade da argamassa distribuir as tensões entre as unidades, ocorrendo rupturas com menor aplicação de cargas quando utilizado argamassamento parcial nas alvenarias.

2.1.2.3 *Graute*

Os critérios da ABNT NBR 15961-1:2011 para a utilização de grautes em alvenaria estrutural é que estes possuam uma resistência a compressão superior a 15 MPa em ensaios realizados em elementos de prismas.

Ramalho e Corrêa (2003) definem que a função deste componente é aumentar a área da seção transversal das unidades ou de promover a solidarização dos blocos e eventuais armaduras que sejam empregadas nos vazios das unidades, aumentando a capacidade portante da alvenaria à compressão.

A composição dos grautes deve ser realizada com agregados de pequenas dimensões e ser fluída, possibilitando o preenchimento dos vazios e envolver a armadura com aderência, formando o conjunto monolítico (SAMPAIO, 2010).

2.1.2.4 Armaduras

Devido à resistência da alvenaria a esforços de tração ser muito baixa, o uso de armaduras torna-se necessário para suprimir essa deficiência. Não obstante, as armaduras também podem ser utilizadas para disposições construtivas.

As especificações para as armaduras no uso em alvenarias estruturais seguem os mesmos critérios adotados para o concreto armado.

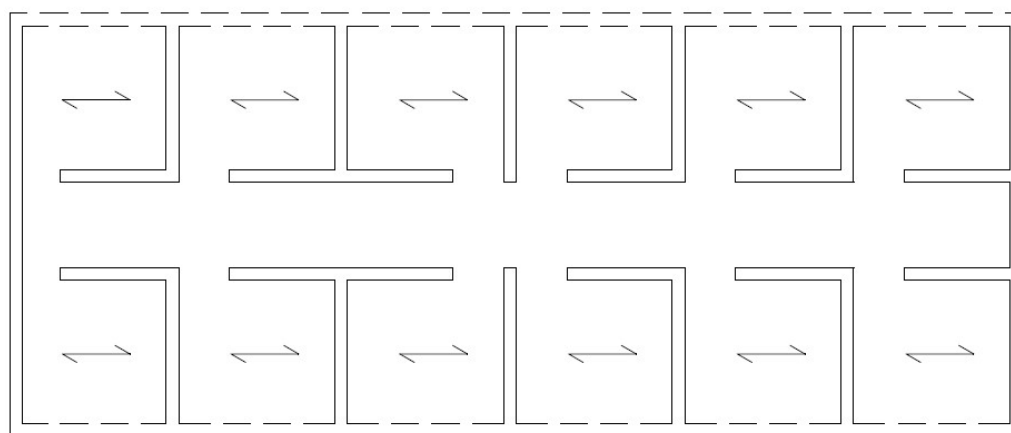
2.1.3 Concepção Estrutural

A determinação de quais paredes tornam-se estruturais no projeto da edificação é definida em planta de acordo com os sistemas descritos em Ramalho e Corrêa (2003, p. 25 *apud* Hendry, 1981), sendo eles:

2.1.3.1 Paredes Transversais

Neste caso, as paredes situadas na parte externa da edificação de maior comprimento são consideradas como elementos de vedação, possibilitando a inserção de caixilhos (paredes tracejadas da Figura 1). Estas paredes, por não terem função estrutural, não recebem solicitações das lajes.

Figura 1 - Sistema estrutural de paredes transversais

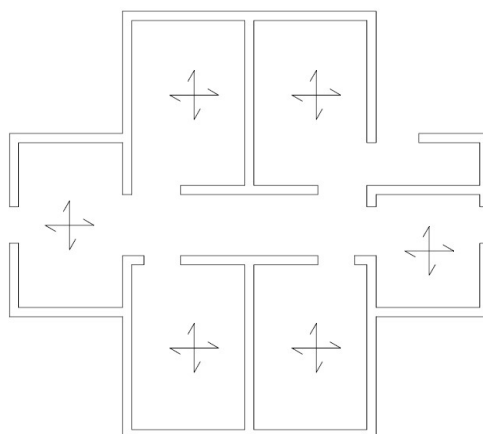


Fonte: Ramalho e Correa (2003)

2.1.3.2 Paredes Celulares

Este sistema considera que todas as paredes são estruturais e as lajes são armadas em duas direções face a possibilidade de apoio em todo seu contorno. Neste caso, devido a sua concepção, a estrutura apresenta uma maior rigidez, devendo ser utilizado sempre que possível.

Figura 2 - Sistema estrutural de paredes celulares



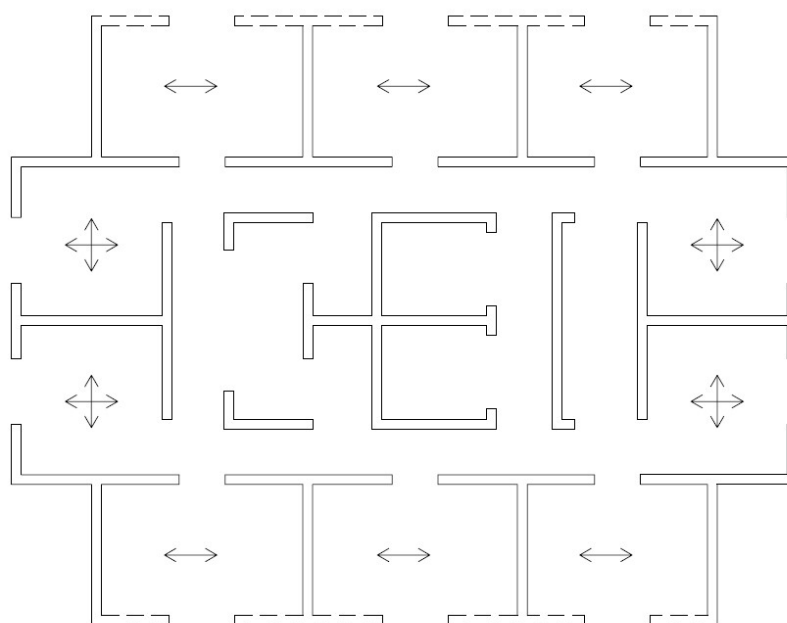
Fonte: Ramalho e Corrêa (2003).

2.1.3.3 Sistema Complexo

Esse sistema consiste na utilização simultânea dos dois tipos de sistemas citados, tornando a parte interna da edificação mais rígida, possibilitando a utilização de alguns painéis externos não estruturais.

O uso de fiadas com blocos grauteados acima das aberturas que passa em todas as paredes (cinta) torna a estrutura mais rígida e também leva as paredes adjacentes a interagirem entre si (ANDOLFATO, 2006, p. 38).

Figura 3 - Sistema estrutural complexo



Fonte: Ramalho e Corrêa (2003)

2.1.4 Vantagens e Desvantagens da Alvenaria Estrutural

As vantagens e desvantagens, segundo Junior (2007), são descritas a seguir:

a) Vantagens:

- **Economia:** as reduções dos custos são estimadas de 20 a 30% devido a menor diversidade de materiais e mão-de-obra;
- **Rapidez:** devido à redução de etapas construtivas, o tempo de execução é menor que o sistema construtivo de estruturas em pórtico com a necessidade de execução de mais etapas como o uso de formas e concretagem de vigas e pilares;
- **Racionalização:** padronização dos projetos, as etapas são bem definidas, evitando atividades de cortes desnecessários para a instalação de sistemas de instalações complementares;
- **Flexibilidade no ritmo de execução da obra:** na possibilidade de uso de lajes pré-moldada, o tempo de espera para cura do concreto é descartado, possibilitando uma execução mais rápida dos serviços.

b) Desvantagens:

- **Mão-de-Obra:** a equipe deve ser bem treinada para uma boa execução dos serviços, pois durante a fase de assentamentos dos blocos quaisquer desvios interferem diretamente na resistência a compressão do elemento e também em sua função de vedação;
- **Acompanhamento Técnico:** por necessitar de maior rigor na execução, é necessário um maior acompanhamento para fiscalização dos serviços;
- **Interação dos Projetistas:** deve haver a compatibilização dos projetos antes do início da execução da obra para não provocar alterações diretas na execução.

Os parâmetros elencados como desvantagens somente terão essa característica quando houver descaso nos processos. Caso contrário, o processo pode se tornar mais eficaz e econômico (JUNIOR, 2007).

Um exemplo retratando a situação descrita anteriormente é baseado na comparação da resistência em alvenarias executadas por equipes especializadas e comerciais, onde a primeira obteve valores de resistências em torno de 60 a 80% maiores que a segunda equipe (SAMPAIO, 2010, pg. 16, apud CAMACHO, 2006).

2.2 Modelos para determinação de forças na alvenaria estrutural

O dimensionamento da alvenaria estrutural deve ser efetuado para duas solicitações que ocorrem no edifício: as solicitações no sentido vertical devido ao peso próprio, cargas acidentais, e as solicitações que ocorrem no sentido horizontal, originada pela ação do vento, desaprumo e sismos.

Considerando a necessidade de aprofundamento sobre as ações verticais, os processos apresentados serão referenciados a esse tipo de solicitação.

2.2.1 Modelos numéricos simplificados

Os modelos numéricos simplificados mais usuais segundo Ramalho e Corrêa (2003) são: Paredes Isoladas (PI), Grupos de Paredes Isoladas (GPI) e Grupos de Paredes com Interação (GPCI).

2.2.1.1 Paredes Isoladas (PI)

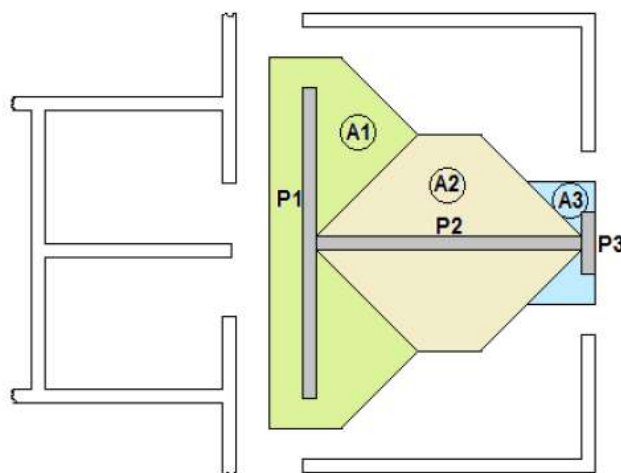
Esse método considera que as paredes de alvenaria estrutural não interagem com as paredes vizinhas, sendo dimensionadas para resistir a solicitação de forças verticais de acordo com a área de influência definida para a mesma.

A determinação da área equivalente das paredes consiste na divisão da área da laje de acordo com a disposição das paredes, geralmente a 45° ou 60° , dependendo da vinculação considerada nos apoios da laje.

Esse procedimento, segundo Ramalho e Corrêa (2003), é simples e seguro do ponto de vista da determinação da resistência nas unidades empregadas. Entretanto, não se trata de um método econômico, sendo recomendado para edifícios de pequena altura.

Uma desvantagem é a distorção nas cargas dos apoios, tornando desfavorável à segurança para as fundações (MOREIRA, 2007, p. 10).

Figura 4 - Áreas de Influência para paredes isoladas

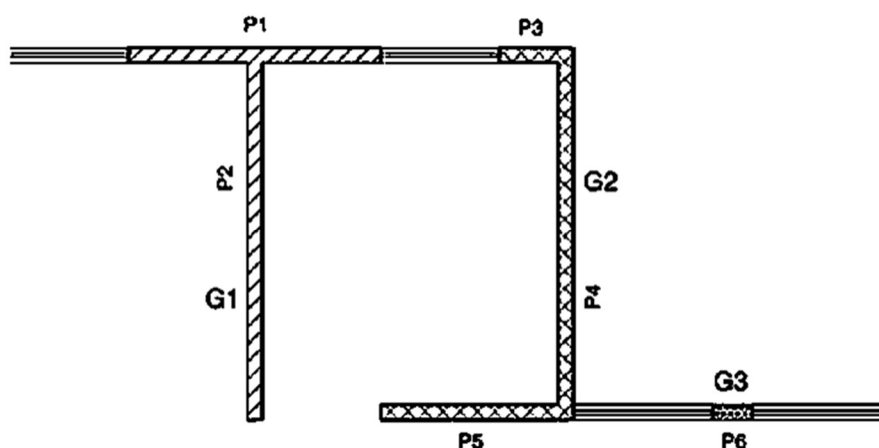


Fonte: Camacho (2016, p. 19)

2.2.1.2 Grupos Isolados de Parede (GIP)

Ramalho e Corrêa (2003) definem que um grupo é um conjunto de paredes que são supostas como totalmente solidárias. Os limites dos grupos são determinados por aberturas de portas e janelas e as linhas de ruptura das lajes.

Figura 5 - Exemplo de Grupo de Paredes

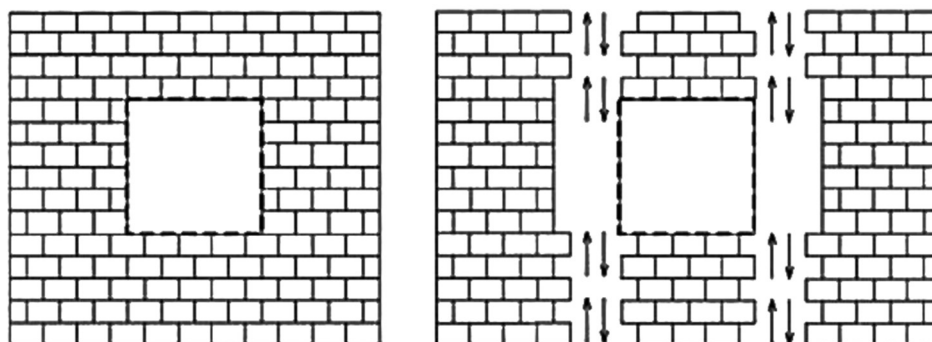


Fonte: Ramalho e Corrêa (2003, p. 33)

Além disso, as forças aplicadas nas paredes de cada grupo são uniformizadas, considerando que todas as paredes absorvem a mesma quantidade de esforços, trabalhando independentes entre si.

2.2.1.3 Grupos de Parede com Interação (GPCI)

Esse procedimento considera que há uma interação para transferência de forças entre grupos de paredes definidos. Essa transferência deve-se à presença do lintel nas aberturas (Figura 6), ocorrendo a uniformização das forças em pavimentos inferiores (CAMACHO, 2014, p. 19).

Figura 6 - Interação de forças entre aberturas de paredes

Fonte: Ramalho e Corrêa (2003, p. 29)

A transferência de forças é determinada por uma taxa de interação definida pelo projetista. Esta taxa, expressa em porcentagem, considera a distribuição das forças entre grupos que se interagem de acordo com a concepção adotada pelo projetista.

O procedimento consiste na aplicação das equações ((1), ((2), e ((3) conforme o procedimento sugerido em Ramalho e Corrêa (2003):

$$q_m = \frac{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + \dots + q_n)}{n} \quad ((1)$$

$$d_i = (q_i - q_m) * (1 - t) \quad ((2)$$

$$q_i = q_m + d_i \quad ((3)$$

Onde:

n : número de grupos que estão interagindo;

q_i : carga do grupo i ($i = 1, \dots, n$);

q_m : carga média dos grupos que estão interagindo;

d_i : diferença de carga do grupo em relação à média;

t : taxa de interação para cada nível considerado.

A taxa de interação representa a diferença de forças entre grupos que interagem, devendo ser uniformizadas em cada nível, ou seja, caso a taxa de

interação seja nula, isto significa que o procedimento é similar ao Grupos de Paredes sem Interação. Se esse valor for adotado igual a 30%, significa que a diferença das ações do grupo e a ação média do macrogrupo são uniformizadas mantendo-se uma diferença de 70%.

O critério de adoção de macrogrupos em um projeto tem como objetivo definir quais grupos de paredes estão interagindo. Caso não seja adotado este critério, significa que todos os grupos interagem entre si.

[...] as evidências de uniformização do carregamento vertical dentro dos grupos foram levantadas por Stockbridge *apud* Hendry (1981) que mediu deformações em paredes na base de um edifício de cinco pavimentos enquanto este era construído. Essas medidas evidenciaram que as cargas acabavam se uniformizando à medida que os pavimentos eram acrescentados à edificação. (RAMALHO; CORRÊA, 2003, p. 33).

A definição da taxa de interação pode ser adotada dentro de um grupo de paredes isolado. Nessa condição de análise, as paredes são definidas como grupos e o grupo é definido como o macrogrupo.

2.2.1.4 Considerações entre os modelos PI x GIP x GPCI

Dentre os modelos simplificados, nem todos consideram a homogeneização das forças verticais na edificação conforme descrito nos itens 2.3.1.5 e 2.2.1.2.

Os processos de GIP e GPCI consideram a uniformização da carga entre as paredes do mesmo grupo. O procedimento adotado no GPCI ainda considera a transferência de cargas entre os grupos por taxas pré-definidas.

Um exemplo elaborado por Ramalho e Corrêa (2003, pg. 41) indica a estimativa da resistência a compressão dos blocos, de acordo com os modelos simplificados, cujos resultados são expressos a Tabela 2-3. A redução da resistência do bloco devido ao processo de interação de cargas traz benefícios econômicos para a edificação.

Tabela 2-3 - Resistência à compressão do bloco (processos simplificados)

Processo	PI	GIP	GPCI t = 50%	GPCI t = 100%
Resistência do Bloco a Compressão (MPa)	16	8	6	6

Fonte: Adaptado de Ramalho e Corrêa (2003, p. 41)

2.2.2 Método dos Elementos Finitos

Considerando a hipótese da adoção da simplificação de sistemas estruturais para a obtenção de modelos idealizados de estruturas, surge a necessidade de equacionar os problemas. Esse equacionamento deve ser utilizado de acordo com o tipo de estrutura a ser simulada, ou seja, estruturas lineares, planas ou tridimensionais (SAVASSI, 1996).

Este consiste não apenas em transformar o sólido em uma associação de elementos discretos e escrever as equações de compatibilidade e equilíbrio entre eles, mas admitir funções contínuas que representem, por exemplo, o campo de deslocamentos no domínio de um elemento e, a partir daí obter o estado de deformações correspondentes que, associados às relações constitutivas do material, permitem definir o estado de tensões em todo o elemento. (ASSAN, 2003, p. 15)

Os tipos de elementos descritos por SAVASSI (1996) devem ser utilizados de maneira que possa representar a estrutura com compatibilidade fazendo o uso de elementos de acordo com o tipo de estrutura analisada.

Ainda segundo Assan (2003), o método dos elementos finitos não foi desenvolvido por uma única pessoa. Historicamente, esse método teve seu início na década de trinta, onde McHenry e Hrennikoff elaboraram uma discretização de um elemento estrutural tipo placa por um conjunto de placas. Após isso, somente no ano de 1956, foi conhecida a formulação do MEF pela publicação de Tuner, Clough, Martin e Topp.

Junior (2007, pg. 11) explica que o método teve origem na década de 30 na indústria aeronáutica britânica devido à possibilidade do uso de computadores digitais

para o processamento do método. O computador digital e a engenharia náutica são responsáveis pelo surgimento desse método.

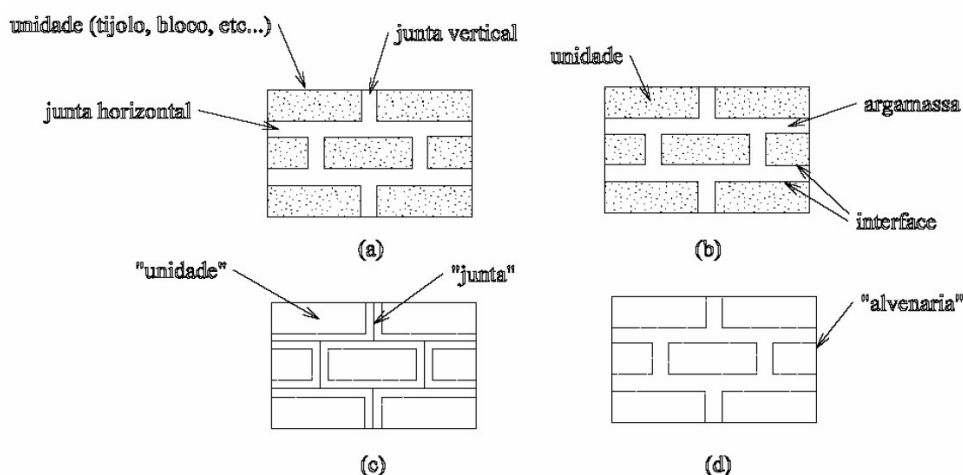
2.2.2.1 Modelagem numérica da alvenaria estrutural

A modelagem numérica deve ser elaborada de maneira que se obtenha resultados confiáveis para análises dos esforços nos elementos. As considerações do tipo de elemento finito, a discretização da estrutura, as condições de contorno, dentre outras considerações devem ser bem definidas para a obtenção dos resultados.

Para a discretização da alvenaria estrutural, segundo Mata (2006, p. 55 apud Lourenço, 1996) e Sampaio (2010, pg. 59), os modelos utilizados são:

- **Modelo micro detalhado / Micro modelagem detalhada:** nesse caso, os blocos, a argamassa e o graute podem ser representados por elementos contínuos. A interface bloco / argamassa é modelada por elementos especiais (descontínuos).
- **Modelo micro simplificado / Micro modelagem simplificada:** os blocos são representados por elementos contínuos com dimensões expandidas (bloco e argamassa) e a argamassa e junta são representados por elementos de interface;
- **Modelo Macro / Macro-modelagem:** todos componentes que compõem a alvenaria são representados por um único meio contínuo, adotando o comportamento médio da alvenaria.

Figura 7 - Modelos para alvenaria estrutural

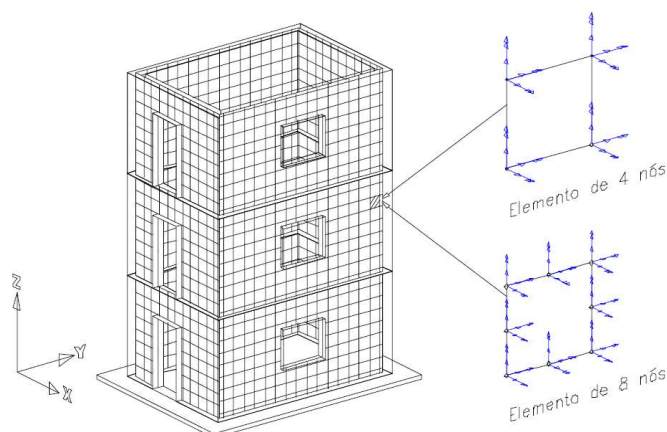


(a) Elemento alvenaria (b) modelo Micro detalhado (c) modelo micro simplificado e (d) modelo macro

Fonte: Mata (2006 apud LOURENÇO, 1996)

O tipo de elemento utilizado pode ser classificado como de baixa ordem ou alta ordem, Figura 8.

Figura 8 - Modelagem de elementos finitos quadrangulares de 4 e 8 nós



Fonte: Palacio (2001)

No *software* Ansys, os elementos que possuem estas características são descritos como SHELL181 (04 nós – baixa ordem) e SHELL93 (08 nós – alta ordem). O elemento utilizado para análise deste trabalho foi o SHELL181 e será descrito em capítulo específico.

O método dos elementos finitos tem sua solução expressa em deslocamentos nodais, esforços nodais e tensões no elemento, possibilitando a investigação desejada no elemento estrutural.

2.3 Distribuição das forças verticais

Segundo Peleteiro (2002, pg. 14), o aumento em pesquisas na área de alvenaria estrutural ocorreu devido ao crescimento da utilização desta técnica na área de construção civil, gerando a necessidade de uma compreensão do seu comportamento.

Tendo em vista a necessidade de embasamento do comportamento da alvenaria estrutural para a distribuição de forças verticais, assim como a utilização de modelos numéricos para simular o seu comportamento, são apresentados alguns trabalhos nesse contexto.

2.3.1 A interação de forças entre paredes

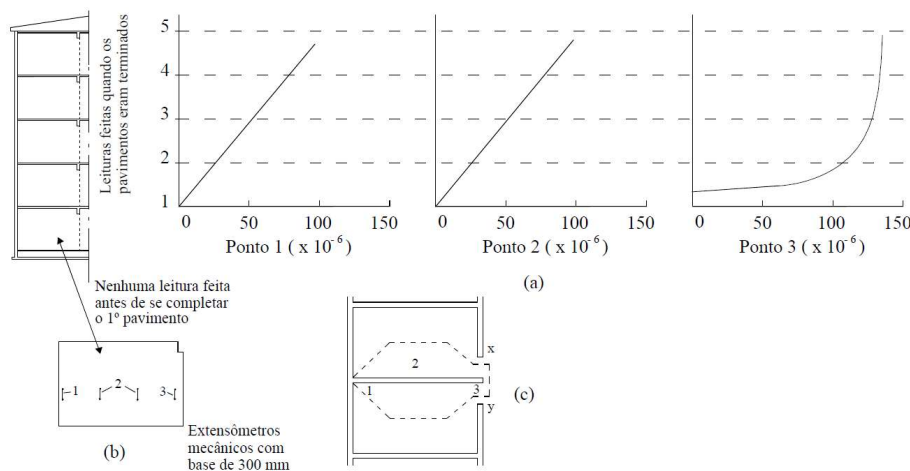
2.3.1.1 A homogeneização de forças em um edifício

O trabalho de Stockbridge¹, citado por Silva (2011, p. 59) e Moreira (2007, p. 14), realizado em 1967, na sua tese de doutorado na Universidade de Edimburgo, Escócia, tornou-se um marco para a pesquisa sobre as ações verticais em alvenaria estrutural.

O autor realizou medições de deformações em um edifício de 05 pavimentos durante a sua construção, obtendo os resultados ilustrados na Figura 9.

A interpretação dos dados por Hendry (1987, p. 125 citado por Silva, 2011, p. 61) foi de uniformização das ações atuantes pelo fato de não ocorrer uma deformação acentuada no ponto 2. Ao contrário, as deformações ficavam mais equivalentes conforme a altura da edificação aumentava. Por fim, o autor também conclui que a uniformização ocorre em maiores proporções face à altura do edifício.

Figura 9 - Deformações medidas na parede do edifício por Stockbridge



(a) Medidas feitas na parede do 1º pavimento; (b) Localização dos extensômetros mecânicos (mesma disposição da face oposta) e (c) área de influência estimada da laje.

Fonte: Moreira (2007, p. 15)

¹ STOCKBRIDGE, J. G. **A study of high-rise load bearing brickwork in Britain**. 1967. PhD Thesis, University of Edinburgh, 1967.

2.3.1.2 Estudo da interação de forças com blocos cerâmicos

Capuzzo Neto (2000) elaborou um estudo teórico e experimental para analisar a interação de paredes de alvenaria estrutural. Nesse estudo, foi possível verificar a perda de linearidade nos painéis com o surgimento de fissuras.

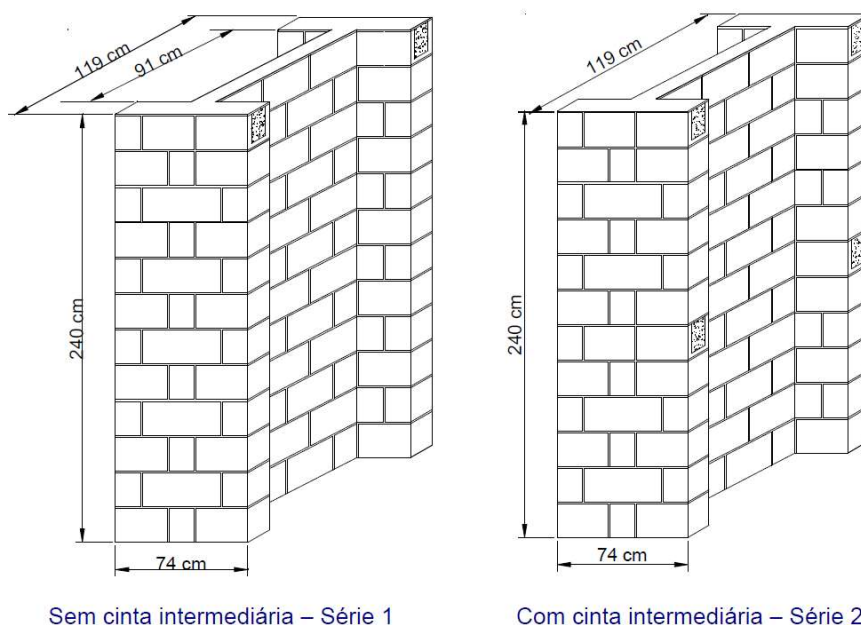
Os painéis de alvenaria, constituídos por blocos cerâmicos, foi constituída por duas séries, com e sem cinta de amarração, Figura 10. Foi possível verificar um comportamento praticamente igual entre as séries adotadas.

A modelagem numérica que o autor usou para comparação dos valores obtidos dos ensaios de ruptura dos painéis, é composto por elementos tipo casca com seis graus de liberdade e um total de quatro nós.

Os resultados obtidos pela modelagem numérica, considerando a intensidade da força aplicada igual a 60% do valor de ruptura, tiveram resultados próximos quando comparados aos valores obtidos nos ensaios experimentais.

A perda da linearidade dos corpos de prova ocorreu com valores próximos a 90% da força de ruptura, constatado pela curva de tensão x deformação obtidas pelos ensaios.

Figura 10 - Painéis de alvenarias ensaios por Capuzzo (2000)

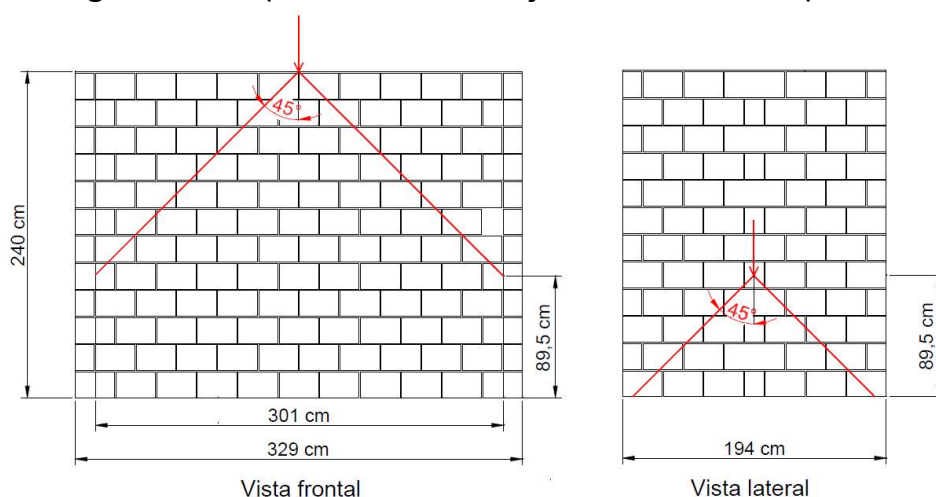


Fonte: Capuzzo (2000, p. 36)

Em relação ao módulo de elasticidade, o autor adotou, em sua modelagem, os valores obtidos para as unidades e argamassa em ensaios experimentais. Devido a este fator, o módulo de elasticidade terá um valor menor do que o obtido para a alvenaria segundo suas próprias considerações.

Após análise dos resultados teóricos e experimentais, o autor constatou que a modelagem numérica representa, de forma bem próxima, o comportamento da alvenaria em regime linear, com a aplicação de uma força de 60% da força de ruptura. Nessas condições, extrapolações numéricas foram realizadas para análise do comportamento da distribuição das forças verticais, variando as dimensões do painel em altura, comprimento da alma e flange do painel.

Figura 11 - Espalhamento de força concentrada em painéis



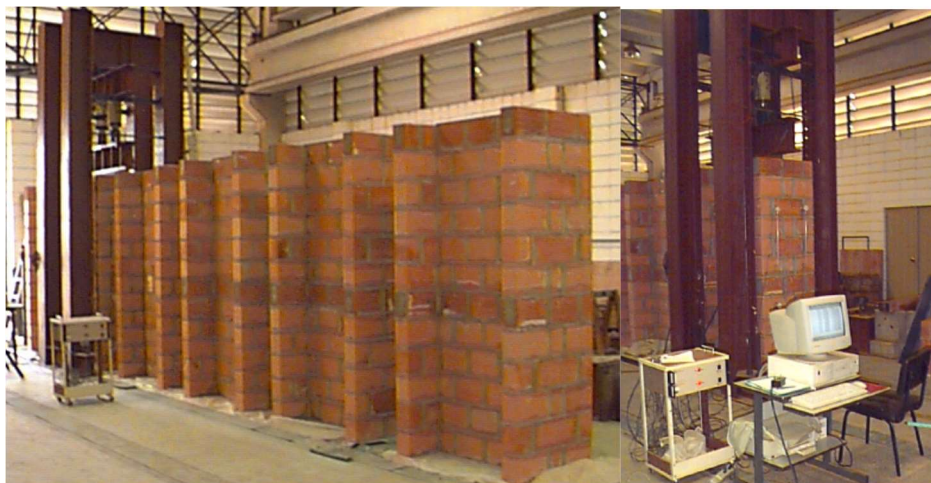
Fonte: Capuzzo Neto (2000).

Foi constatado que quanto maior a altura do painel, maior é a uniformização das forças segundo as simulações numéricas realizadas. Outra característica é o comprimento da alma do painel, quanto maior, menor será a uniformização nos flanges devido ao espraçamento das forças ocorrer em 45° graus.

Por fim, o autor conclui que o modelo numérico teve uma boa representatividade do painel para a distribuição de forças verticais. As interfaces de conexão entre as paredes foram amarradas e seguiram critérios de boa execução para uma boa transferência de forças e resistência as solicitações cisalhantes. Outro

fator importante foi a extrapolação realizada, indicando que a taxa de interação entre as paredes é proporcional aos parâmetros de altura e comprimento em planta.

Figura 12 - Painéis para ruptura e esquema geral do ensaio



Fonte: Capuzzo Neto (2000).

2.3.1.3 Estudo da interação de forças com blocos de concreto

Mauricio (2005) efetuou um estudo teórico e experimental do comportamento das ligações diretas entre paredes de bloco de concreto em escalas reais e reduzidas.

As relações de tensão x deformação obtidas através dos ensaios dos corpos de provas de paredes, nas duas escalas propostas, tiveram um comportamento próximo em tensões até 50% da ruptura.

Para intensidades de força acima de 50% dos valores de ruptura, o autor verificou uma perda de rigidez do modelo em escala real. Esse comportamento foi associado ao processo de cura, efetuado somente nos modelos em escala reduzida.

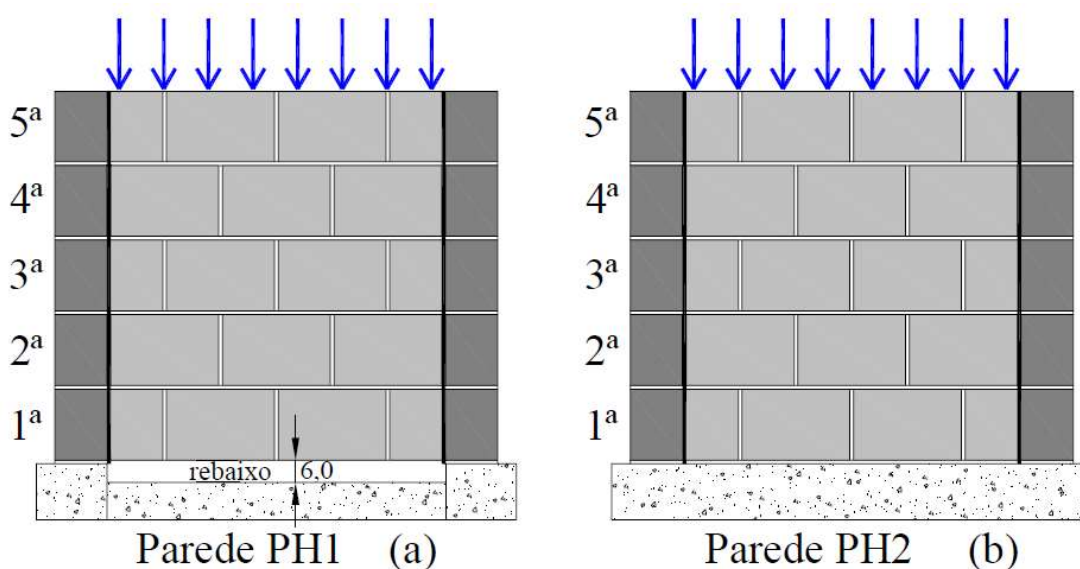
Na caracterização dos modelos, o autor chegou a relações indicando que a escala reduzida representa, de forma satisfatória, a alvenaria em escala real, permitindo o trabalho de forma direta com os modelos reduzidos para análise de resistência de paredes.

Outra consideração apresenta pelo autor foi a distribuição das forças verticais de paredes de forma H com e sem apoio na parede central, Figura 13.

A ruptura da parede PH1 foi caracterizada pelo cisalhamento na interface da ligação entre paredes e almas, valores esses relacionados com a resistência de cisalhamento dos blocos. Além disso, o autor verificou que, mesmo sem o apoio presente na parede central, foi possível verificar uma distribuição de tensões.

No caso das paredes apoiadas, a relação de deformação na base dos corpos de prova teve uma redução, consequência da distribuição de forças através dos blocos contrafiados.

Figura 13 - Tipos de paredes ensaiadas por Mauricio (2005) - análise de transferência de carga



Fonte: Mauricio (2005, p. 101)

Para a ruptura das paredes com formato H os resultados são indicados na Tabela 2-4.

Tabela 2-4 - Cargas de ruptura de painéis com formato H

Parede	Ruptura (kN)
Painel de parede simples	427,80 kN
PH1 (sem apoio na base)	243,33 kN
PH2 (com apoio na base)	510,00 kN

Fonte: Adaptado de Mauricio (2005)

O autor relaciona o aumento da força de ruptura entre o painel simples e o painel com abas totalmente apoiado devido a interação que ocorre, principalmente, nos blocos contrafiados da 3ª fiada. O aumento da força de foi próximo aos valores obtidos com os valores de ruptura de cisalhamento dos blocos, na ordem de 40 kN.

Na análise das deformações nas paredes apoiadas, a transferência das forças ocorreu com maior intensidade nos blocos de ligação entre a alma e os flanges nas primeiras fiadas. Nos blocos com ligação somente com argamassa, referente a 3ª e 4ª fiada, a diferença de deformação foi significativa, não sendo constatado a mesma eficiência quando os blocos são contrafiados.

Dentre as simulações numéricas realizadas, para comparação de resultados teóricos e experimentais, considerando a ruptura dos corpos de prova com a parede central apoiada, foram obtidos resultados mais próximos utilizando elementos finitos do tipo sólido no software SAP, com o módulo de deformação adotado com os resultados obtidos das unidades da alvenaria.

2.3.1.4 Estudo da interação de forças pela ligação de paredes

Moreira (2007, pg. 40) indica que o fenômeno de interação de paredes de alvenaria estrutural é bem caracterizado, essa afirmação é baseada em diversos autores citados em seu trabalho. Com objetivo de compreender o comportamento das ligações de paredes, o pesquisador efetuou a análise de três tipos de ligação com elementos em escala reduzida.

Embora as ligações efetuadas com amarração direta possuem um melhor desempenho para resistência ao cisalhamento, sua ruptura é frágil, ao contrário de amarrações indiretas efetuadas com telas ou grampos que possuem uma ruptura mais dúctil e menor desempenho.

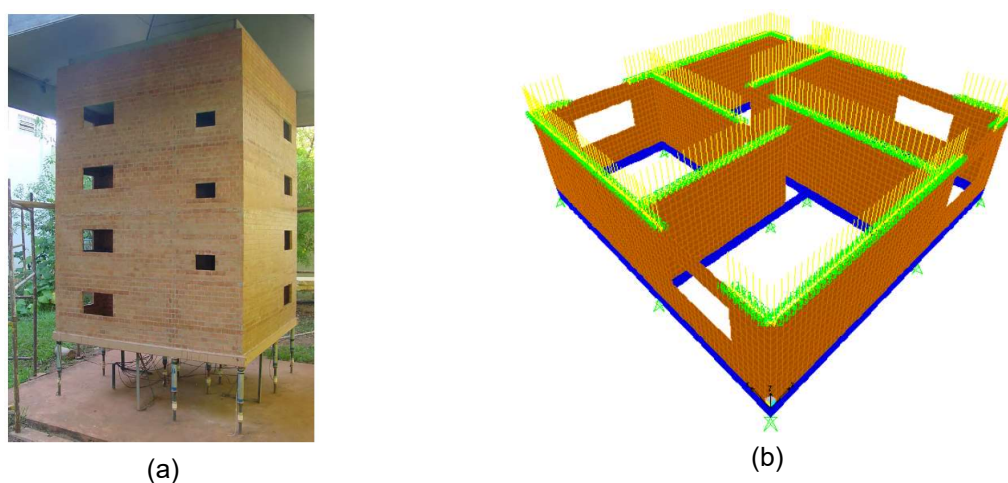
2.3.1.5 Estudo da interação em modelos de escala reduzida

A transferência de forças verticais foi objeto de estudo de Silva (2011). Em seu trabalho foi utilizado um modelo em escala reduzida (1:5) com blocos cerâmicos, além da comparação com resultado obtidos por simulação numérica.

O autor faz referência a vários trabalhos sobre o uso de modelos em escalas reduzidas sendo considerado como uma poderosa ferramenta para a análise do comportamento da alvenaria estrutural. No entanto, seu uso deve ser realizado de maneira criteriosa.

Foi proposto pelo autor um método para a criação dos grupos de parede considerando o princípio de Saint Venant. Essa proposta trouxe melhores resultados quando comparado aos resultados experimentais em alguns pontos de leitura da reação da viga baldrame no modelo em escala reduzida.

Figura 14 - Edifício em (a) em escala (b) e modelo numérico por Elementos Finitos



Fonte: Silva (2011)

Por fim, o autor conclui que a escolha das paredes para a determinação dos grupos é de grande importância para a obtenção de resultados mais satisfatórios. Além disso, cita que o modelo numérico gera resultados semelhantes com o modelo de grupos de paredes com interação.

2.3.2 Estudos com simulação numérica

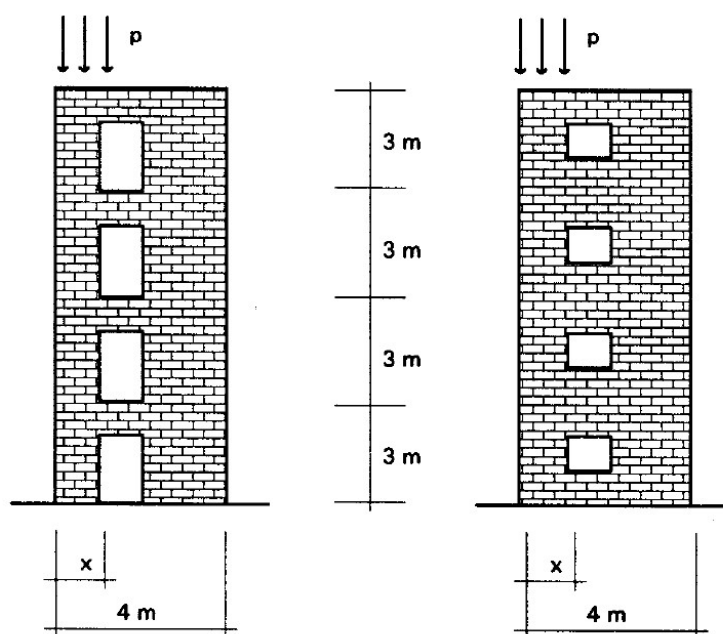
2.3.2.1 A distribuição de forças em painéis com aberturas e interação entre grupos

Corrêa e Ramalho (1994a) efetuaram um estudo sobre aberturas em painéis de alvenaria utilizando a modelagem numérica para análise do comportamento das ações em paredes e sua distribuição.

Após as simulações nos modelos discretizado em elementos finitos, não foi possível a obtenção de um resultado prático para a determinação da transferência de forças. Não obstante, os autores constataram que a uniformização de forças ocorre, principalmente, quanto maior a distância “x” da abertura, conforme ilustrado na Figura 15.

Por fim, os autores concluíram que o espraio das forças ocorrendo em um ângulo de 45° nos painéis com abertura resultam em valores conservadores, podendo este procedimento ser utilizado para considerar a distribuição das forças.

Figura 15 - Carregamento das paredes com aberturas de portas e janelas



Fonte: Corrêa e Ramalho (1994, p. 360)

Nesse trabalho, os autores propõem um procedimento de interação entre grupos de parede, o qual será descrito no item 2.2.1.3.

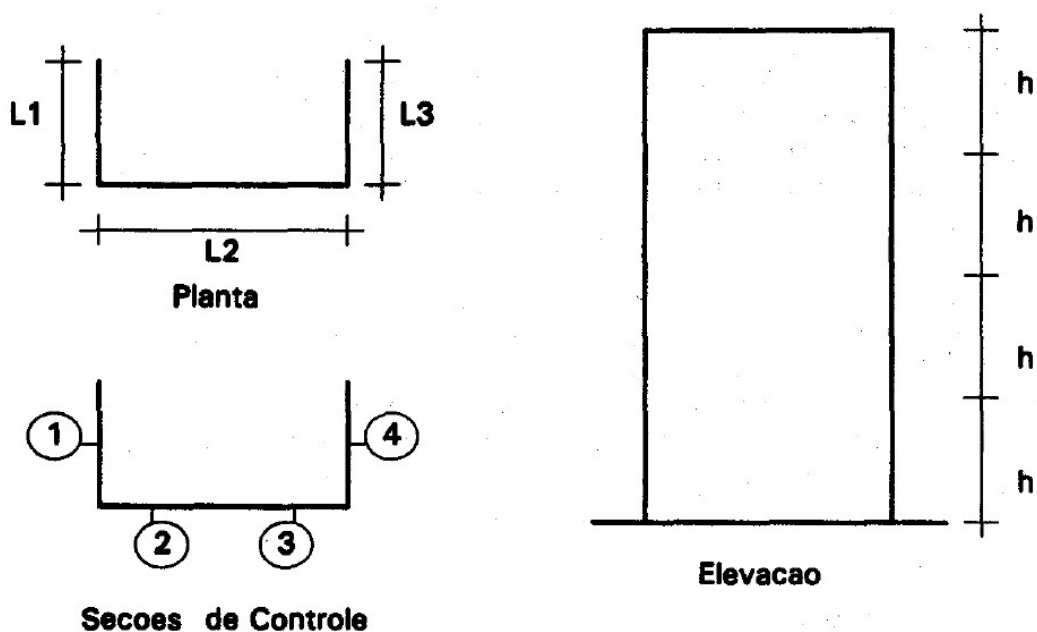
O estudo realizado por Corrêa e Ramalho (1994b) indica que a interação de paredes dentro de um grupo é bastante racional. Os autores citam a possibilidade de interação entre paredes de grupos distintos devido a presença de lintéis² e até mesmo

² Alvenaria de acabamento acima de aberturas de portas e janelas.

da laje. Apontam também a formação de macrogrupos, cuja definição consiste na união de grupos que interagem entre si.

Os autores também realizaram simulações numéricas com elementos de chapa, obtendo resultados que demonstram a distribuição de forças a 45° nas alvenarias como sendo satisfatória, mesmo considerando a ortogonalidade nas interfaces de união entre as paredes.

Figura 16 - Modelo de interseção de paredes



Fonte: Corrêa e Ramalho (1994b, p. 307)

As forças, com resultante igual a 168 kN, foram aplicadas na parede 01 de forma linear e de forma concentrada na sua extremidade livre.

Os resultados, com pequenas diferenças, informados pelos autores, são exibidos na Tabela 2-5.

Por fim, os pesquisadores propõem a metodologia de “Grupos de Paredes com Interação”, que será descrito no item 2.2.1.3.

Tabela 2-5 - Tensões Normais verticais nas Seções de Controle (kN/m²)

Nível	Caso 1				Caso 2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
9 m	154,29	119,55	71,87	54,37	176,92	105,92	66,56	51,60
6 m	112,65	105,79	95,36	86,20	113,24	108,19	94,47	84,13
3 m	102,97	102,00	99,07	96,00	102,00	102,00	98,90	95,54
0 m	100,97	101,14	99,92	97,99	101,17	101,23	98,86	97,77

Fonte: Adaptado de Corrêa e Ramalho (1994b, p. 308)

2.3.2.2 Proposta de distribuição de forças pelas aberturas de paredes

Parsekian e Franco (2002) propõem um método para a determinação da distribuição das forças verticais considerando parâmetros como o comprimento das paredes, o número de pavimentos, a existência de aberturas e a altura do pavimento. O procedimento considera o espraçamento das forças em um ângulo 45° para níveis inferiores.

O método proposto, que considera as características geométricas das paredes envolvidas para a distribuição de forças, como o comprimento, altura do pavimento e a presença de aberturas e suas dimensões, pode ser utilizado no conjunto de n paredes com interação. O procedimento de cálculo, considerando a Figura 17 e a uniformização da carga da parede 1 com a parede 2 são sugeridos pelos autores:

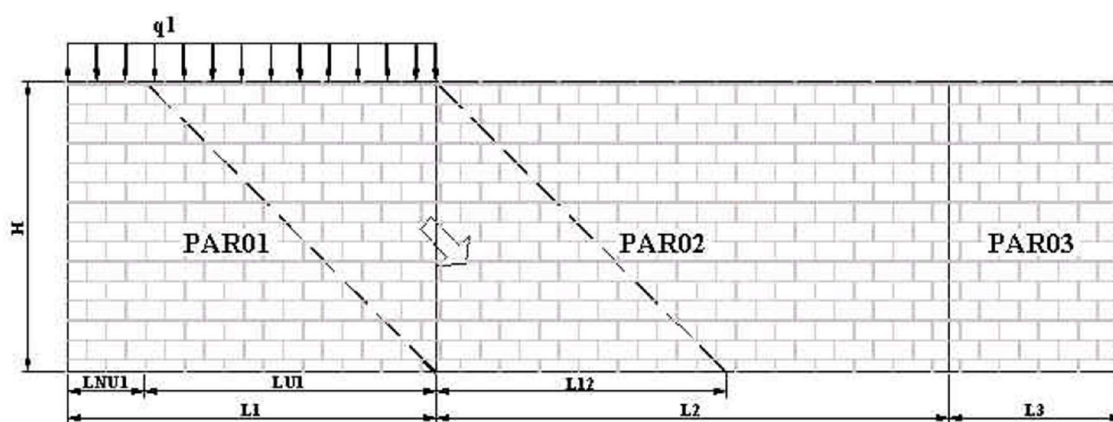
- Calcula-se o comprimento de influência (L_{12}) para a distribuição da carga aplicada para todas as paredes que com interação;

$$L_{12} \leq \begin{cases} L_1 \\ L_2 \\ H \end{cases}$$

- Determina-se o comprimento da carga q_1 a ser uniformizada entre as paredes: $LU_1 = L_{12}$;
- Determina-se o comprimento da carga que não é uniformizada entre as paredes: $LNU_1 = L_1 - LU_1$;
- A partir desses parâmetros, determina-se as cargas uniformizadas:

- Carga da parede 1 (PAR01) uniformizada:
 - $q_{1u} = q_1 \cdot LU_1 / (LU_1 + LU_2);$
- Carga da parede 01 (PAR01) a ser transmitida para parede 02 (PAR02):
 - $p_{12} = q_{1u} \cdot L_{12};$
- Carga da parede 01 (PAR01) que não é transmitida:
 - $p_{11} = q_1 \cdot LNU_1 + q_{1u} \cdot LU_1$

Figura 17 - Uniformização de cargas de paredes conforme método de Franco e Parsekian



Fonte: Franco e Parsekian (2002).

Após determinado a força distribuída da parede 01 (PAR01) para a parede 02 (PAR02), deve-se repetir o procedimento para as paredes que possuem interação e, ao final, somar as forças uniformizadas:

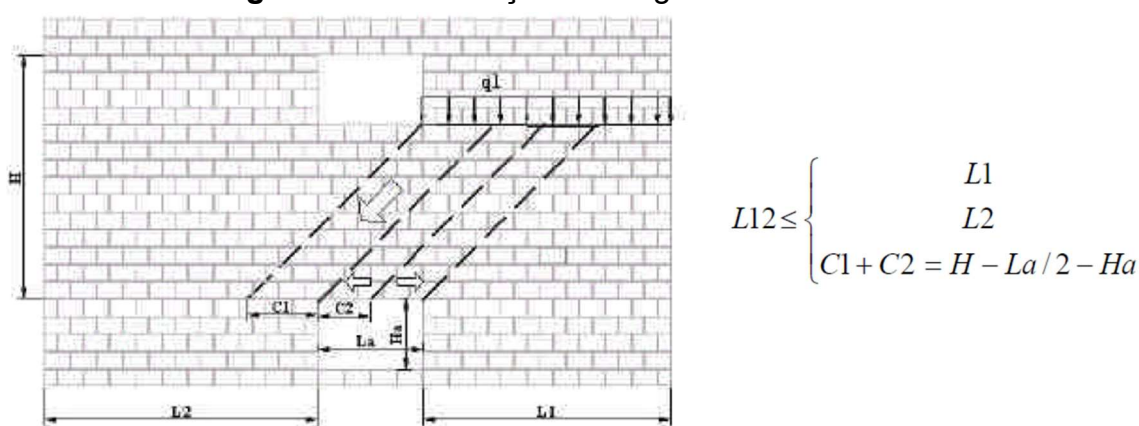
- PAR01: $q_1' = (p_{11} + p_{21}) / L_1;$
- PAR02: $q_2' = (p_{12} + p_{22} + p_{23}) / L_2;$
- PAR03: $q_3' = (p_{23} + p_{33}) / L_3;$

Outra característica considerada no método proposto é a distribuição de forças em paredes com aberturas. Nesse caso, dois novos parâmetros são adotados na determinação do comprimento equivalente (Figura 18), sendo eles:

- $C1 = H - La - Ha$;
- $C2 = La / 2$.

Para a análise da eficiência do modelo proposto, os autores fizeram uma comparação dos resultados gerados pelo método apresentado e por simulações numéricas. Enfim, em comparação aos resultados pelo método proposto e os resultados obtidos pelas simulações numéricas, os autores concluem que seus valores são próximos quando comparados a níveis isolados de pavimentos.

Figura 18 - Distribuição de cargas entre aberturas



Fonte: Franco e Parsekian (2002).

2.3.2.3 A modelagem numérica da interação de paredes nos estados linear e não linear

Peleteiro (2002) realizou em seu trabalho um levantamento bibliográfico sobre a utilização de diversos modelos de modelagem numérica para a simulação do comportamento da alvenaria estrutural, sendo necessário adotar uma modelagem que gere resultados de acordo com o objetivo da análise.

Para a análise de estruturas submetidas a baixos níveis de tensão, é possível a utilização de um modelo discreto com comportamento linear e material isotrópico.

Além disso, foi efetuado uma análise considerando o comportamento linear e não-linear para os corpos de prova adotado por Capuzzo (2000). Os valores obtidos, em relação a deformação foram próximos entre os dois regimes considerados. Foi

concluído pelo autor que o uso do modelo CONCRETE do software ABAQUS é eficiente quando utilizados blocos cerâmicos.

2.3.2.4 O uso de modelos numéricos simplificados para análise global da estrutura

Ramalho e Corrêa (2004) efetuaram um estudo teórico da interação de paredes e a distribuição das cargas, no qual considerou-se que a resistência ao cisalhamento na interface de união das paredes é suficiente para suportar as solicitações de forças de serviço.

A macromodelagem, ilustrada na Figura 19, foi realizada com a finalidade de prever a distribuição de forças verticais e tensões de cisalhamento nas interfaces nos diversos níveis da alvenaria. Esta macromodelagem, segundo os resultados obtidos, foram satisfatórias quando comparados com resultados obtidos em simulações com micromodelagens.

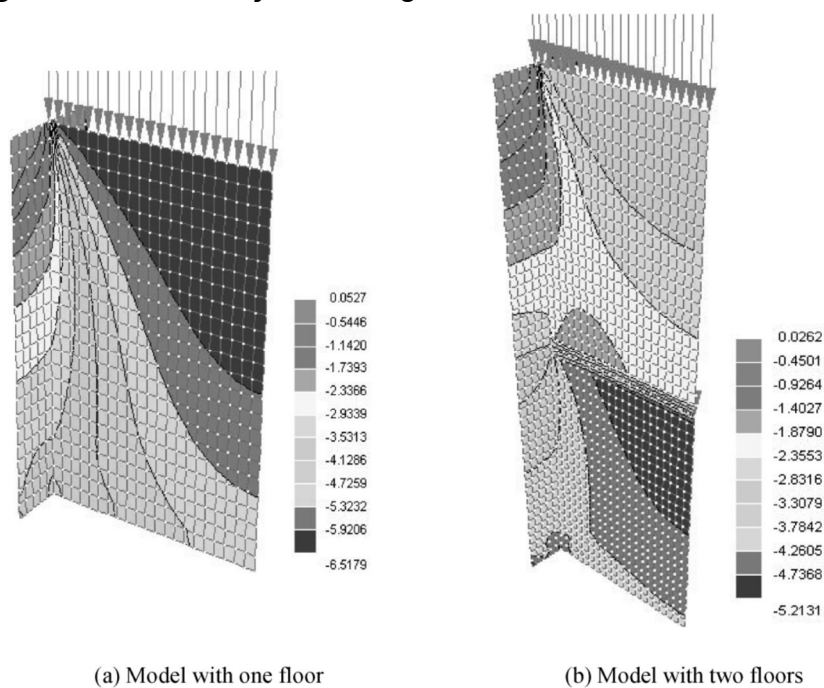
Além disso, os autores, nas modelagens de grupos isolados de paredes, consideraram a restrição dos deslocamentos horizontais nos níveis de piso, a qual possui como ideia básica a obtenção do comportamento da laje que trabalha como um diafragma rígido.

Para a verificação do comportamento da restrição dos deslocamentos nos níveis de laje, foram comparados resultados entre modelos considerando a restrição dos deslocamentos e considerando a discretização das lajes. Os resultados tiveram uma diferença de aproximadamente 1%, validando a ideia da restrição imposta aos deslocamentos horizontais.

Outra consideração apresentada pelos autores foi o princípio de homogeneização das cargas que é regido pelo processo de Saint Venant no caso de cargas concêntricas: a distância para homogeneização deve ser maior que o círculo que compreende o grupo de paredes. Já nos casos de cargas excêntricas, os autores indicam a necessidade de dois pisos para que este fenômeno ocorra.

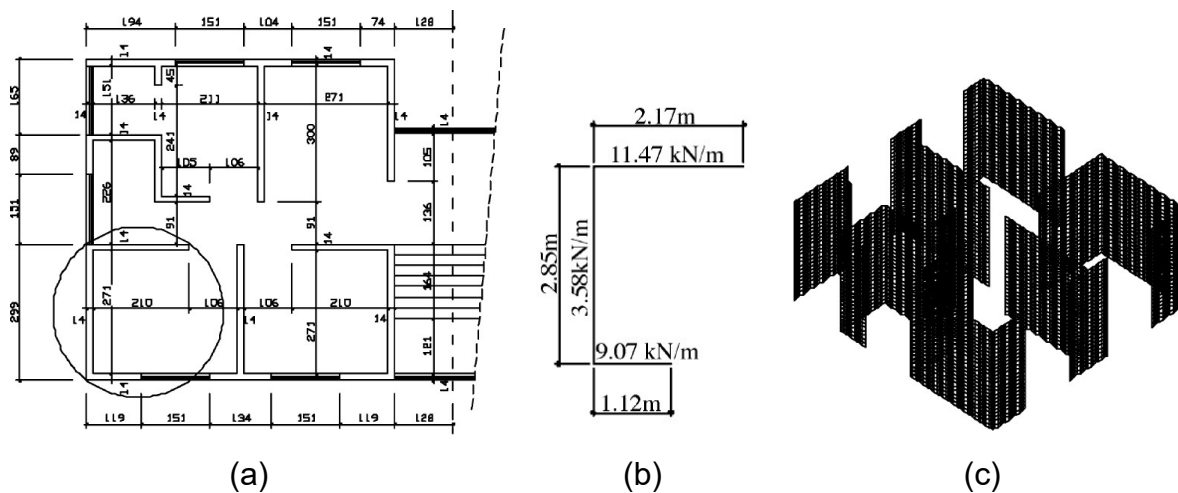
Por fim, os autores sugerem um método simplificado para obtenção dos comportamentos da distribuição das tensões de cisalhamentos baseados em uma parábola, possuindo resultados satisfatórios quando comparados aos resultados em modelos discretizado em elementos finitos utilizando a macromodelagem.

Figura 19 - Distribuição de carga vertical em níveis de alvenaria



Fonte: Corrêa e Ramalho (2003)

Figura 20 - Macro modelagem para análise de distribuição de forças verticais e tensões de cisalhamento



(a) Grupo proposto para modelagem simplificada, (b) dimensões do grupo e (c) modelagem com elementos finitos.

Fonte: Corrêa e Ramalho (2003)

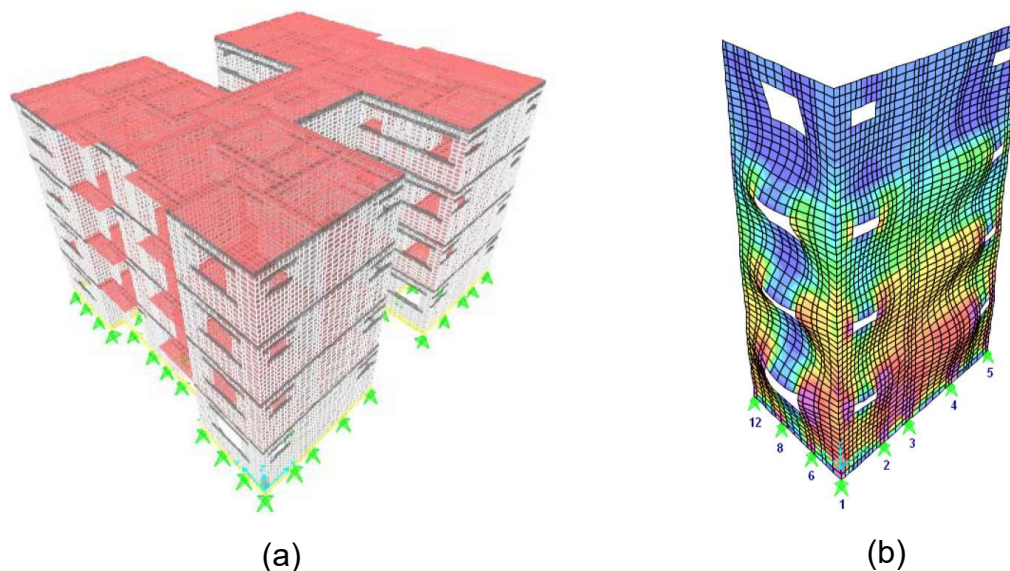
2.3.2.5 Análise dos resultados da simulação numérica em um edifício instrumentado

Andolfato (2006) estudou, em um edifício em escala real com instrumentos, a interação dos esforços entre paredes durante a fase de construção. Os dados obtidos nos experimentos foram base para comparações entre modelos numéricos na tentativa de prever o comportamento do edifício.

O autor explicita que o procedimento de distribuição de forças verticais não está bem definido devido a controvérsias, embasando seu trabalho para o estudo a ser realizado como contribuição para determinar o comportamento deste fenômeno.

Em seu estudo, o autor conclui que o modelo numérico com elementos finitos obteve grande concordância em vários pontos relacionado ao modelo experimental. Outra citação é que os esforços de tração devido a curvatura da parede não são considerados nos modelos numéricos simplificados e podem influenciar nos resultados finais.

Figura 21 - Modelagem numérica com elementos finitos (a) edifício e (b) interação de paredes



Fonte: Andolfato (2006).

2.3.3 A NBR 15961-1 (2011)

Para o dimensionamento da alvenaria estrutural segundo as orientações da NBR 15961-1:2011, algumas hipóteses básicas são consideradas. A primeira é a distribuição da carga. Esta dispersão ocorrerá em um ângulo de 45° , independente da carga ser concentrada ou distribuída na alvenaria.

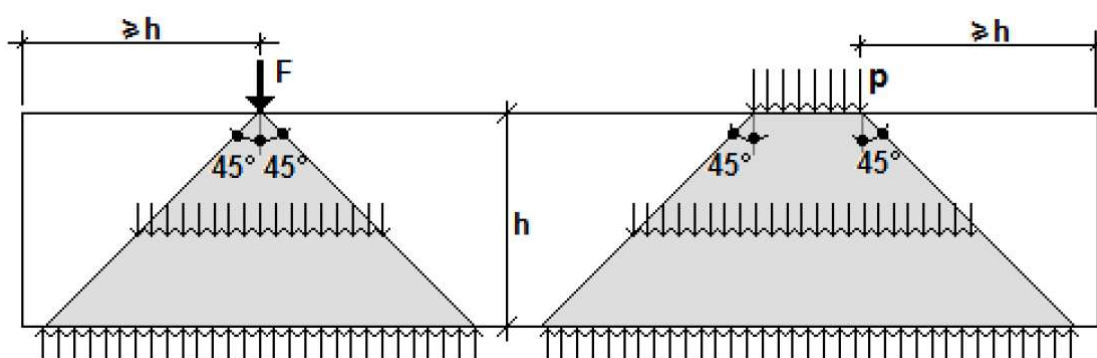
Ainda, segundo a NBR 15961-1:2011, a ocorrência da interação para forças verticais entre paredes deve ser considerada quando executada com amarração direta e essa interface possua resistência suficiente para a transmissão dessas. Outros tipos de ligação devem ser comprovados cientificamente segundo próprias orientações da NBR.

A resistência ao cisalhamento na interface entre as paredes pode ser adotada igual a 0,35 MPa (item 6.2.5.6 da NBR 15961-1:2011).

Além disso, a NBR trata da interação da alvenaria em cantos de bordas em ligações do tipo L, X e T, podendo ser considerado a interação quando executadas com amarração direta.

Para aberturas nas paredes, em conformidade com a norma deve ser desconsiderada a transferência das forças verticais, exceto quando houver comprovação experimental de sua eficiência.

Figura 22 - Distribuição de cargas verticais



Fonte: Camacho (2014)

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS PARA ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DAS FORÇAS VERTICAIS

Nesse capítulo são indicados os procedimentos realizados para definição das propriedades dos materiais e a arquitetura do modelo que será discretizado em elementos finitos.

As primeiras características definidas foram as propriedades dos materiais a serem empregados no modelo sugerido. Posteriormente, foi adotado as dimensões arquitetônicas do modelo a ser estudado. Essas dimensões foram baseadas em uma planta de um edifício real, no entanto, apenas alguns grupos foram considerados para elaboração do modelo a ser estudado.

Foram consideradas as situações de grupos de paredes com e sem interação, ocorrendo assim a discretização de 7 modelos que foram processados para a obtenção dos resultados de distribuição das forças verticais pela simulação numérica.

3.1 Características dos materiais e elementos

Segundo a ABNT NBR 15961-1:2011, os valores do módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν) são definidos de acordo com a Tabela 3-1.

A resistência a compressão simples (f_k) da alvenaria pode ser obtida com valores de equivalência. O valor de f_k equivale a 70% da resistência a compressão de prismas (f_{pk}) de dois blocos e 85% da resistência de pequenas paredes (f_{ppk}) de cinco fiadas. Caso o ensaio de prismas seja efetuado com argamassamento total, a obtenção da resistência com argamassamento parcial da alvenaria é obtido multiplicando o resultado por um coeficiente igual a 0,80, Tabela 3-2.

Tabela 3-1 - Propriedades Elásticas da Alvenaria

Propriedade	Valor	Valor Máximo
Módulo de deformação longitudinal (E)	$800.f_{pk}$	16 GPa
Coeficiente de Poisson (ν)	0,20	-

Fonte: ABNT (2011).

Tabela 3-2 - Relação entre a resistência de compressão de primas e paredes

Resistência à compressão das paredes (f_k)	Resistência à compressão com argamassamento total	
	Prima 2 blocos	Pequenas paredes
Argamassamento	Total	$0,7 \cdot f_{pk}$
	Parcial	$0,85 \cdot f_{ppk}$
		$0,80 \times 0,85 \cdot f_{ppk}$

Fonte: Adaptado de ABNT (2011).

De acordo com Ramalho e Corrêa (2003, pg. 79), a eficiência entre a resistência do prisma e a resistência do bloco pode ser estimada pela equação (4) possuindo valores comuns obtidos no Brasil de acordo com a Tabela 3-3.

$$\eta = \frac{f_p}{f_b} \quad (4)$$

Onde:

η : relação entre a resistência a compressão de prisma e bloco;

f_p : resistência de compressão do prisma;

f_b : resistência de compressão do bloco.

Tabela 3-3 - Intervalos da relação de resistência de prismas e blocos

Tipo do Bloco	Intervalo de eficiência
Cerâmico	0,3 a 0,6
Concreto	0,5 a 0,9

Fonte: Adaptado de Ramalho e Corrêa (2003, p. 79).

A escolha da argamassa a ser utilizada na alvenaria e nos ensaios de prismas devem possuir resistência a compressão com um valor máximo de 70% da resistência característica do bloco de acordo com a equação (5):

$$f_a = 0,7 \cdot f_{bk} \quad (5)$$

Onde:

f_a : resistência máxima de compressão da argamassa;

f_{bk} : resistência característica do bloco de concreto.

Para o cálculo do módulo de elasticidade, adotaram-se os valores de 5 MPa para as resistências a compressão dos blocos, seguindo os mesmos valores indicados por Andolfato (2006), já que seu modelo em escala real possuía a mesma resistência indicada dos blocos.

Adotando o coeficiente de eficiência entre o bloco e o concreto igual a 0,85 para a estimativa do valor de f_{pk} e utilizando o conceito indicado pela Tabela 3-1, foi obtido um valor do módulo de elasticidade igual a 3.400 MPa. No entanto, para as simulações numéricas o valor utilizado foi de 4.000 MPa.

O aumento do valor do módulo de elasticidade teve como premissa uma aproximação dos resultados obtidos por Andolfato (2006, pg. 36), que, nesse caso, o valor utilizado para as suas simulações foi de 4.500 MPa, visto que o modelo arquitetônico e a resistência do bloco também foi considerada de acordo com seu estudo.

O módulo de elasticidade do concreto e o peso próprio para as lajes maciças do modelo sugerido seguem as diretrizes da NBR 6118:2014, onde, o módulo de elasticidade é obtido através da equação (6). Os valores são indicados na Tabela 3-4.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{com } f_{ck} \text{ expresso em MPa}) \quad (6)$$

Onde:

E_{ci} : Módulo de elasticidade de concreto;

α_E : coeficiente em função do agregado graúdo do concreto;

f_{ck} : resistência característica do concreto.

A resistência a compressão do concreto adotado foi de 25 MPa e o coeficiente α_E igual a 1,0 (agregado granito). O valor de coeficiente de Poisson também foi adotado de acordo com as diretrizes da NBR. A espessura da laje foi adotada igual a 14 centímetros.

As características geométricas do modelo são indicadas na Tabela 3-5.

O peso próprio da alvenaria de blocos de concreto foi adotado de acordo com a NBR 15.961-1:2001, item 8.3.1.1.

Tabela 3-4 - Características dos materiais e elementos adotados

Material	Propriedade	Valor adotado
Bloco de Concreto	Modulação (NBR 6136)	M15
	Resistência a compressão (NBR 6136)	5 MPa
	Classe (NBR 6136)	B
	Designação (NBR 6136)	M15
Alvenaria	Módulo de elasticidade (E) (NBR 15.961-2:2011)	4.000 MPa
	Coeficiente de Poisson	0,20
	Peso Próprio	14 kN/m ³
Concreto (Laje)	Peso Próprio	25 kN/m ³
	Módulo de deformação longitudinal (E)	28.000 MPa
	Coeficiente de Poisson	0,20
Solicitações	Carga Acidental	3,00 kN/m ²

Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 3-5 - Características Geométricas do modelo

Elemento / Característica	Valor adotado
Altura do pé direito (pisos a pisos)	2,80 m
Espessura da Laje Maciça	0,14 m
Espessura da Alvenaria	0,14 m

Fonte: Dados do próprio autor.

3.2 Características dos modelos

3.2.1 Modelos com interação entre grupos (M.GPCI)

Para a análise dos resultados da distribuição das forças verticais com interação entre grupos de paredes, utilizou-se a planta de uma edificação buscando um modelo com características usuais de grupos em edifícios. Este modelo é baseado em parte de uma edificação existente e ilustrada por Andolfato (2006), Figura 23.

Os grupos analisados são indicados na Figura 24. A determinação da arquitetura do modelo teve de ser reduzida devido a algumas restrições do *software* Ansys Workbench em sua versão 17.2, por se tratar de uma licença acadêmica. Ainda que essas restrições limitem somente as características geométricas dos modelos além da quantidade de elementos da malha para discretização, o processamento,

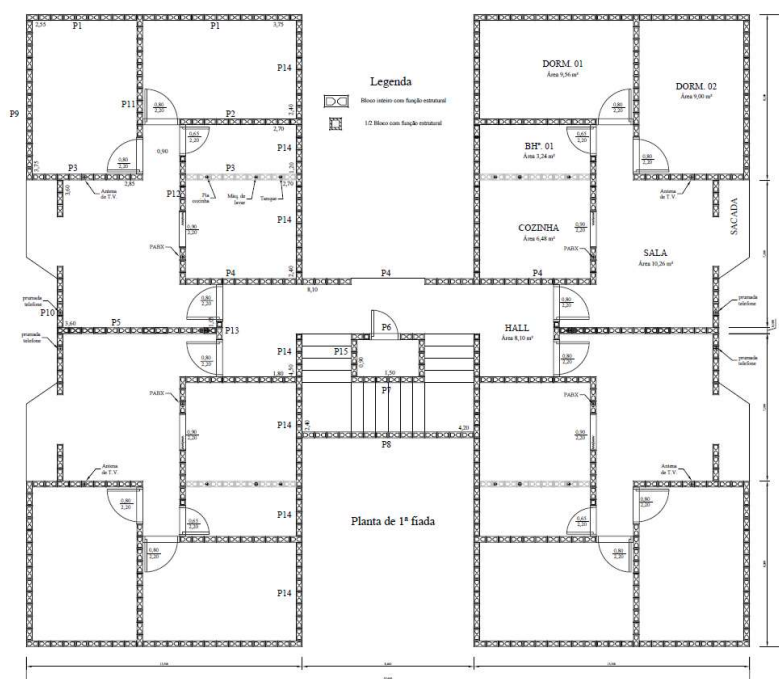
assim como os resultados de pós processamento, não possuem restrições segundo informações do fabricante.

A análise considera a transferência das forças verticais com valores obtidos em apoios no nível da fundação. A discretização de um único pavimento, indica a interação que ocorre somente no último nível do modelo. Para a discretização de dois pavimentos, os resultados indicam a interação que ocorreu no último e penúltimo pavimento do modelo.

Os apoios no nível da fundação foram definidos utilizando elemento de reação, onde as dimensões são menores que a altura do pavimento, ou seja, limitados ao comprimento de 2,80 metros. Outra consideração foram os nós de intersecção entre as paredes para a definição dos limites geométricos desses elementos.

A nomenclatura dos elementos de reação no nível de fundação é definida pelo grupo a que pertencem seguidos da letra “R” e sua numeração.

Figura 23 - Modelo de edificação adotado



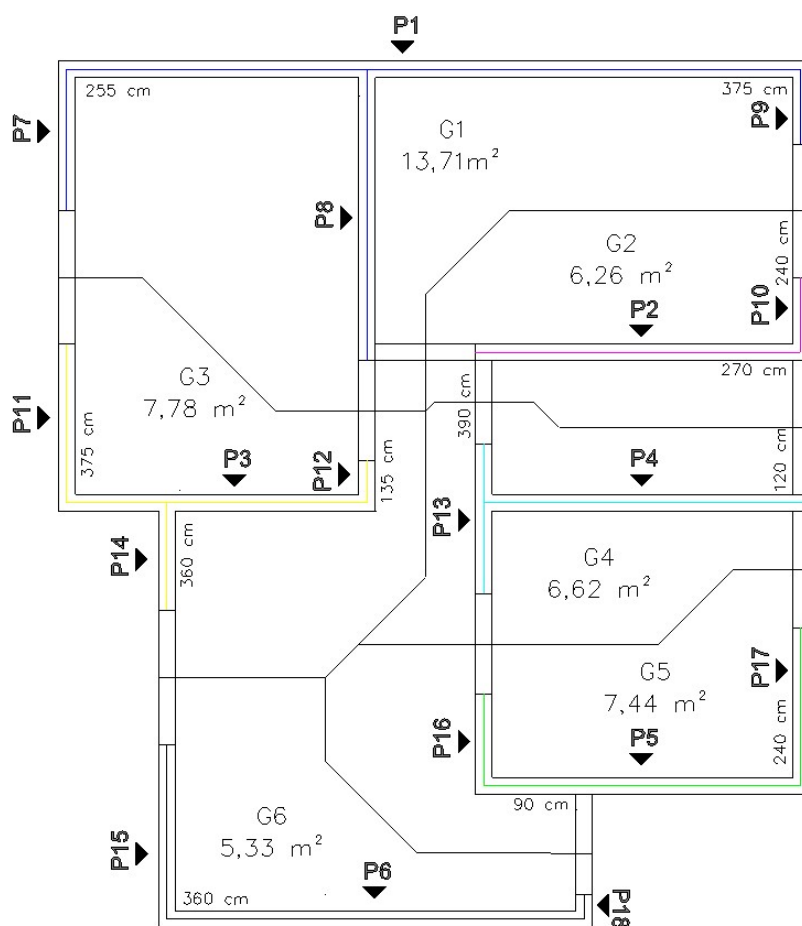
Fonte: Andolfato (2006, p. 17)

Às resultantes de forças verticais dos elementos de reação abaixo das aberturas de janelas são somadas as forças obtidas nas paredes adjacentes dos

respectivos grupos a qual pertencem, de acordo com a divisão de áreas ilustradas na Figura 24 e Figura 25. Nas aberturas de portas, não foram considerados apoios para determinação das reações. As somas realizadas para obtenção das forças resultantes nas paredes, em nível de fundação, de acordo com os valores obtidos nos elementos de reação, são indicadas na Tabela 3-6.

Um exemplo para ilustrar os resultados segundo a configuração das forças pode ser as reações finais da parede P7, que será obtida através da soma dos resultados dos elementos de reação G1.R1 e G1.R2.

Figura 24 - Modelo para análise de interação de grupos

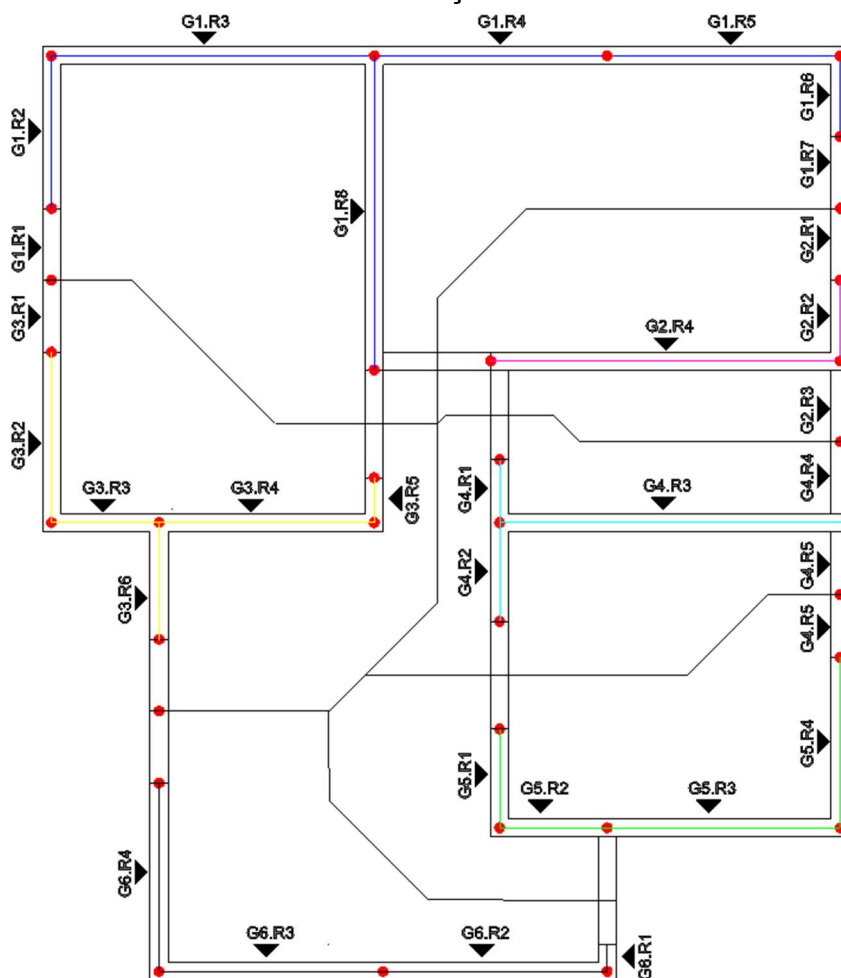


Fonte: Dados do próprio autor.

Outra característica adotada, para a determinação das forças a serem aplicadas nas paredes dos grupos de paredes sem interação, foi a distribuição dos carregamentos oriundos da laje e as reações que ocorrem em nível de respaldo, na

última laje do modelo discretizado. Para este caso, foram determinados elementos de reação seguindo o mesmo procedimento para o nível de fundação. A nomenclatura desses elementos é definida pelo grupo a que pertencem seguidos da letra “S” e sua numeração, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 25 - Nomenclatura das reações de apoio do modelo adotado para o nível de fundação



Fonte: Dados do próprio autor.

O aumento do número elementos de reação no nível de respaldo comparados ao nível de fundação ocorreu devido a presença dos linteis acima das aberturas de portas.

Tabela 3-6 Configuração das reações de apoio das paredes (nível fundação) e comprimentos

Grupo	Parede	Comp. (m)*	Apoio	Grupo	Parede	Comp. (m)*	Apoio
G1	P7	1,27	R1	G2	P10	0,675	R1
			R2				R2 + 0,5 R3
	P1a	2,70	R3		P2	2,85	0,5 . R3
	P1b	1,95	R4				R4
	P1c	1,95	R5	G4	P13	1,35	R1
	P9	0,675	R6				R2
			R7		P4	2,85	R3
G3	P8	2,55	R8				R4
			R5				
	P11	1,425	R1	G5	P16	0,825	R1
			R2		P5a	0,90	R2
	P3a	0,90	R3		P5b	1,95	R3
	P3b	1,80	R4		P17	1,425	R4
	P12	0,375	R5				R5
	P14	0,975	R6	* Os comprimentos das paredes referem-se ao eixo das alvenarias.			
G6	P18	0,23	R1				
	P6a	1,875	R2				
	P6b	1,875	R3				
	P15	1,58	R4				

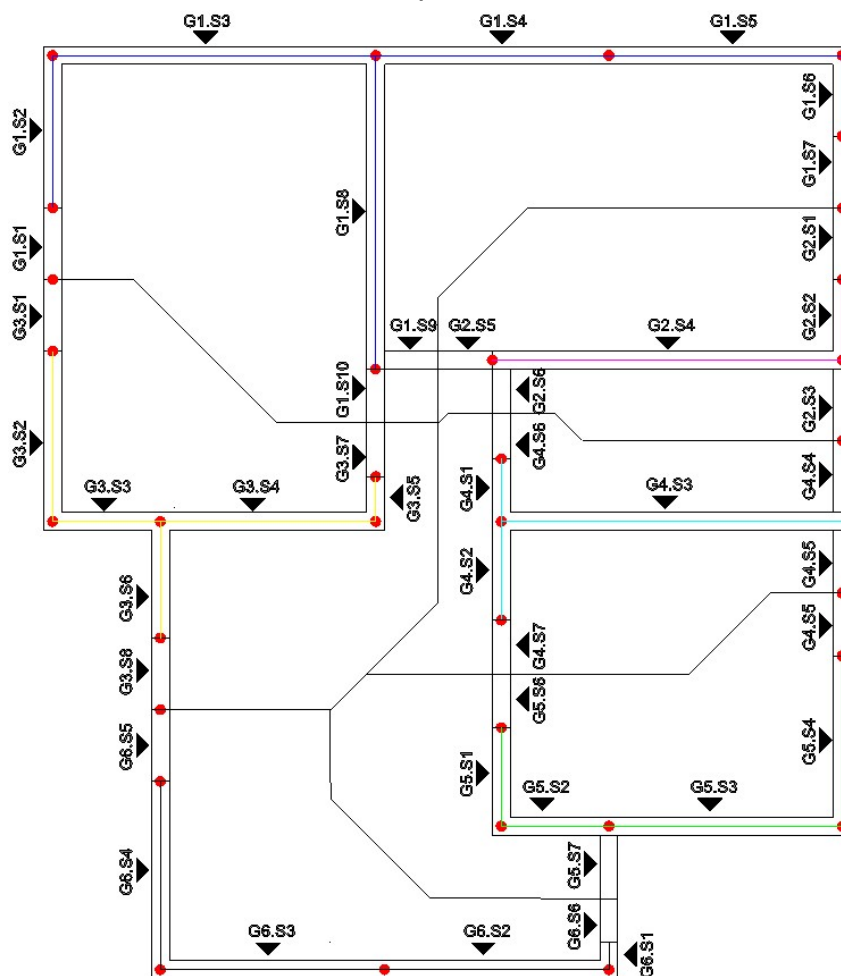
Fonte: Dados do próprio autor.

Para a determinação das forças a serem aplicadas nas paredes dos grupos isolados, determinadas pelas reações em nível de respaldo da última laje do modelo M.GPCI, foram considerados as configurações da Tabela 3-7.

O modelo tridimensional é ilustrado na Figura 27, no entanto este não é referente ao modelo numérico discretizado em elementos finitos, e sim ao modelo elaborado em *softwares* CAD, que posteriormente foram enviados ao Ansys Workbench por arquivos de extensão *.sat*.

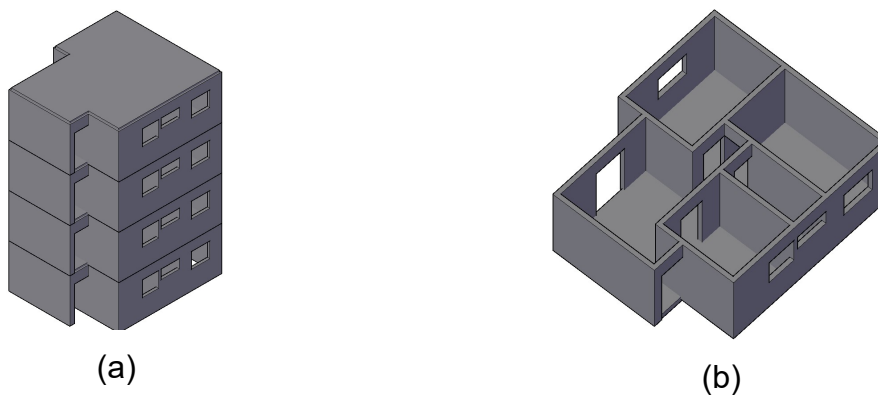
Os arquivos com extensão *.sat* possuem informações tridimensionais dos objetos possibilitando sua exportação ao programa para elaboração do modelo discretizado.

Figura 26 - Nomenclatura das reações de apoio do modelo adotado para o nível de respaldo



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 27 - Modelo tridimensional para estudo de transferência de cargas em (a) vista isométrica e (b) detalhe do pavimento tipo



Fonte: Dados do próprio autor.

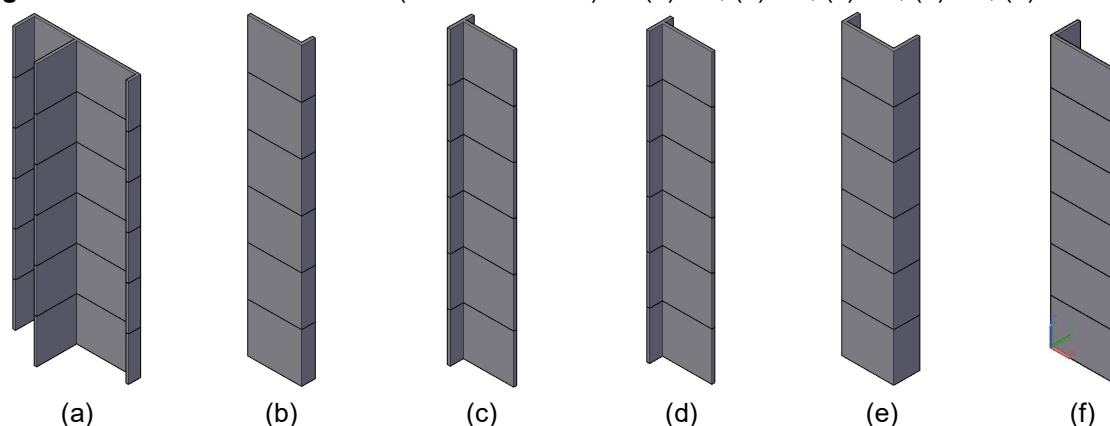
Tabela 3-7 - Configuração das reações de apoio das paredes (nível respaldo) e comprimentos

Grupo	Parede	Comp. (m)*	Apoio	Grupo	Parede	Comp. (m)*	Apoio	
G1	P7	1,27	S1	G2	P10	0,675	S1	
			S2				S2	
	P1a	2,70	S3				0,5 x S3	
	P1b	1,95	S4		0,5 x S3			
	P1c	1,95	S5		S4			
	P9	0,675	S6		S5			
			S7		S6			
	P8	2,55	S8	G4	P13	1,35	S1	
			S9				S2	
			S10		S3			
G3	P11	1,425	S1		G5	P16	0,825	S1
			S2					S6
	P3a	2,7	S3	P5a		0,90	S2	
	P3b		S4				=0,5.S7	
	P12	0,375	S5	P5b		1,95	S3	
			S7				=0,5.S7	
	P14	0,975	S6	P17		1,425	S4	
	S8	S5						
G6	P18	0,23	S1	* Os comprimentos das paredes referem-se ao eixo das alvenarias.				
			S6					
	P6a	1,875	S2					
	P6b	1,875	S3					
	P15	1,575	S4					
			S5					

Fonte: Dados do próprio autor.

3.2.2 Modelos de Grupos Isolados de Parede (M.GIP_X)

Os modelos adotados para grupos isolados de paredes foram no modelo M.GPCI. As forças aplicadas nas paredes para análise da distribuição seguem os valores definidos na Tabela 3-7. Em relação as reações de apoio no nível de fundação, esses valores são informados na Tabela 3-8.

Figura 28 Modelos tridimensionais (vista isométrica) de (a) G1, (b) G2, (c) G3, (d) G4, (e) G5 e (f) G6

Fonte: Dados do próprio autor.

Nesse caso, devido um número menor de elementos geométricos, foi possível analisar a interação de forças até o 6º pavimento. Os modelos tridimensionais são apresentados na Figura 28.

Tabela 3-8 Reações de apoio das paredes de grupos individuais (nível fundação) e comprimentos

Grupo	Parede	Comp. (m)*	Apoio	Grupo	Parede	Comp. (m)*	Apoio
G1	P7	1,27	R2	G2	P10	0,675	R2
	P1a	2,70	R3		P2	2,85	R4
	P1b	1,95	R4	G4	P13	1,35	R1
	P1c	1,95	R5		P4	2,85	R3
	P9	0,675	R6	G5	P16	0,825	R1
	P8	2,55	R8		P5a	0,90	R2
G3	P11	1,425	R2		P5b	1,95	R3
	P3a	0,90	R3		P17	1,425	R4
	P3b	1,80	R4	G6	P18	0,23	R1
	P12	0,375	R5		P6a	1,875	R2
	P14	0,975	R6		P6b	1,875	R3
* Os comprimentos das paredes referem-se ao eixo das alvenarias.					P15	1,58	R4

Fonte: Dados do próprio autor.

3.2.2.1 Características geométricas dos grupos individuais

Algumas características geométricas dos grupos são indicadas na Tabela 3-9 e ilustradas na Figura 32. Essas considerações são informadas com o objetivo de identificar o comportamento da interação das forças de acordo com as geometrias dos grupos.

Os centroides da resultante da carga, considerando as áreas de influências das lajes, indicada pela sigla CG, e que a mesma é totalmente uniformizada, foi obtido pela determinação do centro geométrico. Esse procedimento também foi realizado para as paredes, considerando a seção em planta e as áreas que ela representa, indicadas pela sigla CR, Figura 29.

A obtenção dos centroides, foi realizado com o intuito de prever o comportamento de distribuição das forças pela proposição de Shutterland (1969)³.

No procedimento proposto pelo autor citado no parágrafo anterior, admitia-se a distribuição linear das tensões normais nas paredes considerando o efeito de excentricidade da resultante em relação ao centroide da área do grupo de paredes (SILVA, 2011, pg. 56).

O raio da circunferência indicada na Tabela 3-9 tem origem no CG da área de aplicação de forças com comprimento para circunscrever todas as paredes do grupo e as dimensões das paredes referem-se ao eixo das mesmas.

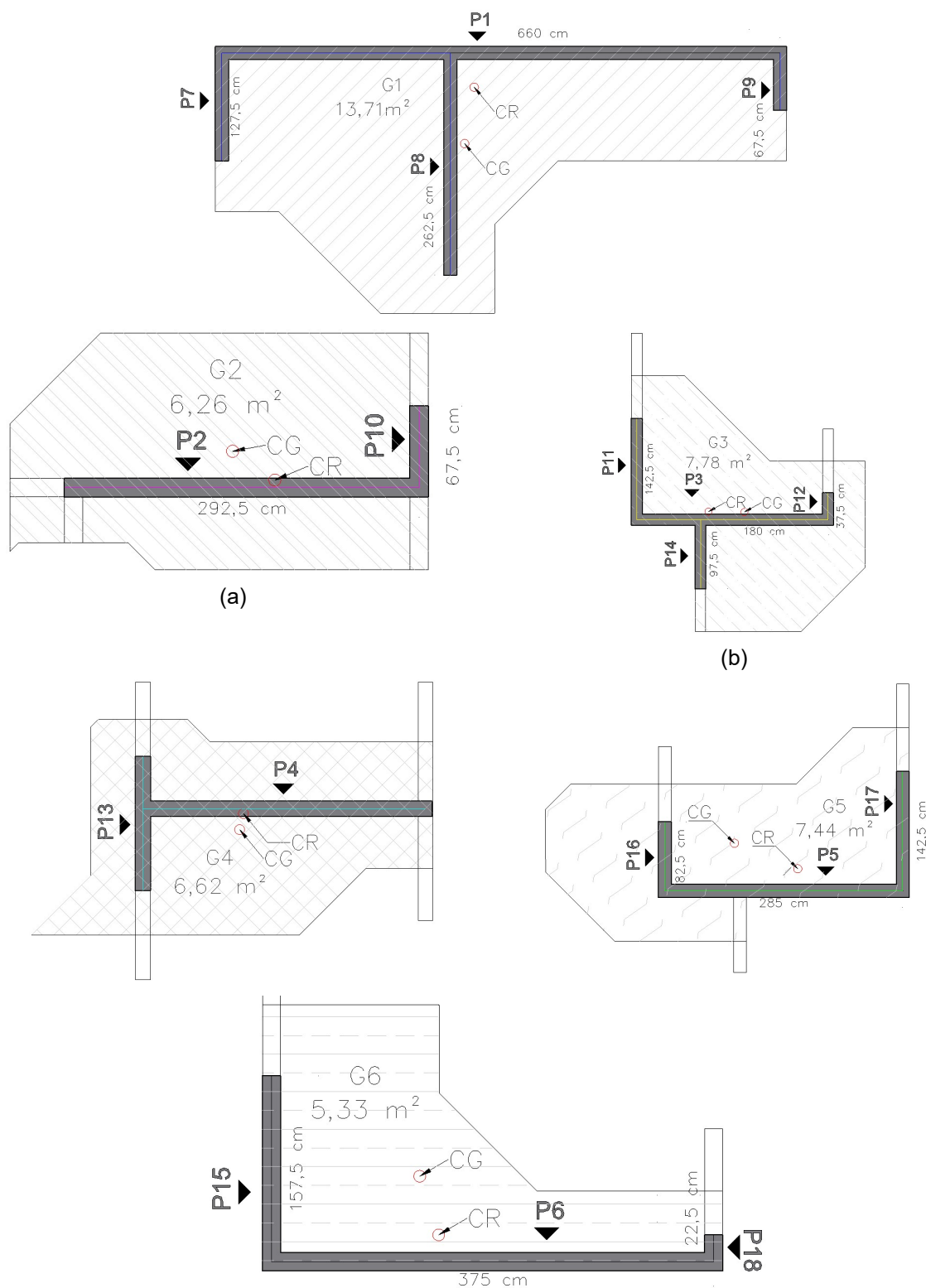
Tabela 3-9 - Características geométricas dos grupos de parede

Grupo	Coordenadas CG (cm)		Circunferência (m)		(A)	(B)	(A) / (B)
	X	Y	Raio	Área	Comp. Parede	Área Laje	
G1	204,512	665,582	3,97	49,51	11,090	13,71	0,81
G2	423,760	547,595	1,65	8,55	3,600	6,26	0,58
G3	69,406	393,108	2,06	13,33	5,475	7,78	0,70
G4	390,051	361,519	1,96	12,07	4,200	6,62	0,63
G5	375,994	184,364	2,25	15,90	5,100	7,44	0,68
G6	140,764	87,358	2,69	22,73	5,550	5,33	1,04

Fonte: Dados do próprio autor.

³ SHUTERLAND, R.J.M (1969). **Design Engineer's Approach Construction**. In: Designing, Engineering and Construction with Masonry Products. Houston, ed. F.B. Johnson, p. 375-385

Figura 29 - Centroides de carregamento e paredes (Grupo 01 a Grupo 06)



Fonte: Dados do próprio autor.

4 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

A alvenaria estrutural pode ser considerada como um material isotrópico quando discretizado em elementos finitos. Essa característica é baseada nas considerações de Andolfato (2006, pg. 53), pois, os elementos de cascas a serem utilizados possuem uma espessura muito pequena quando comparadas a outras duas, que nesse caso é a espessura das paredes. Essas paredes, podem, ainda segundo o autor, serem consideradas como elementos de superfície no estado plano de tensão, possibilitando a obtenção de resultados com bastante aproximação do comportamento da alvenaria e a distribuição das forças.

Foi utilizado o *software* Ansys Workbench em sua versão 17.2, com licença acadêmica, no entanto, segundo informações do fabricante, não há restrições quanto as suas funcionalidades ou processamento de informações.

As restrições existentes no software, devido a licença utilizada, são as dimensões dos modelos e a quantidade de elementos e nós da malha, limitando assim, as dimensões da malha e o número de pavimentos.

O conceito de macromodelagem foi utilizado para a discretização dos modelos propostos, permitindo a obtenção de resultados de distribuição das forças com menor esforço computacional, de acordo com os conceitos apresentados na revisão bibliográfica. O elemento utilizado foi o SHELL181 presente na biblioteca do software com maiores informações no item 4.3.

4.1 Considerações iniciais

O modelo M.GPCI refere-se ao grupo de paredes com interação, efetuado com a discretização das alvenaria e lajes maciças.

No caso dos modelos M.GIP_X, os grupos foram discretizado individualmente, sendo imposto a restrição de deslocamentos horizontais no plano da laje para a simulação do seu comportamento como um diafragma rígido.

A Tabela 4-1, indica o resumo dos modelos de estudo discretizado.

Tabela 4-1 - Identificação dos modelos numéricos

Modelo Numérico	Identificação	Nº Pavimentos considerados
M.GPCI	Modelo com interação de grupos.	4
M.GIP_X*	Modelo de grupos individuais.	6

* A sigla X identificará o grupo de aplicação de cargas ou o grupo individual analisado.

Fonte: O próprio autor.

4.2 Considerações sobre os modelos

As interfaces entre paredes, assim como a ligação de lajes com a alvenaria em pavimentos superiores e inferiores possuem total aderência e respeitam os deslocamentos e rotações impostas pelos esforços aplicados na estrutura. Esse comportamento foi definido utilizando a ligação do tipo *bonded* do *software* Ansys.

Para a base da alvenaria foram adotadas as restrições de apoios fixos, restringindo as translações e rotações nos eixos x, y e z.

O peso próprio da estrutura foi processado pelo modelo numérico para uma melhor aproximação do comportamento da estrutura com modelos reais. Esta opção foi habilitada considerando a força gravitacional através das ferramentas do *software*.

4.3 Características do elemento finito SHELL181

Segundo o próprio manual do Ansys, esse elemento é definido como um elemento de casca possuindo seis graus de liberdade em cada nó (translação nas direções x, y e z e rotação nos eixos x, y e z).

A recomendação do uso desse elemento, de acordo com manual, é para estruturas de casca de camadas finas ou moderadamente espessa. Além disso, seu processamento possui esquemas de integração completos ou reduzidos.

O resultado deste elemento é ilustrado na Figura 30.b, onde a tensão pode ser obtida nas três camadas indicadas (TOP, MID e BOT). No estudo foram consideradas as tensões da camada MID que se refere a membrana do modelo discretizado.

A discretização da malha pode ser efetuada com o elemento em forma quadricular ou triangular, esta segunda opção somente é recomendada para preenchimento da malha evitando o seu uso nas regiões de contato.

O comportamento e processamento do elemento pode ser realizada com a configuração de opções dos denominados por *KEYOPT*. Para esta configuração, deve-se considerar a posição numérica e o número atribuído para esta posição, obtendo o comportamento de acordo com a configuração adotada.

Como exemplo, se a posição 1 da configuração *KEYOPT* fosse utilizada com valor numérico igual a 1, o processamento iria considerar que o elemento somente efetuasse o processamento das solicitações como membrana. Caso essa configuração fosse ajustada com o valor igual a 2, o comportamento seria somente para análise das superfícies externas, desconsiderando os valores de membrana.

Figura 30 - Elemento SHELL181 (a) característica do elemento e (b) saída de dados

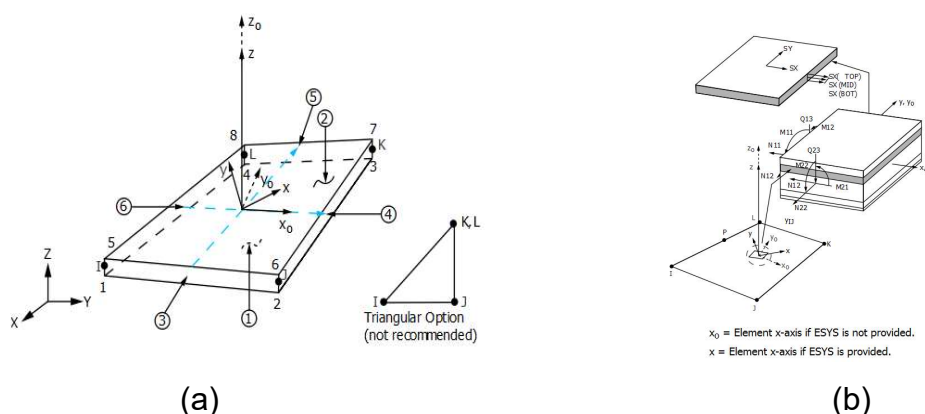


Tabela 4-2 Opções de configuração do elemento SHELL181

Opção	Comportamento
KEYOPT(1)	{0}: Comportamento de membrana e placa; {1}: Comportamento somente de membrana; {2}: Análise de tensões nas superfícies exteriores;
KEYOPT(3)	{0}: Integração reduzida com controle de modos espúrio; {2}: Integração sem redução e sem controle de modo espúrio com alta eficácia;
KEYOPT(5)	{0}: Não considerada a curvatura inicial (elementos planos); {1}: O elemento incorpora a curvatura inicial (conchas);
KEYOPT(8)	{0}: Armazena valores BOTTOM para todas as camadas; {1}: Armazena valores TOP e BOTTOM de todas as camadas; {2}: Armazena valores TOP, BOTTOM e MID para todas as camadas;
KEYOPT(9)	{0}: O elemento não possui valores de espessura diferentes; {1}: O elemento possui valores de espessuras diferentes podendo ser atribuídos por sub-rotinas;

Fonte: Adaptado de Ansys Element.

4.4 Modelagem de Grupos de Paredes com Interação (M.GPCI)

A discretização para modelagem numérica seguiu as definições baseadas no item 3.2. Os vértices dos elementos de reação, tanto em nível de respaldo da última laje como no nível de fundação, possuem as coordenadas indicadas na Tabela 4-3 e a nomenclatura definida na Figura 32.

Tabela 4-3 - Coordenadas dos vértices dos elementos de apoio (m)

Nó	X	Y	Nó	X	Y	Nó	X	Y
1	-0,825	3,825	14	1,875	5,175	27	3,825	0,30
2	-0,825	5,25	15	1,875	7,725	28	3,825	0,665
3	-0,825	5,85	16	1,95	0,075	29	3,825	7,725
4	-0,825	6,45	17	2,40	5,175	30	5,775	1,275
5	-0,825	7,725	18	2,925	1,275	31	5,775	2,70
6	0,075	0,075	19	2,925	2,10	32	5,775	3,225
7	0,075	1,65	20	2,925	2,55	33	5,775	3,825
8	0,075	2,25	21	2,925	3,00	34	5,775	4,50
9	0,075	2,85	22	2,925	3,825	35	5,775	5,175
10	0,075	3,825	23	2,925	4,35	36	5,775	5,85
11	1,875	3,825	24	2,925	4,725	37	5,775	6,45
12	1,875	4,20	25	2,925	5,175	38	5,775	7,05
13	1,875	4,65	26	3,825	0,075	39	5,775	7,725

Fonte: Dados do próprio autor.

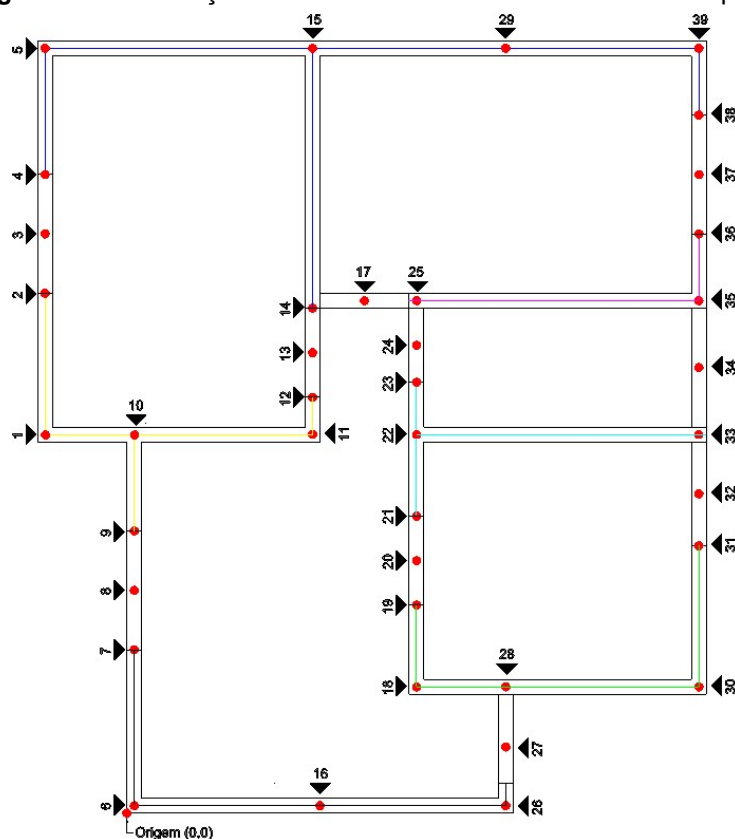
A discretização das paredes e lajes, realizadas com elementos finitos indicados no item 4.3, necessitaram da alteração da densidade da malha de acordo com o número de pavimentos considerados na simulação. Os elementos, que são quadriláteros e com possibilidade de preenchimento com elementos triangulares, possuem suas dimensões informadas na Tabela 4-4. Essa alteração foi necessária devido à restrição da licença do *software*.

Tabela 4-4 Dimensões dos elementos das malhas x nº pavimento

Nº de pavimentos	Dimensões adotadas dos lados dos elementos (m)	
	Paredes	Laje
1	0,10	0,10
2	0,15	0,15
3	0,20	0,15
4	0,25	0,25

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 32 Identificação dos vértices limites dos elementos de apoio.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 33 - Modelo numérico com interação de grupos de paredes com (a) malha discretizado e (b) carregamento da laje no quarto pavimento.



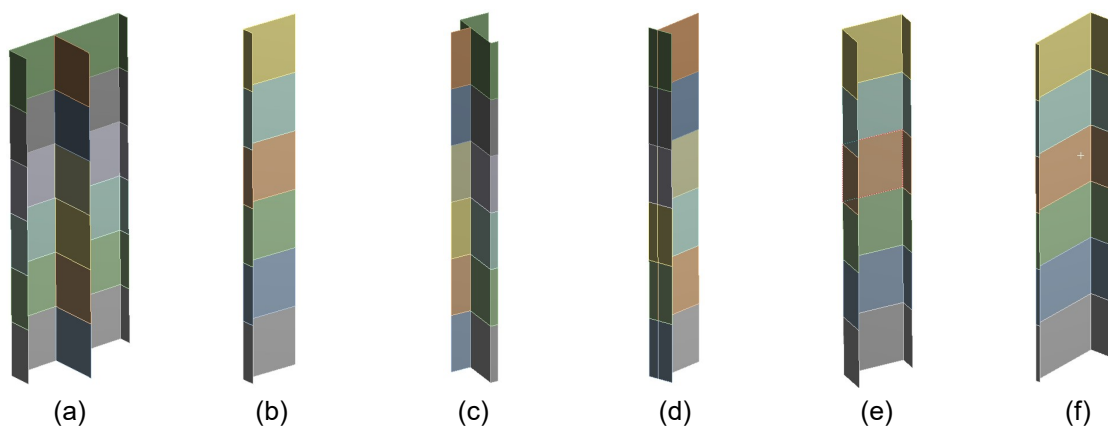
Fonte: Dados do próprio autor.

4.5 Modelagem de Grupos de Paredes Individuais (M.GIP_X)

Para a realização da discretização dos grupos individuais de paredes, foram respeitadas as coordenadas do modelo M.GPCI, discretizando os grupos isoladamente, conforme a Figura 34.

A densidade da malha de elementos foi constante para todas as simulações realizadas e a dimensão dos lados é igual a 0,10 metros.

Figura 34 - Modelos numéricos dos grupos de paredes individuais (a) G1, (b) G2, (c) G3, (d) G4, (e) G5.



Fonte: Dados do próprio autor.

5 RESULTADOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

5.1 Considerações Iniciais

O modelo M.GPCI foi processado considerando a intensidade das forças de peso próprio e carga accidental de acordo com a caracterização do modelo indicado na Tabela 3-4. Nesse contexto, serão apresentados os resultados obtidos para os modelos considerando as solicitações indicadas.

No caso dos modelos de grupos individuais, indicados pela sigla M.GIP_X, as forças adotadas nas paredes são referentes às forças obtidas pelo processamento e obtenção das solicitações em nível de respaldo no modelo M.GPCI. O procedimento para obtenção dessas cargas será indicado no capítulo 6.

5.2 Valores obtidos nas reações de apoio

Os modelos caracterizados indicam as resultantes considerando as forças determinadas para cada parede, onde os resultados sob as aberturas são somados as forças das paredes adjacentes para obtenção das solicitações finais, obedecendo a configuração indicada na Tabela 3-6.

5.3 Modelo de Grupos de Paredes com Interação (M.GPCI)

Os resultados obtidos são indicados na Tabela 5-1. Os valores são apresentados por grupo, parede e elemento de reação para uma melhor visualização. As forças obtidas, considerando a configuração das forças, serão indicadas em ilustrações específicas.

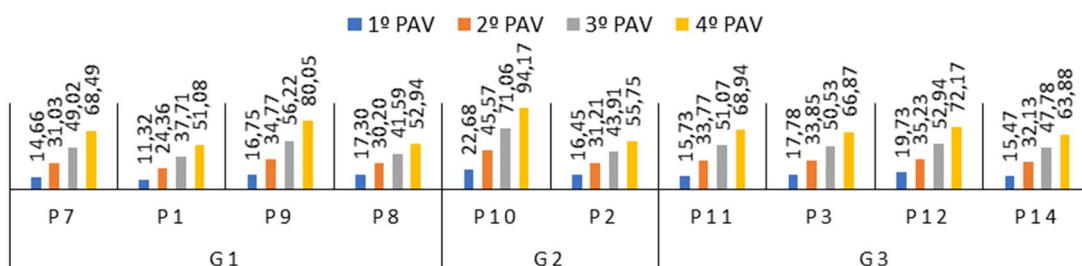
Tabela 5-1 - Valores de solicitações nas reações de apoio M.GPCI

Grupo	Parede	Reação	1º PAV		2º PAV		3º PAV		4º PAV	
			kN/m	MPa	kN/m	MPa	kN/m	MPa	kN/m	MPa
G1	P7	R1	7,01	0,050	15,03	0,107	24,54	0,175	35,47	0,253
		R2	11,35	0,081	23,93	0,171	37,43	0,267	51,74	0,370
	P1	R3	11,48	0,082	25,15	0,180	38,83	0,277	52,34	0,374
		R4	11,63	0,083	24,76	0,177	37,79	0,270	51,32	0,367
		R5	10,78	0,077	22,86	0,163	36,08	0,258	49,09	0,351
	P9	R6	10,87	0,078	22,60	0,161	36,22	0,259	52,05	0,372
		R7	6,61	0,047	13,69	0,098	22,50	0,161	31,49	0,225
	P8	R8	17,30	0,124	30,20	0,216	41,59	0,297	52,94	0,378
G2	P10	R1	7,09	0,051	14,71	0,105	23,53	0,168	32,31	0,231
		R2	10,78	0,077	21,78	0,156	33,38	0,238	44,22	0,316
	P2	R3	11,19	0,080	21,44	0,153	33,52	0,239	42,45	0,303
		R4	15,55	0,111	29,50	0,211	41,09	0,294	52,19	0,373
G3	P11	R1	7,15	0,051	15,93	0,114	25,48	0,182	35,92	0,257
		R2	12,72	0,091	27,06	0,193	40,34	0,288	53,81	0,384
	P3	R3	17,37	0,124	32,17	0,230	47,07	0,336	61,42	0,439
		R4	18,59	0,133	37,21	0,266	57,45	0,410	77,75	0,555
	P12	R5	19,73	0,141	35,23	0,252	52,94	0,378	72,17	0,515
	P14	R6	15,47	0,110	32,13	0,230	47,78	0,341	63,88	0,456
G4	P13	R1	20,68	0,148	37,98	0,271	56,28	0,402	74,75	0,534
		R2	17,56	0,125	34,97	0,250	50,20	0,359	66,33	0,474
	P4	R3	13,08	0,093	26,20	0,187	37,57	0,268	48,08	0,343
		R4	9,69	0,069	18,43	0,132	28,61	0,204	38,03	0,272
		R5	7,90	0,056	15,40	0,110	24,67	0,176	33,61	0,240
G5	P16	R1	21,20	0,151	37,09	0,265	52,11	0,372	67,43	0,482
	P5	R2	21,55	0,154	38,75	0,277	56,73	0,405	75,35	0,538
		R3	13,87	0,099	29,40	0,210	44,04	0,315	58,28	0,416
	P17	R4	10,55	0,075	23,87	0,171	37,48	0,268	51,56	0,368
		R5	7,81	0,056	16,45	0,117	27,37	0,196	39,52	0,282
G6	P18	R1	8,23	0,059	21,74	0,155	41,91	0,299	62,70	0,448
	P6	R2	8,73	0,062	19,58	0,140	32,34	0,231	45,02	0,322
		R3	11,76	0,084	24,29	0,173	37,23	0,266	50,69	0,362
	P15	R4	12,74	0,091	25,50	0,182	38,14	0,272	50,61	0,361

Fonte: Dados do próprio autor.

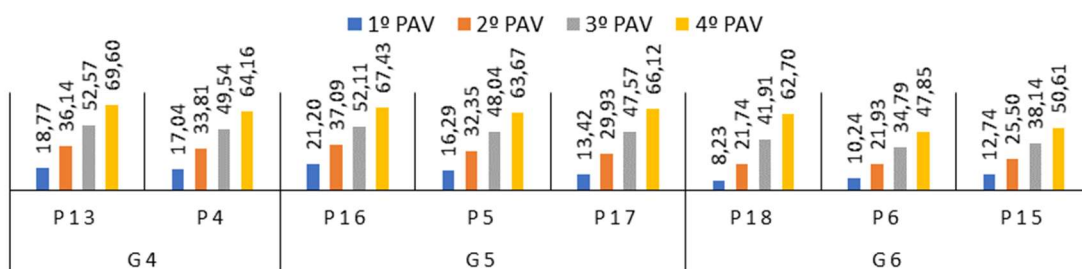
Os resultados das forças das paredes de acordo com o número de pavimentos considerados e a somatória das forças sob aberturas nas paredes adjacentes são ilustrados na Figura 35 e Figura 36. A Figura 37 indica os valores médios obtidos para cada grupo em função do número de pavimentos.

Figura 35 Cargas lineares em paredes (kN/m) com peso próprio e carga accidental (G1, G2 e G3)



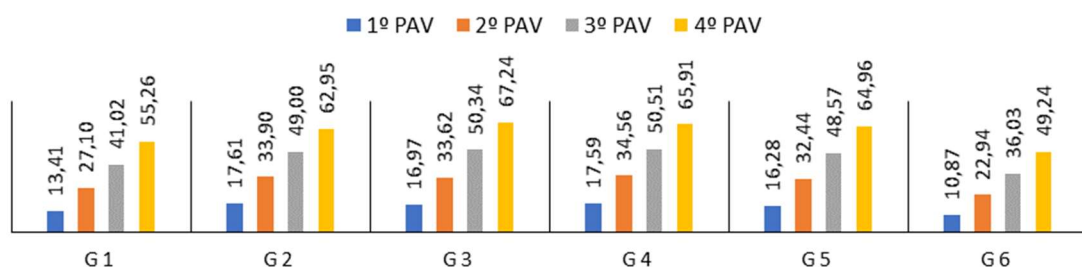
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 36 Cargas lineares em paredes (kN/m) com peso próprio e carga accidental (G4, G5 e G6)



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 37 Cargas lineares (kN/m) médias dos grupos



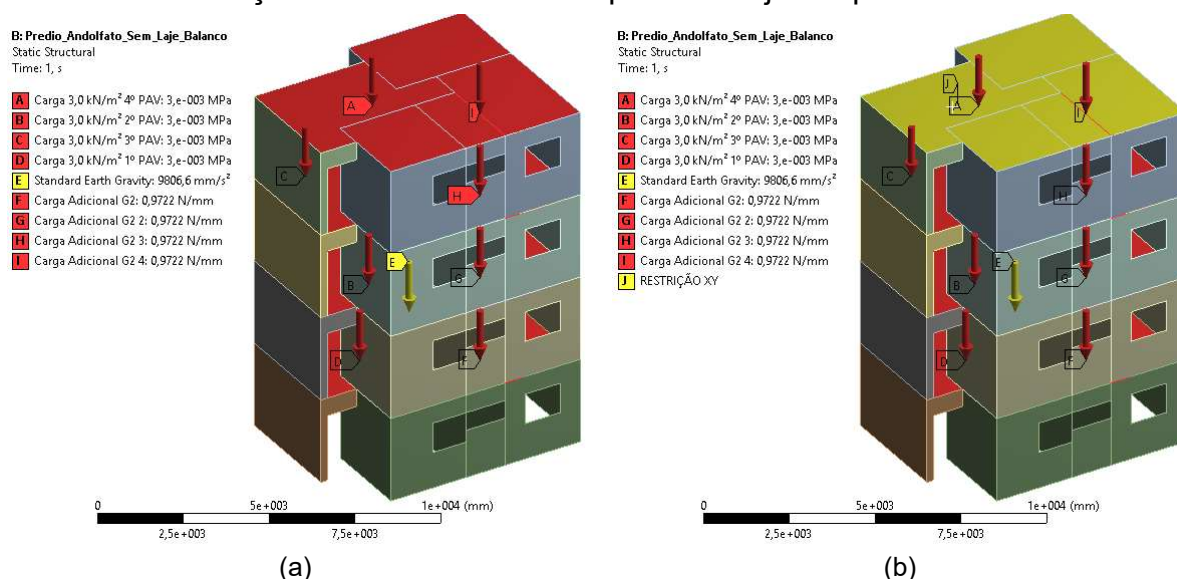
Fonte: Dados do próprio autor.

5.4 Modelo com interação entre grupos com carregamento adicional no Grupo 02 (M.GPCI)

O processamento no modelo com elementos finitos considerando as forças adicionais tem como objetivo prever o comportamento do espraimento com o conceito de superposição de efeitos.

A Figura 38 indica o procedimento de aplicação da força adicional no Grupo 2. Por questões de análise, foram adotadas duas situações: Na primeira delas, há a restrição dos deslocamentos de translação do plano da laje e na segunda situação não são impostas as restrições de deslocamento. As ações de peso próprio e carga accidental também foram considerados para a obtenção desses valores.

Figura 38 - Carga adicional aplicada no Grupo 02 (a) sem restrição e (b) com restrição de deslocamento no plano da laje – 4 pavimentos



Fonte: Dados do próprio autor.

O valor da força adicional foi definido com uma resultante próximo a 1kN/m, totalizando uma carga de 5 kN aplicada no grupo.

Considerando a superposição de efeitos, os resultados ilustrados da Figura 39 até a Figura 44 foram obtidos subtraindo os resultados com carga adicional no grupo dos resultados obtidos pelos carregamentos sem força adicional obtidos no item 5.3.

A Tabela 5-2 e a Tabela 5-3 indicam os valores obtidos das reações de apoio sem e com a restrição do deslocamento no plano da laje, respectivamente.

Tabela 5-2 - Valores de solicitações nas reações de apoio M.GPCI sem restrição de deslocamentos da laje do último pavimento com carga adicional no Grupo 02

Grupo	Parede	Reação	1º PAV		2º PAV		3º PAV		4º PAV	
			kN/m	MPa	kN/m	MPa	kN/m	MPa	kN/m	MPa
G1	P7	R1	6,78	0,048	14,50	0,104	23,67	0,169	34,44	0,246
		R2	11,11	0,079	23,45	0,167	36,70	0,262	51,02	0,364
		R3	11,61	0,083	25,51	0,182	39,33	0,281	53,03	0,379
	P1	R4	11,91	0,085	25,82	0,184	39,55	0,282	53,54	0,382
		R5	11,27	0,081	24,80	0,177	39,26	0,280	52,87	0,378
		R6	11,45	0,082	24,86	0,178	39,93	0,285	56,61	0,404
	P9	R7	6,73	0,048	14,45	0,103	24,06	0,172	33,51	0,239
	P8	R8	17,05	0,122	29,67	0,212	41,12	0,294	52,67	0,376
G2	P10	R1	7,43	0,053	15,80	0,113	25,30	0,181	34,44	0,246
		R2	11,36	0,081	23,34	0,167	35,73	0,255	46,92	0,335
	P2	R3	11,65	0,083	22,63	0,162	35,39	0,253	44,53	0,318
		R4	15,37	0,110	29,31	0,209	41,24	0,295	52,70	0,376
G3	P11	R1	7,06	0,050	15,48	0,111	24,58	0,176	34,75	0,248
		R2	12,29	0,088	25,56	0,183	38,00	0,271	51,08	0,365
	P3	R3	17,53	0,125	32,22	0,230	46,69	0,334	60,63	0,433
		R4	18,04	0,129	35,35	0,253	54,45	0,389	74,17	<u>0,530</u>
	P12	R5	20,93	0,150	37,70	0,269	55,42	0,396	74,15	0,530
	P14	R6	15,11	0,108	30,70	0,219	45,43	0,325	61,05	0,436
G4	P13	R1	20,66	0,148	37,75	0,270	55,91	0,399	74,48	0,532
		R2	16,49	0,118	32,46	0,232	47,21	0,337	63,46	0,453
		R3	13,15	0,094	26,40	0,189	37,89	0,271	48,53	0,347
	P4	R4	10,21	0,073	19,65	0,140	30,33	0,217	39,94	0,285
		R5	8,54	0,061	16,93	0,121	26,70	0,191	35,84	0,256
G5	P16	R1	20,25	0,145	34,61	0,247	48,89	0,349	63,97	0,457
	P5	R2	20,31	0,145	35,61	0,254	52,57	0,375	70,85	0,506
		R3	13,88	0,099	29,14	0,208	43,55	0,311	57,65	0,412
	P17	R4	11,19	0,080	25,51	0,182	39,42	0,282	53,52	0,382
		R5	8,56	0,061	18,50	0,132	30,03	0,215	42,45	0,303
G6	P18	R1	11,52	0,082	28,61	0,204	49,87	0,356	69,99	0,500
	P6	R2	9,49	0,068	21,28	0,152	34,14	0,244	46,33	0,331
		R3	11,11	0,079	22,49	0,161	34,58	0,247	47,45	0,339
	P15	R4	11,94	0,085	23,23	0,166	34,89	0,249	46,83	0,335

Fonte: Dados do próprio autor.

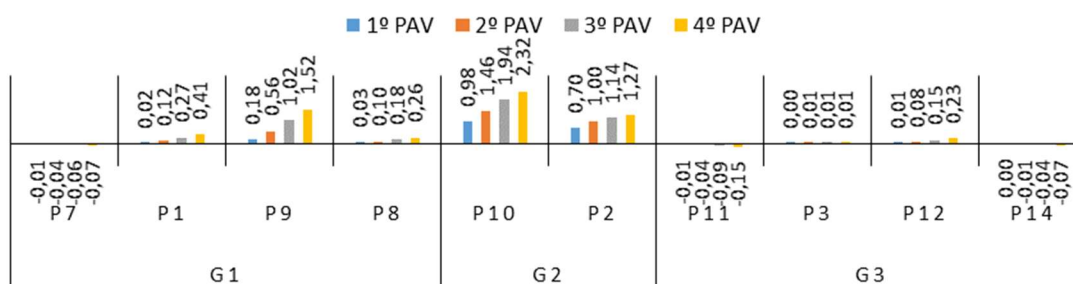
Tabela 5-3 - Valores de solicitações nas reações de apoio M.GPCI com restrição de deslocamentos da laje do último pavimento com carga adicional no Grupo 02

Grupo	Parede	Reação	1º PAV		2º PAV		3º PAV		4º PAV	
			kN/m	MPa	kN/m	MPa	kN/m	MPa	kN/m	MPa
G1	P7	R1	6,78	0,048	14,51	0,104	23,73	0,170	34,58	0,247
		R2	11,11	0,079	23,47	0,168	36,81	0,263	51,26	0,366
	P1	R3	11,61	0,083	25,56	0,183	39,48	0,282	53,29	0,381
		R4	11,93	0,085	25,94	0,185	39,77	0,284	53,88	0,385
		R5	11,32	0,081	25,00	0,179	39,59	0,283	53,30	0,381
	P9	R6	11,53	0,082	25,11	0,179	40,31	0,288	57,09	0,408
		R7	6,82	0,049	14,65	0,105	24,35	0,174	33,87	0,242
	P8	R8	17,09	0,122	29,78	0,213	41,33	0,295	52,98	0,378
G2	P10	R1	7,72	0,055	16,20	0,116	25,80	0,184	35,01	0,250
		R2	11,87	0,085	24,04	0,172	36,53	0,261	47,78	0,341
	P2	R3	12,07	0,086	23,22	0,166	36,12	0,258	45,28	0,323
		R4	16,03	0,115	30,26	0,216	42,29	0,302	53,82	0,384
G3	P11	R1	7,06	0,050	15,49	0,111	24,61	0,176	34,85	0,249
		R2	12,29	0,088	25,58	0,183	38,07	0,272	51,24	0,366
	P3	R3	17,53	0,125	32,24	0,230	46,76	0,334	60,77	0,434
		R4	18,04	0,129	35,38	0,253	54,56	0,390	74,40	<u>0,531</u>
	P12	R5	20,93	0,150	37,70	0,269	55,44	0,396	74,22	0,530
	P14	R6	15,11	0,108	30,72	0,219	45,51	0,325	61,22	0,437
G4	P13	R1	20,69	0,148	37,99	0,271	56,35	0,402	75,09	0,536
		R2	16,62	0,119	32,81	0,234	47,75	0,341	64,18	0,458
	P4	R3	13,23	0,094	26,66	0,190	38,28	0,273	49,00	0,350
		R4	10,39	0,074	19,96	0,143	30,74	0,220	40,41	0,289
		R5	8,60	0,061	17,07	0,122	26,92	0,192	36,10	0,258
G5	P16	R1	20,24	0,145	34,64	0,247	49,04	0,350	64,26	0,459
	P5	R2	20,30	0,145	35,66	0,255	52,76	0,377	71,21	0,509
		R3	13,87	0,099	29,17	0,208	43,69	0,312	57,90	0,414
	P17	R4	11,18	0,080	25,57	0,183	39,56	0,283	53,77	0,384
		R5	8,57	0,061	18,56	0,133	30,17	0,215	42,67	0,305
G6	P18	R1	11,52	0,082	28,59	0,204	49,81	0,356	69,92	0,499
	P6	R2	9,49	0,068	21,28	0,152	34,14	0,244	46,35	0,331
		R3	11,11	0,079	22,50	0,161	34,61	0,247	47,54	0,340
	P15	R4	11,94	0,085	23,24	0,166	34,92	0,249	46,90	0,335

Fonte: Dados do próprio autor.

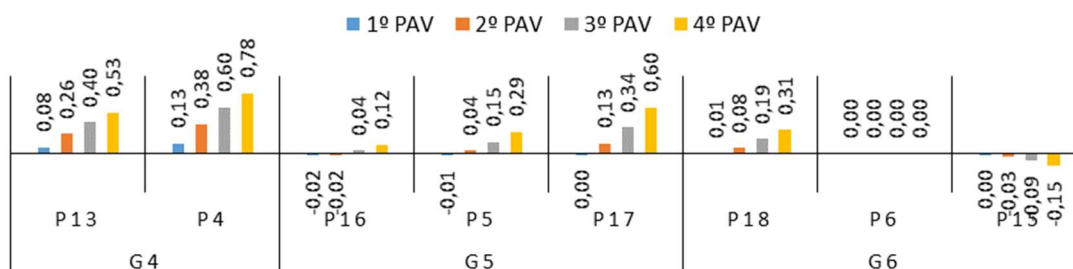
A seguir, ilustram-se os valores, considerando a superposição de efeitos para os grupos e paredes. As ilustrações da Figura 39 até a Figura 41 indicam os resultados obtidos sem restrições de deslocamentos no plano da laje.

Figura 39 - Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) nas paredes considerando a superposição de efeitos – sem restrição de deslocamentos na laje (G1, G2 e G3)



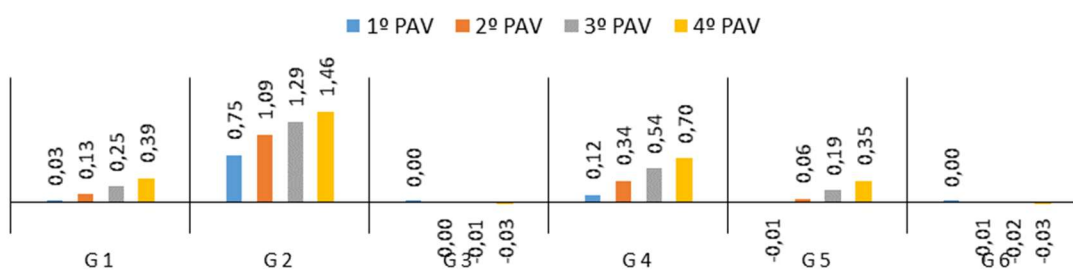
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 40 - Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) nas paredes considerando a superposição de efeitos – sem restrição de deslocamentos na laje (G4, G5 e G6)



Fonte: Dados do próprio autor.

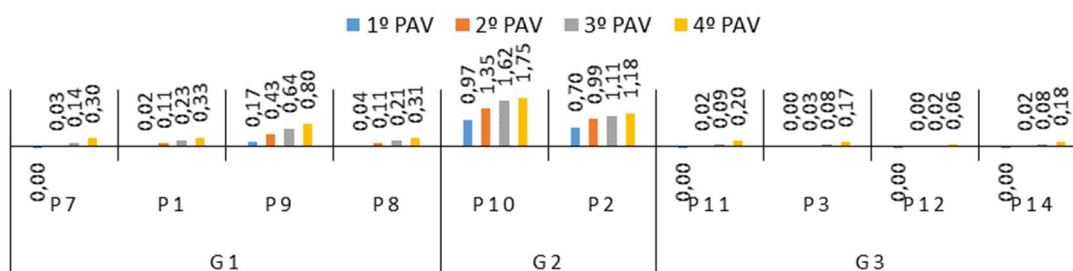
Figura 41 - Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) médias dos grupos considerando a superposição de efeitos – sem restrição de deslocamentos na laje



Fonte: O próprio autor.

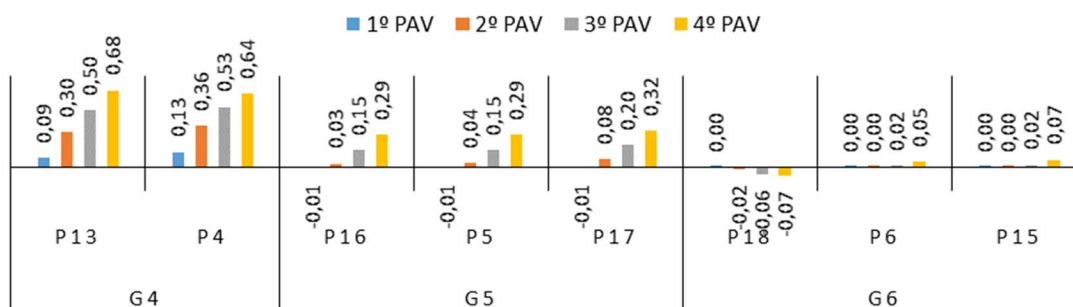
As ilustrações da Figura 42 até a Figura 44 indicam os resultados obtidos com restrições de deslocamentos no plano da laje.

Figura 42 - Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) nas paredes considerando a superposição de efeitos – com restrição de deslocamentos na laje (G1, G2 e G3)



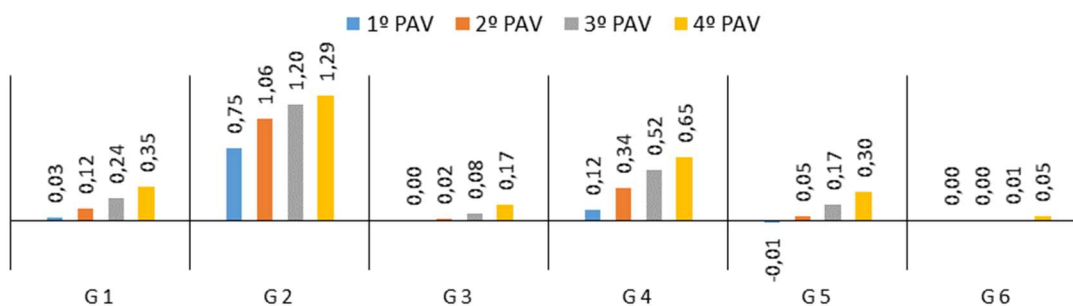
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 43 - Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) nas paredes considerando a superposição de efeitos – com restrição de deslocamentos na laje (G4, G5 e G6)



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 44 - Distribuição das cargas adicionais (kN/m) (Grupo 02) médias dos grupos considerando a superposição de efeitos – com restrição de deslocamentos na laje

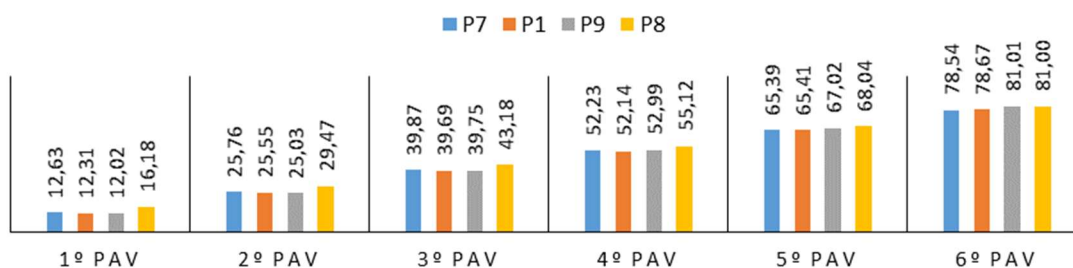


Fonte: Dados do próprio autor.

5.5 Modelos de grupos individuais de paredes (M.GIP_X)

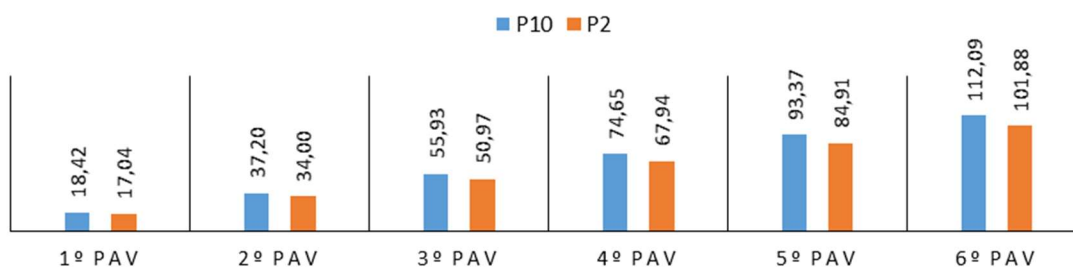
As paredes possuem os valores de carregamento apresentados na Tabela 6-1 (p. 85). Esses carregamentos foram aplicados no topo da parede em cada nível, e o peso próprio foi processado pelo programa. Os resultados obtidos são indicados nas figuras Figura 45 até a Figura 50 com as forças lineares resultantes.

Figura 45 - Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_1



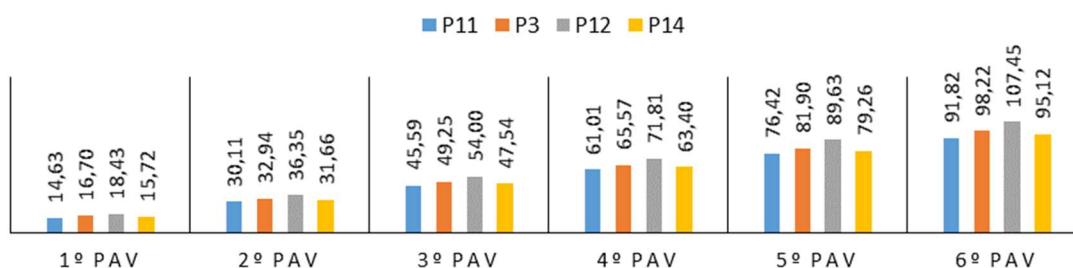
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 46 - Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_2

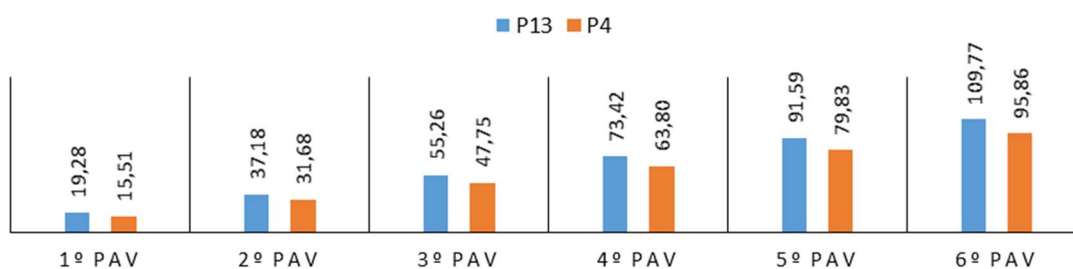


Fonte: Dados do próprio autor.

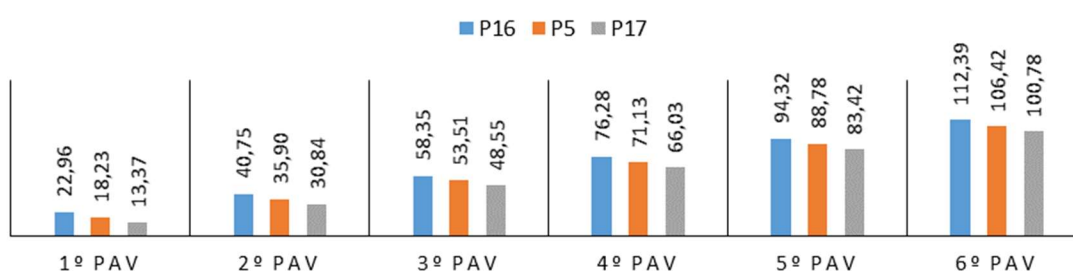
Figura 47 - Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_3



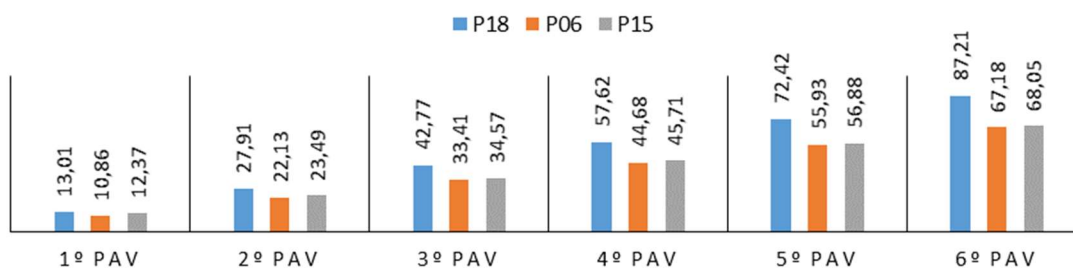
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 48 - Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_4

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 49 - Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_5

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 50 - Cargas lineares (kN/m) médias M.GIP_6

Fonte: Dados do próprio autor.

6 RESULTADOS PELOS MODELOS SIMPLIFICADOS

6.1 Considerações Iniciais

Este capítulo aborda o uso dos modelos simplificados para a obtenção das solicitações de forças verticais. Para análise da diferença das reações em nível de respaldo nos topos das paredes pelas ações provenientes da laje entre os processos considerados, foram determinados dois tipos de carregamentos para os modelos simplificados.

Tabela 6-1 - Cargas lineares resultantes pelos modelos propostos

GRUPO	Parede	Comprimento (m)	Hendry (1981)		MEF				
			Total (kN/m)	Grupo (kN/m)	Total (kN/m)	kN [A]*	kN [B]**	kN/m [C]***	Grupo (kN/m)
G1	P1	6,600	11,07	14,06	9,95	65,70	29,48	4,47	13,22
	P7	1,270	16,53		16,15	20,50	10,95	8,62	
	P8	2,550	19,07		19,12	48,75	33,52	13,15	
	P9	0,675	17,39		17,40	11,75	5,93	8,78	
G2	P2	2,925	17,99	17,69	17,46	51,06	32,82	11,22	17,30
	P10	0,675	15,82		16,62	11,22	6,45	9,56	
G3	P3	2,700	14,59	15,37	16,17	43,65	28,83	10,68	16,11
	P11	1,425	16,01		15,36	21,89	11,95	8,39	
	P12	0,375	22,91		24,02	9,01	6,33	16,89	
	P14	0,975	15,33		13,98	13,63	7,46	7,65	
G4	P4	2,850	16,09	17,06	14,79	42,15	22,09	7,75	16,72
	P13	1,350	18,32		20,80	28,08	19,54	14,47	
G5	P5	2,850	12,43	15,63	12,84	36,59	20,33	7,13	17,64
	P16	0,825	29,24		40,95	33,79	28,64	34,72	
	P17	1,425	14,23		13,73	19,57	9,63	6,76	
G6	P6	3,750	10,45	11,99	9,78	36,68	16,10	4,29	11,37
	P15	1,575	15,30		14,68	23,12	13,65	8,67	
	P18	0,225	14,59		14,77	3,32	1,47	6,54	

* [A] = [Peso Próprio da Parede + Peso Próprio da Laje + Ação da Carga Acidental]

** [B] = [Peso Próprio da Laje + Ação da Carga Acidental]

*** [C] = Peso próprio da Laje + Ação da Carga acidental distribuída linearmente

Fonte: Dados do próprio autor.

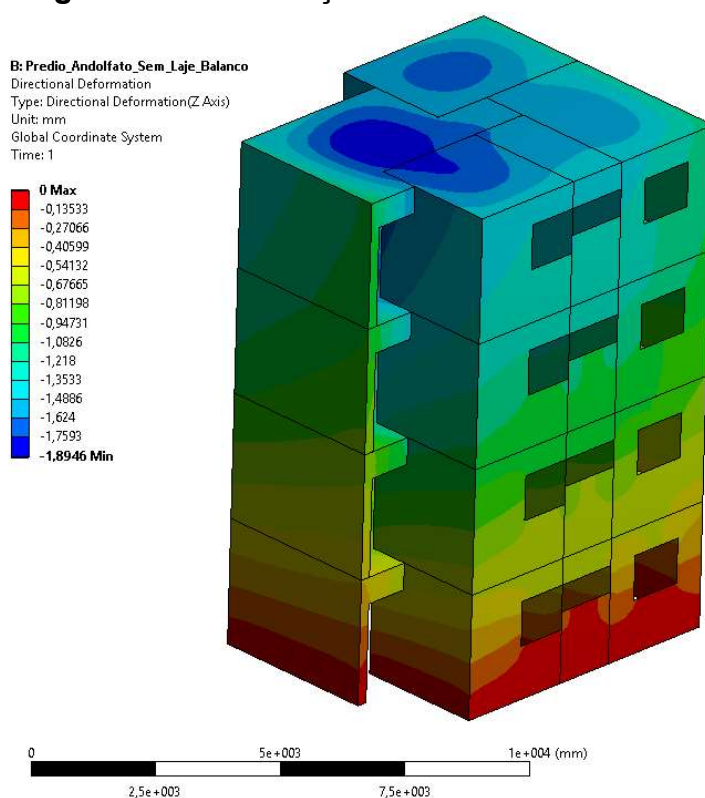
O primeiro carregamento é referente ao método de divisão de lajes proposto por Hendry (1981). É obtido por meio da soma do peso das paredes somado as forças da laje conforme abordado no item 6.2.1.

Para a determinação do carregamento 2, o modelo em elementos finitos foi processado para obtenção das solicitações em nível de respaldo, considerando o peso próprio da laje e a ação da carga acidental distribuída uniformemente. A Tabela 6-1 indica os valores das ações de solicitação para cada tipo de carregamento.

Devido à alta solicitação da parede P16 indicada pelo carregamento 2, a Figura 51 ilustra a deformação da estrutura no modelo numérico, sendo possível identificar os deslocamentos que ocorre na direção Z.

É importante lembrar que não foram adotados valores de majoração das cargas acidental ou permanentes para a determinação dos carregamentos.

Figura 51 - Deformação da estrutura no eixo Z



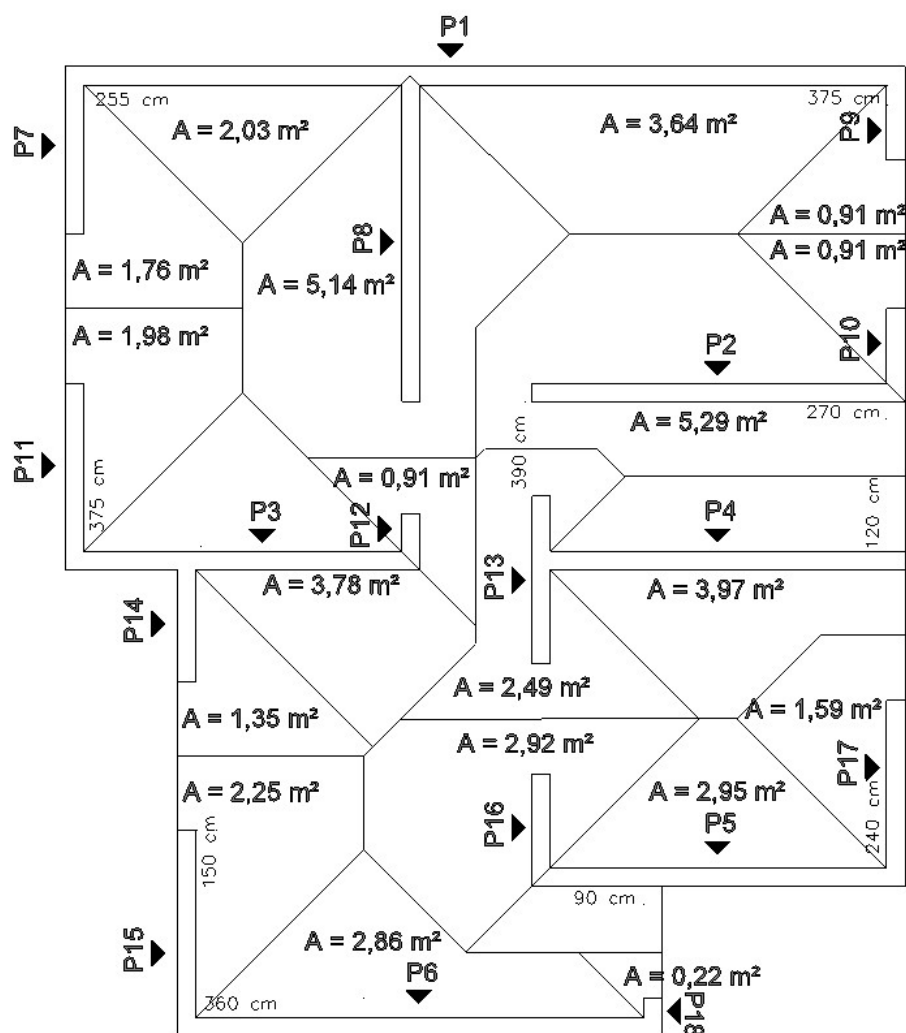
Fonte: Dados do próprio autor.

6.2 Definições de forças atuantes para o Carregamento 01

6.2.1 Paredes Isoladas (PI) – Carregamento 01

Esse procedimento não considera a interação entre paredes, ou seja, as forças devido ao peso próprio da parede e da laje, será resistido somente pela respectiva parede que é solicitada por essas ações determinadas pelo processo de divisão de lajes.

Figura 52 - Área de influência de paredes individuais.



Fonte: Dados do próprio autor.

Os valores de peso próprio das paredes, espessura das lajes e valores de cargas acidentais foram adotados de acordo com a caracterização indicada na Tabela 3-5 e Tabela 3-6

A Figura 52 aponta as áreas de influência do modelo adotado. Na Tabela 6-2 são indicados os valores de força linear resultante de um único pavimento, no nível do piso. Os pesos das alvenarias presentes sob e sobre as aberturas de portas e janela são análogas aos critérios de configuração de forças proposto na Tabela 3-7.

Tabela 6-2 - Carga linear das paredes por pavimento – PI (Carregamento 01)

	Comp. (m)	Carga Parede (kN)	Carga Adicional* (kN)	Carga Parede (kN)	Influência Laje (m ²)	Laje PP (kN)	AC (kN)	PP (kN)	PP + AC	kN/m	σ^{**} (MPa)
P1	6,60	36,22	0,00	36,22	5,67	19,85	17,01	56,07	73,08	11,07	0,316
P2	2,93	16,05	2,19	18,24	5,29	18,52	15,87	36,76	52,63	17,99	0,514
P3	2,70	14,82	0,00	14,82	3,78	13,23	11,34	28,05	39,39	14,59	0,417
P4	2,85	15,64	4,42	20,06	3,97	13,90	11,91	33,96	45,87	16,09	0,460
P5	2,85	15,64	0,62	16,26	2,95	10,33	8,85	26,58	35,43	12,43	0,355
P6	3,75	20,58	0,00	20,58	2,86	10,01	8,58	30,59	39,17	10,45	0,298
P7	1,27	6,97	2,59	9,56	1,76	6,16	5,28	15,72	21,00	16,53	0,472
P8	2,55	13,99	1,23	15,23	5,14	17,99	15,42	33,22	48,64	19,07	0,545
P9	0,68	3,70	2,12	5,82	0,91	3,19	2,73	9,01	11,74	17,39	0,497
P10	0,68	3,70	1,06	4,76	0,91	3,19	2,73	7,95	10,68	15,82	0,452
P11	1,43	7,82	2,12	9,94	1,98	6,93	5,94	16,87	22,81	16,01	0,457
P12	0,38	2,06	0,62	2,68	0,91	3,19	2,73	5,86	8,59	22,91	0,655
P13	1,35	7,41	1,13	8,54	2,49	8,72	7,47	17,26	24,73	18,32	0,523
P14	0,98	5,35	0,82	6,17	1,35	4,73	4,05	10,90	14,95	15,33	0,438
P15	1,58	8,64	0,82	9,47	2,25	7,88	6,75	17,34	24,09	15,30	0,437
P16	0,83	4,53	0,62	5,15	2,92	10,22	8,76	15,37	24,13	29,24	0,835
P17	1,43	7,82	2,12	9,94	1,59	5,57	4,77	15,50	20,27	14,23	0,406
P18	0,23	1,23	0,62	1,85	0,22	0,77	0,66	2,62	3,28	14,59	0,417

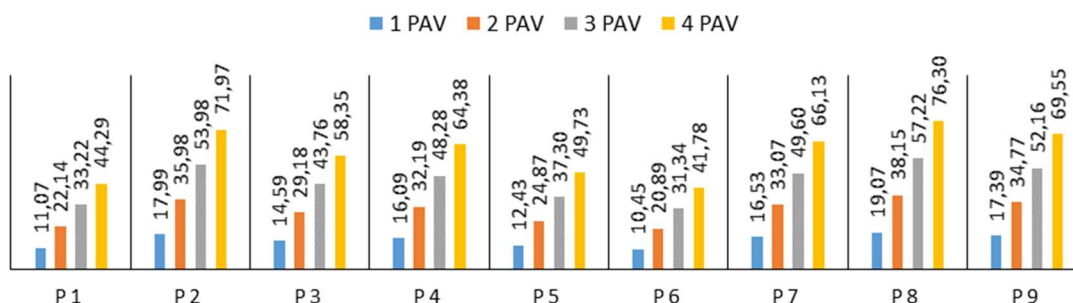
* referente a alvenaria acima e abaixo das aberturas de portas e janelas.
 ** valor referente a 4 pavimentos

Fonte: Dados do próprio autor.

Para uma melhor interpretação dos valores calculados para o procedimento de paredes isoladas, foram adotadas siglas. A sigla PP refere-se ao peso próprio dos elementos de parede e laje e a sigla AC refere-se a resultante da carga acidental.

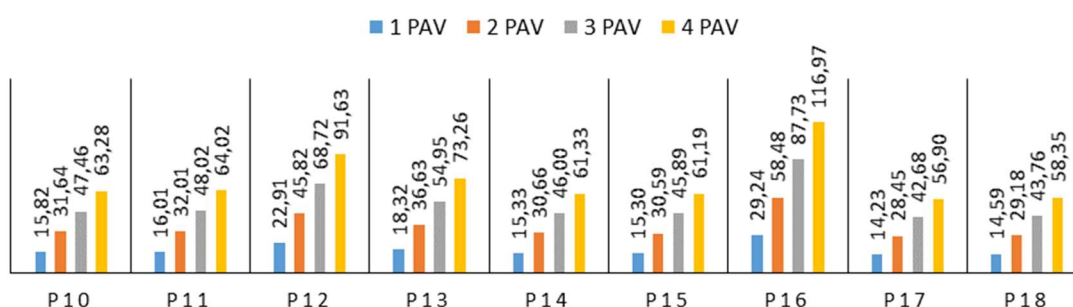
A Tabela 6-2, em sua penúltima coluna, indica os valores de solicitações para cada parede isoladamente. Esses valores foram definidos como carregamento 01.

Figura 53 - Cargas de paredes P1 - P9 (PI) – kN/m



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 54 - Cargas de paredes P10 – P18 (PI) – kN/m



Fonte: Dados do próprio autor.

6.2.2 Grupos de Paredes Isolados (GIP) - Carregamento 01

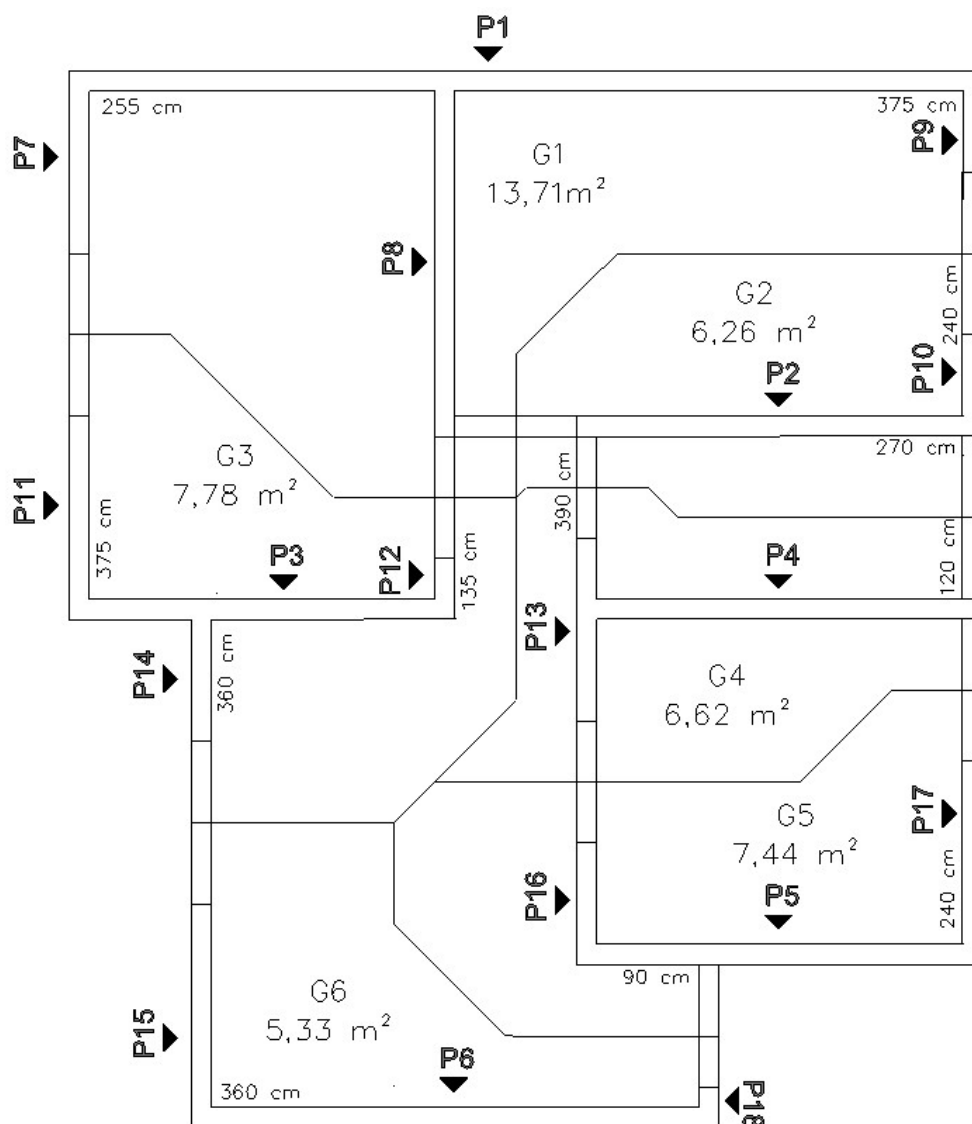
Esse procedimento supõe que as paredes são totalmente solidárias e suportam as forças verticais igualmente entre elas.

Os limites geométricos para a definição de um grupo, conforme já exposto no item 2.2.1.2, são as aberturas de portas e janelas. Nesse caso, não é considerado a interação de forças entre grupos pelos lintéis e lajes presentes na edificação. A Figura 55 indica as áreas de influência dos grupos.

Os valores das forças nas paredes foram mantidos de acordo com o procedimento anterior, ou seja, os valores obtidos e definidos como carregamento 01. Vale lembrar que as dimensões das paredes foram consideradas nos eixos das paredes.

A Tabela 6-3, em sua última coluna, indica os valores obtidos considerando o carregamento linear e a tensão com a solicitação de 4 pavimentos.

Figura 55 - Área de influência de grupos de paredes individuais



Fonte: Dados do próprio autor.

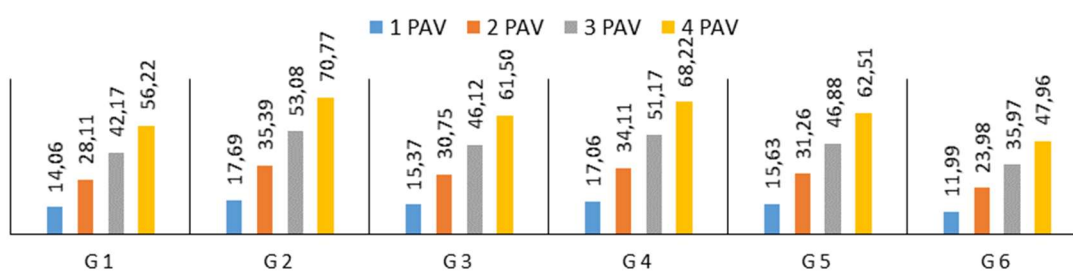
Devido a consideração do trabalho solidário das paredes pelo modelo simplificado de grupos isolados, onde as forças verticais são distribuídas uniformemente, a Figura 56 ilustra os valores de cada grupo em função dos pavimentos considerados.

Tabela 6-3 Carga linear grupos de parede – GIP (Carregamento 01)

	PAREDE	Comp. Grupo (m)	Carga Parede PP (kN)	Influência Laje (m²)	Laje PP (kN)	AC (kN)	PP (kN)	PP+AC (kN)	kN/m	σ* (MPa)
G1	P1	11,10	66,83	13,71	47,99	41,13	114,81	155,94	14,06	0,402
	P7									
	P8									
	P9									
G2	P2	3,60	23,01	6,26	21,91	18,78	44,92	63,70	17,69	0,506
	P10									
G3	P3	5,48	33,60	7,78	27,23	23,34	60,83	84,17	15,37	0,439
	P11									
	P12									
	P14									
G4	P4	4,20	28,60	6,62	23,17	19,86	51,77	71,63	17,06	0,487
	P13									
G5	P5	5,10	31,34	7,44	26,04	22,32	57,38	79,70	15,63	0,447
	P16									
	P17									
G6	P6	5,55	31,90	5,33	18,66	15,99	50,55	66,54	11,99	0,343
	P15									
	P18									
* valor referente a 4 pavimentos										

* valor referente a 4 pavimentos

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 56 - Valores médios de grupos de paredes - GPI

Fonte: Dados do próprio autor.

6.2.3 Grupos de Paredes com Interação (GPCI) - Carregamento 01

Esse procedimento pode ser definido como uma extensão do grupo isolados de paredes. Seu procedimento considera a transferência das forças entre grupos de

que pertencem a um macrogrupo. A única questão desse procedimento é a taxa de interação a ser adotada para interação entre os grupos.

O procedimento é descrito no item 2.2.1.3 e os resultados foram obtidos com diversas taxas de interação. O macrogrupo definido considera que todos os seis grupos interagem entre si.

As taxas de interação adotadas foram de 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, visando extrapolar o valor de 20%, que segundo Accetti (1998) citado por SILVA (2002, p. 26)⁵, esse valor considera um comportamento seguro para interação de grupos próximos, ressaltando que pesquisas estão sendo desenvolvidas sobre este comportamento.

Para a taxa de interação igual a 10%, a Tabela 6-4 contém todas as colunas referentes as etapas do procedimento de cálculo e a Tabela 6-5 indica os valores obtidos com todas as taxas adotadas, além da taxa igual a zero, indicando os resultados do procedimento de grupos de paredes sem interação.

Pelo procedimento considerar que a interação das forças ocorrem por cada nível da edificação, os valores com menor solicitação são os pavimentos superiores, e conseqüentemente, as maiores solicitações em pavimentos inferiores. Por esta característica os resultados estão na ordem dos pavimentos menos solicitados para os pavimentos mais solicitados, de cima para baixo na tabela.

Tabela 6-4 - Cargas lineares e tensão de grupos de paredes com interação $t = 10\%$ (Carregamento 01)

(continua)

PAV	GRUPO	Carga Grupo (kN)	Comp. Grupo (m)	Carga Grupo (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	di	Carga Uniformizada (kN/m)	σ^* (MPa)
4	G1	155,94	11,10	14,06	14,90	-0,76	14,14	0,101
	G2	63,70	3,60	17,69		2,52	17,41	0,125
	G3	84,17	5,48	15,37		0,43	15,33	0,110
	G4	71,63	4,20	17,06		1,94	16,84	0,121
	G5	79,70	5,10	15,63		0,66	15,55	0,111
	G6	66,54	5,55	11,99		-2,62	12,28	0,087

⁵ SILVA, WILSON J. **Estudo experimental de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos sujeitas a ações verticais**. Ilha Solteira, 144p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2002.

Tabela 6-4 - Cargas lineares e tensão de grupos de paredes com interação $t = 10\%$ (Carregamento 01)

(conclusão)

3	G1	312,82	11,10	28,19	29,79	-1,44	28,35	0,202
	G2	126,38	3,60	35,11		4,78	34,58	0,250
	G3	168,09	5,48	30,70		0,82	30,61	0,219
	G4	142,36	4,20	33,90		3,69	33,49	0,241
	G5	159,03	5,10	31,18		1,25	31,04	0,222
	G6	134,70	5,55	24,27		-4,97	24,82	0,174
2	G1	470,54	11,10	42,41	44,69	-2,05	42,64	0,303
	G2	188,17	3,60	52,27		6,82	51,51	0,373
	G3	251,76	5,48	45,98		1,16	45,86	0,328
	G4	212,27	4,20	50,54		5,26	49,96	0,361
	G5	238,02	5,10	46,67		1,78	46,47	0,333
	G6	204,31	5,55	36,81		-7,09	37,60	0,263
1	G1	629,01	11,10	56,69	59,59	-2,61	56,98	0,404
	G2	249,13	3,60	69,20		8,65	68,24	0,496
	G3	335,23	5,48	61,23		1,48	61,07	0,438
	G4	281,45	4,20	67,01		6,68	66,27	0,480
	G5	316,71	5,10	62,10		2,26	61,85	0,444
	G6	275,23	5,55	49,59		-9,00	50,59	0,352

Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 6-5 - Cargas lineares (kN/m) de grupos de paredes com interação e diversas taxas (Carregamento 01)

(continua)

PAV	Grupo	t = 0%	t = 5%	t = 10%	t = 20%	t = 30%	t = 40%	t = 50%
4° PAV	G1	14,06	14,10	14,14	14,22	14,31	14,39	14,48
	G2	17,69	17,55	17,41	17,13	16,85	16,57	16,30
	G3	15,37	15,35	15,33	15,28	15,23	15,18	15,14
	G4	17,06	16,95	16,84	16,62	16,41	16,19	15,98
	G5	15,63	15,59	15,55	15,48	15,41	15,34	15,26
	G6	11,99	12,14	12,28	12,57	12,86	13,15	13,44
3° PAV	G1	28,11	28,23	28,35	28,58	28,79	28,99	29,16
	G2	35,39	34,97	34,58	33,82	33,12	32,48	31,89
	G3	30,75	30,68	30,61	30,48	30,36	30,25	30,15
	G4	34,11	33,79	33,49	32,90	32,36	31,87	31,41
	G5	31,26	31,15	31,04	30,85	30,66	30,50	30,34
	G6	23,98	24,41	24,82	25,61	26,33	27,00	27,61

Fonte: Dados do próprio autor.

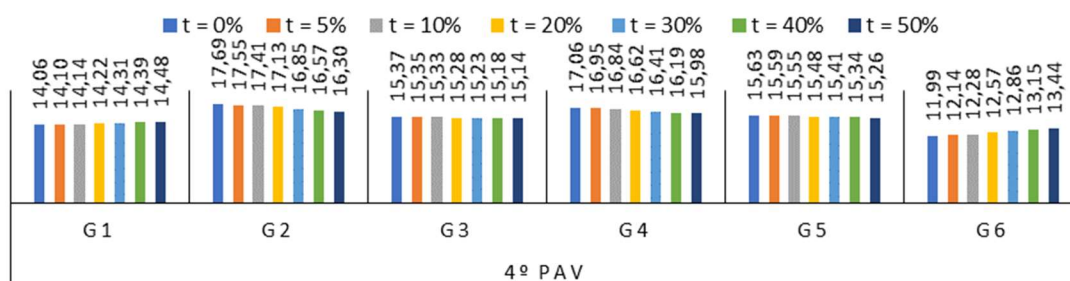
Tabela 6.5 - Cargas lineares (kN/m) de grupos de paredes com interação e diversas taxas (Carregamento 01)

(conclusão)								
2º PAV	G1	42,17	42,41	42,64	43,05	43,40	43,70	43,95
	G2	53,08	52,27	51,51	50,15	48,98	47,98	47,14
	G3	46,12	45,98	45,86	45,62	45,42	45,25	45,11
	G4	51,17	50,54	49,96	48,90	48,00	47,23	46,58
	G5	46,88	46,67	46,47	46,12	45,81	45,55	45,33
	G6	35,97	36,81	37,60	39,02	40,23	41,27	42,15
1º PAV	G1	56,22	56,62	56,98	57,60	58,10	58,49	58,80
	G2	70,77	69,44	68,24	66,19	64,55	63,24	62,21
	G3	61,50	61,27	61,07	60,72	60,43	60,21	60,04
	G4	68,22	67,20	66,27	64,69	63,42	62,41	61,61
	G5	62,51	62,16	61,85	61,31	60,88	60,54	60,27
	G6	47,96	49,34	50,59	52,72	54,43	55,79	56,86

Fonte: Dados do próprio autor.

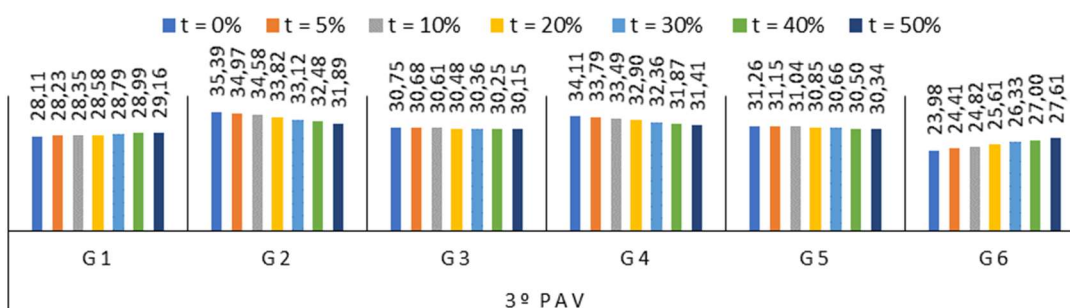
Nas Figura 57 até a Figura 60 são ilustrados os valores de cargas lineares por pavimento de acordo com as taxas definidas.

Figura 57 - Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 4º PAV

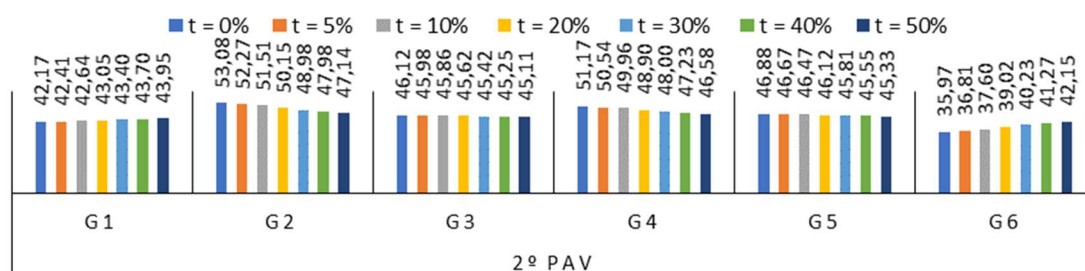


Fonte: Dados do próprio autor.

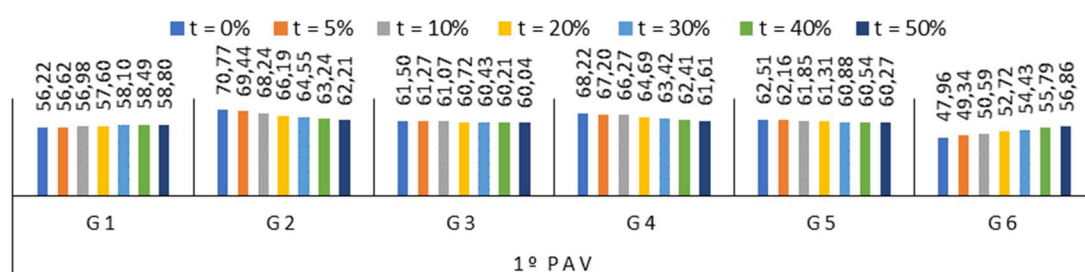
Figura 58 - Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 3º PAV



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 59 - Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 2º PAV

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 60 - Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 1º PAV

Fonte: Dados do próprio autor.

6.3 Definições de forças atuantes para Carregamento 02

O carregamento 02, foi obtido através de simulações numéricas nos elementos de reação de apoio em nível de respaldo, da última laje, conforme identificado no item 3.2.

Devido a simulação numérica obter resultados de solicitações somente oriundas do peso próprio da laje e da carga acidental, os valores de peso próprio das paredes foram somados, seguindo os mesmos procedimentos para a determinação do carregamento 01.

6.3.1 Paredes Isoladas (PI) - Carregamento 02

O procedimento é análogo item 6.2.1, no entanto, os valores são obtidos pela simulação numérica, nos elementos de reações de apoio no nível de respaldo da última laje, não sendo efetuado um novo cálculo de área de influência. A Tabela 6-6 indica os resultados obtidos.

Tabela 6-6 - Carga linear das paredes por pavimento – PI (Carregamento 02)

	Comp. (m)	Carga Parede (kN)	Carga Adicional* (kN)	Carga Parede Total (kN)	Laje PP + AC (kN)	1 PAV kN/m	2 PAV kN/m	3 PAV kN/m	4 PAV kN/m	σ^* (MPa)
P1	6,60	36,22	0,00	36,22	65,70	9,95	19,90	29,85	39,80	0,284
P2	2,93	16,05	2,19	18,24	51,06	17,46	34,92	52,38	69,84	0,499
P3	2,70	14,82	0,00	14,82	43,65	16,17	32,34	48,51	64,68	0,462
P4	2,85	15,64	4,42	20,06	42,15	14,79	29,58	44,37	59,16	0,423
P5	2,85	15,64	0,62	16,26	36,59	12,84	25,68	38,52	51,63	0,367
P6	3,75	20,58	0,00	20,58	36,68	9,78	19,56	29,34	39,12	0,280
P7	1,27	6,97	2,59	9,56	20,50	16,15	32,30	48,45	64,60	0,461
P8	2,55	13,99	1,23	15,23	48,75	19,12	38,24	57,36	76,48	0,546
P9	0,68	3,70	2,12	5,82	11,75	17,40	34,80	52,20	69,60	0,497
P10	0,68	3,70	1,06	4,76	11,22	16,62	33,24	49,86	66,48	0,475
P11	1,43	7,82	2,12	9,94	21,89	15,36	30,72	46,08	61,44	0,439
P12	0,38	2,06	0,62	2,68	9,01	24,02	48,04	72,06	96,08	0,686
P13	1,35	7,41	1,13	8,54	28,08	20,80	41,60	62,40	83,20	0,594
P14	0,98	5,35	0,82	6,17	13,63	13,98	27,96	41,94	55,92	0,400
P15	1,58	8,64	0,82	9,47	23,12	14,68	29,36	44,04	58,72	0,419
P16	0,83	4,53	0,62	5,15	33,79	40,95	81,90	122,85	163,80	1,170
P17	1,43	7,82	2,12	9,94	19,57	13,73	27,46	41,19	54,92	0,392
P18	0,23	1,23	0,62	1,85	3,32	14,77	29,54	44,31	59,08	0,422

* valor referente a 4 pavimentos

Fonte: Dados do próprio autor.

6.3.2 Grupos de Paredes Isolados (GIP) - Carregamento 02

Análogo ao procedimento efetuado no item 6.2.2, os resultados são indicados na Tabela 6-7.

Tabela 6-7 Carga linear grupos de parede – GIP (Carregamento 02)

(continua)

GRUPO	PAREDE	Comp. Grupo (m)	Carga Parede PP (kN)	Laje PP+AC (kN)	Carga Total (kN)	kN/m	σ^* (MPa)
G1	P1	11,10	66,83	79,87	146,70	13,22	0,378
	P7						
	P8						
	P9						

Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 6.7 - Carga linear grupos de parede – GIP (Carregamento 02)

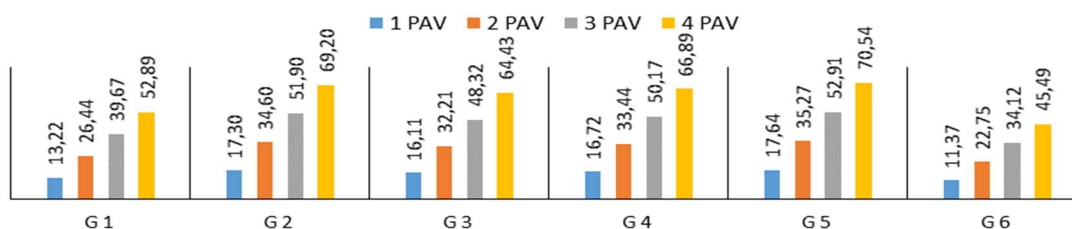
(conclusão)

G2	P2	3,60	23,01	39,27	62,28	17,30	0,494
	P10						
G3	P3	5,48	33,60	54,58	88,18	16,11	0,460
	P11						
	P12						
	P14						
G4	P4	4,20	28,60	41,63	70,23	16,72	0,478
	P13						
G5	P5	5,10	31,34	58,60	89,94	17,64	0,504
	P16						
	P17						
G6	P6	5,55	31,90	31,22	63,12	11,37	0,325
	P15						
	P18						

* valor referente a 4 pavimentos

Fonte: Dados do próprio autor.

A Figura 61 ilustra os valores das forças uniformizadas dos grupos de acordo com o número de pavimentos considerados.

Figura 61 - Valores médios de grupos de paredes - GPI (Carregamento 02)

Fonte: Dados do próprio autor.

6.3.3 Grupos de Paredes com Interação (GPCI) - Carregamento 02

Análogo ao item 6.2.3 os resultados são indicados na Tabela 6-8.

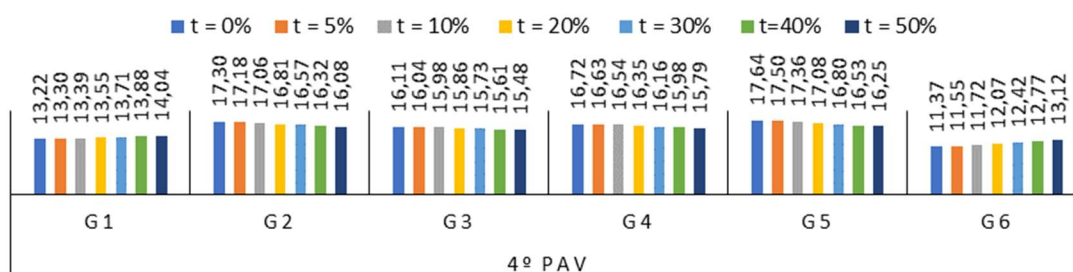
Nas Figura 62 até a Figura 65 são ilustrados os valores de cargas lineares por pavimento de acordo com as taxas definidas.

Tabela 6-8 Cargas lineares (kN/m) de grupos de paredes com interação e diversas taxas (Carregamento 02)

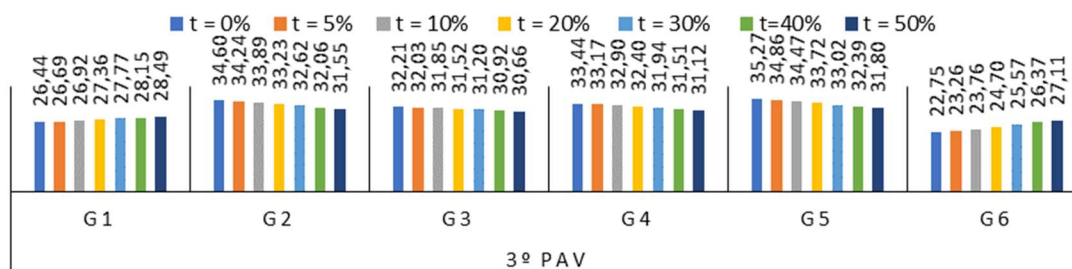
PAV	Grupo	t = 0%	t = 5%	t = 10%	t = 20%	t = 30%	t=40%	t = 50%
4º PAV	G1	13,22	13,30	13,39	13,55	13,71	13,88	14,04
	G2	17,30	17,18	17,06	16,81	16,57	16,32	16,08
	G3	16,11	16,04	15,98	15,86	15,73	15,61	15,48
	G4	16,72	16,63	16,54	16,35	16,16	15,98	15,79
	G5	17,64	17,50	17,36	17,08	16,80	16,53	16,25
	G6	11,37	11,55	11,72	12,07	12,42	12,77	13,12
3º PAV	G1	26,44	26,69	26,92	27,36	27,77	28,15	28,49
	G2	34,60	34,24	33,89	33,23	32,62	32,06	31,55
	G3	32,21	32,03	31,85	31,52	31,20	30,92	30,66
	G4	33,44	33,17	32,90	32,40	31,94	31,51	31,12
	G5	35,27	34,86	34,47	33,72	33,02	32,39	31,80
	G6	22,75	23,26	23,76	24,70	25,57	26,37	27,11
2º PAV	G1	39,67	40,14	40,59	41,38	42,07	42,66	43,15
	G2	51,90	51,19	50,53	49,34	48,32	47,45	46,72
	G3	48,32	47,96	47,62	47,01	46,49	46,05	45,67
	G4	50,17	49,63	49,12	48,22	47,44	46,77	46,21
	G5	52,91	52,10	51,35	50,00	48,84	47,85	47,01
	G6	34,12	35,13	36,08	37,78	39,24	40,48	41,53
1º PAV	G1	52,89	53,67	54,37	55,57	56,54	57,31	57,91
	G2	69,20	68,04	66,99	65,20	63,77	62,63	61,73
	G3	64,43	63,83	63,30	62,39	61,65	61,07	60,61
	G4	66,89	66,00	65,21	63,84	62,75	61,88	61,19
	G5	70,54	69,22	68,03	66,00	64,36	63,07	62,05
	G6	45,49	47,15	48,65	51,21	53,26	54,89	56,18

Fonte: Dados do próprio autor.

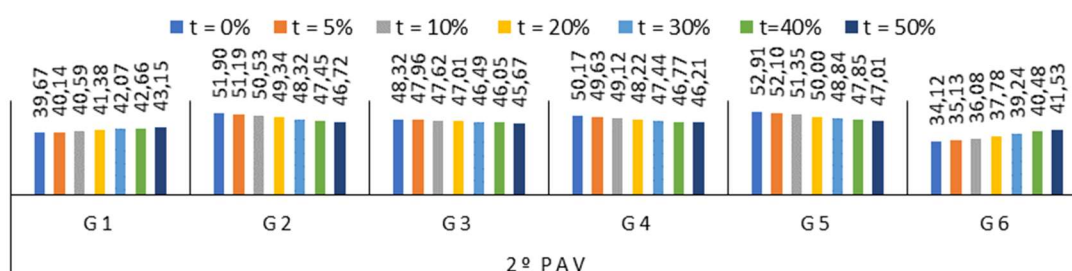
Figura 62 - Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 4º PAV



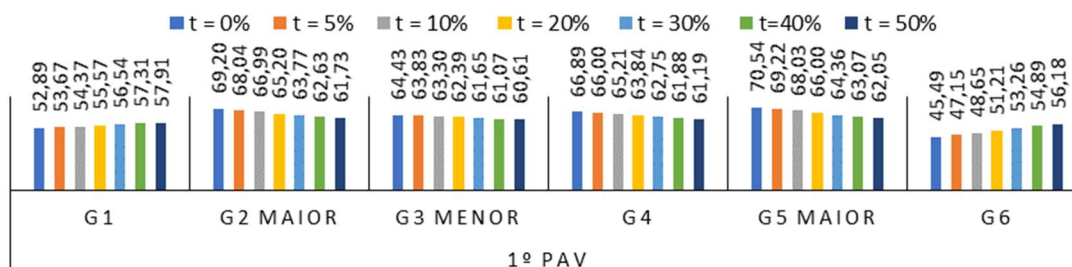
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 63 - Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 3º PAV

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 64 - Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 2º PAV

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 65 - Cargas lineares (kN/m) dos grupos de parede com interação – 1º PAV

Fonte: Dados do próprio autor.

6.4 Determinação das unidades para solicitação a compressão simples

A título de exemplo, optou-se por efetuar o dimensionamento dos blocos de acordo com a NBR 15.961-1. Por se tratar de uma solicitação em compressão simples, o esforço resistente é obtido através da seguinte equação (7)⁶:

⁶ PARSEKIAN, G. A (Org.). **Parâmetros de projeto de alvenaria estrutural com blocos de concreto** / organizador:. — São Carlos : EdUFSCar, 2012. 85 p.

$$\frac{\gamma_f \cdot N_k}{A} = \left\{ \frac{1,0 \text{ parede}}{0,9 \text{ pilares}} \right\} \cdot \frac{0,7 \cdot f_{pk}}{\gamma_m} \cdot \left[1 - \left(\frac{h_{ef}}{40 \cdot t_{ef}} \right)^3 \right] \quad (7)$$

Onde:

γ_f, γ_m : coeficientes de ponderação das ações e das resistências;

N_k : força normal característica;

A : área bruta da seção transversal;

f_{pk} : resistência característica a compressão simples do prisma;

t_{ef}, h_{ef} : espessura e altura efetiva.

Considerando a relação $f_{pk} / f_{bk} = 0,80$ (Tabela 3-3, p. 57) e utilizando as forças de maiores intensidades indicadas na Tabela 6-9, cujo valores não consideram a majoração das cargas, as respectivas resistências das unidades são indicadas na Tabela 6-10.

Tabela 6-9 - Cargas de solicitação para cálculo da resistência das unidades

Método considerado	Carregamento	Maior carga de solicitação (kN/m)		
Processamento em Elementos Finitos (GIP / GPCI)				
Elementos finitos*	-	116,09 / 94,17		
		PI	GPI	GPCI (10% / 20% / 30%)
Numéricos simplificados	Carregamento 01	116,97	70,76	68,24 / 66,19 / 64,55
	Carregamento 02	163,81	70,54	68,06 / 66,00 / 64,36
* resultado de acordo com processamento do modelo com caracterização das reações / sem a caracterização das reações				

* resultado de acordo com processamento do modelo com caracterização das reações / sem a caracterização das reações

Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 6-10 - Resistência de cálculo das unidades para compressão simples

Método considerado	Carregamento	Processo considerado		
Processamento em Elementos Finitos				
Elementos finitos*	-	4 MPa / 5 MPa		
		PI	GPI	GPCI (10% / 20% / 30%)
Numéricos simplificados	Carregamento 01	5 MPa	4 MPa	4 MPa / 4 MPa / 4 MPa
	Carregamento 02	7 MPa	4 MPa	4 MPa / 4 MPa / 4 MPa
* resultado de acordo com processamento do modelo / modelo considerando cargas acidentais sobrepostas				

* resultado de acordo com processamento do modelo / modelo considerando cargas acidentais sobrepostas

Fonte: Dados do próprio autor.

7 INTERAÇÃO DOS MODELOS NÚMERICOS

Através do comportamento da distribuição das forças verticais obtidas nas reações de apoio das simulações numéricas do M.GPCI, foi possível a análise da interação das forças entre os grupos de parede.

Em relação ao comportamento ao modelo M.GIP, foi possível identificar um comportamento de interação de forças entre paredes em função do número de pavimentos.

7.1 Interação do modelo M.GPCI

A Tabela 7-1 fornece os resultados referente a interação e transferência de forças entre os grupos. A coluna A da tabela refere-se a diferenças das forças aplicadas pelas forças uniformizadas do grupo no respectivo nível. Na coluna B é indicado a diferença entre as forças aplicadas do grupo e as forças do macrogrupo.

Os valores da coluna A, quando positivos, indicam um ganho de carregamento dos grupos. Na coluna B, quando estes são positivos, indicam que o carregamento do grupo está abaixo da média do macrogrupo. O comportamento esperado da Tabela 7-1 é de valores com sinais opostos das colunas A e B, por exemplo, caso o grupo tenha um carregamento maior que o macrogrupo, em função da homogeneização das forças, espera-se que o grupo, após a interação no respectivo nível, possua um carregamento final menor em sua base.

Tabela 7-1 - Interação de forças dos grupos no modelo M.GPCI

(continua)

	Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
4	G1	146,70	11,10	13,22	14,90	-0,18	1,67
	G2	62,28	3,60	17,30		-0,32	-2,40
	G3	88,18	5,48	16,11		-0,86	-1,21
	G4	70,23	4,20	16,72		-0,87	-1,83
	G5	89,94	5,10	17,64		1,35	-2,74
	G6	63,12	5,55	11,37		0,50	3,52

Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.1 - Interação de forças dos grupos no modelo M.GPCI

(conclusão)

	Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)		Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
3	G1	295,44	11,10	26,63	27,10	29,79	-0,47	3,17
	G2	125,69	3,60	34,91	33,90		1,01	-5,12
	G3	181,08	5,48	33,07	33,62		-0,54	-3,28
	G4	144,13	4,20	34,32	34,56		-0,24	-4,52
	G5	172,99	5,10	33,92	32,44		1,48	-4,13
	G6	123,46	5,55	22,24	22,94		-0,69	7,55
2	G1	447,33	11,10	40,32	41,02	44,69	-0,71	4,37
	G2	184,34	3,60	51,20	49,00		2,21	-6,51
	G3	272,24	5,48	49,72	50,34		-0,62	-5,03
	G4	215,37	4,20	51,28	50,51		0,77	-6,59
	G5	255,40	5,10	50,08	48,57		1,51	-5,39
	G6	190,43	5,55	34,31	36,03		-1,71	10,38
1	G1	601,85	11,10	54,25	55,26	59,59	-1,02	5,34
	G2	238,66	3,60	66,30	62,95		3,34	-6,71
	G3	363,82	5,48	66,45	67,24		-0,79	-6,86
	G4	282,38	4,20	67,23	65,91		1,32	-7,65
	G5	337,65	5,10	66,21	64,96		1,24	-6,62
	G6	263,07	5,55	47,40	49,24		-1,83	12,19

* A = Carga Aplicada – Carga Uniformizada (kN/m)

** B = Carga Aplicada – Carga Macrogrupo (kN/m)

* A = Carga Aplicada – Carga Uniformizada (kN/m)

** B = Carga Aplicada – Carga Macrogrupo (kN/m)

Fonte: Dados do próprio autor.

7.2 Interação do modelo M.GIP_X

Nesse caso, os valores considerados para a simulação também são referentes ao carregamento 2.

7.2.1 Interação do modelo M.GPI_1

A Tabela 7-2 fornece os resultados da interação entre as paredes do Grupo 01.

Tabela 7-2 Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_1

		Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
6	P7	20,50	1,27	16,15	12,63	13,22	3,52	-2,92
	P1	65,70	6,60	9,95	12,31		-2,36	3,27
	P9	11,75	0,68	17,40	12,02		5,38	-4,18
	P8	48,75	2,55	19,12	16,18		2,93	-5,90
5	P7	36,54	1,27	28,78	26,31	26,44	2,47	-2,33
	P1	146,97	6,60	22,27	26,10		-3,83	4,18
	P9	19,86	0,68	29,42	25,57		3,85	-2,98
	P8	90,02	2,55	35,30	30,10		5,20	-8,86
4	P7	53,92	1,27	42,45	39,87	39,67	2,58	-2,79
	P1	237,97	6,60	36,06	39,69		-3,64	3,61
	P9	29,01	0,68	42,97	39,75		3,22	-3,31
	P8	125,51	2,55	49,22	43,18		6,04	-9,55
3	P7	71,14	1,27	56,02	53,36	52,89	2,66	-3,13
	P1	327,66	6,60	49,65	53,26		-3,62	3,24
	P9	38,58	0,68	57,15	54,13		3,03	-4,27
	P8	158,87	2,55	62,30	56,31		6,00	-9,41
2	P7	88,27	1,27	69,50	66,80	66,11	2,70	-3,39
	P1	417,22	6,60	63,22	66,82		-3,60	2,89
	P9	48,28	0,68	71,53	68,46		3,07	-5,42
	P8	192,33	2,55	75,42	69,50		5,92	-9,31
1	P7	105,34	1,27	82,94	80,23	79,33	2,71	-3,61
	P1	506,68	6,60	76,77	80,36		-3,59	2,56
	P9	57,96	0,68	85,86	82,75		3,12	-5,11
	P8	225,98	2,55	88,62	82,74		5,88	-7,87

* A = Carga Aplicada – Carga Uniformizada (kN/m)

** B = Carga Aplicada – Carga Macrogrupo (kN/m)

Fonte: Dados do próprio autor.

7.2.2 Interação do modelo M.GPI_2

A Tabela 7-3 fornece os resultados de interação do Grupo 02.

Tabela 7-3 - Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_2

		Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
6	P10	11,22	0,68	16,62	18,42	17,30	-1,80	0,68
	P2	51,06	2,93	17,46	17,04		0,42	-0,16
5	P10	23,65	0,68	35,04	36,24	34,60	-1,19	-0,44
	P2	100,90	2,93	34,50	33,12		1,37	0,10
4	P10	35,68	0,68	52,85	54,49	51,01	-1,63	-1,85
	P2	147,94	2,93	50,58	49,65		0,93	0,43
3	P10	48,00	0,68	71,11	72,73	67,86	-1,62	-3,25
	P2	196,30	2,93	67,11	66,19		0,92	0,75
2	P10	60,31	0,68	89,34	90,96	84,71	-1,62	-4,63
	P2	244,66	2,93	83,64	82,72		0,92	1,07
1	P10	72,62	0,68	107,58	109,20	101,57	-1,62	-6,01
	P2	293,02	2,93	100,18	99,25		0,92	1,39

* A = Carga Aplicada – Carga Uniformizada (kN/m)

** B = Carga Aplicada – Carga Macrogrupo (kN/m)

Fonte: Dados do próprio autor.

7.2.3 Interação do modelo M.GPI_3**Tabela 7-4** - Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_3

(continua)

		Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
6	P11	21,89	1,43	15,36	14,63	16,11	0,73	0,75
	P3	43,65	2,70	16,17	16,70		-0,53	-0,06
	P12	9,01	0,38	24,02	18,43		5,59	-7,92
	P14	13,63	0,98	13,98	15,72		-1,74	2,12
5	P11	42,74	1,43	29,99	31,61	32,21	-1,62	2,22
	P3	88,74	2,70	32,87	34,59		-1,72	-0,65
	P12	15,92	0,38	42,46	38,16		4,30	-10,24
	P14	28,96	0,98	29,70	33,24		-3,53	2,51
4	P11	66,94	1,43	46,97	47,86	48,32	-0,88	2,95
	P3	137,03	2,70	50,75	51,71		-0,95	-0,83
	P12	23,32	0,38	62,18	56,69		5,49	-12,26
	P14	46,04	0,98	47,22	49,91		-2,68	2,70

Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 7.4 - Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_3

(conclusão)

		Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
3	P11	90,09	1,43	63,22	64,05	64,43	-0,83	3,61
	P3	183,26	2,70	67,87	68,84		-0,96	-1,04
	P12	30,27	0,38	80,72	75,39		5,32	-13,88
	P14	62,29	0,98	63,89	66,56		-2,67	2,94
2	P11	113,16	1,43	79,41	80,23	80,53	-0,82	4,33
	P3	229,51	2,70	85,00	85,97		-0,97	-1,26
	P12	37,28	0,38	99,41	94,09		5,32	-15,67
	P14	78,53	0,98	80,54	83,21		-2,67	3,20
1	P11	136,21	1,43	95,59	96,40	96,64	-0,81	5,06
	P3	275,78	2,70	102,14	103,11		-0,97	-1,49
	P12	44,29	0,38	118,12	112,80		5,31	-17,47
	P14	94,76	0,98	97,19	99,86		-2,67	3,46

* A = Carga Aplicada – Carga Uniformizada (kN/m)
 ** B = Carga Aplicada – Carga Macrogrupo (kN/m)

Fonte: Dados do próprio autor.

7.2.4 Interação do modelo M.GPI_4

A Tabela 7-5 fornece os resultados da interação entre as paredes do Grupo 04.

Tabela 7-5 - Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_4

(continua)

		Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
6	P13	28,08	1,35	20,80	19,28	16,72	1,52	-4,08
	P4	42,15	2,85	14,79	15,51		-0,72	1,93
5	P13	54,11	1,35	40,08	37,30	33,44	2,78	-6,63
	P4	86,36	2,85	30,30	31,78		-1,48	3,14
4	P13	78,43	1,35	58,10	55,45	50,17	2,65	-7,82
	P4	132,73	2,85	46,57	47,91		-1,34	3,70
3	P13	102,93	1,35	76,25	73,66	66,89	2,58	-9,19
	P4	178,70	2,85	62,70	64,01		-1,30	4,35
2	P13	127,52	1,35	94,46	91,90	83,61	2,56	-10,63
	P4	224,58	2,85	78,80	80,10		-1,30	5,03

Tabela 7.5 - Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_4

(conclusão)

		Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
1	P13	152,14	1,35	112,70	110,14	100,33	2,56	-12,09
	P4	270,43	2,85	94,89	96,18		-1,30	5,72

* A = Carga Aplicada – Carga Uniformizada (kN/m)

** B = Carga Aplicada – Carga Macrogrupo (kN/m)

Fonte: Dados do próprio autor.

7.2.5 Interação do modelo M.GPI_5

A Tabela 7-6 fornece os resultados da interação entre as paredes do Grupo 05.

Tabela 7-6 - Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_5

		Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
6	P16	33,79	0,83	40,95	22,96	17,64	18,00	-23,32
	P5	36,59	2,85	12,84	18,23		-5,39	4,80
	P17	19,57	1,43	13,73	13,37		0,36	3,90
5	P16	52,72	0,83	63,91	42,10	35,27	21,81	-28,64
	P5	88,53	2,85	31,06	37,08		-6,02	4,21
	P17	38,63	1,43	27,11	31,86		-4,75	8,16
4	P16	68,52	0,83	83,05	60,27	52,91	22,78	-28,98
	P5	142,26	2,85	49,92	55,27		-5,36	4,15
	P17	64,97	1,43	45,59	50,15		-4,56	8,48
3	P16	83,51	0,83	101,22	78,80	70,54	22,42	-28,94
	P5	194,11	2,85	68,11	73,48		-5,37	4,17
	P17	91,03	1,43	63,88	68,21		-4,33	8,41
2	P16	98,79	0,83	119,75	97,42	88,18	22,33	-29,25
	P5	245,99	2,85	86,31	91,70		-5,39	4,19
	P17	116,77	1,43	81,94	86,17		-4,23	8,56
1	P16	114,16	0,83	138,38	116,09	105,81	22,29	-29,66
	P5	297,93	2,85	104,54	109,93		-5,39	4,18
	P17	142,36	1,43	99,90	104,10		-4,20	8,81

* A = Carga Aplicada – Carga Uniformizada (kN/m)

** B = Carga Aplicada – Carga Macrogrupo (kN/m)

Fonte: Dados do próprio autor.

7.2.6 Interação do modelo M.GPI_6

A Tabela 7-7 fornece os resultados da interação entre as paredes do Grupo 06.

Tabela 7-7 - Interação de cargas das paredes no modelo M.GIP_6

		Carga (kN)	Comp. (m)	Carga Aplicada (kN/m)	Carga Uniformizada (kN/m)	Carga Macrogrupo (kN/m)	A*	B**
6	P16	33,79	0,83	40,95	22,96	17,64	18,00	-23,32
	P5	36,59	2,85	12,84	18,23		-5,39	4,80
	P17	19,57	1,43	13,73	13,37		0,36	3,90
5	P16	52,72	0,83	63,91	42,10	35,27	21,81	-28,64
	P5	88,53	2,85	31,06	37,08		-6,02	4,21
	P17	38,63	1,43	27,11	31,86		-4,75	8,16
4	P16	68,52	0,83	83,05	60,27	52,91	22,78	-28,98
	P5	142,26	2,85	49,92	55,27		-5,36	4,15
	P17	64,97	1,43	45,59	50,15		-4,56	8,48
3	P16	83,51	0,83	101,22	78,80	70,54	22,42	-28,94
	P5	194,11	2,85	68,11	73,48		-5,37	4,17
	P17	91,03	1,43	63,88	68,21		-4,33	8,41
2	P16	98,79	0,83	119,75	97,42	88,18	22,33	-29,25
	P5	245,99	2,85	86,31	91,70		-5,39	4,19
	P17	116,77	1,43	81,94	86,17		-4,23	8,56
1	P16	114,16	0,83	138,38	116,09	105,81	22,29	-29,66
	P5	297,93	2,85	104,54	109,93		-5,39	4,18
	P17	142,36	1,43	99,90	104,10		-4,20	8,81

* A = Carga Aplicada – Carga Uniformizada (kN/m)

** B = Carga Aplicada – Carga Macrogrupo (kN/m)

Fonte: Dados do próprio autor.

8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Diante dos resultados obtidos, foram realizados gráficos de distribuição das tensões nos modelos processados pela simulação numérica, além de tabelas comparativas entre os resultados dos processos para a determinação das forças considerados para uma avaliação da convergência.

Dentre as análises, pode-se verificar a convergência dos modelos simplificados e numéricos, considerando os conceitos de grupos com interação, essa característica somente foi possível com os valores das ações de solicitação do carregamento 02.

8.1 Modelo M.GPCI

Os valores obtidos pelos procedimentos são apresentados na Tabela 8-1 e Tabela 8-2. As tabelas indicam os valores resumidos por grupo nos modelos simplificados e simulações numéricas, de acordo com os carregamentos definidos, com destaques dos resultados que convergiram entre si.

Tabela 8-1 - Comparação dos resultados (kN/m) (Processo Simplificado de Grupo de Paredes com Interação x MEF) Carregamento 01

(continua)

PAV	Grupo	t = 0%	t = 5%	t = 10%	t = 20%	t = 30%	t = 40%	t = 50%	MEF
4º PAV	G1	14,06	14,10	14,14	14,22	14,31	14,39	14,48	13,41
	G2	17,69	17,55	17,41	17,13	16,85	16,57	16,30	17,61
	G3	15,37	15,35	15,33	15,28	15,23	15,18	15,14	16,97
	G4	17,06	16,95	16,84	16,62	16,41	16,19	15,98	17,59
	G5	15,63	15,59	15,55	15,48	15,41	15,34	15,26	16,28
	G6	11,99	12,14	12,28	12,57	12,86	13,15	13,44	10,87
3º PAV	G1	28,11	28,23	28,35	28,58	28,79	28,99	29,16	27,10
	G2	35,39	34,97	34,58	33,82	33,12	32,48	31,89	33,90
	G3	30,75	30,68	30,61	30,48	30,36	30,25	30,15	33,62
	G4	34,11	33,79	33,49	32,90	32,36	31,87	31,41	34,56
	G5	31,26	31,15	31,04	30,85	30,66	30,50	30,34	32,44
	G6	23,98	24,41	24,82	25,61	26,33	27,00	27,61	22,94

Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 8-1 - Comparação dos resultados (kN/m) (Processo Simplificado de Grupo de Paredes com Interação x MEF) Carregamento 01

(conclusão)

PAV	Grupo	t = 0%	t = 5%	t = 10%	t = 20%	t = 30%	t = 40%	t = 50%	MEF
2º PAV	G1	42,17	42,41	42,64	43,05	43,40	43,70	43,95	41,02
	G2	53,08	52,27	51,51	50,15	48,98	47,98	47,14	49,00
	G3	46,12	45,98	45,86	45,62	45,42	45,25	45,11	50,34
	G4	51,17	50,54	49,96	48,90	48,00	47,23	46,58	50,51
	G5	46,88	46,67	46,47	46,12	45,81	45,55	45,33	48,57
	G6	35,97	36,81	37,60	39,02	40,23	41,27	42,15	36,03
1º PAV	G1	56,22	56,62	56,98	57,60	58,10	58,49	58,80	55,26
	G2	70,77	69,44	68,24	66,19	64,55	63,24	62,21	62,95
	G3	61,50	61,27	61,07	60,72	60,43	60,21	60,04	67,24
	G4	68,22	67,20	66,27	64,69	63,42	62,41	61,61	65,91
	G5	62,51	62,16	61,85	61,31	60,88	60,54	60,27	64,96
	G6	47,96	49,34	50,59	52,72	54,43	55,79	56,86	49,24

Fonte: Dados do próprio autor.

Pode-se verificar, considerando as interações entre os grupos após os 4 níveis do modelo, que os resultados não apresentam um padrão de convergência entre os mesmos. Nota-se uma dispersão dos resultados considerando os valores da taxa de interação.

Verifica-se que a convergência obtida pelo carregamento 02, considerando os valores de taxa de interação, tendem a valores próximos de 20%, exceto o Grupo 03.

Os caminhos de tensões, referentes ao nível da fundação, foram obtidos através do software Ansys considerando a interação dos 04 níveis do modelo. Esses resultados, expressos em MPa, mostram um comportamento de distribuição das forças nas paredes dos grupos definidos.

A visualização dos resultados indicados nos gráficos, seguem o caminho indicado com os pontos 1 e 2. A numeração 1, refere-se ao lado esquerdo do gráfico, seguindo em direção ao ponto 2. Os valores no gráfico são negativos por tratarem-se de resultados de compressão. Os pontos de CG são ilustrados na Figura 29.

Tabela 8-2 - Comparação dos resultados (kN/m) (Processo Simplificado de Grupo de Paredes com Interação x MEF) Carregamento 02

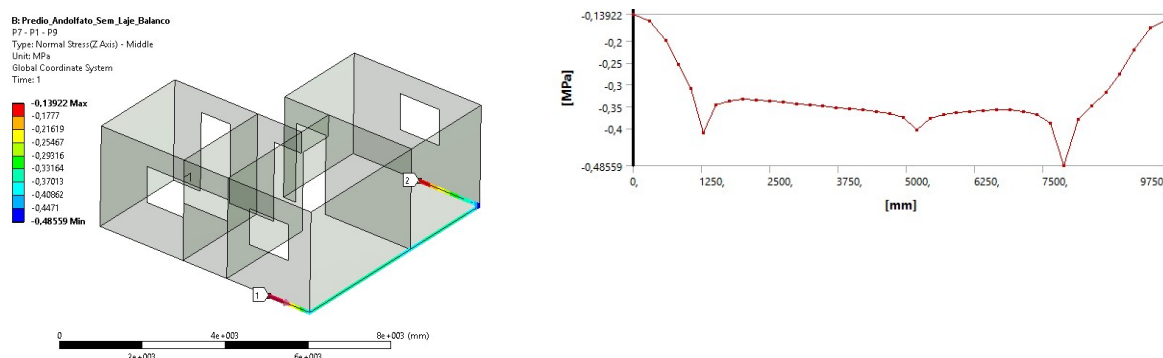
PAV	Grupo	t = 0%	t = 5%	t = 10%	t = 20%	t = 30%	t=40%	t = 50%	MEF
4º PAV	G1	13,22	13,30	13,39	13,55	13,71	13,88	14,04	13,41
	G2	17,30	17,18	17,06	16,81	16,57	16,32	16,08	17,61
	G3	16,11	16,04	15,98	15,86	15,73	15,61	15,48	16,97
	G4	16,72	16,63	16,54	16,35	16,16	15,98	15,79	17,59
	G5	17,64	17,50	17,36	17,08	16,80	16,53	16,25	16,28
	G6	11,37	11,55	11,72	12,07	12,42	12,77	13,12	10,87
3º PAV	G1	26,44	26,69	26,92	27,36	27,77	28,15	28,49	27,10
	G2	34,60	34,24	33,89	33,23	32,62	32,06	31,55	33,90
	G3	32,21	32,03	31,85	31,52	31,20	30,92	30,66	33,62
	G4	33,44	33,17	32,90	32,40	31,94	31,51	31,12	34,56
	G5	35,27	34,86	34,47	33,72	33,02	32,39	31,80	32,44
	G6	22,75	23,26	23,76	24,70	25,57	26,37	27,11	22,94
2º PAV	G1	39,67	40,14	40,59	41,38	42,07	42,66	43,15	41,02
	G2	51,90	51,19	50,53	49,34	48,32	47,45	46,72	49,00
	G3	48,32	47,96	47,62	47,01	46,49	46,05	45,67	50,34
	G4	50,17	49,63	49,12	48,22	47,44	46,77	46,21	50,51
	G5	52,91	52,10	51,35	50,00	48,84	47,85	47,01	48,57
	G6	34,12	35,13	36,08	37,78	39,24	40,48	41,53	36,03
1º PAV	G1	52,89	53,67	54,37	55,57	56,54	57,31	57,91	55,26
	G2	69,20	68,04	66,99	65,20	63,77	62,63	61,73	62,95
	G3	64,43	63,83	63,30	62,39	61,65	61,07	60,61	67,24
	G4	66,89	66,00	65,21	63,84	62,75	61,88	61,19	65,91
	G5	70,54	69,22	68,03	66,00	64,36	63,07	62,05	64,96
	G6	45,49	47,15	48,65	51,21	53,26	54,89	56,18	49,24

Fonte: Dados do próprio autor.

No Grupo 01 pode ser observado que as paredes P7 e P9 são menos solicitadas.

A parede P1, por ter uma simetria, possui tensões com intensidades próximas em todo seu comprimento, podendo ser observado uma tendência de maior solicitação em direção a localização do CG determinado na área de influência de carregamento do grupo.

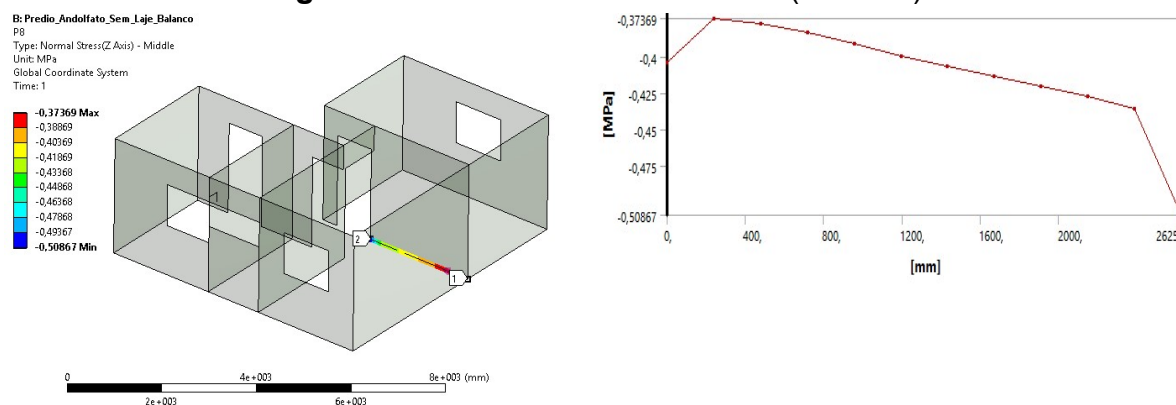
Figura 66 - Caminho de tensões P9 - P1 - P7 (M.GPCI)



Fonte: Dados do próprio autor.

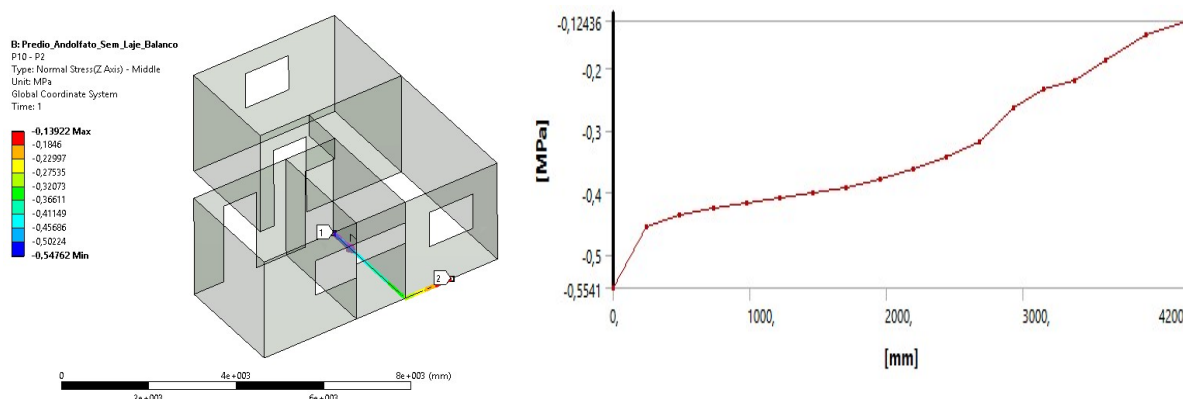
Ainda referente ao Grupo1, a parede P8 possui os resultados com maiores intensidades considerando a localização do CG, Figura 67.

Figura 67 - Caminho de tensões P8 (M.GPCI)



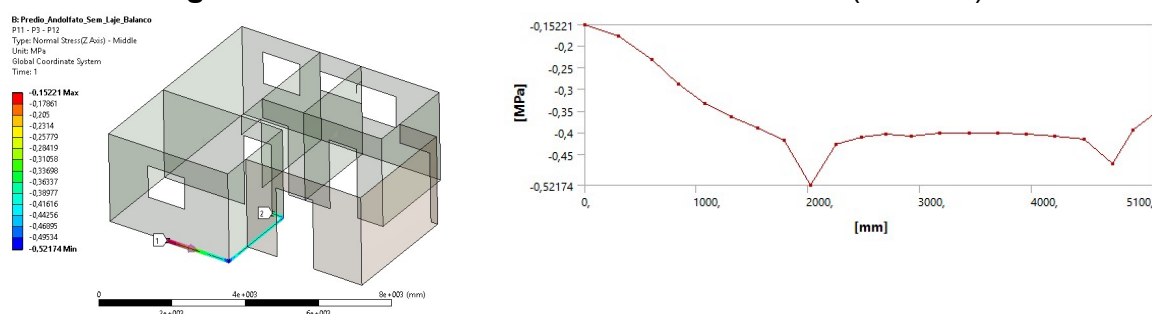
Fonte: Dados do próprio autor.

No grupo 02, os resultados dos caminhos de tensões são ilustrados na Figura 68. Em análise ao gráfico é possível relacionar o aumento das intensidades de compressão em função da localização do CG.

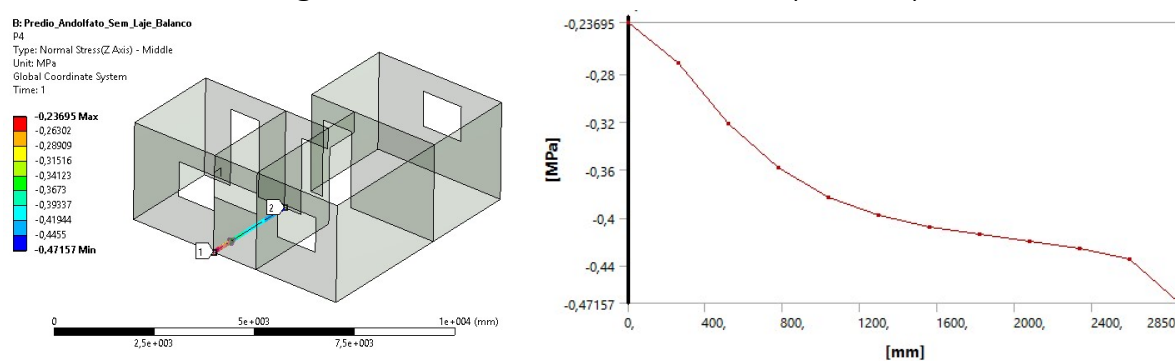
Figura 68 - Caminho de tensões P2 - P10 (M.GPCI)

Fonte: Dados do próprio autor.

Para o grupo 03, também é possível verificar que as intensidades das tensões são maiores nas paredes mais próximas ao CG de aplicação da carga, Figura 69.

Figura 69 - Caminho de tensões P11 - P3 - P12 (M.GPCI)

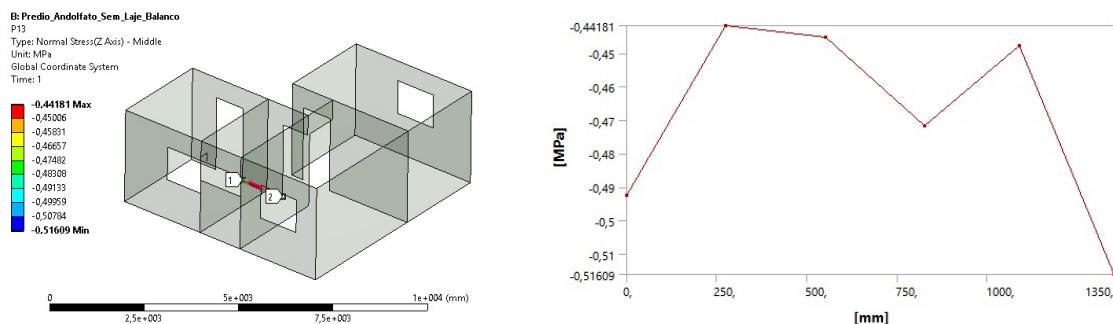
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 70 - Caminho de tensões P4 (M.GPCI)

Fonte: Dados do próprio autor.

No grupo 4, o comportamento da distribuição das tensões também teve concordância com o posicionamento do CG, que está mais próximo da parede P13. Os valores podem ser verificados na Figura 70 e Figura 71.

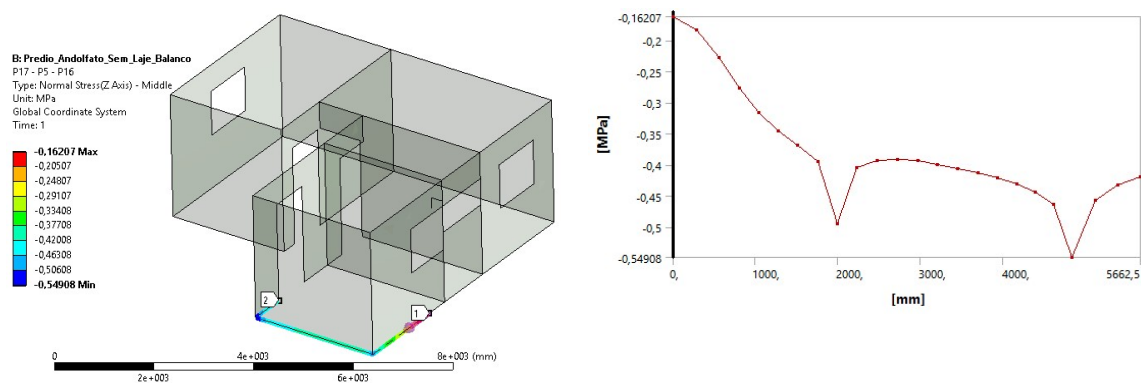
Figura 71 - Caminho de tensões P13 (M.GPCI)



Fonte: Dados do próprio autor.

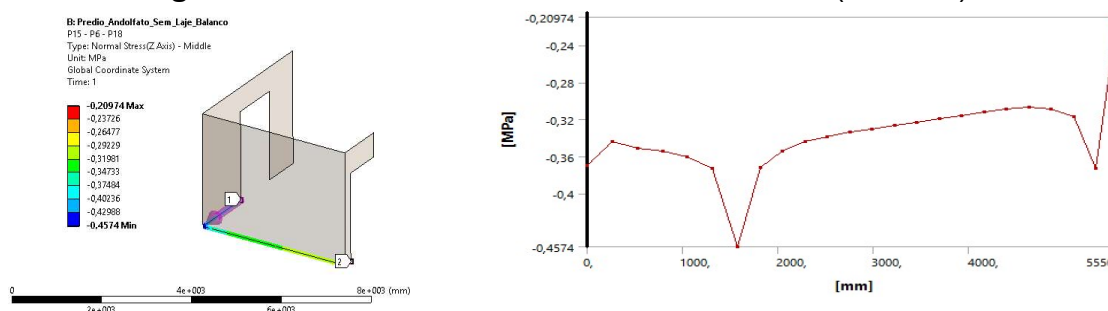
O Grupo 5 formado pelas paredes P17, P5 e P16, os resultados das tensões de compressão são ilustradas na Figura 72.

Figura 72 - Caminho de tensões P17 - P5 - P16 (M.GPCI)



Fonte: Dados do próprio autor.

O Grupo 06, formado pelas paredes P15, P6 e P18, possui as tensões indicadas na Figura 73.

Figura 73 - Caminho de tensões P15 - P6 - P18 (M.GPCI)

Fonte: Dados do próprio autor.

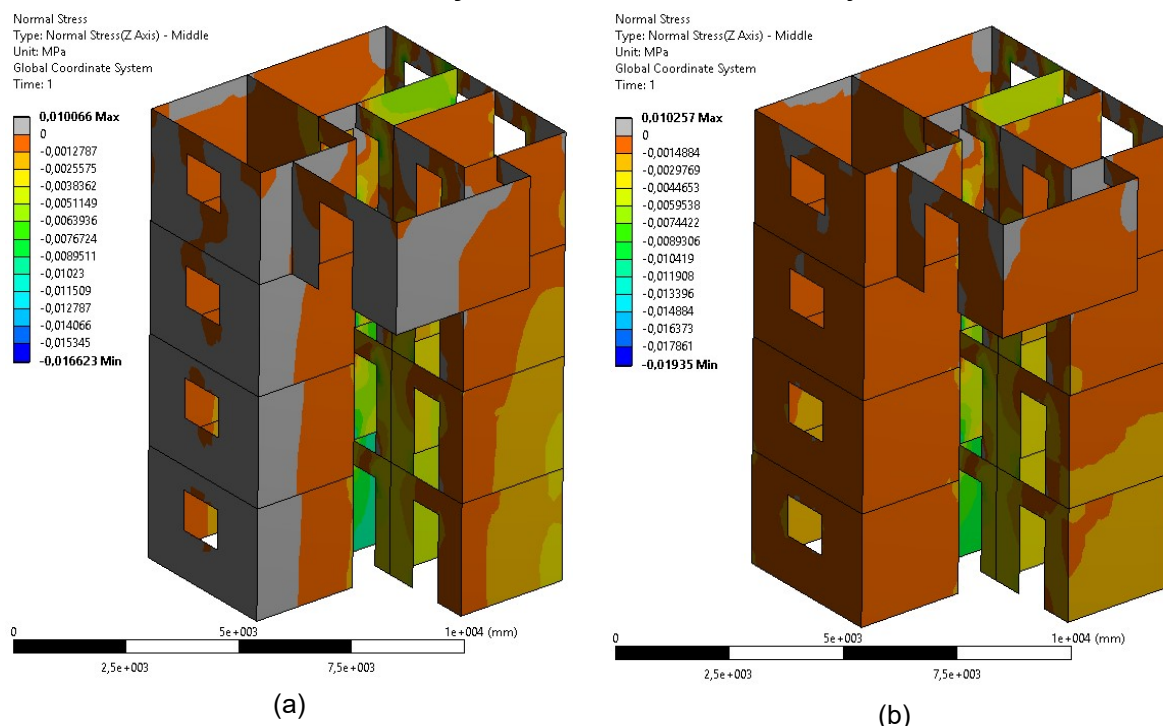
8.2 Modelo M.GPCI com cargas adicionais

Considerando as simulações com as forças adicionais no Grupo 02, foi possível observar diferenças na distribuição das forças de acordo a imposição de restrição dos deslocamentos horizontais nas lajes, Figura 74. Essa figura, obtida somente com a aplicação da carga adicional no Grupo 02, indica os resultados de espraçamento das forças na parede P3, onde, para uma melhor visualização do comportamento analisado, as paredes P14, P6 e P18 foram ocultas.

Os resultados de compressão investigado na parede P3 podem se diferenciar considerando as restrições das lajes. Sem a restrição dos deslocamentos nas lajes, as forças de solicitação, que geram um efeito de excentricidade, possuem resultados finais próximos a zero considerando a distribuição linear da resultante obtida da parede em questão. No entanto, quando a restrição do deslocamento no modelo é imposta, pode-se verificar um melhor espraçamento das forças com resultados diferentes.

Essa investigação permitiu relacionar alguns efeitos obtidos nos resultados obtidos pela simulação numérica. Apesar da identificação dos efeitos aqui representados, investigações devem ser melhor analisadas para a compreensão considerando a geometria da edificação.

Figura 74 - Espraiamento das forças adicionais e efeitos na parede P3 (a) sem e (b) com restrição de deslocamentos da laje



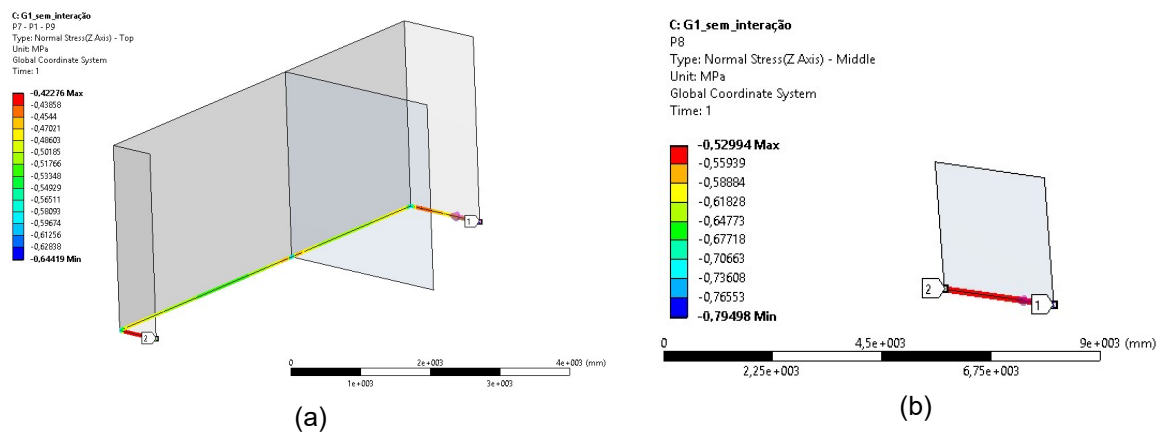
Fonte: Dados do próprio autor.

8.3 Modelo M.GIP_X

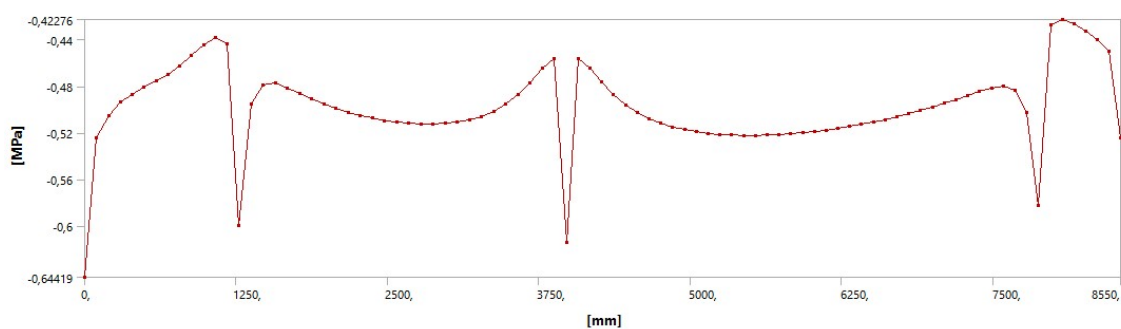
Os gráficos de caminho de tensões para análise aqui apresentada possuem as mesmas características de representação indicadas no item 8.1. Esses gráficos foram obtidos nos elementos de reação em nível de fundação dos grupos isolados de paredes, considerando os 6 pavimentos discretizado com aplicação de forças de solicitação no topo das paredes, em cada nível, de acordo com as intensidades do carregamento 02.

8.3.1 Solicitações das paredes do M.GPI_1

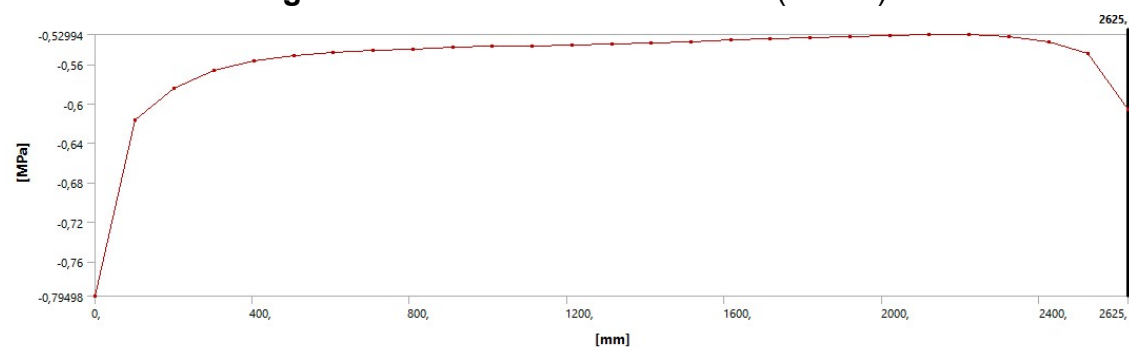
Os resultados serão indicados pela tensão obtida graficamente de acordo com o caminho determinados para a solicitação dos 06 pavimentos. Para o Grupo 01 foram definidos dois caminhos, o primeiro refere-se as paredes P7, P1 e P9 e o segundo é referente a parede P8,

Figura 75 - Caminho de tensões das paredes (a) P7, P1 e P9 e (b) P8 (M.GIP)

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 76 - Caminho de tensões P7, P1 e P9 (M.GIP)

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 77 - Caminho de tensões P8 (M.GIP)

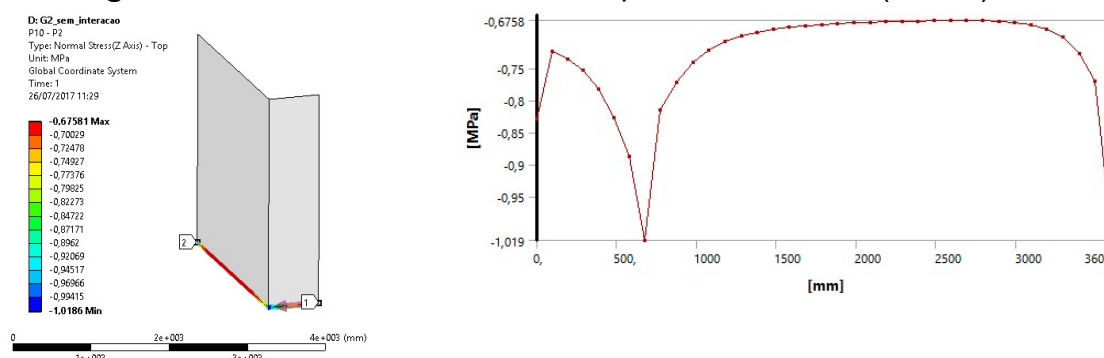
Fonte: Dados do próprio autor.

As solicitações indicadas na Figura 75 (a) e (b) são ilustradas graficamente na Figura 76 e Figura 77, respectivamente.

8.3.2 Solicitações das paredes do M.GPI_2

Analogamente aos resultados apresentados para o Grupo 1, são indicadas as tensões obtidas graficamente de acordo com o caminho determinados. Para o Grupo 02 foi definido apenas um caminho referente a parede P10 e P2 (Figura 78).

Figura 78 - Caminho de Tensões das paredes P10 - P2 (M.GIP)



Fonte: Dados do próprio autor.

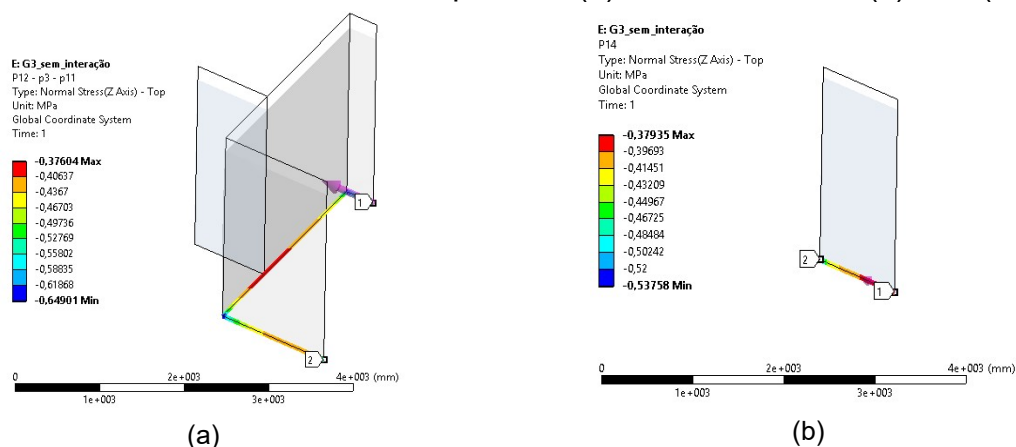
8.3.3 Solicitações das paredes do M.GPI_3

Analogamente aos resultados anteriores, são indicadas as tensões obtidas graficamente de acordo com os caminhos determinados.

Para o Grupo 03 foram definidos dois caminhos referentes as paredes P12-P3-P11 e P14. A Figura 79 indica os caminhos definidos.

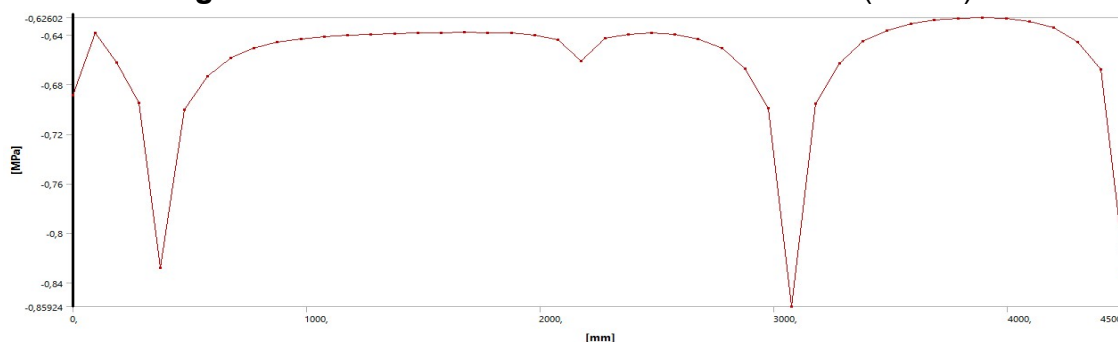
As solicitações indicadas na Figura 79 (a) e (b) são ilustradas graficamente, através dos gráficos de caminho de tensão, na Figura 80 e Figura 81, respectivamente.

Figura 79 - Caminho de tensões das paredes (a) P12, P3 e P11 e (b) P14 (M.GIP)



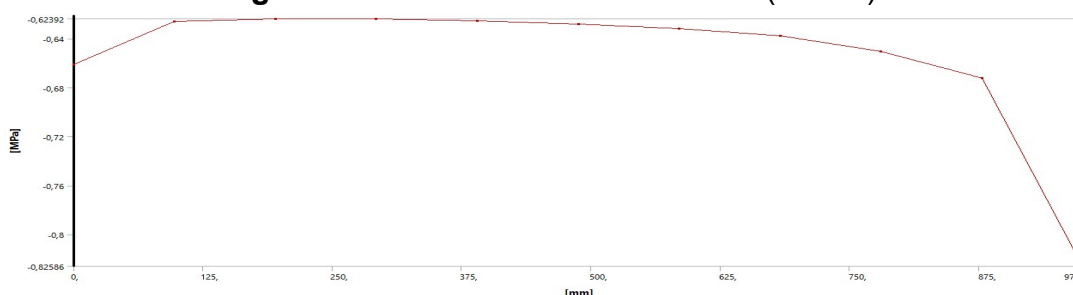
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 80 - Tensões do caminho P12 - P3 - P11 (M.GIP)



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 81 - Tensões do caminho P14 (M.GIP)



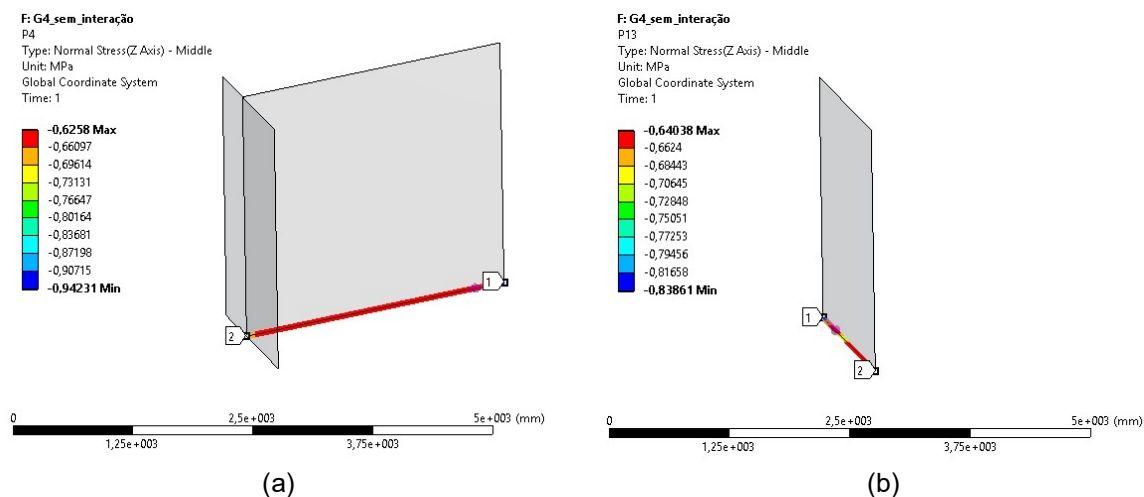
Fonte: Dados do próprio autor.

8.3.4 Solicitações das paredes do M.GPI_4

Analogamente aos resultados anteriores, são indicadas as tensões obtidas graficamente de acordo com os caminhos determinados. Para o Grupo 04 foram

definidos dois caminhos referentes as paredes P4 e P13. A Figura 82 indica os caminhos definidos.

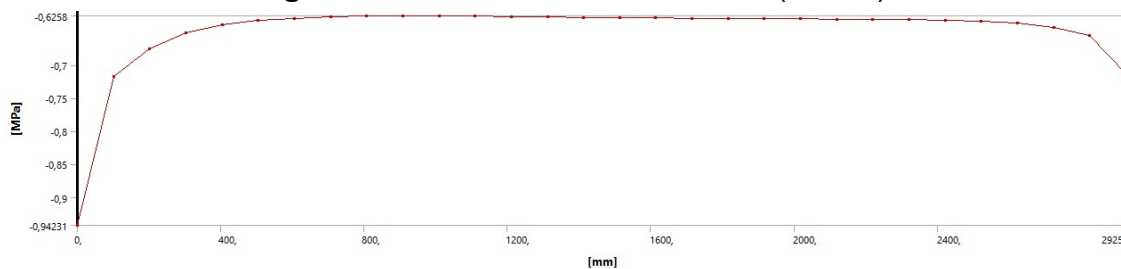
Figura 82 - Caminho de tensões das paredes (a) P4 (b) P13 (M.GIP)



Fonte: Dados do próprio autor.

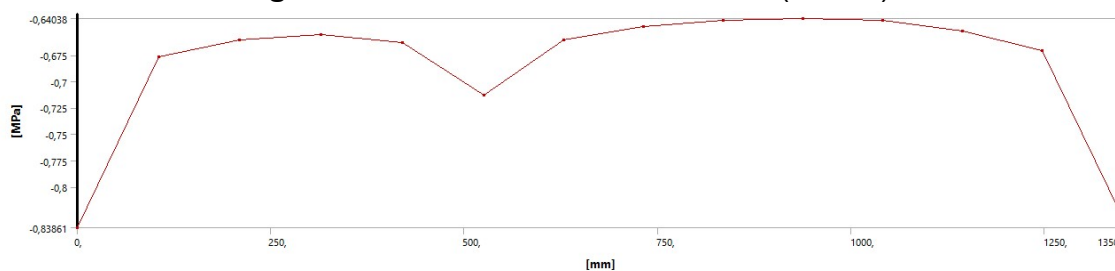
As solicitações indicadas na Figura 82 (a) e (b) são ilustradas graficamente na Figura 83 e Figura 84.

Figura 83 - Caminho de tensões P4 (M.GIP)



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 84 - Caminho de tensões P13 (M.GIP)

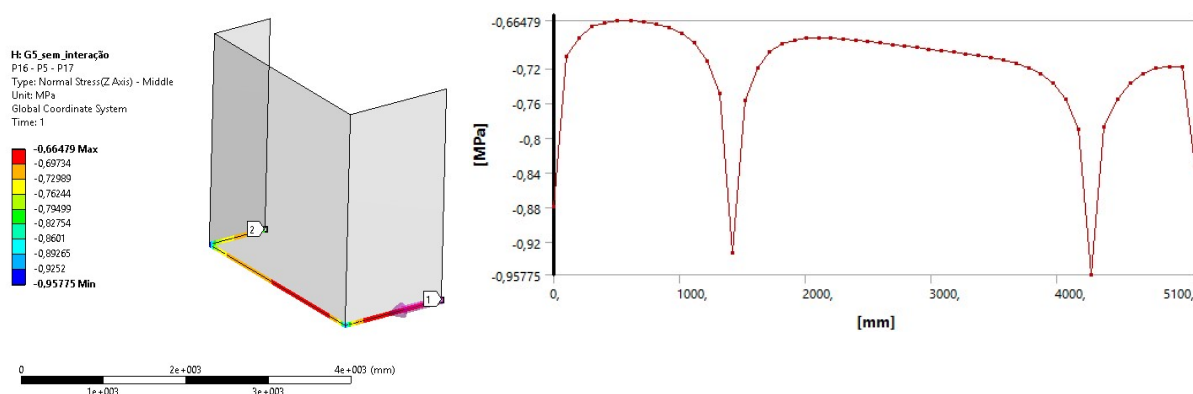


Fonte: Dados do próprio autor.

8.3.5 Solicitações das paredes do M.GPI_5

Analogamente aos resultados anteriores, é indicado a tensão obtida graficamente de acordo com o caminho determinado. Para o Grupo 05 foi definido apenas um caminho referente a parede P17, P5 e P16. A Figura 85 indica o caminho definido.

Figura 85 - Caminho de tensões P17 - P5 - P16 (M.GIP)

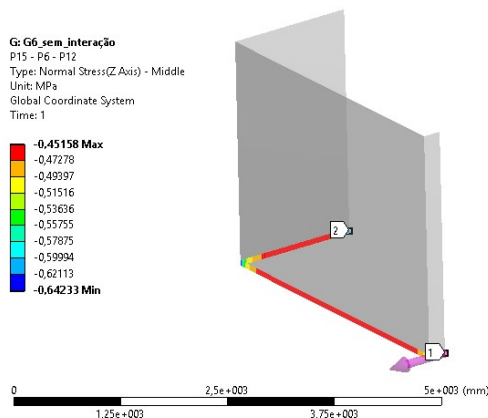


Fonte: Dados do próprio autor.

8.3.6 Solicitações das paredes do M.GPI_5

Para o Grupo 06 foi definido apenas um caminho de tensões referente as paredes P18, P6 e P15, Figura 86.

Figura 86 - Caminho de tensões das paredes P18 - P6 - P15



Fonte: Dados do próprio autor.

As solicitações indicadas na Figura 86 são ilustradas graficamente na Figura 87.



Fonte: Dados do próprio autor.

8.4 Configuração das forças verticais nas paredes pelos resultados obtidos nos modelos em elementos finitos

Durante a obtenção dos dados, verificou-se que as concepções configuração de forças finais para as paredes poderiam indicar resultados muito elevados, conforme a configuração adotada.

Um exemplo, foram os resultados da concepção adotada para a determinação da carga na parede P10 pelas reações de apoios G2.R1, G2.R2 e G2.R3. Considerando esta divisão de forças, os valores poderiam chegar próximos a 115,00 kN/m (0,82 MPa), onde, pelo caminho de tensões do M.GPCI indicados pela Figura 68, esses valores variam em torno de 0,20 a 0,30 MPa. Visando um comportamento mais próximo dos resultados em elementos finitos, adotou-se a concepção indicada na Tabela 3-6, onde as forças do apoio G2.R3 é dividida igualmente pelas paredes adjacentes P2 e P10, resultando em uma solicitação próximo a 0,55 MPa.

8.5 Convergência dos valores obtidos nos modelos numéricos x modelos simplificados

A interação das paredes na alvenaria estrutural leva como principal consideração a homogeneização das forças verticais em uma edificação. Como resultado desta interação, é possível afirmar que a força resultante de um grupo nos níveis inferiores será cada vez mais próxima da força homogeneizada do macrogrupo.

Nos modelos numéricos adotados, a distribuição de forças obteve um comportamento similar ao conceito abordado, exceto pela particularidade referente ao Grupo 03. A Tabela 8-3 indica os valores obtidos pelo processamento numérico dos grupos e os carregamentos adotados da Tabela 6-1.

Tabela 8-3 - Convergência dos carregamentos adotados pelos resultados do modelo em MEF (kN/m)

Grupo	Carregamento 01		Carregamento 02		MEF	Macrogrupo
	1 Pav	4 Pav	1 Pav	4 Pav		
G1	14,06	56,22	13,22	52,89	55,26	59,59
G2	17,69	70,77	17,30	69,20	62,95	
G3	15,37	61,50	16,11	64,43	67,24	
G4	17,06	68,22	16,72	66,89	65,91	
G5	15,63	62,51	17,64	70,54	64,96	
G6	11,99	47,96	11,37	45,49	49,24	

Fonte: Dados do próprio autor.

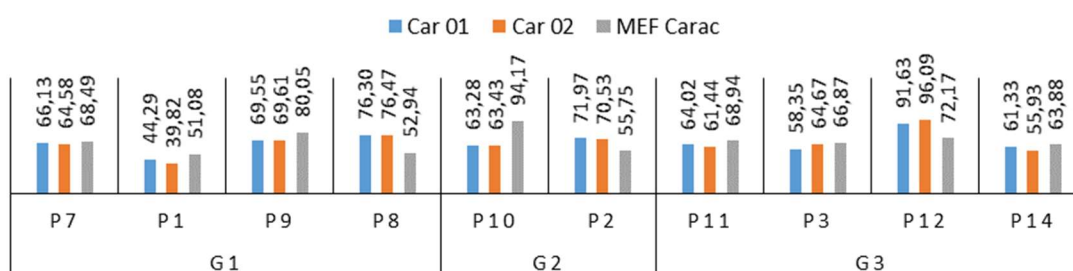
A força média do macrogrupo foi obtida pela soma dos pesos próprios das paredes e lajes mais a carga accidental, dividido pela soma dos comprimentos dos grupos.

8.6 Comparação dos resultados dos modelos simplificados e simulação numérica

As ilustrações da Figura 88 e Figura 89 apresentam os resultados obtidos para os valores das paredes para os procedimentos numéricos simplificados de Paredes Individuais (PI) considerando os carregamentos definidos e também os valores fornecidos pelos métodos dos elementos finitos.

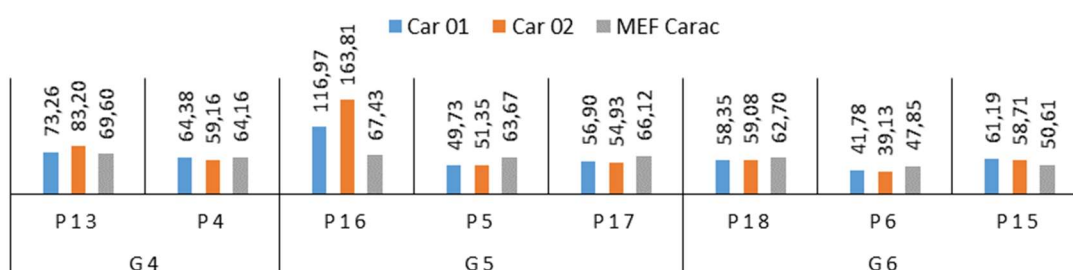
Os valores obtidos na simulação numérica no modelo M.GPCI indicam as forças resultantes considerando a somatória das reações de apoio para a determinação da carga da parede conforme indicado na Tabela 3-6. Esses resultados são apresentados com a sigla “MEF Carac.”

Figura 88 - Carregamentos das paredes (kN/m) dos modelos numéricos simplificados PI e pelo MEF considerando a caracterização (G1, G2 e G3)



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 89 - Carregamentos das paredes (kN/m) dos modelos numéricos simplificados PI e pelo MEF considerando a caracterização (G4, G5 e G6)



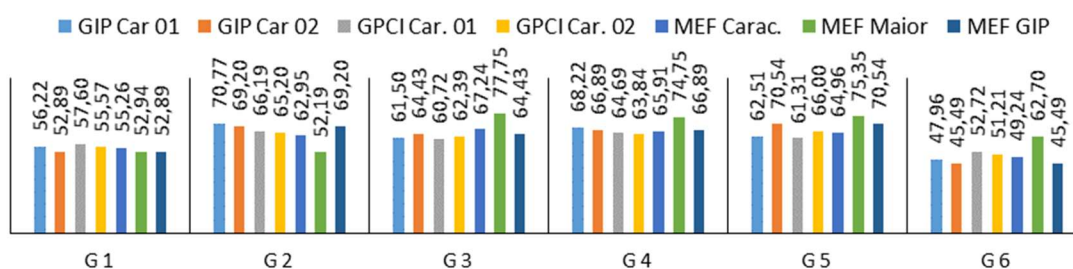
Fonte: Dados do próprio autor.

É possível identificar que o modelo numérico produz resultados mais nivelados para as solicitações. No entanto, o grupo 02 obteve em sua parede P10 valores maiores considerando a caracterização das forças.

Em outras situações, como a parede P8 do Grupo 01 e P16 do Grupo 05 apresentaram resultados inferiores quando comparados aos procedimentos numéricos para os dois carregamentos definidos. Essa diferença pode estar associada a interação das forças com os elementos adjacentes na simulação numérica.

A Figura 90 indica os resultados para grupos de paredes individuais e grupos com interação. A taxa adotada para a interação entre os grupos foi de 20%. Também são indicados os maiores valores das reações de apoio obtidos na simulação numérica dos respectivos grupos para comparações.

Figura 90 - Carregamentos dos grupos (kN/m) dos modelos numéricos simplificados e pelo MEF



Fonte: Dados do próprio autor.

Pelos valores indicados na ilustração anterior, é possível identificar que alguns valores obtidos pelo modelo numérico, considerando as maiores solicitações, são inferiores aos valores obtidos pelos outros procedimentos. Isso indica uma distribuição das forças nos modelos numéricos e, quando considerado a caracterização para definição das cargas de paredes, pode-se obter valores maiores devido a somatória das forças.

Um exemplo baseado no contexto do parágrafo anterior são os resultados do Grupo 02. O valor obtido considerando a caracterização das forças nas paredes resulta em um valor maior do que o obtido pela maior reação. Em outros casos, é possível verificar que alguns elementos possuem uma maior solicitação, no entanto, devido a caracterização esta intensidade diminui passando a ter valores próximos aos outros procedimentos considerados, resultado de paredes que possuem mais de um elemento de reação para definição da carga distribuída linearmente.

8.7 Taxa de uniformização de cargas x características geométricas dos grupos

Considerando os resultados obtidos pelos modelos numéricos simplificados e discretizado em elementos finitos, foi apresentada uma proposta visando caracterizar os comportamentos dos grupos de acordo com suas solicitações e resultados obtidos.

Tabela 8-4 - Solicitações processos numéricos simplificados x reações MEF

Grupo	Parede	Cargas de Solicitação (kN/m)				Reações (kN/m) MEF*			
		Carregamento 01		Carregamento 02		Paredes		Grupos	
		PI	GIP	PI	GIP	kN/m	MPa	kN/m	MPa
G1	P1	44,29	56,22	39,82	52,89	51,08	0,36	55,26	0,39
	P7	66,13		64,58		68,49	0,49		
	P8	76,30		76,47		52,94	0,38		
	P9	63,28		69,61		80,05	0,57		
G2	P2	71,97	70,77	70,53	69,20	55,75	0,40	62,95	0,45
	P10	63,28		63,43		94,17	0,67		
G3	P3	58,35	61,50	64,67	64,43	66,87	0,48	67,24	0,48
	P11	64,02		61,44		68,94	0,49		
	P12	91,63		96,09		72,17	0,52		
	P14	61,33		55,93		63,88	0,46		
G4	P4	64,38	68,22	59,16	66,89	64,16	0,46	65,91	0,47
	P13	73,26		83,20		69,60	0,50		
G5	P5	49,73	62,51	51,35	70,54	63,67	0,45	64,96	0,46
	P16	116,97		163,81		67,43	0,48		
	P17	56,90		54,93		66,12	0,47		
G6	P6	41,78	47,96	39,13	45,49	47,85	0,34	49,24	0,35
	P15	61,19		58,71		50,61	0,36		
	P18	58,35		59,08		62,70	0,45		

* valores obtidos de acordo com a concepção de reações para cargas de paredes

Fonte: Dados do próprio autor.

O procedimento buscou a obtenção de parâmetros considerando os resultados em função da uniformização da carga de maior solicitação da parede de um grupo.

Inicialmente, para a determinação da taxa de uniformização, foi identificado os valores de solicitação da parede e das cargas médias de cada grupo. Posteriormente, na mesma tabela, foram obtidos os valores de carga média resultantes da simulação numérica.

A Tabela 8-4 indica os valores para os 4 pavimentos. Essas informações, apesar de já apresentadas no estudo, foram organizadas para uma melhor visualização. As paredes mais solicitadas foram destacadas.

O próximo passo consiste na aplicação da equação (8). Os resultados são indicados Tabela 8-5 considerando o carregamento 01.

$$\%T_u = \frac{S_p - Ch_{mef}}{S_p} \quad (8)$$

Onde:

S_p : carga (kN/m) da parede mais solicitada;

Ch_{mef} : carga (kN/m) homogeneizada na discretização em elementos finitos considerando a caracterização do modelo;

$\%T_u$: taxa de uniformização do grupo.

Tabela 8-5 - Taxa de uniformização dos grupos pelas paredes mais solicitadas – carregamento 01

Grupo	Parede mais solicitada	(A)	(B)	(A) - (B)	%T _u
		kN/m			
G1	P8	76,30	55,26	21,03	27,57%
G2	P2	71,97	62,95	9,02	12,53%
G3	P12	91,63	67,24	24,39	26,62%
G4	P13	73,26	65,91	7,35	10,03%
G5	P16	116,97	64,96	52,01	44,46%
G6	P15	61,19	49,24	11,95	19,53%

Fonte: Dados do próprio autor.

Para o carregamento 02, as taxas de uniformização são indicadas na Tabela 8-6.

Tabela 8-6 - Taxa de uniformização dos grupos pelas paredes mais solicitadas – carregamento 02

Grupo	Parede mais solicitada	(A)	(B)	(A) - (B)	%Tu
		kN/m			
G1	P8	76,47	55,26	21,21	27,73%
G2	P10	70,53	62,95	7,57	10,74%
G3	P12	96,09	67,24	28,85	30,03%
G4	P13	83,20	65,91	17,29	20,78%
G5	P16	163,81	64,96	98,85	60,34%
G6	P18	59,08	49,24	9,84	16,66%

Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando as características indicadas na Tabela 3-5 é possível relacionar as taxas de uniformização com as relações geométricas identificadas. Para o carregamento 01 as relações de taxa de uniformização pelas características geométricas são indicadas na Tabela 8-7.

Tabela 8-7 - Correlação %Tu x Características geométricas - Carregamento 01

%T_u	(A) / (B)*	Grupos
10% a 15%	0,55 a 0,65	G2, G4
15% a 30%	> 0,65	G1, G3, G6
> 30%	0,68	G5
(A) = Comprimento do grupo / (B) = Área da circunferência		

Fonte: Dados do próprio autor.

Para o carregamento 02, as correlações da taxa de uniformização com as características geométricas são indicadas na Tabela 8-8.

Tabela 8-8 - Correlação %Tu x Características geométricas - Carregamento 02

%T_u	(A) / (B)*	Grupos
10% a 15%	0,55 ~ 0,60	G2
15% a 30%	> 0,60	G1, G3, G4, G6
> 30%	0,68	G5
(A) = Comprimento do grupo/ (B) = Área da circunferência		

Fonte: Dados do próprio autor.

9 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram efetuadas análises de resultados obtidos em modelos discretizado por elementos finitos e modelos simplificados.

Na pesquisa bibliográfica, foi identificado que o uso de modelos numéricos pode ser utilizado para obtenção de resultados que expressem o comportamento da alvenaria estrutural. No entanto, seu uso deve ser efetuado considerando o tipo de análise a ser efetuada. No caso da análise para a estrutura de forma global, com objetivos de distribuição das forças verticais, em regime linear, o uso de elementos de casca com propriedades elásticas médias da alvenaria pode ser adotado. Para análises pontuais, é necessário a utilização de micromodelos com caracterização dos materiais empregados.

Os resultados obtidos para a definição dos carregamentos considerando o processo de divisão de laje e a simulação numérica, apesar de gerar resultados próximos, indicam uma distribuição com diferenças que foram de grande importância para análise dentro os processos considerados. É válido ressaltar que a distribuição de cargas obtidas na simulação numérica foi efetuada na última laje do modelo discretizado, com a mesma carga acidental definida para os demais pavimentos.

Considerando a superposição de efeitos, verificou-se que o comportamento das ações de solicitação pode gerar deslocamentos horizontais no M.GPCI. No entanto, para a simulação de M.GIP, segundo os conceitos abordados de restrição de translação nos níveis de ligação da laje com a alvenaria, não foi verificado esse efeito nos grupos individuais.

Em relação a convergência dos carregamentos dos grupos para o carregamento médio do macrogrupo, após as interações de forças, no modelo M.GPCI, verificou-se que o Grupo 03 obteve um ganho de carregamento, no entanto, acredita-se que este comportamento ocorra devido a efeitos de segunda ordem, ocorridos pelos deslocamentos horizontais, devendo ser melhor investigado.

Foi possível observar nos gráficos de caminho de tensões que as distribuições do carregamento correspondem aos conceitos descritos por Shuterland (1969), onde os valores de maior solicitação estão próximos ao CG da área de influência determinado pelo processo de divisão de lajes, no entanto, esse fenômeno deve ser

melhor investigado devido a consideração das lajes e a distribuição das ações ocorrer por simulação numérica.

Em relação aos modelos simplificados, pode-se concluir, conforme esperado, que o procedimento de Paredes Individuais (PI) resulta em carregamentos superiores por não considerar a interação entre paredes. Neste caso, os maiores valores foram obtidos para a parede P16 do Grupo 05, com solicitações de 116,97 kN/m e 163,81 kN/m para o carregamento 01 e carregamento 02 respectivamente.

Em análise aos resultados grupos individuais, o modelo simplificado considera uma homogeneização das forças no grupo. Para os resultados obtidos na simulação numérica, verificou-se que este fenômeno ocorre, no entanto, os resultados apresentam diferenças quando comparados a uma situação de homogeneização completa, fato este que pode ser associado pela altura insuficiente do para a homogeneização das forças.

Ainda em relação ao procedimento de grupos individuais, a simulação numérica possibilitou uma verificação de normalização das forças finais de acordo com o número de pavimentos. Esta normalização refere-se à transferência dos esforços, resultado obtido pela diferença das ações de solicitação pelas ações resultantes na base de cada parede. Para grupos com dimensões pequenas, essa normalização ocorre com um único pavimento, caso do Grupo 02. Em grupos com dimensões maiores, como por exemplo o Grupo 01, esta normalização ocorre necessitando de um maior número de pavimentos.

Os resultados para o modelo simplificado de GIP foram diferentes para os grupos mais solicitados de acordo com o carregamento adotado. Para o carregamento 01, o grupo mais solicitado é o Grupo 02, com valor final de 70,77 kN/m. No caso do carregamento 02, o Grupo 05 é o mais solicitado com valor final de 70,54 kN/m.

Os valores obtidos pela simulação numérica do M.GPCI, quando comparados aos resultados obtidos pelos modelos simplificados de GPCI, tendem a convergir a para uma taxa de interação de 20%. Acredita-se que com um maior número de pavimentos na simulação a convergência para esta taxa seria ainda maior.

Comparando os resultados da simulação numérica com obtidos no M.GPCI, verifica-se que, no estudo efetuado, os resultados é conservador devido o ganho de

carga no Grupo 03 (67,24 kN/m), se considerados para dimensionamento da alvenaria.

Ainda para o modelo simplificado GPCI com taxa de 20%, o grupo mais solicitado é o Grupo 05 (66,00 kN/m) considerando o carregamento 02. Para o carregamento 01 o maior valor pertence ao Grupo 02 (66,19 kN/m).

Analisando os maiores valores obtidos da simulação numérica nas reações de apoio, o Grupo 03 é identificado com valor de 77,75 kN/m no elemento G3.R4.

Para os resultados obtidos no M.GIP, a simulação numérica possui valores de solicitação com maior intensidade em algumas paredes devido o processamento considerar a interação em função da altura, onde, no modelo simplificado, o carregamento é considerado como homogeneizado dentro do grupo.

Além disso, pode-se notar que os valores para comparações sempre foram mais próximos ao carregamento 02 devido a diferença nas solicitações da parede.

Por fim, verifica-se que os modelos numéricos simplificados resultaram em valores com boa aproximação quando comparados as simulações numéricas, principalmente pela convergência da taxa de interação de 20%, no entanto, eles não consideram alguns comportamentos identificados nas simulações numéricas.

9.1 Sugestões para trabalhos futuros

a. Estudo para relacionar a macromodelagem com modelos experimentais reduzidos;

Por se tratar de um modelo teórico, é justificável a realização de uma macromodelagem para retratar o comportamento de um modelo em escala reduzida, possibilitando uma maior correlação dos dados e comportamento da transferência de forças e a calibração do modelo numérico.

b. Macromodelagem considerando o efeito arco para a determinação da taxa de interação e o comportamento das interfaces das paredes;

No estudo realizado, foram definidos apoios fixos lineares para a obtenção das reações das paredes em nível de fundação. Para uma melhor correlação com dados da alvenaria estrutural, seria interessante a obtenção do comportamento considerando o efeito arco que é oriundo das concentrações de tensões em locais com presença de vigas e estacas de fundação. Outra característica importante seria o comportamento das interfaces das paredes de acordo com os resultados obtido em estudos experimentais, que apesar das cargas de serviço indicam que a alvenaria trabalha em regime linear, essas características poderiam indicar possíveis interferências obtendo um modelo mais calibrado.

c. Macromodelagem considerando a distribuição de forças com lajes pré-moldadas;

O trabalho foi realizado considerando a distribuição das forças oriundas da laje considerando a utilização de lajes maciças. No entanto, devido a vinculação adotada para lajes pré-moldadas gerar resultados de distribuição, torna-se interessante esta análise principalmente considerando os efeitos de espraçamento e interação em função da altura.

REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, R. P. **Estudo teórico e experimental da interação de paredes em edifícios de alvenaria estrutural**. 203 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ASSAN, A.E. **Método dos elementos finitos: primeiros passos**. 2.ed. Campinas: UNICAMP, 2003. 298 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos Parte 2: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural: terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-1**: Alvenaria Estrutural: blocos de concreto: parte 1: projeto. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-2**: Alvenaria estrutural: blocos de concreto: parte 2: execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

CAMACHO, J. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. Ilha Solteira: Departamento de Engenharia Civil-UNESP/FE, 2006. 48 p. (Notas de aula).

CAMACHO, J. S. **Dimensionamento de alvenaria estrutural de concreto**. Ilha Solteira: Departamento de Engenharia Civil-UNESP/FE, 2014. 32 p. (Notas de aula).

CAPUZZO NETO, V. **Estudo teórico e experimental da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas a ações verticais**. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. **Efeitos de aberturas em painéis de alvenaria estrutural**. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5., 1994a, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1994a. p. 359-367.

CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. **Procedimento para análise de edifícios de alvenaria estrutural submetidos a ações verticais**. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5.,

1994b, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1994b. p. 305-314.

CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO M. A. **A simple finite element based model for evaluating the interaction of load bearing walls subjected to vertical loading.** *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 18, p. 77–89, 2004.

EUROCODE 6 **Design of masonry structures:** Part 1-1. European standard, English Version, 2005. 123 f.

HENDRY, Emeritus A.W. *Masonry Walls: materials and construction.* **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 15, p. 323-330, 2001.

SILVA JUNIOR, D. M. **Análise numérica do comportamento não-linear de prismas de alvenaria estrutural submetidos a ações verticais utilizando o elemento finito prismático regular linear.** 86 f. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2007.

MATA, R. C. **Influência do padrão de argamassamento na resistência à compressão de prismas e mini-paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto.** 180 f. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2006.

MOREIRA, Elian M. S. **Análise experimental em escala reduzida de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos submetidas a ações verticais.** 146 f. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

NASCIMENTO NETO, J. A. **Investigação das solicitações de cisalhamento em edifícios de alvenaria estrutural submetidos a ações horizontais.** 144 f. 1999. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

PARSEKIAN, G. A.; FRANCO L. S. **Método para distribuição de esforços verticais entre paredes de edifícios de alvenaria estrutural.** *Revista Techne*, n. 61. Abril/2002.

PELETEIRO, S. C. **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural.** 143 f. 2002. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002..

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifício de alvenaria estrutural.** São Paulo. Editora Pini. 2003.

RODRIGUES, R. O. **Introdução ao método dos elementos finitos.** Ilha Solteira: Departamento de Engenharia Civil-UNESP/FE, 1999. 44 p. (Notas de aula).

SAMPAIO, M. B. **Fissuras em edifícios residenciais em alvenaria estrutural.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SAVASSI, W. **Introdução ao método dos elementos finitos em análise linear de estruturas.** São Carlos: USP/EESC, 1996. 260 p.

SILVA, R. F. **Estudo teórico-experimental da distribuição das ações verticais entre paredes de edifício de alvenaria estrutural cerâmica em escala reduzida.** 2011. 232 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

BIBLIOGRAFIA

MAIA, E. J. A. **Estudo experimental de vigas de alvenaria estrutural sujeitas a flexão**. 86 f. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2012.

MAURÍCIO, R. M. **Estudo teórico e experimental das ligações diretas contra fiadas entre paredes de blocos de concreto em escala real e reduzida 1:4**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado e Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2005.

OLIVEIRA, L. M. F. **Cisalhamento nas interfaces verticais de paredes de edifícios de alvenaria estrutural**. 271 f. 2009. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PALÁCIO, K. **Desenvolvimento e implementação de um software para análise tridimensional de edifícios altos em alvenaria estrutural**. 180 f. 2001. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharias de Estrutura, Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

PRUDÊNCIO JR., L. R. **Resistência à compressão da alvenaria e correlação entre resistência de unidades, prismas e paredes**. 144 f. 1986. Dissertação (Mestrado). Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1986.

RABELO, A. C. N. **Dimensionamento de alvenaria estrutural segundo recomendações da EUROCODE 6**. 219 f. 2004. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

SANTOS, C. F. R. **Avaliação numérica da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas às ações verticais**. 213 f. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.