UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E CONSTRUÇÃO CIVIL

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DOS SEGMENTOS GRAUTEADOS NA INTERAÇÃO ENTRE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM BLOCOS DE CONCRETO

PAULO FRANCISCO DE OLIVEIRA REIS

D0014C10

GOIÂNIA

2010

PAULO FRANCISCO DE OLIVEIRA REIS

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DOS SEGMENTOS GRAUTEADOS NA INTERAÇÃO ENTRE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM BLOCOS DE CONCRETO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geotécnia e Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de mestre em Construção Civil .

Orientador: Prof. Dr. Magid Elie Khouri

Co-orientador Prof. Dr. Ademir Aparecido do Prado

D0014C10

GOIÂNIA

2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG

R375a

Reis, Paulo Francisco de Oliveira.
Análise numérica da influência dos segmentos grauteados na interação entre paredes de alvenaria estrutural com blocos de concreto / Paulo Francisco de Oliveira Reis. - 2010.
169 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Magid Elie Khouri; Co-orientador: Prof. Dr. Ademir Aparecido do Prado.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010.
Bibliografia.
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.
Apêndices.

1. Alvenaria Estrutural 2. Interação entre Paredes 3. Grauteamento 4. Modelagem Computacional 5. Comportamento Estrutural. I. Título.

CDU: 624.012

Autorizamos a reprodução total ou parcial, para fins de estudo e pesquisa.

Goiânia 06/04/2010

Assinatura:

e-mail: pfreis@uol.com.br

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pos-Graduação em Geotecnia e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

"ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DOS SEGMENTOS GRAUTEADOS NA INTERAÇÃO ENTRE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM BLOCOS DE CONCRETO"

Paulo Francisco de Oliveira Reis

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

Presidida pelo Prof. Dr. Magid Elie Khouri (UFG)

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo (UFG)

Prof. Dr. Gray Farias Moita (CEFET-MG)

Goiânia, 06 de abril de 2010.

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores, professor Magid Elie Khouri e professor Ademir Aparecido do Prado, pelo empenho e dedicação.

Ao professor Daniel de Lima Araújo, pela orientação no uso do Software de Elementos Finitos.

A Escola de Engenharia Civil da UFG, pelos laboratórios e apoio logístico.

Ao programa de mestrado GECON da UFG, pela oportunidade que me deu de fazer o curso de mestrado

A todos os professores do programa do Mestrado, pelas palavras de incentivo e carinho

Aos colegas do programa GECON pela atenção e solidariedade.

A ex-secretaria Aparecida pela atenção.

A minha esposa, Suelene Dias e Silva Reis, pela compreensão, tolerância e paciência.

Aos meus filhos Henri Silva de Oliveira Reis, Breno Silva de Oliveira Reis, pela compreensão.

Ao Engenheiro Civil Ademar Toyonori Hirata, pelo incentivo e apoio.

RESUMO

REIS, Paulo Francisco de Oliveira. (2010). Análise Numérica da Influência dos Segmentos Grauteados na Interação entre Paredes de Alvenaria Estrutural com Blocos de Concreto. Goiânia, 2010. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás –UFG, Goiânia, 2010.

A alvenaria estrutural é um dos sistemas construtivos mais antigos usado pelo homem. Com o avanço tecnológico, o seu uso passou a ser cada vez maior por proporcionar racionalidade e economia para a construção. Por isso, os centros de pesquisas têm buscado conhecê-la de maneira precisa, principalmente no Brasil, onde o sistema utilizado difere de outros países, prevalecendo o uso da alvenaria não armada ou parcialmente armada. Os estudos feitos visam conhecer, primordialmente, os materiais empregados e a avaliação do seu comportamento estrutural. Mesmo assim, ainda há aspectos estruturais da alvenaria que ainda não foram totalmente esclarecidos. A partir deste princípio, a proposta do trabalho foi realizar uma investigação sobre a influência de segmentos grauteados na interação entre paredes, com a utilização de painéis isolados de três, cinco e sete paredes e uma estrutura de múltiplos pavimentos, desenvolvido por modelagem computacional em elementos finitos. Para análise dos resultados, avaliou-se o perfil da distribuição de tensões verticais normais e absorção do carregamento aplicado, que é transferido às paredes. Nesse sentido, percebe-se que em alguns casos o graute causa interferência significativa, como nos furos dos blocos, enquanto que em outros, a sua participação é praticamente desprezível. Exemplo disso são os grauteamentos das cintas.

Palavras Chave – Alvenaria Estrutural. Interação entre Paredes. Modelagem Computacional. Grauteamento. Comportamento Estrutural. Elementos Finitos.

.

ABSTRACT

REIS, Paulo Francisco de Oliveira. (2010). Numerical Analysis of the influence of the segments grouted in the interaction of walls in masonry structural with concrete blocks. Goiânia, 2010. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás –UFG, Goiânia, 2010.

Structural masonry is one of the oldest building systems used by man. With technological advance, its use has become more and more frequent for providing rationality and economy to the building. For that reason, the research centers have tried to get to know it more precisely, especially in Brazil, where the system differs from other countries, prevailing the use of not armed or partially armed masonry. The studies conducted aim to know, primarily, the materials used and the analysis of their structural behavior. Even though, there are still masonry structural aspects that haven't been totally clarified. Based on that principle, the purpose of this work was to accomplish an investigation about the influence of grouting segments in the interaction between walls, with the utilization of isolated panels of three, five and seven walls and a multiple pavement structure, developed by computational modeling in finite elements. For the analysis of the results, check the profile of the distribution of normal vertical tensions and the absorption of applied loading. In this way, it is realizable that in some cases the grout causes significant interference, as in the holes of the bricks, while in others, its participation is almost despicable. An example is the grouting of the braces.

Keywords – Structural masonry. Interaction between walls. Computational Modeling. Grouting. Structural Behavior. Finite Elements.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NBR	Norma Brasileira Registrada
BS	British standards institution
AS	Autralian standard
ACI	American institute concrete
$D_{máx.}$	Diâmetro máximo
G1	Graute com resistência a compressão de 7,98 MPa
G2	Graute com resistência a compressão de 16,47 MPa
G3	Graute com resistência a compressão de 24,38 MPa
A1	Argamassa com traço 1:1:5
A2	Argamassa com traço 1:0,25:3
LDVT	Linear differential variable transformer
P1	Amostra de prisma número 1
P2	Amostra de prisma número 2
P3	Amostra de prisma número 3
P4	Amostra de prisma número 4
CA	Concreto armado

LISTA DE SÍMBOLOS

C1	Comprimento de distribuição
C2	Comprimento de influencia
La	Comprimento da abertura
H	Altura entre aberturas
Ha	Altura da abertura
qn	Carregamento distribuído qualquer
Ln	Comprimento qualquer
x	Número da parede na direção x
y	Número da parede na direção y
Lxy	Comprimento de influencia da parede x na parede y
Lx	Comprimento da parede na direção x
Ly	Comprimento da parede na direção y
PARx	Parede na direção x
PARy	Parede na direção y
Lxx	Comprimento de influencia da parede x na parede x
LUx	Comprimento da carga uniformizada na direção x
LNUx	Comprimento da carga não uniformizada na direção x
qxu	Carga distribuída uniformemente
pxy	Força distribuída da parede x para parede y
pxx	Carga não uniformizada
qx´	Carga distribuída uniformizada final na parede
d1	Diâmetro do circulo 1
d2	Diâmetro do circulo 2
d3	Diâmetro do circulo 3
E	Módulo de elasticidade longitudinal

E_x Módulo de elasticidade na direção x

E_y Módulo de elasticidade na direção y

E_b Módulo de elasticidade do bloco

E_a Módulo de elasticidade da argamassa

ν Coeficiente de Poisson

ν_b Coeficiente de Poisson do bloco

ν_a Coeficiente de Poisson da argamassa

σ_{xb} Tensão normal no bloco na direção x

σ_{yb} Tensão normal no bloco na direção y

σ_{zb} Tensão normal no bloco na direção z

σ_{xa} Tensão normal na argamassa na direção x

σ_p Tensão normal vertical aplicada nos painéis

σ_e Tensão normal vertical aplicada na parede da estrutura de múltiplos andares

σ_{ya} Tensão normal na argamassa na direção y

σ_{za} Tensão normal na argamassa na direção z

σ_{xg} Tensão normal no gruate na direção x

σ_{yg} Tensão normal no gruate na direção y

σ_{zg} Tensão normal no gruate na direção z

T_b Altura do bloco

T_a Espessura da argamassa

T_s Espessura da parede do bloco

w Largura do prisma

f_{cpa} Resistência da parede

f_{cpa0} Resistência da parede sem graute

A_g Área de grauteamento

A_b Área bruta da seção transversal

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Espalhamento de força parcialmente distribuída. Adaptado de Capuzzo Neto (2000) 29

Figura 2.2 - Distribuição de ações segundo a NBR 10837 (ABNT, 1989) 30

Figura 2.3 - Procedimento para paredes isoladas. Adaptado de Hendry (1981) 31

Figura 2.4 - Exemplo de grupos de paredes. Adaptado de Ramalho e Corrêa (2003) 32

Figura 2.5 - Transferência de cargas pelas aberturas. Adaptado de Ramalho e Corrêa (2003) 32

Figura 2.6 - Exemplo de macrogrupo. Adaptado de Capuzzo Neto (2005) 33

Figura 2.7 - Distribuição de cargas. Adaptado de Franco e Parsekian (2002) 34

Figura 2.8 - Interação de três paredes. Adaptado de Parsekian e Franco (2002) 34

Figura 2.9 - Distribuição da carga atuante na parede 1. Adaptador de Parsekian e Franco (2002) 35

Figura 2.10 - Distribuição da carga atuante na parede 2. Adaptado de Parsekian e Franco (2002) 35

Figura 2.11 - Transferência de ações pelas aberturas. Adaptado de Parsekian e Franco (2002) 36

Figura 2.12 - Deformações medidas numa parede de um edifício. (a) Medidas feitas na parede do 1º pavimento; (b) Localização dos extensiômetros mecanicos; (c) Área de contribuição estimada. Hendry (1981). 37

Figura 2.13 - Painéis de alvenaria. (a) Série 1, (b) Série 2 . Capuzzo Neto (2000) 38

Figura 2.14 - Esquema do carregamento dos painéis. Capuzzo Neto (2000) 38

Figura 2.15 - Diagrama tensão x deformação, (a) Média das tensões, (b) Pontos instrumentados da série 1, (c) Pontos instrumentados da série 2. Capuzzo Neto (2000) 39

Figura 2.16 - Distribuição das tensões normais verticais. Capuzzo Neto (2000) 40

Figura 2.17 - Distâncias para uniformização de tensões verticais . Adaptado pelo autor de Corrêa e Page (2001) 42

Figura 2.18 - Formatos adotados para a seção em planta.Capuzzo Neto (2005) 43

Figura 2.19 - Geometria, fiadas e vistas do modelo H. Capuzzo Neto (2005) 43

Figura 2.20 - Geometria, fiadas e vistas do modelo Z. Capuzzo Neto (2005) 43

Figura 2.21 - Distribuição das tensões normais verticais - modelo H1. Capuzzo Neto (2005) 44

Figura 2.22 - Distribuição das tensões normais verticais- modelo Z1. Capuzzo Neto (2005) . 45

Figura 2.23 - Corpos de prova para ensaios de cisalhamento em escala reduzida (1:3). Capuzzo Neto (2005) 45

Figura 2.24 - Forma de aplicação do carregamento. Capuzzo Neto (2005) 45

Figura 2.25 - Painel H com laje. Capuzzo Neto (2005) 46

Figura 2.26 - Pontos de leitura e análise de tensões. Andolfato (2006) 47

Figura 2.27 - Tensões nos pontos instrumentados considerano PI, GIP, GCI50 e GCIT. Andolfato (2006) 48

Figura 2.28 - Resultados experimentais e de modelagem. (a) ponto para 3, (b) ponto 14. Andolfato (2006) 49

Figura 2.29 - Estado de tensões segundo o modelo de Hamid e Draysdale (1979) *apud* Garcia (2000) 52

Figura 2.30 - Faces opostas de um prisma após a ruptura. Garcia (2000) 53

Figura 2.31 - Esquema de grauteamento das paredes. Garcia (2000) 53

Figura 2.32 - Detalhe da ruptura do graute. Garcia (2000) 54

Figura 2.33 - Aumento da resistência da parede com o grauteamento. Garcia (2000) 54

Figura 2.34 - Prismas de bloco de concreto. Cunha (2001) 55

Figura 2.35 - Esquema do ensaio de compressão. Cunha (2001) 55

Figura 2.36 - Esquema de moldagem do corpo de prova para avaliação da absorção de água. Cunha (2001) 55

Figura 2.37 - Modelos de prismas com diferentes percentuais de grauteamento. Grohmann (2006) 56

Figura 2.38 - Prismas grauteados - Grohmann (2006) 57

Figura 2.39 - Formação da fissura na face transversal do bloco - Grohmann (2006) 57

Figura 2.40 - Graute, interface bloco/argamassa. Grohmann (2006) 58

Figura 2.41 - Pilarete após a ruptura do prisma. Grohmann (2006) 59

Figura 2.42 - Ruptura de prisma com graute de menor resistência. Grohmann (2006) 59

Figura 2.43 - Tipo de ruptura dos prismas grauteados. Leão (2008) 60

Figura 2.44 - Montagem dos prismas grauteados. Logullo (2006) 62

Figura 2.45 - Esquema da instrumentação dos prismas. Logullo (2006) 62

Figura 2.46 - Curva tensão x deformação do prisma B1G1. Logullo (2006) 63

Figura 2.47 - Geometria e visão geral dos blocos. Barbosa (2008) 63

Figura 2.48 - Esquema dos ensaios dos blocos. Barbosa (2008) 64

Figura 2.49 - Moldagem e ensaios dos corpos de prova de argamassa. Barbosa (2008) 64

Figura 2.50 - Detalhe da miniparede de bloco de concreto. Barbosa (2008) 65

Figura 2.51 - Esquema da instrumentação e ensaio da miniparede.Barbosa (2008) 65

Figura 2.52 - Fluxograma da aplicação do método dos elementos finitos. Adaptado pelo autor de Gonçalves Junior (2008) 67

Figura 2.53 - Modelos (a) Elementos da alvenaria, (b) Micromodelagem detalhada, (c) Micromodelagem simplificada, (d) Macromodelagem.Adaptado pelo autor de Lourenço (1996) 69

Figura 2.54 - Procedimentos de homogeneização: (a) Objeto de homogeneização, (b) Homogeneização em xy, (c) Homogeneização em yx. Adaptado pelo autor de Lourenço (1996) 72

Figura 2.55 - Formação da célula básica de alvenaria, (a) Painel de alvenaria, (b) Célula básica de alvenaria. Adaptado pelo autor de Lourenço (1996)..... 73

Figura 2.56 - Relação entre módulos de elasticidade e espessuara da argamassa, (a) Relação E_x/E_b x espessura da argamassa, (b) Relação E_y/E_b x espessura da argamssa. Peleteiro (2002)..... 74

Figura 2.57 - Relação Ex/Ey x espessura da argamassa. Peleteiro (2002)..... 74

Figura 2.58 - Volume representativo de alvenaria. Lourenço e Zucchini (2002) 75

Figura 2.59 - Notação geométrica do volume representativo. Loureço e Zucchini (2002)..... 76

Figura 2.60 - Prisma ensaiado. Ali e Page *apud* Peleteiro (2002)..... 77

Figura 2.61 - Gráfico força x deformação. Peleteiro (2002) 78

Figura 2.62 – Aspecto do carregamento. Peleteiro (2002)..... 79

Figura 2.63 - Tensão vertical no painel para altura de 274 mm da base. Peleteiro (2002) 80

Figura 2.64 - Geometria do painel com abertura. Modificado pelo autor de Barreto (2002)... 81

Figura 3.1 - Modelos que representam materiais compósitos 84

Figura 3.2 - Elemento shell 63. Adaptado da biblioteca do ANSYS 6.1 89

Figura 3.3 - Detalhe da malha de elementos finitos dos painéis 90

Figura 3.4 - Curva tensão x deformação do grupo PAR2. Adaptado pelo autor de Barbosa (2008) 91

Figura 3.5 - Geometria da com miniparede. Barbosa (2008) 91

Figura 3.6 - Malha de elementos finitos da miniparede 92

Figura 3.7 - Deformações da miniparede PAR2 - Para tensão aplicada de 5,37 N/mm² 92

Figura 4.1 - Esquema das fiadas da série 1 96

Figura 4.2 - Disposição dos blocos nas diferentes fiadas da série 1 97

Figura 4.3 - Regiões grauteadas dos painéis da série 1 97

Figura 4.4 -Esquema das fiadas da série 2 98

Figura 4.5 - Disposição geral das fiadas da série 2 98

Figura 4.6 - Regiões grauteadas dos painéis da série 2 99

Figura 4.7 - Esquema dass fiadas da série 3 99

Figura 4.8 - Disposição geral das fiadas da série 3 100

Figura 4.9 - Regiões grauteadas dos painéis da série 3 100

Figura 4.10 - Carregamento dos painéis de alvenaria da séries 1,2 e 3 101

Figura 4.11 – Denominação das paredes dos painéis das séries 1 e 2 103

Figura 4.12 – Denominação das paredes dos painéis das série 3 104

Figura 4.13 - Resultantes verticais nas paredes do painel 2P0G 106

Figura 4.14 - Resultantes verticais nas paredes do painel 3P0G 106

Figura 4.15 - Resultantes verticais nas paredes do painel 4P0G 107

Figura 4.16 - Cargas distribuídas no painel 2P0G 108

Figura 4.17 - Cargas distribuídas no painel 3P0G - paredes 1,2 e 3 108

Figura 4.18 - Cargas distribuídas no painel 3P0G - paredes 4,2 e 5 109

Figura 4.19 - Cargas distribuídas no painel 4P0G - paredes 1, 2 e 3 109

Figura 4.20 - Cargas distribuídas no painel 4P0G - paredes 4, 2 e 5. 110

Figura 4.21 - Cargas distribuídas no painel 4P0G - paredes 6,2 e 7 110

Figura 4.22 - Distribuição de tensões verticais normais na parede 2- série 1. 113

Figura 4.23 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 2 - série 2 113

Figura 4.24 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 2 - série 3 114

Figura 4.25 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 1 e 3 - série 1 114

Figura 4.26 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 1 e 3 - série 2 115

Figura 4.27 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 4 e 5 - série 2 115

Figura 4.28 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 1, 3, 6 e 7 - série 3 116

Figura 4.29 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 4 e 5 - série 3 116

Figura 4.30 - Ilustração da separação entre paredes e regiões grauteadas 117

Figura 4.31 - Carregamento absorvido na parede1 e na parede 3 da série 1 119

Figura 4.32 - Carregamento absorvido na parede 2 da série 1 119

Figura 4.33 - Carregamento absorvido pelas regiões 1 e 2 da série 1 120

Figura 4.34 - Carregamento absorvido pela parede 1 e parede 2 da série 2 120

Figura 4.35 - Carregamento absorvido na parede 2 da série 2 121

Figura 4.36 - Carregamento absorvido pela parede 4 e paredes 5 da série 2 121

Figura 4.37 - Carregamento absorvido na região 1 e região 2 da série 2 122

Figura 4.38 - Carregamento absorvido pela parede 1 e parede 3 da série 3 122

Figura 4.39 - Carregamento absorvido pela parede 2 da série 3 123

Figura 4.40 - Carregamento absorvido pela parede 4 e parede 5 da série 3 123

Figura 4.41 - Carregamento absorvido pela parede 6 e parede 7 da série 3 124

Figura 4.42 - Carregamento absorvido pela região 1 e região 2 da série 3 124

Figura 4.43 - Absorção de carregamento nas paredes dos painéis da série 1 com grauteamento horizontal 125

Figura 4.44 - Perfil da distribuição de tensões nas paredes 1 e 3 em painéis com grauteamento horizontal da série 1 126

Figura 4.45 - Perfil da distribuição de tensões na parede 2 em painéis com grauteamento horizontal da série 1 126

Figura 5.1- Croqui da planta baixa da estrutura de andares múltiplos 128

Figura 5.2 – Esquema do grauteamento para estrutura de múltiplos pavimentos 129

Figura 5.3 – Modelagem da estrutura (a) Malha (b) Carregamento da Estrutura de 10 Pavimentos 130

Figura 5.4 – Detalhe da malha de elementos finitos utilizada na macromodelagem e na micromodelagem 131

Figura 5.5 - Tensões verticais obtidas por micromodelagem simplificada 131

Figura 5.6 - Tensões verticais obtidas por macromodelagem 132

Figura 5.7 - Pontos de obtenção de tensões 133

Figura 5.8 - Tensões verticais ao longo da altura do ponto 1 133

Figura 5.9 - Tensões verticais ao longo da altura do ponto 2 134

Figura 5.10 - Tensões ao longo da altura do ponto 3 135

Figura 5.11 - Tensões nos pontos 1, 2 e 3 nas paredes sem graute ao longo da altura 135

Figura 5.12 - Tensões nos pontos 1, 2 e 3 nas paredes com graute ao longo da altura 136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características mecânicas dos materiais empregados no trabalho de Capuzzo Neto (2000) 39

Tabela 2.2 – Propriedades e características usadas na modelagem do trabalho de Capuzzo Neto (2005) 44

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na modelagem..... 48

Tabela 2.4 – Proporções da NBR 8798(ABNT, 85) para dosagem dos grautes 51

Tabela 2.5 – Parcela de carga absorvida pelo graute e pela alvenaria pesquisa de Leão (2008) 60

Tabela 2.6 – Tipos de prismas usados no estudo de Logullo (2006)..... 61

Tabela 2.7 – Propriedades elásticas e inelásticas da argamassa e do concreto da unidade 66

Tabela 3.1 – Características físicas dos materiais por Logullo (2006)..... 87

Tabela 3.2 - Módulo de elasticidade de prismas vazios obtidos experimentalmente e pela expressão 4.6. 88

Tabela 3.3 - Módulos de elasticidade de prismas grauteados obtidos experimentalmente e pela expressão 4.11. 88

Tabela 3.4 – Características físicas dos materiais empregados por Barbosa (2008). 88

Tabela 3.5 - Módulo de elasticidade de prismas vazios obtidos por diferentes métodos (experimental x numérrico x teórico) 89

Tabela 3.6 – Deformações da miniparede do grupo PAR2 obtidas com modelgem numérica e experimentamente 93

Tabela 4.1 - Propriedades dos materiais empregados na modelagem dos painéis 102

Tabela 4.2 – Valores de forças resultantes, em newton (N), para os procedimentos de parede isolada e grupo de paredes nos painéis das séries, 1, 2 e 3. 104

Tabela 4.3 – Valores das resultantes, em newton (N), para os procedimentos da NBR 10837(ABNT, 1989) e Parsekian e Franco (2002) nos painéis das séries, 1, 2 e 3. 105

Tabela 4.4 – Valores de forças resultantes, em newton (N), obtidas pelo método dos elementos finitos nos painéis das séries, 1, 2 e 3. 105

Tabela 4.5 – Diferença percentual para cálculo da carga distribuída entre o MEF e outros procedimentos no painel 2P0G 111

Tabela 4.6 – Diferença percentual para cálculo da carga distribuída entre o MEF e outros procedimentos no painel 3P0G 111

Tabela 4.7 – Diferença percentual para cálculo da carga distribuída entre o MEF e outros procedimentos no painel 4P0G 111

Tabela 4.8– Percentuais de Cargas Absorvidas nas Paredes e nas Regiões do Graute 118

Tabela 5.1 – Propriedades elásticas segundo a ortotropia do material equivalente de Pande *et al*. (1989) 131

Tabela 5.2 – Resultados de tensões pela micromodelagem e homogeneização 132

SUMÁRIO

RESUMO 5

ABSTRACT 6

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS 7

LISTA DE SÍMBOLOS 8

LISTA DE FIGURAS 10

LISTA DE TABELAS 18

1 INTRODUÇÃO 23

1.1 Objetivo geral 24

1.2 Objetivos específicos 24

1.3 Justificativa 25

1.4 Estrutura do trabalho 25

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 28

2.1 Considerações iniciais 28

2.2 Distribuição das ações verticais 28

2.2.1 Interação entre paredes 29

2.2.2 Procedimentos para o cálculo da distribuição de ações verticais nas paredes 30

2.2.2.1 Paredes isoladas 30

2.2.2.2 Grupo isolado de paredes 31

2.2.2.3 Grupo de paredes com interação 32

2.2.2.4 Método proposto por Parsekian e Franco (2002) 33

2.2.3 Pesquisas sobre interação de paredes 36

2.2.3.1 Trabalho de Stockbridge (1967) 36

2.2.3.2 Ensaios realizados por Capuzzo Neto (2000) 37

2.2.3.3 Método de Corrêa e Page (2001) 41

2.2.3.4 Trabalho de Capuzzo Neto (2005) 42

2.2.3.5 Estudo de Andolfato (2006) 46

2.3 Influência do grauteamento nas paredes de alvenaria estrutural 50

2.3.1 Modelo de Hamid E Draysdale (1979) 51

2.3.2 Ensaios realizados por Garcia (2000) 53

2.3.3 Pesquisa de Cunha (2001) 55

2.3.4 Estudo de Grohmann (2006) 56

2.3.5 Estudo experimental de Leão (2008) 59

2.3.6 Estudo experimental de prismas de Logullo (2006) 61

2.3.7 Estudo experimental de Barbosa (2008) 63

2.4 ANÁLISE NUMÉRICA EM ALVENARIA ESTRUTURAL 66

2.4.1 Micromodelos e modelos homogeneizados 70

2.4.1.1 Micromodelo de Page (1978) 70

2.4.1.2 Modelo homogeneizado de Pande *et al*.(1989) 71

2.4.1.3 Modelo numérico de homogeneização de Peleteiro (2002) 72

2.4.1.4 Modelo numérico homogeneizado de Lourenço e Zucchini (2002) 75

2.4.2 Pesquisas para aferição de alguns modelos 77

2.4.2.1 Aferição do modelo discreto de Ali e Page (1988) 77

2.4.2.2 Estudo comparativo do material equivalente de Pande *et al.* (1989) com o macromodelo numérico de Peleteiro (2002) 78

2.4.2.3 Processo de homogeneização aferido por Barreto (2002) 80

3 PARÂMETROS DE MODELAGEM DOS PAINÉIS 82

3.1 Análise da alvenaria estrutural no regime elástico linear 82

3.2 Definição do módulo de elasticidade equivalente dos trechos grauteados 83

3.2.1 Modelos teóricos para a determinação das propriedades elásticas dos trechos grauteados 83

3.2.2 Comparação com valores experimentais 87

3.3 Discretização da malha 89

3.4 Validação do modelo numérico usado nos painéis 90

4 DISTRIBUIÇÃO DE AÇÕES VERTICAIS NOS PAINÉIS 95

4.1 Definição dos painéis 95

4.2 Carregamento e restrições 101

4.3 Propriedades dos materiais 102

4.4 Procedimentos para obtenção de esforços em painéis de alvenaria 103

4.4.1 Parede isolada e grupo de paredes 103

4.4.2 Recomendação da Norma NBR 10387 (ABNT, 1989) e do método Paserkian e Franco (2002) 105

4.4.3 Resultantes obtidas pelo método dos elementos finitos (MEF) 105

4.5 Estudo da influência do grauteamento vertical nos painéis 112

4.5.1 Distribuição da tensão normal nos painéis 113

4.5.2 Parcela de ações absorvida nas paredes e regiões grauteadas 117

4.5.3 Estudo da influência do grauteamento horizontal 125

5 INFLUÊNCIA DO GRAUTEAMENTO VERTICAL EM ESTRUTURA DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS 128

5.1 Análise numérica da estrutura 129

5.1.1 Uso da macromodelagem 130

5.2 Análises dos resultados 132

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 137

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 140

ANEXO A 143

ANEXO B 149

ANEXO C 154

ANEXO D 156

ANEXO E 162

1 INTRODUÇÃO

Construções antigas como a Muralha da China, iniciada no ano de 220 a.C se estendendo até o século XVI, e o Farol de Alexandria, em 280 a.C, ambas edificadas com blocos de pedra ligados com argamassa, semelhante a técnica usada atualmente na alvenaria portante; estas obras foram erguidas de maneira empírica e intuitiva, pois naquele período não existia conhecimento científico sobre o sistema. Em razão desse desconhecimento as construções eram bastante robustas, consumindo, assim, grandes quantidades de insumos e demandavam longos períodos de execução.

Em seu trabalho, Peleteiro (2002) cita que o ano de 1920 representou o marco inicial do estudo racional da alvenaria estrutural. Juste (2001) coloca na sua pesquisa que edifícios cujas paredes tinham grandes espessuras, como o Monadnock Building, construído em Chicago no final do século XIX, com aproximadamente 1,80 m de espessura nas paredes do térreo, atualmente foram substituídos por edifícios com paredes mais esbeltas e, portanto, muito mais econômicos.

Os projetos de alvenaria tiveram uma abordagem racional somente na década de 50 com o surgimento das primeiras normas técnicas em alguns países. A alvenaria é iniciada no Brasil na década de 60 na cidade de São Paulo, e incorporada à construção de habitações populares em edifícios com quatro ou cinco pavimentos, em blocos vazados de concreto, como cita Gomes (2001). E por volta dos anos 90 começou, em vários centros de pesquisas do país, estudos sobre alvenaria estrutural, ressaltando as particularidades do uso no país.

Segundo Juste (2001), alguns fatores restringem o uso da alvenaria no Brasil, tais como, o preconceito, o maior conhecimento da tecnologia do concreto armado, a pouca divulgação do assunto nas universidades e o reduzido número de publicações sobre o tema em língua portuguesa. Por este motivo, muitos projetistas que não conhecem o sistema acabam optando pelo concreto armado.

Apesar do avanço cientifico no estudo da alvenaria, ainda não há um consenso sobre o intercâmbio das ações verticais entre as paredes que constituem o sistema estrutural. Faz-se

necessário, portanto, conhecer a trajetória destas ações entre paredes, tanto do ponto de vista qualitativo e quantitativo, dado que o dimensionamento da estrutura depende diretamente do cenário da distribuição das ações verticais. Camacho *et al*. (2001) chama a atenção para o estabelecimento correto de todos os esforços nos painéis, principalmente aqueles provenientes da interação entre paredes.

O graute é um componente importante que está presente na alvenaria, principalmente em encontro de paredes, cintas de amarração, vergas e contravergas e tem como funções principais aumentar a capacidade resistente dos painéis e transmitir esforços. O comportamento estrutural do conjunto bloco e argamassa já é muito conhecido. Porém o comportamento na alvenaria grauteada ainda não está totalmente esclarecido. Nem mesmo a norma NBR 10837(ABNT, 1989) cita algum aspecto dos efeitos do graute nas paredes resistentes.

Em decorrência da carência de pesquisas sobre os efeitos do graute no comportamento estrutural da alvenaria, este estudo visa avaliar a sua participação na distribuição de ações verticais entre paredes.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliação da influência do grauteamento na interação entre as paredes e na uniformização de tensões verticais na alvenaria estrutural com blocos de concreto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever o tipo de distribuição de tensões verticais nos painéis de alvenaria na presença do grauteamento;

- Observar o comportamento estrutural dos painéis de alvenaria, quanto à alteração das dimensões dos segmentos grauteados verticais;

- Comparar resultados da análise numérica com outros provenientes de metodologias de distribuição de ações verticais usados no cálculo da alvenaria estrutural;

- Avaliar a modelagem que melhor representa painéis compostos com graute;

- Verificar se o grauteamento vertical interfere na uniformização das tensões verticais normais para uma estrutura de andares múltiplos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Mesmo com o uso crescente da alvenaria portante, ainda não se conhece totalmente seu comportamento estrutural. Por isso, é importante entender como ocorre a distribuição de tensões nas paredes, dado que as paredes constituem os principais elementos portantes para este tipo de estrutura, nas quais a resistência à compressão é um dos principais fatores no dimensionamento.

Atualmente a alvenaria ainda é calculada com base em dados empíricos ou em métodos simplificados. A norma NBR-10837 (ABNT, 1989), referente ao cálculo da alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto, ainda utiliza o conceito das tensões admissíveis como critério de segurança, sendo que apenas um coeficiente de segurança é aplicado às tensões atuantes nas paredes, considerando todos os fatores que originam incertezas como mão de obra, material e cargas.

A alvenaria parcialmente grauteada, consiste em preencher os vazios dos blocos das paredes e, conseqüentemente, aumentar a sua resistência. O uso do graute constitui prática rotineira na alvenaria portante, por isso a pesquisa mostra-se relevante, pois procura esclarecer como ocorre a distribuição e uniformização de tensões entre as paredes na presença das regiões grauteadas.

Esta investigação mostra caminhos para compreender os aspectos do desempenho estrutural das paredes resistentes quando grauteados. O estudo poderá colaborar para implementação de metodologias de cálculos seguras e confiáveis.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

CAPÍTULO UM: INTRODUÇÃO

Procurou-se apresentar de maneira geral o tema e as propostas deste trabalho, justificando sua importância para o desenvolvimento da alvenaria estrutural.

CAPÍTULO DOIS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se uma revisão bibliográfica, descrevendo o desenvolvimento dos vários ramos do conhecimento relacionados a esta pesquisa. Essa abordagem visa situar a proposta do presente trabalho no contexto do estado da arte das investigações relacionadas com alvenaria estrutural, mais precisamente, aquelas ligados à modelagem computacional, parametrização dos materiais e metodologias aplicadas.

CAPÍTULO TRÊS: PARÂMETROS DE MODELAGEM

As respostas adequadas a um estudo com análise numérica dependem fundamentalmente dos parâmetros que serão utilizados nos softwares. Por isso, foram escolhidas criteriosamente as propriedades elásticas dos trechos grauteados e dos materiais, como bloco e junta de argamassa. Sendo que as propriedades elásticas foram provenientes de trabalhos científicos experimentais, e dos trechos grauteados definidos por analogia de teorias de materiais compósitos, como o modelo de Voigt e Reuss.

CAPÍTULO QUATRO: AÇÕES VERTICAIS NOS PAINÉIS

Foram definidos painéis compostos por três, cinco e sete paredes, a fim de investigar a distribuição de tensões verticais normais na presença do grauteamento vertical e horizontal.

São apresentados resultados e discussões sobre a distribuição de tensões nos painéis das séries 1, 2 e 3 sob influência do graute. Levou-se em consideração a presença de grautes em furos dos blocos, cintas intermediárias e de respaldo.

CAPÍTULO CINCO: INFLUÊNCIA DO GRAUTEAMENTO VERTICAL EM ESTRUTURAS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS

Nesse capítulo foi avaliada a influência do grauteamento vertical na uniformização das tensões verticais ao longo da altura, considerando uma estrutura de 10 pavimentos, com pé direto de 2,80 m de altura.

CAPÍTULO SEIS: CONSIDERAÇÕES FINAIS

É dedicado às considerações obtidas com a realização de todo o trabalho desenvolvido. E apresenta algumas sugestões para futuros trabalhos, que possam dar continuidade a pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Devido à heterogeneidade na composição da alvenaria estrutural decorrente da sua composição (bloco, junta de argamassa e graute) qualquer estudo sobre ela, seja experimental ou analítico, é extremamente trabalhoso. A proposta desta seção é encontrar respostas em outros trabalhos, para que as análises sejam respaldadas em resultados confiáveis. Desde modo, a escolha criteriosa dos parâmetros e metodologias adequadas para a presente investigação é necessária.

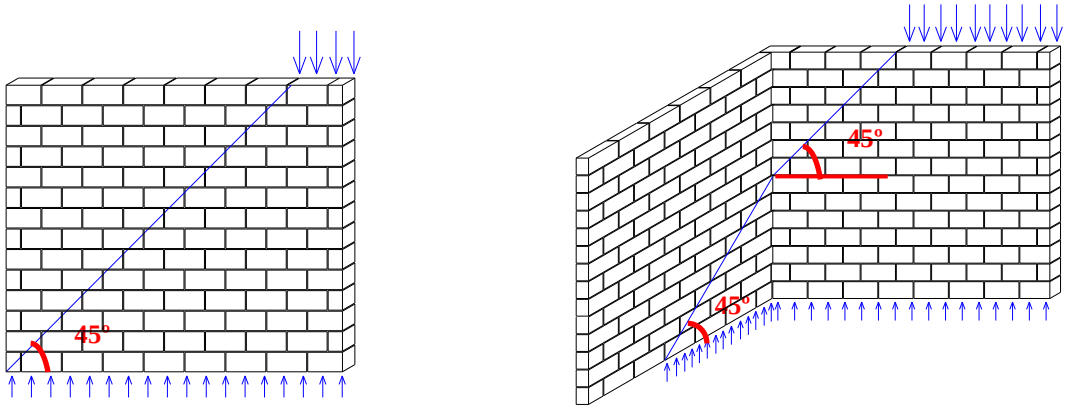
2.2 DISTRIBUIÇÃO DAS AÇÕES VERTICAIS

As paredes resistentes da alvenaria estrutural recebem carregamentos diferenciados, portanto, a especificação do bloco para cada parede deveria ter uma classe de resistência distinta. Nesses casos o procedimento para escolha dos blocos deveria ser feito pela parede mais solicitada em cada pavimento, o que poderia onerar o custo da obra. Mas os projetistas não seguem esse critério. Com o espalhamento das ações verticais nos painéis há uma diminuição de cargas entre as paredes, por isso a resistência à compressão especificada para o bloco tende a ser menor.

Quando estudaram a distribuição de ações verticais entre paredes, Ramalho e Corrêa (2003) observaram que existiam diversos fatores que levavam às cargas a se espalharem. A amarração das paredes em cantos e bordas sem juntas a prumo, existência de cintas sob a laje do pavimento e a meia altura e pavimento com lajes maciças são alguns dos fatores que contribuem para existência de forças de interação elevadas e, portanto o surgimento de uma maior uniformização dessas cargas.

2.2.1 INTERAÇÃO ENTRE PAREDES

Um procedimento bastante comum do sistema é a amarração direta nos cantos e encontros das paredes. Este mecanismo acontece devido ao inter-travamento entre as unidades de duas ou mais paredes. Segundo[1], a amarração direta das paredes permite distribuição das ações verticais e laterais ao longo do comprimento e altura dos painéis de alvenaria. O espalhamento de forças, parcialmente distribuída, geralmente são adotados à 45º com a vertical, como demonstra a Figura 2.1. Quando existe ligação entre elas adota-se também um ângulo de espalhamento de 45º. Nesse caso, acontece a transferência de cargas de uma parede para a outra, conforme mostrado na Figura 2.1b. Em seu trabalho, Capuzzo Neto (2005) comenta que o espalhamento depende da rigidez da parede adjacente, pois a força transferida é excêntrica. Acrescenta ainda que a seção geométrica das paredes em planta pode influenciar no fenômeno da interação de paredes.



(a) (b)

Figura 2.1- Espalhamento de força parcialmente distribuída. Adaptado de Capuzzo Neto (2000)

Algumas normas internacionais[2], citadas na pesquisa de Capuzzo Neto (2005), consideram o espalhamento das cargas verticais a 45º nos painéis de alvenaria. Para a norma brasileira NBR 10837 (ABNT, 1989), em seu item 4.3.3.1.1, recomenda-se que as cargas

[1] Curtin et. al. *apud* Capuzzo Neto (2005)

[2] Norma britânica BS 5628 (1978), norma australiana AS 3700 (1998) e o código americano ACI 530-92 (1992)

concentradas ou parcialmente distribuídas podem ser repartidas em seções horizontais limitadas por dois planos inclinados a 45º sobre a vertical e passando pelo ponto de aplicação da carga ou pelas extremidades da faixa de aplicação, como ilustrado na Figura 2.2.

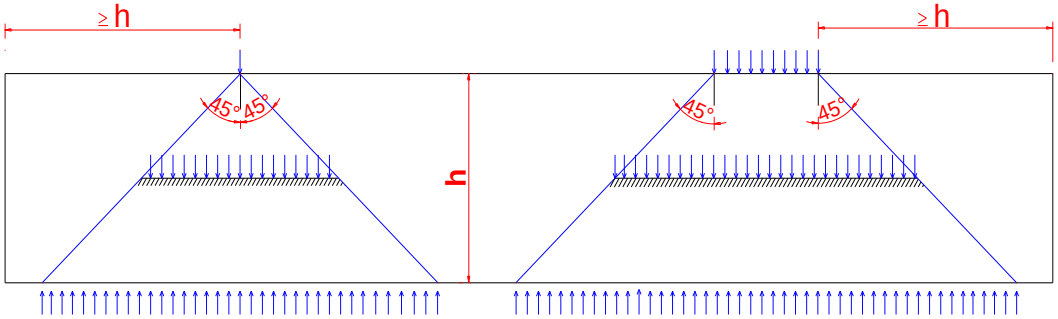


Figura 2.2 - Distribuição de ações segundo a NBR 10837 (ABNT,1989)

2.2.2 PROCEDIMENTOS PARA O CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE AÇÕES VERTICAIS NAS PAREDES

Os procedimentos visam obter ações verticais na base das paredes, pois são essas forças a base para o dimensionamento da alvenaria portante. Diferentemente das estruturas convencionais de concreto, na alvenaria estrutural, são as paredes que suportam as cargas permanentes e acidentais. Uma maneira para considerar a influência das ações nas paredes, além do seu peso próprio, é subdividir as lajes em parcelas de cargas e distribuí-la para cada parede.

.

2.2.2.1 PAREDES ISOLADAS

O procedimento de paredes isoladas considera que a carga incidente numa parede se distribua apenas nela, tratando cada parede independentemente e não avalia a interação com as demais. Para[3], é usual subdividir as lajes dos pisos em triângulos, retângulos e trapézios, limitando pelas chamadas linhas de ruptura, com intuito de distribuir as cargas dos pisos nas paredes correspondentes, conforme indicado na Figura 2.3. Segundo o autor, para as lajes

[3] Hendry *apud* Capuzzo Neto (2005)

retangulares provavelmente as cargas se distribuem dessa maneira, mas as reações das lajes não se distribuem uniformemente ao longo do comprimento da parede. O que se observa é um carregamento concentrado na sua parte central. Para a referência citada há evidências de que a não uniformização decresce à medida que diminui a altura da parede.

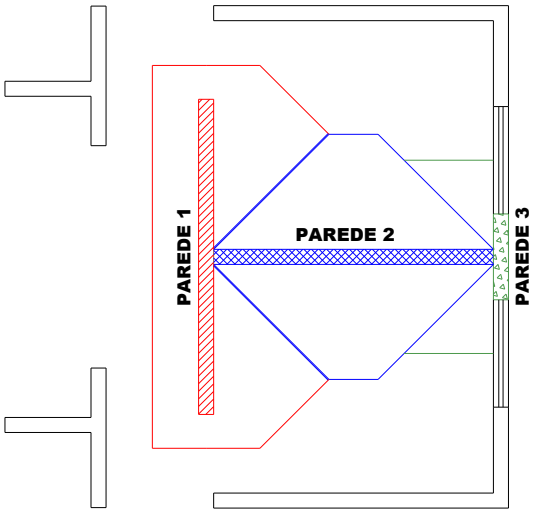


Figura 2.3 - Procedimento para paredes isoladas. Adaptado de Hendry (1981)

2.2.2.2 GRUPO ISOLADO DE PAREDES

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), um conjunto de paredes, totalmente solidárias, é considerado como um grupo isolado de paredes. Esses grupos estão limitados por aberturas de portas e janelas, como mostra a Figura 2.4. As cargas são consideradas totalmente uniformizadas em cada grupo de paredes, sem, no entanto, nenhuma interação entre os vários grupos. O processo é simples: somam-se todas as cargas aplicadas nas paredes do grupo, e em seguida é distribuída pelo comprimento total das paredes. As ações atuantes nos trechos sobre aberturas são transformadas em forças concentradas aplicadas nos grupos vizinhos. Para Capuzzo Neto (2005), quando a definição dos grupos é baseada em outros critérios, que não sejam os limites estabelecidos por aberturas, a fixação dos grupos pode apresentar distorções. Acetti (1998), alerta para escolha correta dos grupos, pois escolhas incorretas podem acarretar especificações inadequadas para resistência dos blocos. Para Ramalho e Corrêa (2003), esse é

um procedimento adequado para qualquer tipo de edificação em alvenaria estrutural, desde que a transferência de forças entre paredes seja garantida.

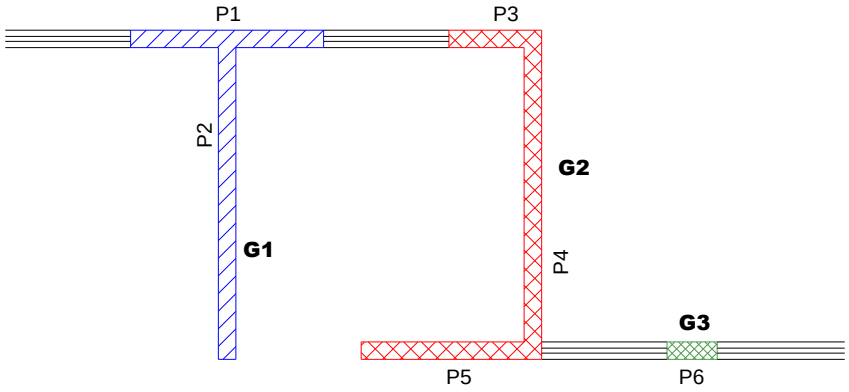


Figura 2.4 - Exemplo de grupos de paredes. Adaptado de Ramalho e Corrêa (2003)

2.2.2.3 GRUPO DE PAREDES COM INTERAÇÃO

Basicamente é o mesmo procedimento do grupo isolado de paredes, acrescido da interação entre grupos, o que possibilita a formação de grupos maiores. Para Ramalho e Corrêa (2003), há forças de interação entre os grupos sobre as aberturas, fazendo com que eles interajam, como ilustra a Figura 2.5. Considera-se uma taxa de interação como critério para transferência desses esforços entre grupos. Capuzzo Neto (2005) cita que a taxa pode ser estimada por modelos teóricos, como o espalhamento a 45º, ou por procedimento experimental. Salienta também a importância de especificar corretamente quais os grupos de paredes que estão interagindo e com que taxa, para não incorrer em erros.

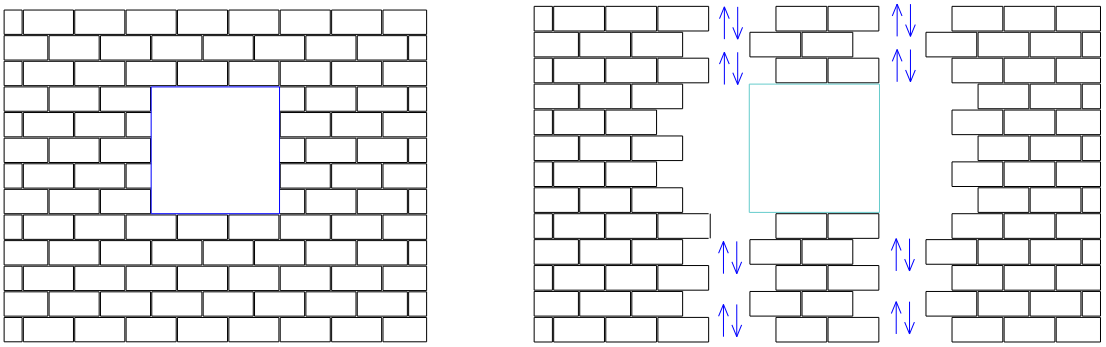


Figura 2.5 - Transferência de cargas pelas aberturas. Adaptado de Ramalho e Corrêa (2003)

Capuzzo Neto (2005) cita que a taxa de interação corresponde o quanto de diferença de cargas um grupo irá transferir para o outro. Considerar uma taxa igual a 100% significa que há uma homogeneização total das ações onde o macrogrupo funciona como um grupo único. Se a taxa for zero não haverá transferência de ações entre os grupos, nesse caso os grupos comportam-se como grupos isolados. Grupos com carregamentos maiores que a média do macrogrupo transfere parte das cargas para os grupos com carregamentos menores que a média. A Figura 2.6 apresenta um esquema típico de macrogrupo em que as cargas são transferidas pela abertura da janela, compreendida entre as paredes P1 e P3 e pela porta que se encontra entre as paredes P2 e P5.

Há liberdade na utilização da taxa de interação entre os grupos para formar o macrogrupo. Ressaltando que para grupos limitados por trechos abaixo e acima das aberturas de janelas pode ser utilizada uma taxa de interação maior do que para aqueles ligados por trechos de abertura de portas. Capuzzo Neto (2005) indica ainda que uma possibilidade seja considerar cada parede como um grupo e adotar uma taxa de interação única entre elas, e não adotar a uniformização total.

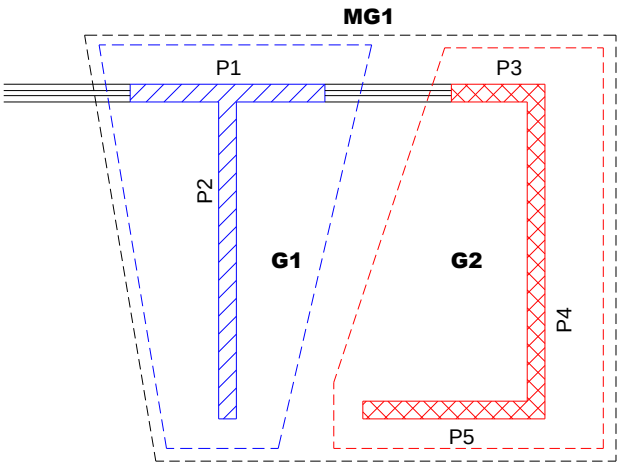


Figura 2.6 - Exemplo de macrogrupo. Adaptado de Capuzzo Neto (2005)

2.2.2.4 MÉTODO PROPOSTO POR PARSEKIAN E FRANCO (2002)

O método tem como princípio a definição de parâmetros para distribuição das ações verticais. Os parâmetros são baseados em características geométricas das paredes, o número

de pavimentos, a existência de aberturas e a altura do pavimento. O espalhamento das ações segue a recomendação de algumas normas, ou seja, as cargas aplicadas no topo das paredes alcançam as regiões inferiores segundo uma dispersão orientada com ângulo de 45º em relação à vertical, conforme ilustra a Figura 2.7.

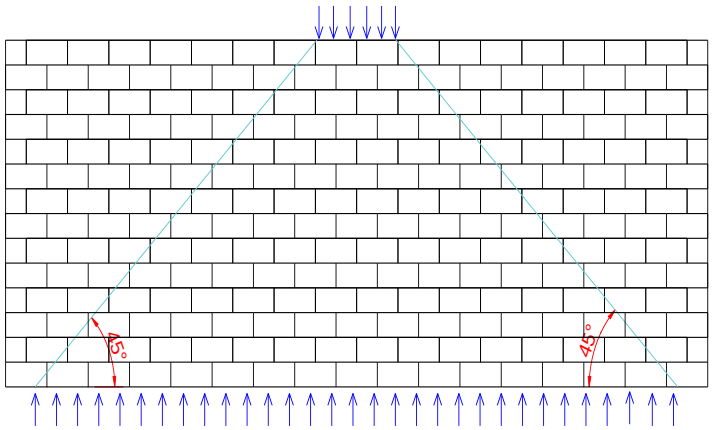


Figura 2.7 - Distribuição de cargas. Adaptado de Franco e Parsekian (2002)

Parsekian e Franco (2002) mostraram o caso de carregamento entre três paredes, conforme apresenta a Figura 2.8. A distribuição da carga nas outras paredes proveniente da parede 1 é mostrada na Figura 2.9 e o espalhamento provocado pela parede 2 nas demais está ilustrado na Figura 2.10. Segundo este método, pode existir uma parcela de carga não uniformizada (LNU), nas situações onde o comprimento da parede é maior do que a sua altura.

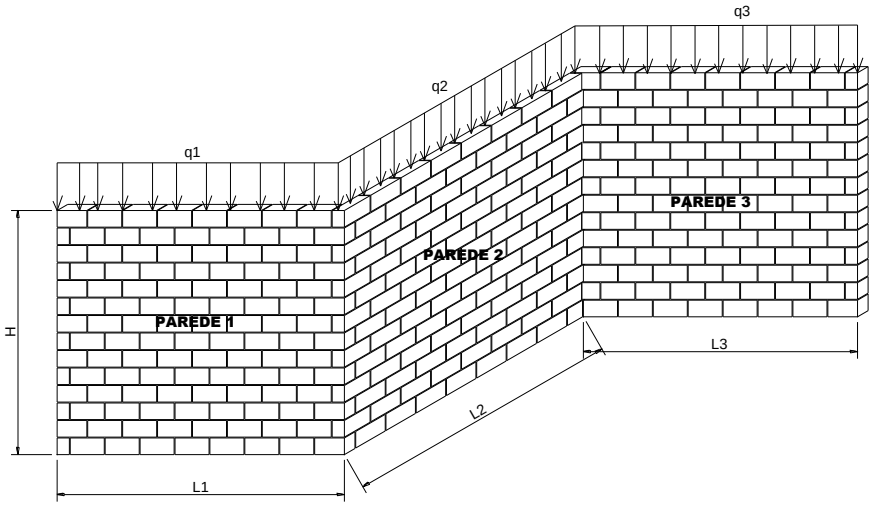


Figura 2.8 - Interação de três paredes. Adaptado de Parsekian e Franco (2002)

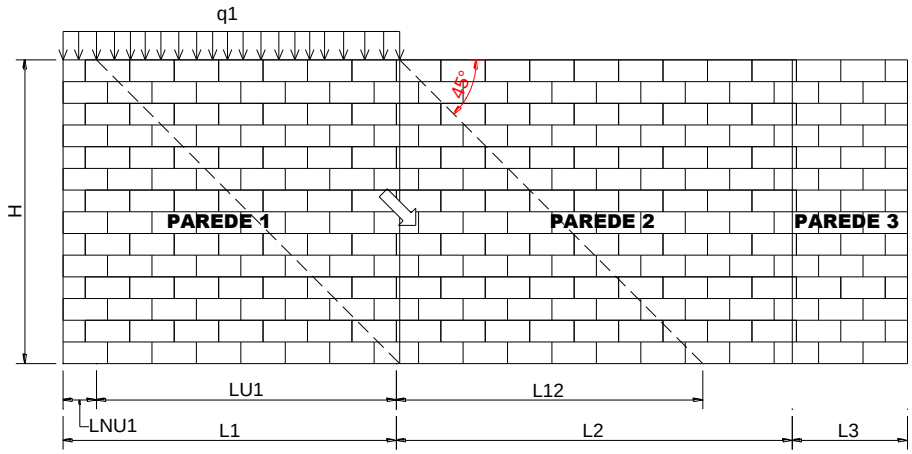


Figura 2.9 - Distribuição da carga atuante na parede 1. Adaptador de Parsekian e Franco (2002)

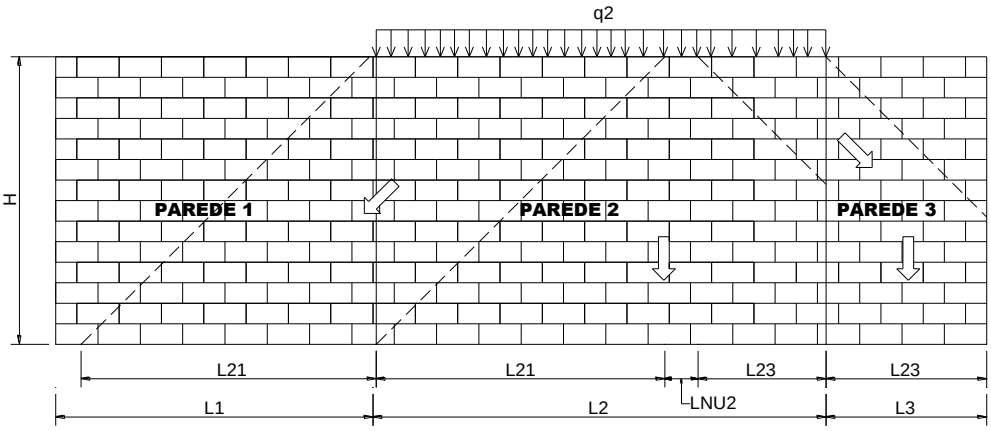


Figura 2.10 - Distribuição da carga atuante na parede 2. Adaptado de Parsekian e Franco (2002)

O método também prevê a transferência de cargas de uma parede para outra através de aberturas. Para esse caso propõe um espalhamento a 45º da ação que encontra do lado da abertura. A carga que irá atuar do outro lado da abertura é definida pelo comprimento de distribuição (C1), como sendo a distância entre as aberturas (H - Ha) menos o comprimento (La). A parcela da carga que irá atuar na verga acima da abertura é definida pelo comprimento de influência (C2) como sendo metade do comprimento da abertura (La), ou seja, C2=La/2. A Figura 2.11 ilustra o caso de transferência de ações pelas aberturas.

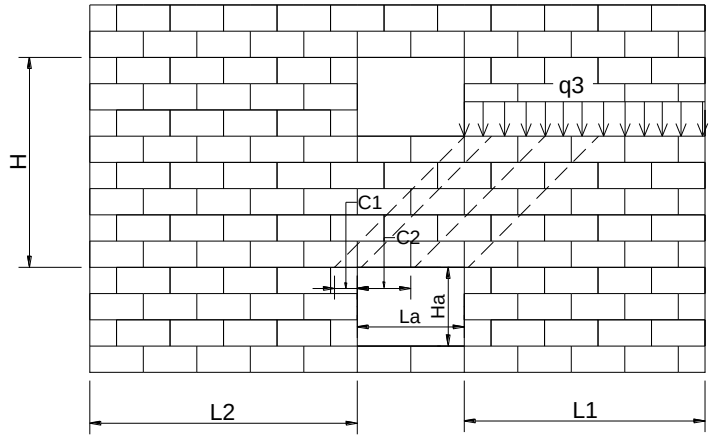


Figura 2.11 - Transferência de ações pelas aberturas. Adaptado de Parsekian e Franco (2002)

2.2.3 PESQUISAS SOBRE INTERAÇÃO DE PAREDES

2.2.3.1 TRABALHO DE STOCKBRIDGE (1967)

Considerado o trabalho pioneiro na investigação da distribuição de ações verticais entre paredes[4], instrumentou três pontos distintos localizados no primeiro pavimento de um edifício com cinco pavimentos durante sua construção. Nesse experimento, Stockbridge (1967) encontrou evidências de que as tensões de compressão tendem a se uniformizar nos pavimentos inferiores, tanto nas paredes isoladas como em grupos de paredes que se interceptam. Os gráficos da Figura 2.12 mostram a tendência de uniformização à medida que acrescentou os demais pavimentos. Observa-se que nos estágios iniciais as diferenças nas deformações são consideráveis, enquanto que no final os seus valores praticamente se igualam. Consequentemente, as tensões se uniformizam com a altura nos primeiros pavimentos quando a construção é concluída, ou seja, quando o carregamento permanente é completo.

[4] Stockbridge *apud* Hendry (1981)

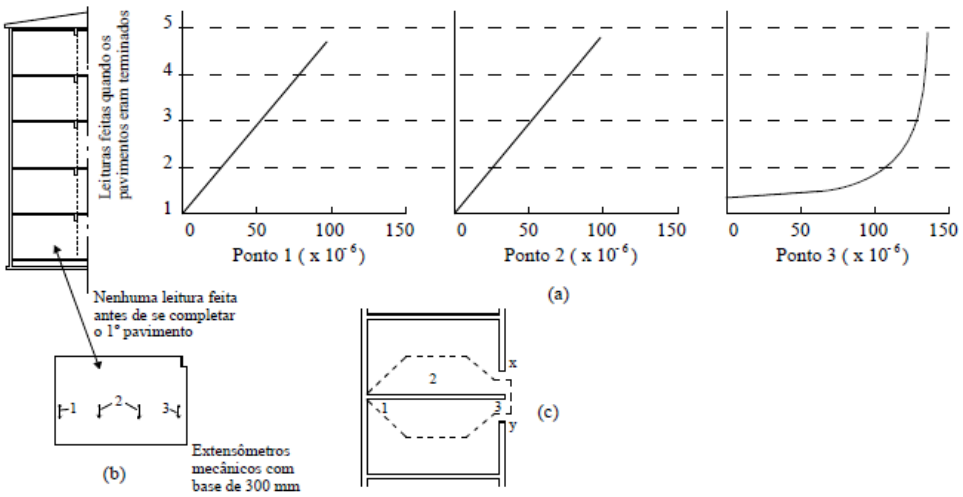
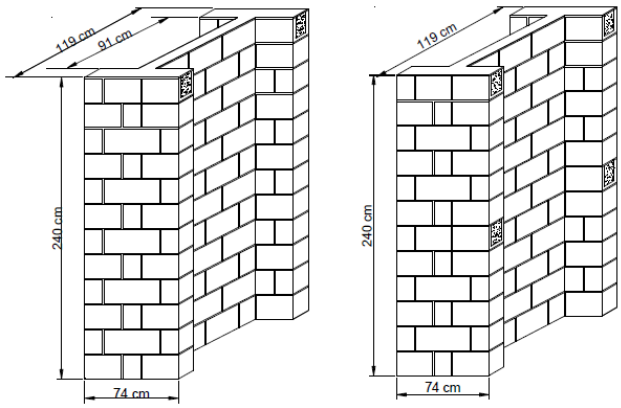


Figura 2.12 - Deformações medidas numa parede de um edifício. (a) Medidas feitas na parede do 1º pavimento; (b) Localização dos extensiômetros mecanicos; (c) Área de contribuição estimada. Hendry (1981).

2.2.3.2 ENSAIOS REALIZADOS POR CAPUZZO NETO (2000)

O pesquisador ensaiou duas séries de painéis em formato “H”, constituídos por tijolo cerâmico com dimensões 15 x 20 x 30 cm, 15 x 20 x 45 cm e bloco canaleta. A série 1 constituída de três painéis com cinta de amarração na última fiada e a série 2 com cinta de amarração no topo e intermediária. A Figura 2.13 mostra os painéis da série 1 e da série 2 ensaiados por Capuzzo Neto (2000). Aplicou-se uma carga distribuída apenas na parede central com base na carga de ruptura de 460 KN com incrementos de carga de 40 KN, o esquema da Figura 2.14 ilustra a aplicação do carregamento nos painéis.



(a) (b)

Figura 2.13 - Painéis de alvenaria. (a) Série 1, (b) Série 2 . Capuzzo Neto (2000)

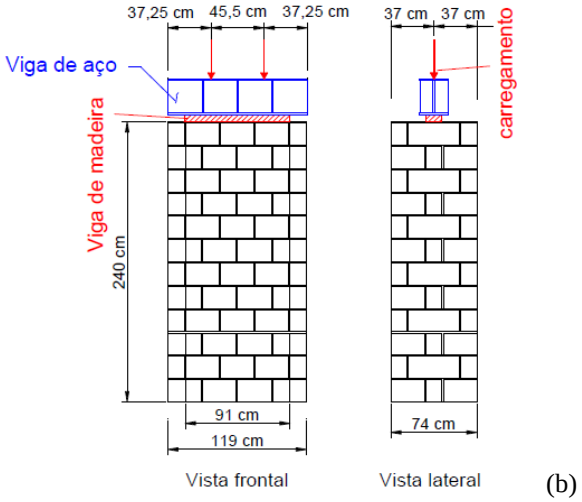


Figura 2.14 - Esquema do carregamento dos painéis. Capuzzo Neto (2000)

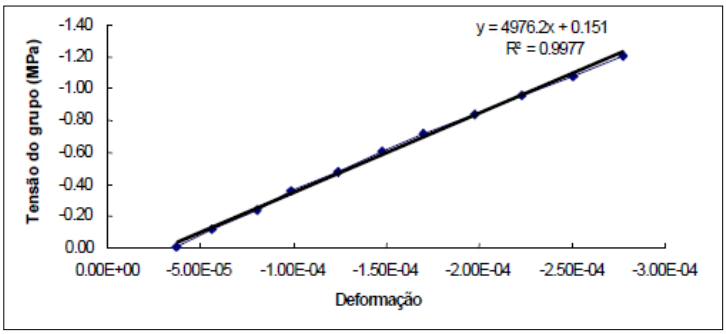
Capuzzo Neto (2000) analisou experimentalmente o comportamento dos flanges e da parede central no trecho inferior e superior dos painéis pelas curvas dos diagramas tensão x deformação. A referência citada deu continuidade no estudo fazendo um comparativo dos resultados experimentais com análise numérica, no regime elástico linear, com o pacote computacional ANSYS 5.5.

A Tabela 2.1 mostra os resultados médios das características mecânicas dos materiais e corpos de prova determinados experimentalmente.

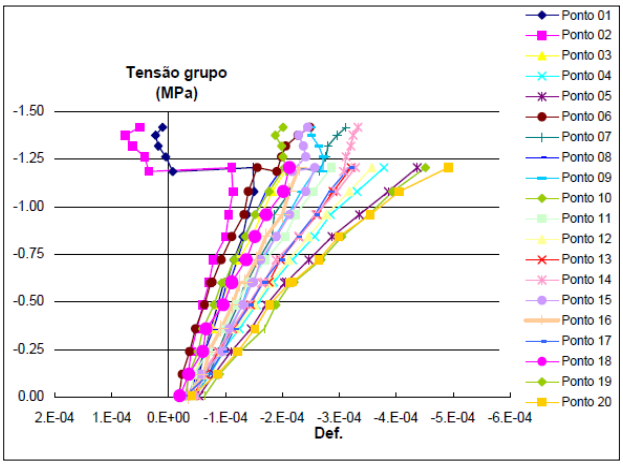
Tabela 2.1 – Características mecânicas dos materiais empregados no trabalho de Capuzzo Neto (2000)

Componente	Tensão de Ruptura (Mpa) – área bruta	Módulo de deformação (MPa) – área bruto
Bloco	11,0	4.013
Argamassa	12,3	10.900
Graute	28,4	30.000
Prisma 2 blocos	5,4	-
Prisma 3 blocos	5,1	-

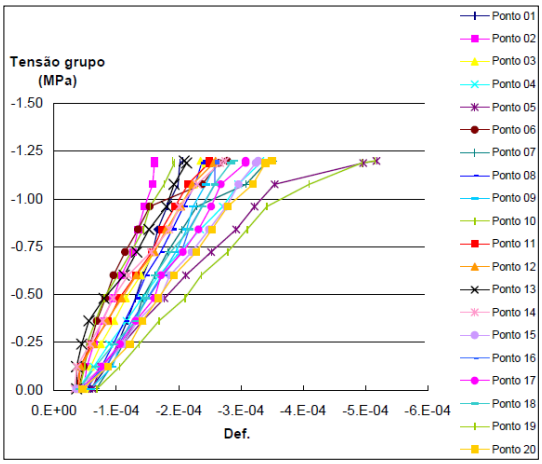
Obteve-se o digrama tensão x deformação com a média das leituras realizadas no trecho inferior (flanges e parede central), descartando os trechos em que houve perda de linearidade, como pode ser visualizado pelo gráfico da Figura 2.15a, demonstrando o comportamento típico global. Já as figuras 2.15b e 2.15c mostram comportamento em cada ponto instrumentado da série 1 e da série 2.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.15 - Diagrama tensão x deformação, (a) Média das tensões, (b) Pontos instrumentados da série 1, (c) Pontos instrumentados da série 2. Capuzzo Neto (2000)

Após as análises, percebeu-se pelo comportamento dos painéis com cinta de respaldo e cinta intermediaria que as mesmas não influenciam na distribuição das ações verticais. Outro fato observado foi a uniformização dos deslocamentos verticais nos trechos inferiores desde os estágios iniciais até próximo a 75% da carga de ruptura. Observou-se que as regiões superiores dos painéis, a parede central é a mais solicitada que os flanges, pois as deformações são maiores. Na região inferior, as deformações de todas as paredes praticamente se igualam, evidenciando uma uniformização das tensões, como pode ser visto pelo gráfico da Figura 2.16, proveniente da análise numérica.

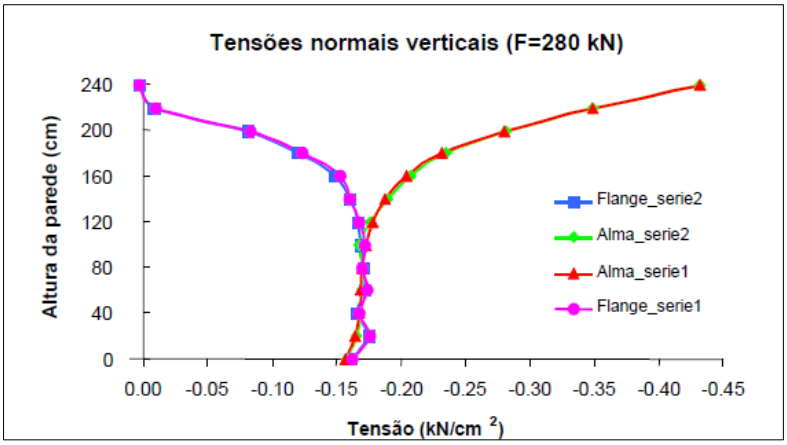


Figura 2.16 - Distribuição das tensões normais verticais. Capuzzo Neto (2000)

Nas suas conclusões, Capuzzo Neto (2000) verificou que nas estruturas de múltiplos pavimentos, a partir de quatro pavimentos, as reduções de tensões e deslocamentos são pequenas, evidenciando que para um número maior de pavimentos as tensões máximas não mais se alteram.

Conseguiu uma razoável representação global do painel por meio da modelagem computacional. Os resultados indicaram que o principal parâmetro na análise de taxa de interação é a relação entre a altura e o comprimento em planta. No caso em que o comprimento dos flanges é maior que a parede central as taxas de interações aproxima-se de 100%. No caso dos flanges que têm comprimentos equivalentes a altura as taxas de interação tenderam a reduzir.

2.2.3.3 MÉTODO DE CORRÊA E PAGE (2001)

Corrêa e Page (2001) desenvolveram um modelo para análise da interação de paredes submetidas a ações verticais. O método tem como base a uniformização das tensões normais verticais e a distribuição das tensões cisalhantes na interface do encontro de paredes. Utilizaram análise numérica em painéis, investigando os efeitos causados na variação do tipo de carregamento, o número de pavimentos e as dimensões em planta. A metodologia envolve, além da distribuição da forças verticais, a capacidade de transferência de cargas nas interseções de paredes.

O Princípio de Saint Venant[5] norteou o trabalhou, quando estudaram a capacidade do espalhamento causado por aplicação de forças centradas em relação a seção transversal das paredes. Esse princípio tem como base as deformações sofridas pelo corpo em diferentes pontos, ou seja, com exceção dos pontos da vizinhança de aplicação das cargas. Pode-se admitir que a distribuição das tensões é independente da modo de aplicação das ações. Para as referências citadas, o critério adotado por diversas normas para o espalhamento da força a 45º tem como base esse princípio.

As referências citadas adotaram um modelo simples em elementos finitos com comportamento elástico linear, usando macro-modelagem e elementos de membrana bidimensionais. Para verificação das hipóteses estabelecidas houve variação de alguns parâmetros como: números de pavimentos, dimensões das paredes e a excentricidade no plano da parede.

Após a análise dos resultados da modelagem computacional, concluíram que o princípio de Saint Venant comanda a uniformização das tensões. Observaram que a distância necessária para haver igualdade das tensões deve ser maior que o diâmetro do círculo que circunscreve a seção do painel em planta. Para exemplificar a relação entre diâmetro e altura, a Figura 2.17 ilustra três grupos de paredes com os diâmetros d1, d2 e d3. Cada diâmetro deve ser comparado a altura do pavimento (h). Para determinar a altura ótima de uniformização, deverá comparar com a altura necessária para cada grupo de paredes, ou seja, aquele grupo que

[5] *Se um sistema de forças atuante em uma região de um corpo for substituída por outro que seja equivalente, atuando na mesma região, as tensões, deformações e movimentos (excetuando-se os de corpo rígido), em pontos do corpo suficientemente afastados da aplicação das cargas, são suficientemente iguais.*

necessita de uma maior altura determinará qual a quantidade de pavimentos para que haja uniformização das tensões verticais normais.

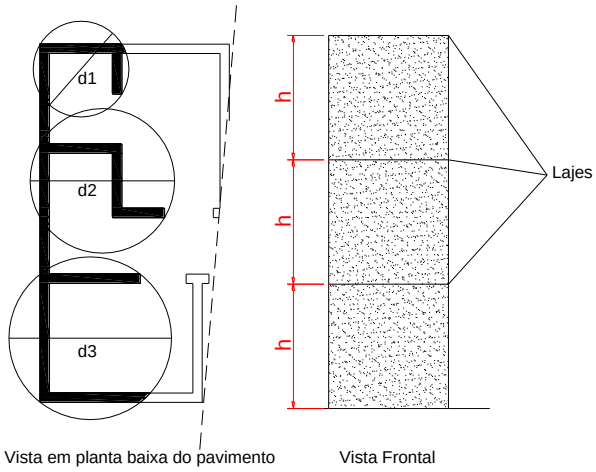


Figura 2.17 - Distâncias para uniformização de tensões verticais . Adaptado pelo autor de Corrêa e Page (2001)

Neste trabalho as citadas referências observaram que a força a ser transferida pela interseção de duas paredes é a diferença entre as reações verticais, considerando a uniformização das tensões normais verticais, e as reações verticais desprezando este processo, se for andares adjacentes.

2.2.3.4 TRABALHO DE CAPUZZO NETO (2005)

Capuzzo Neto (2005) realizou um amplo estudo com intuito de entender qual a influência da geometria dos painéis, da presença de laje, das cintas de amarração e do número de pavimentos na transferência de cargas entre paredes. Fez análises numéricas e estudos experimentais em escala reduzida para a investigação.

No estudo da geometria dos painéis foram usados dois tipos de painéis, em formato “H” e em formato “Z”, ambos possuindo seções correspondentes a círculos que circunscreve com o mesmo diâmetro em planta. Verificou a uniformização das ações verticais para dois modelos, um considera apenas um pavimento, com diâmetro do círculo igual à metade da altura, e o segundo dois pavimentos, com diâmetro do círculo igual a uma vez e meia a distância entre pisos. As figuras de 2.18 a 2.20 mostram as geometrias empregadas.

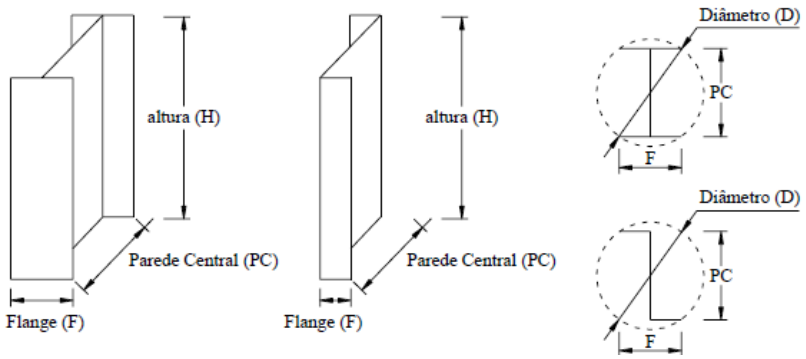


Figura 2.18 - Formatos adotados para a seção em planta.Capuzzo Neto (2005)

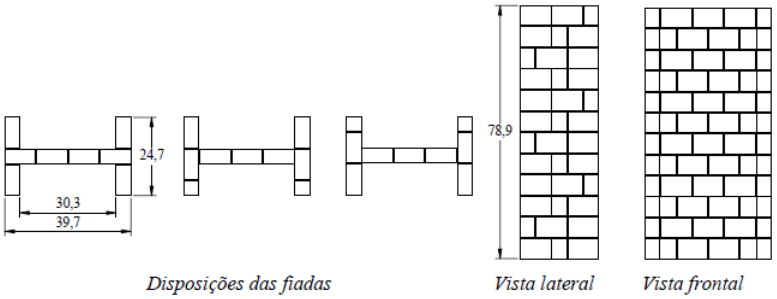


Figura 2.19 - Geometria, fiadas e vistas do modelo H. Capuzzo Neto (2005)

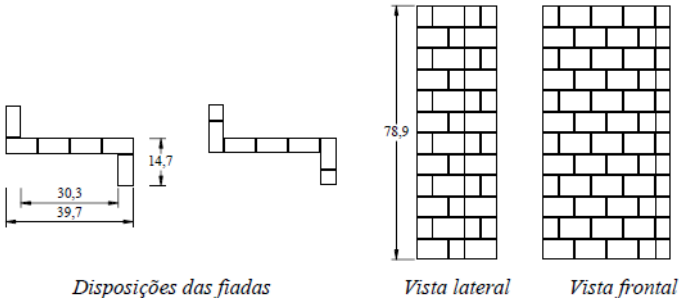


Figura 2.20 - Geometria, fiadas e vistas do modelo Z. Capuzzo Neto (2005)

A análise numérica foi realizada no regime elástico linear com o pacote computacional ANSYS, utilizando a técnica de micro-modelagem. As propriedades elásticas dos materiais usados na análise encontram na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades e características usadas na modelagem do trabalho de Capuzzo Neto (2005)

Elemento	**Sólido – 8 nós – 3 graus de liberdade por nó**
Módulo de elasticidade - Bloco (E_b)	18500 MPa
Coeficiente de Poisson – Bloco (ν_b)	0,18
Módulo de elasticidade - Argamassa (E_a)	10000 MPa
Coeficiente de Poisson – Argamassa (ν_a)	0,20
Espessura das Juntas de argamassa	0,30 cm

No modelo com um pavimento foi aplicado um carregamento de 1 MPa no topo da parede central. Já para os modelos com dois pavimentos o carregamento foi diferenciado , ou seja, no primeiro caso, aplicou-se 1 MPa, apenas no topo da parede central do último pavimento e no segundo caso, aplicou-se 0,25 MPa na parede central de cada pavimento.

Analisando os resultados a referência citada percebeu que as hipótese de Corrêa e Page (2001) são válidas, tanto nos painéis "H", como nos painéis "Z", verificando que a altura necessária para uniformização das tensões para o modelo H1 foi de 60% da altura do pavimento, de acordo com as figuras 2.21 e 2.22. Observou que não houve igualdade das tensões na sua base, para os modelos de um pavimento, enquanto que para os painéis de dois pavimentos com carregamento aplicado no topo do segundo andar houve uniformização das tensões a meia altura do primeiro andar.

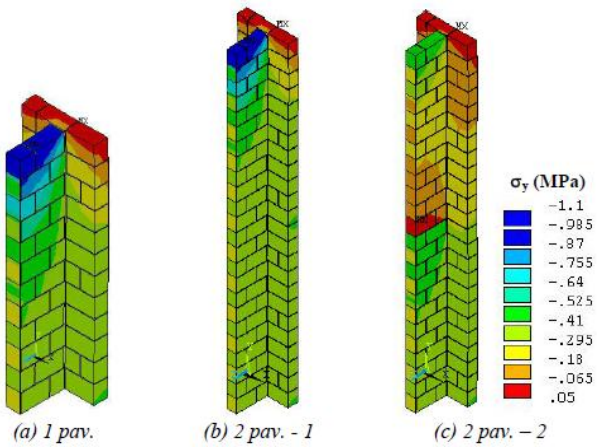


Figura 2.21 - Distribuição das tensões normais verticais - modelo H1. Capuzzo Neto (2005)

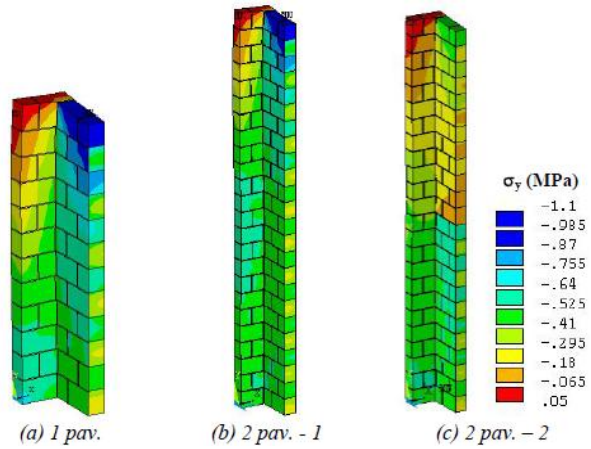


Figura 2.22 - Distribuição das tensões normais verticais- modelo Z1. Capuzzo Neto (2005)

Na investigação da influência das cintas, a referência citada avaliou a tensão de cisalhamento vertical com utilização dos painéis "H" em escala reduzida (1:3), como pode ser visualizado na Figura 2.23. A aplicação do carregamento ocorreu apenas na parede central, como ilustra a Figura 2.24.

Figura 2.23 - Corpos de prova para ensaios de cisalhamento em escala reduzida (1:3). Capuzzo Neto (2005)

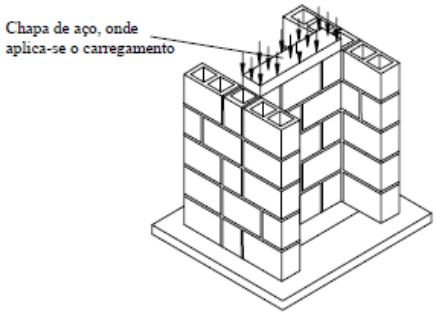


Figura 2.24 - Forma de aplicação do carregamento. Capuzzo Neto (2005)

Após análise dos resultados experimentais, Capuzzo Neto (2005) percebeu que o ganho de resistência devido à presença da cinta de amarração foi inferior a 20%. Para a referência, o principal papel da cinta de amarração é proporcionar uma transferência de forças de modo uniforme.

Neste estudo também foram usados painéis "H" a fim de investigar a interferência na interação entre as paredes, impedindo parcialmente a flexão dos flanges com a laje, como pode ser visto na Figura 2.25. Uma das conclusões da referência citada, quanto a presença da laje no topo é de que a mesma não permite alívio de tensões nos flanges. A laje transmite diretamente para os flanges uma parcela do carregamento, ou seja, a capacidade resistente do painel passa a ser composta pela capacidade da parede central mais a parcela de força transferida para os flanges.

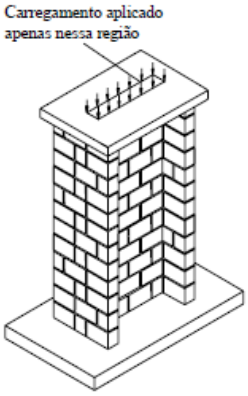


Figura 2.25 - Painel H com laje. Capuzzo Neto (2005)

2.2.3.5 ESTUDO DE ANDOLFATO (2006)

Andolfato (2006) elaborou um amplo estudo sobre a distribuição de ações verticais em um edifício de alvenaria estrutural não armada de quatro pavimentos, estabelecendo correlações entre resultados medidos no edifício real com resultados provenientes de modelos numéricos.

O edifício foi construído com blocos de concreto de 15 x 20 x 30 cm, com resistência de projeto estipulada em 4,5 MPa para toda edificação. As lajes utilizadas foram do tipo treliçada, a fundação foi concebida com o apoio das paredes diretamente em vigas baldrames

de 20 cm de largura por 40 cm de altura. Estacas de 30 cm de diâmetro serviram de sustentação para as vigas.

Os valores de tensões foram adquiridos de pontos previamente escolhidos e instrumentados na edificação real como pode ser visualizado na Figura 2.26.

As cargas provenientes das lajes em cada parede ou grupo de paredes foram determinadas pela área de influência que cada parede detém sobre elas. Os valores considerados na análise foram aqueles referentes a cargas permanentes sem nenhum tipo de majoração.

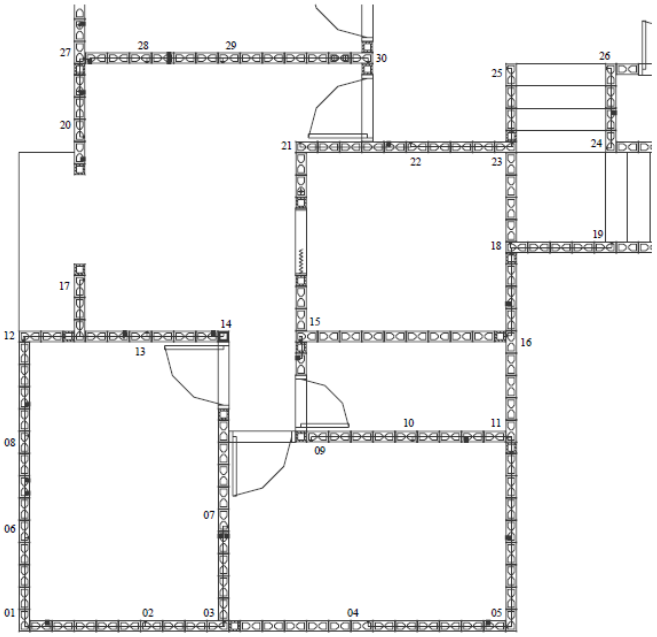


Figura 2.26 - Pontos de leitura e análise de tensões. Andolfato (2006)

A referência citada analisou uma série de gráficos comparando os resultados obtidos pela instrumentação. Considerou os procedimentos para o cálculo de ações verticais, ou seja, o de parede isolada (PI), o de grupo de paredes isolado (GPI), o grupo de parede com 50% de interação (GPCI50) e o grupo de paredes com interação total (GPIT). A Figura 2.27 mostra o gráfico com o comportamento, avaliada por estes procedimentos, nos 30 pontos instrumentado quando a edificação foi totalmente carregada.

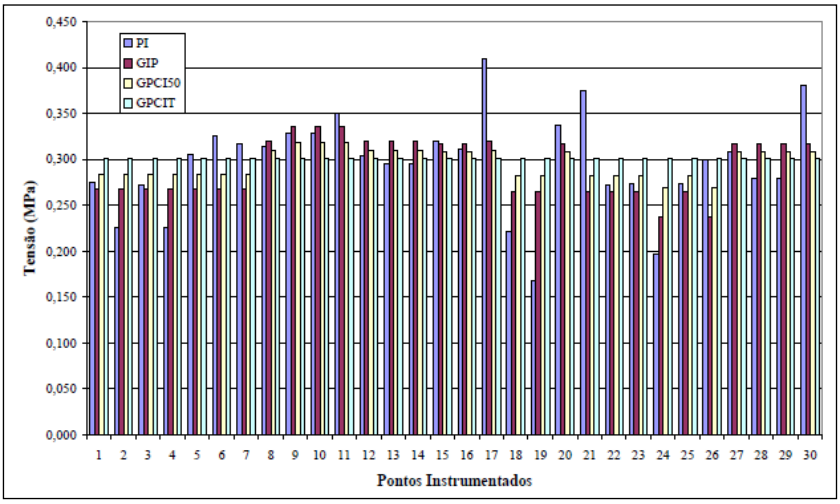


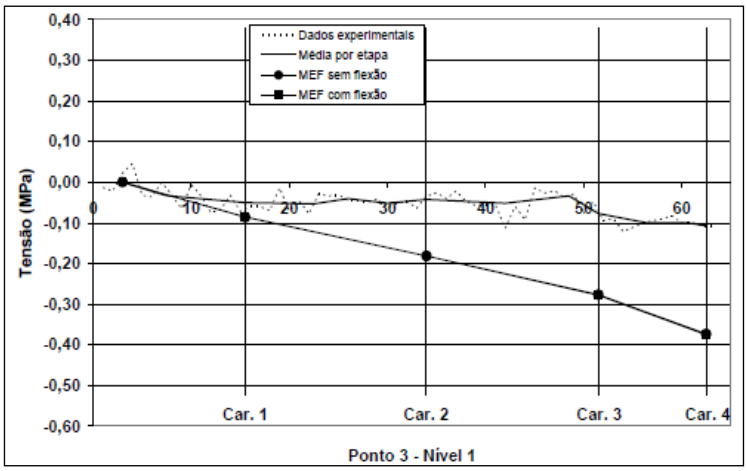
Figura 2.27 - Tensões nos pontos instrumentados considerano PI, GIP, GCI50 e GCIT. Andolfato (2006)

Para a análise numérica utilizou-se da plataforma SAP2000, programa de modelagem computacional baseado no método dos elementos finitos (MEF). As propriedades mecânicas dos materiais utilizados no trabalho estão apresentadas na Tabela 2.3.

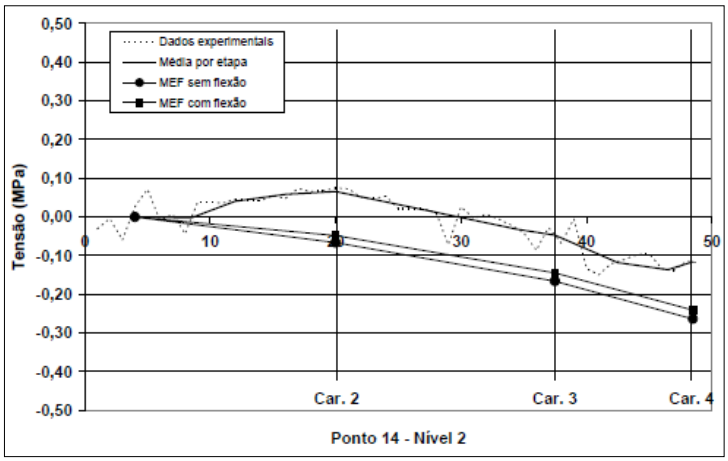
Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na modelagem

Material	**Módulo de Elasticidade (MPa)**	**Poisson (v)**
Alvenaria	4500	0,2
Concreto (Baldrame)	24000	0,2
Concreto (Laje)	24000	0,2
Verga	15000	0,2

Também comparou os resultados provenientes do monitoramento do edifício real com os provenientes da modelagem computacional para os pontos instrumentados em cada nível de carga. Como ilustra o gráfico dos pontos 3 e 14 nas Figura 2.28a e 2.28b.



(a)



(b)

Figura 2.28 - Resultados experimentais e de modelagem. (a) ponto para 3, (b) ponto 14. Andolfato (2006)

As principais conclusões do trabalho de Andolfato (2006) são:

- Apurou boa concordância em vários pontos monitorados nos valores de tensões obtidos com a análise numérica e o modelo experimental. Embora em outros pontos os valores fossem bastante diferentes. Outra evidência originada deste trabalho foi o efeito da flexão das paredes na distribuição das cargas; Andolfato (2006) alerta que o efeito deve ser considerado no dimensionamento da estrutura.

- Os procedimentos para a distribuição de ações verticais usualmente adotados por projetistas, tais como parede isolada, grupo de paredes isolado, grupo de paredes com interação de 50% e grupo de paredes com interação total, foram avaliados nesta pesquisa. Os

valores obtidos nesses procedimentos ficaram bastante próximos, como pode ser visto no gráfico da Figura 2.27.

- Andolfato (2006) encontrou evidências da uniformização de cargas ao analisar alguns pontos, como o ponto 1, observou uma redução na tensão à medida que foi acrescentando os pavimentos.

Em resumo, na transferência de forças entre paredes, a amarração de cantos e encontro deve ser garantida. Portanto, a união das paredes, de preferência, deve ser direta. A distribuição de ações passa a ocorrer também entre pavimentos, como observado por[6], esse espalhamento se torna maior à medida que o carregamento aplicado se afasta da base da estrutura.

2.3 INFLUÊNCIA DO GRAUTEAMENTO NAS PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL

Pretende-se apresentar as principais características do graute e sua influência no comportamento da alvenaria estrutural. Julgou-se importante entender principalmente o comportamento mecânico do conjunto unidade, junta de argamassa e graute.

Define-se como graute um micro concreto formado de cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo de pequenas dimensões (até 9,5 mm) e cal com alta fluidez. A fluidez é uma propriedade importante para permitir que o graute preencha os furos dos blocos e canaletas sem sofrer segregação. Outras características, como apresentar boa trabalhabilidade e capacidade de retenção de água evitando, perdas de água para o bloco, são outras propriedades requeridas para o graute.

O grauteamento serve para aumentar a capacidade resistente das paredes, absorver parte dos esforços verticais, possibilitar o aumento da capacidade resistente do conjunto, aumentar a rigidez e solidarizar a armadura a estrutura, facilitando o seu posicionamento nos furos. Resultados de estudos mostram que para garantir uma boa funcionalidade do graute deve ser

[6] Stockbridge *apud* Hendry (1981)

observada a sua retração, absorção (graute/bloco e graute/argamassa), altura de lançamento, adensamento e adições.

A norma NBR 8798 (ABNT, 1985) classifica o graute em finos e grossos, de acordo com a sua finalidade. Usa-se o graute fino para preenchimento de espaços pequenos, cuja menor dimensão deverá ser menor que 50 mm. Acima desse valor, recomenda-se o graute grosso. A Tabela 2.4 apresenta as proporções para o graute fino e o graute grosso.

Tabela 2.4 – Proporções da NBR 8798 (ABNT, 1985) para dosagem dos grautes

Tipo de Graute	**Proporções em massa em relação ao cimento**				
	Cimento	**Cal Hidratada**	**Agregado Miúdo (Dmax=4,8 mm)**	**Agregado Graudo (Dmáx.= 19 mm)**	**Água**
Graute Fino	1	≤ 0,04	≤ 2,30	-	≤ 0,75
Graute Grosso	1	≤ 0,04	≤ 2,30	≤ 1,70	≤ 0,70

Gomes (1983) realizou ensaios de paredes com e sem graute, e concluiu que para haver uma colaboração efetiva do graute na resistência a compressão da parede, a sua resistência deve ser igual ou superior a do bloco.

Para haver transferência de esforços entre graute/bloco e graute/argamassa, deverá existir uma perfeita aderência entre o graute e estes componentes, segundo[7].

2.3.1 MODELO DE HAMID E DRAYSDALE (1979)

Hamid e Draysdale (1979) estudaram prismas de bloco de concreto grauteados e o comportamento da interação de seus componentes (bloco, argamassa e o graute) sob estado multiaxial de tensões. No final da pesquisa eles desenvolveram um modelo de ruptura para alvenaria.

As referências citadas basearam-se nas seguintes hipóteses: aderência na interface argamassa/bloco/graute; distribuição proporcional dos esforços verticais entre os componentes; distribuição uniforme da tensão ao longo da altura; critério de Mohr; ruptura num ponto ao longo da superfície, quando a tensão de cisalhamento se iguale a resistência ao

[7] Cunha *apud* Logullo (2006).

cisalhamento do material e consideração das características do graute como sendo um concreto convencional sob estado triaxial de tensões.

Algumas observações importantes feitas pelas referências citadas:

- Quando o graute atinge a sua capacidade resistente de compressão, expande devido às deformações ocorridas pela microfissurações inelástica;

- O bloco tende a restringir as deformações e a confinar o graute, aparecendo tensões de tração nas paredes laterais do bloco;

- Se o graute não alcançar a ruptura antes do conjunto bloco/argamassa, as faces do bloco são tracionadas devido às deformações provenientes da argamassa. Percebe-se que o bloco irá romper sempre nestes casos, ou seja, sempre por tração.

A Figura 2.29 ilustra o estado multiaxial de tensões em cada componente da alvenaria de acordo com as hipóteses dos autores.

Partindo de resultados dos ensaios experimentais, as referências citadas ao analisarem a forma de ruptura dos prismas propuserem igualar elasticamente as deformações do graute e do conjunto bloco/argamassa. Portanto, o comportamento mecânico do conjunto é único, pois não existe deslocamento relativo entre graute e junta de argamassa ou graute unidade (bloco).

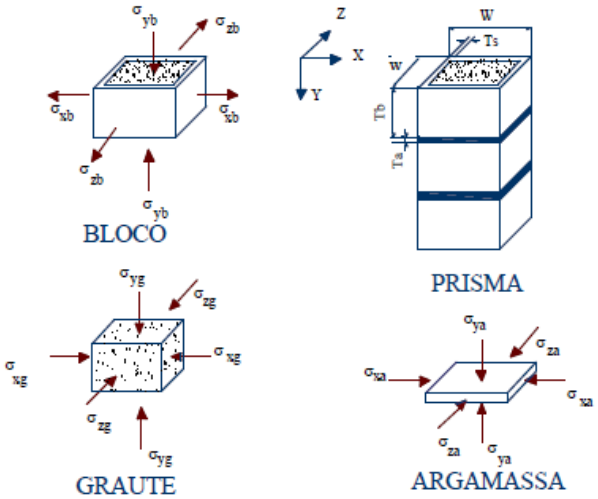


Figura 2.29 - Estado de tensões segundo o modelo de Hamid e Draysdale (1979) *apud* Garcia (2000)

2.3.2 ENSAIOS REALIZADOS POR GARCIA (2000)

A referência citada trabalhou com prismas de 2 e 3 blocos cerâmico, sendo a dimensões dos blocos de 14 x 19 x 29 cm e área líquida aproximadamente 203 cm², com objetivo de fazer uma avaliação quanto à rigidez, modo de ruptura e resistência a compressão dos prismas.

Na análise dos prismas observou-se que o modo de ruptura foi como esperado, ou seja, aparecimento de fissuras verticais que se estenderam até a ruptura do graute e ruína do prisma. Esta como pode observação pode ser visualizado pela Figura 2.30.

As paredes ensaiadas de 1,20 m de altura foram analisadas com quatro e seis furos grauteados como pode ser visto na Figura 2.31. A referência citada percebeu que para as paredes grauteadas houve ruptura do graute por compressão com a formação de um tronco de cone e descolamento das faces do bloco, conforme mostra a Figura 2.32. Outra observação importante foi a pequena fissuração que apareceu nas paredes grauteadas quando comparadas com as que não possuem graute.

Figura 2.30 - Faces opostas de um prisma após a ruptura. Garcia (2000)

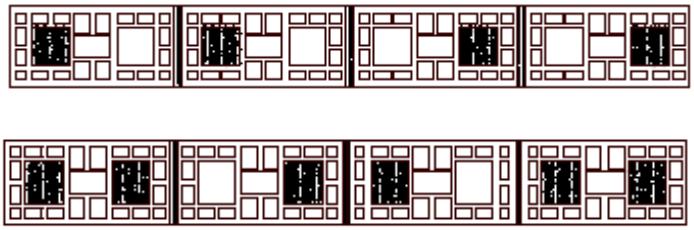


Figura 2.31 - Esquema de grauteamento das paredes. Garcia (2000)

Figura 2.32 - Detalhe da ruptura do graute. Garcia (2000)

Após a análise dos resultados a Garcia (2000) concluiu que a inserção do graute nos furos do bloco contribui para o aumento da resistência das paredes. Com um grauteamento de 11,7% da área bruta da seção transversal da parede, o aumento da resistência da parede foi de 67%. Já para um grauteamento de 17,5% desta mesma área a resistência da parede passa a ser de 84%, como ilustra o gráfico da Figura 2.33. A tensão média de ruptura em relação à área líquida permaneceu praticamente a mesma, independente do grauteamento adotado (4 ou 6 furos grauteados). Para Garcia (2000) esta tensão pode ser admitida como sendo constante.

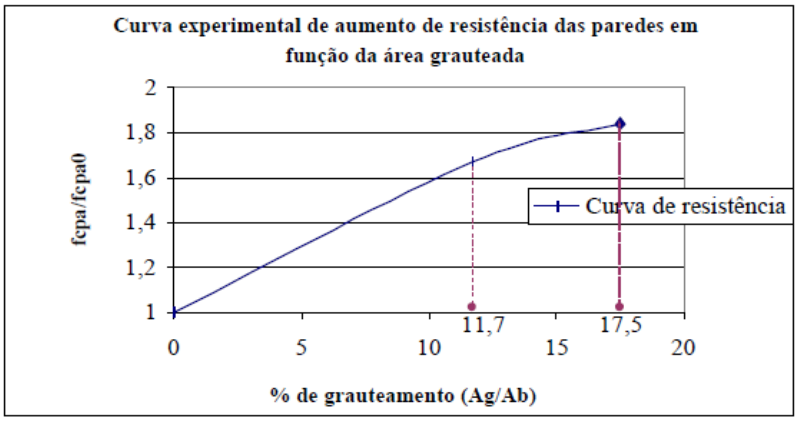


Figura 2.33 - Aumento da resistência da parede com o grauteamento. Garcia (2000)

Onde: f_{cpa} – resistência da parede

f_{cpa0} – resistência da parede sem graute

A_g – área de grauteamento

A_b – área bruta da seção transversal

2.3.3 PESQUISA DE CUNHA (2001)

No seu trabalho, Cunha (2001) estudou prismas grauteados de bloco de concreto avaliando a resistência a compressão em função da resistência da argamassa e da absorção de água no graute.

No programa experimental usou um tipo de bloco com dimensões de 14 x 19 x 39 cm, com resistência à compressão nominal de 4,5 MPa, três tipos de argamassa e 3 tipos de grautes, com resistência de 15 MPa, 25 MPa e 35 MPa. A Figura 2.34 mostra a série de prismas de 3 blocos que foram ensaiadas, na Figura 2.35 mostra o esquema do ensaio à compressão dos prismas e na Figura 2.36 está ilustrado o esquema de moldagem dos corpos de prova para avaliação do efeito da absorção de água no graute.

Figura 2.34 - Prismas de bloco de concreto. Cunha (2001)

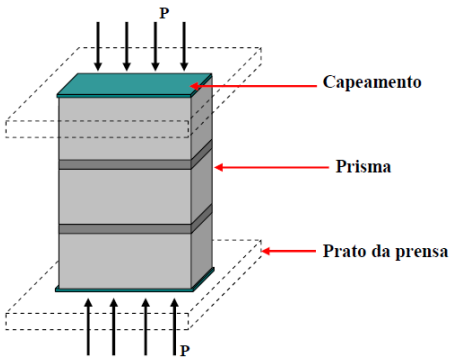


Figura 2.35 - Esquema do ensaio de compressão. Cunha (2001)

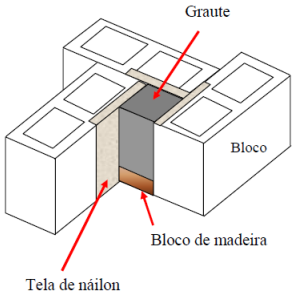


Figura 2.36 - Esquema de moldagem do corpo de prova para avaliação da absorção de água. Cunha (2001)

Para Cunha (2001), a resistência da argamassa não exerce influência na resistência a compressão dos prismas ocos e grauteados. Como em outros trabalhos, constatou-se que a resistência dos prismas aumenta com o acréscimo de resistência do graute.

A referência citada concluiu que a perda de água do graute pode causar dois tipos de fenômenos: o primeiro é o aumento de resistência nos grautes que tem uma relação água cimento maior; o segundo ocasiona a redução da resistência do graute de até 28,6%. Essa redução pode ser explicada pela perda de aderência na interface bloco/graute devido o aumento de porosidade daquela região. O fato também pode ser entendido como a baixa relação água cimento. Nesse caso o graute perde água para o bloco não retendo água suficiente para uma correta hidratação do cimento.

2.3.4 ESTUDO DE GROHMANN (2006)

Grohmann (2006) realizou um estudo experimental com blocos cerâmicos para avaliação da influência do graute na resistência à compressão de prismas. Utilizou diferentes tipos de argamassas e várias porcentagens de grauteamento. As porcentagens de grauteamento, foram de 0%, 66% e 100%, combinados com diferentes tipos de grautes – G1, G2 e G3, e dois tipos de argamassa – A1 e A2. A Figura 2.37 ilustra os diferentes percentuais de grauteamento utilizado no trabalho e a Figura 2.38 mostra os prismas após grauteamento.

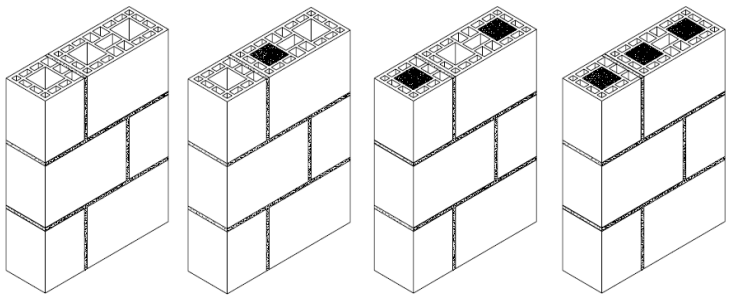


Figura 2.37 - Modelos de prismas com diferentes percentuais de grauteamento. Grohmann (2006)

Figura 2.38 - Prismas grauteados - Grohmann (2006)

Após os ensaios, Grohmann (2006) analisou o comportamento e as causas da ruptura do prisma sob ação de cargas de compressão. Observou que a argamassa tende a se expandir lateralmente e como possui ligação com o bloco, ela é restringida, surgindo tensões laterais de tração no bloco e de compressão na argamassa. Observou-se que a argamassa fendilha o bloco e pode também sofrer esmagamento devido às tensões de compressão geradas.

Devido a alta rigidez das argamassas fortes, observou que houve acréscimo de resistência nos prismas. O fato pode ser explicado pela diminuição das deformações que ocorrem na interface bloco/argamassa retardando a ruptura dos prismas.

Surgiram fissuras verticais nas faces laterais dos blocos, que segundo a referência citada, são devidos a uma maior deformação do graute e da argamassa em relação ao bloco. A Figura 2.39 mostra a formação desse tipo de fissura.

Figura 2.39 - Formação da fissura na face transversal do bloco - Grohmann (2006)

Os prismas grauteados ensaiados romperam-se devido à expansão do graute que, segundo a referência citada, ao alcançarem a sua capacidade resistente sofrem deformações

excessivas proveniente da microfissuração interna. Através deste fenômeno o graute transfere tensões de tração para o bloco e a argamassa, principalmente na zona mais frágil que é na interface bloco/ argamassa, ocasionando ruína do prisma. Quando o graute não atinge a sua capacidade total, o rompimento dar-se-á pela ruína do bloco/argamassa, em que as faces dos blocos são tracionadas pela restrição a deformação da argamassa, que tem a tendência de se expandir lateralmente.

A referência citada constatou a formação de uma zona frágil entre o graute e a argamassa, formada pela alta absorção de água desta região. Para grautes menos resistentes este local costuma ser o ponto de ruptura no graute. Na Figura 2.40 pode ser visualizado a forma desta zona.

Figura 2.40 - Graute, interface bloco/argamassa. Grohmann (2006)

Houve formação de pilaretes, que são resquícios do graute que ficou intacto após a ruína do prisma. O fenômeno foi presenciado nos prismas com grautes de maior resistência, ou seja, o conjunto bloco/argamassa rompeu, porém o graute permaneceu sem sofrer danos aparentes de ruptura, como pode ser visto na Figura 2.41. Para os prismas de menor resistência e menor número de células grauteadas, o rompimento ocorre na estrutura do graute. A Figura 2.42 mostra como ocorre o fenômeno.

Figura 2.41 - Pilarete após a ruptura do prisma. Grohmann (2006)

Figura 2.42 - Ruptura de prisma com graute de menor resistência. Grohmann (2006)

2.3.5 ESTUDO EXPERIMENTAL DE LEÃO (2008)

Leão (2008) investigou o comportamento e as variáveis que influenciam na resistência e nas deformações de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos grauteados e não grauteados, submetidos a esforços de compressão e de tração na flexão.

O seu estudo envolveu dois tipos de blocos, três tipos de argamassa e dois tipos de graute com resistência à compressão e módulos de elasticidade diferentes. Foram avaliados 16 tipos de prismas, e, para cada tipo, foram construídos 5 prismas.

Os prismas grauteados para todas as combinações de argamassa e graute romperam após surgimento de fissuras na direção da altura dos prismas. A ruptura aconteceu pelo descolamento das faces dos blocos provocado pelas deformações do graute o que ocasionou tensões de tração nos blocos. Nos casos observados o graute não permaneceu integro; houve ruína dos mesmos. A Figura 2.43 mostra o comportamento após ruptura dos prismas grauteados.

Figura 2.43 - Tipo de ruptura dos prismas grauteados. Leão (2008)

Com base em resultados teóricos de outros autores, Leão (2008) procurou separar as parcelas de cargas que são absorvidas pelo bloco e pelo graute. Utilizou como hipótese o comportamento mecânico diferenciado dos componentes do prisma (argamassa, bloco e graute), analisando o comportamento apenas no regime elástico linear. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da rigidez dos componentes (argamassa e graute) na absorção de cargas na alvenaria e no próprio graute. Os valores das parcelas para cada tipo de prisma estudado estão representados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Parcela de carga absorvida pelo graute e pela alvenaria pesquisa de Leão (2008)

Tipo de Prisma	**Mód. Elast. do Graute (GPa)**	**Mód. Elast.da Alvenaria (GPa)**	**Carga de Compressão (KN)**			**Porcentagem de carga absorvida**	
			Total	**Graute**	**Alvenaria**	**Graute**	**Alvenaria**
B2-A2-As1-G1	13,52	4,97	412,13	259,74	152,39	63,02%	36,98%
B2-A2-As1-G2	17,86	4,97	374,30	259,19	115,11	69,25%	30,75%
B2-A3-As1-G1	13,52	5,23	415,30	256,77	158,53	61,83%	38,17%
B2-A3-As1-G2	17,86	5,23	418,80	285,41	133,39	68,15%	31,85%

O pesquisador percebeu que os prismas com graute de maior rigidez absorvem uma parcela maior do carregamento total aplicado, diminuindo a parcela absorvida pela alvenaria. Verificou que a carga absorvida pelo graute independe da resistência da argamassa de assentamento. Um acréscimo de 32% no módulo de elasticidade da argamassa reflete num aumento de 10% da carga absorvida pelo mesmo. A argamassa também influencia na distribuição de carga absorvida uma vez que altera o módulo de elasticidade da alvenaria. Um aumento de 5% na rigidez da alvenaria provoca um aumento de 3,4% na carga absorvida pela

mesma nos prismas grauteados. Para Leão (2008), com o acréscimo de rigidez da alvenaria ocorre uma diminuição da tensão lateral exercida pelo graute na alvenaria. Concluiu que para os dois tipos de graute houve uma maior resistência do prisma com o aumento da rigidez da alvenaria.

2.3.6 ESTUDO EXPERIMENTAL DE PRISMAS DE LOGULLO (2006)

A pesquisadora Logullo (2006) fez um extenso estudo sobre a influência do graute no comportamento da alvenaria de blocos de concreto. Ensaiou vários tipos de prismas, variando classes de resistência tanto do bloco como do graute e utilização de diferentes taxas de armadura. Aprofundou sua pesquisa principalmente na investigação da deformabilidade do material compósito, constituído pela unidade, argamassa e graute. Os materiais usados nesse estudo foram dois tipos de blocos, um com resistência de 8,61 MPa e o outro com resistência de 15,76 MPa denominados de B1 e B2, respectivamente. Estas resistências foram obtidas a partir da área bruta, sendo a dimensão do bloco inteiro de 14 cm x 19 cm x 29 cm e de 14 cm x 19 cm x 14 cm para o meio bloco. Dois tipos de grautes, G1 e G2, com resistências à compressão de 18,8 MPa e 27,46 MPa, respectivamente. Quatro tipos de misturas de argamassas dos tipos A1, A2, A3 e A4. Taxas de armaduras ρ_1, ρ_2, ρ_3, de 0,15%, 0,40% e 1% respectivamente. A Tabela 2.6 traz um resumo dos tipos de prismas, e suas características, utilizados no trabalho de Logullo (2006).

Tabela 2.6 – Tipos de prismas usados no estudo de Logullo (2006)

Tipo	**Caracteristica**	**Material Utilizado**
B1	Prisma vazio	Bloco B1
B2	Prisma vazio	Bloco B2
B1G1	Prisma grauteado	Bloco B1 Graute G1
B1G2	Prisma grauteado	Bloco B1 Graute G2
B2G1	Prisma grauteado	Bloco B2 Graute G1
B2G2	Prisma grauteado	Bloco B2 Graute G2

O esquema de montagem dos prismas grauteados está mostrado na Figura 2.44. A instrumentação dos ensaios foi realizada com utilização de medidores de deslocamento tipo LDVT para medir o encurtamento da alvenaria e extensômetros elétricos para medir a deformação da unidade, conforme mostra a Figura 2.45.

Figura 2.44 - Montagem dos prismas grauteados. Logullo (2006)

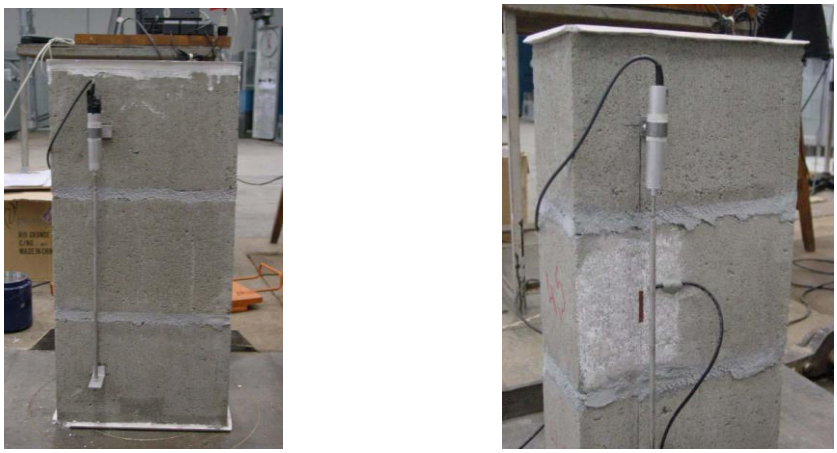


Figura 2.45 - Esquema da instrumentação dos prismas. Logullo (2006)

Ao analisar a curva tensão x deformação de todas as amostras, a referência citada percebeu que as curvas do prisma e da unidade (bloco) coincidiram, ou seja, apresentaram as mesmas deformações para o nível de carregamento aplicado. Concluiu que a presença do graute no prisma igualou a rigidez do conjunto (bloco/argamassa+graute), funcionando como único elemento. A Figura 2.46 mostra as curvas da unidade e do prisma grauteado obtidas no mesmo ensaio de compressão, evidenciando um comportamento mecânico idêntico para os materiais componentes devido à aderência entre eles.

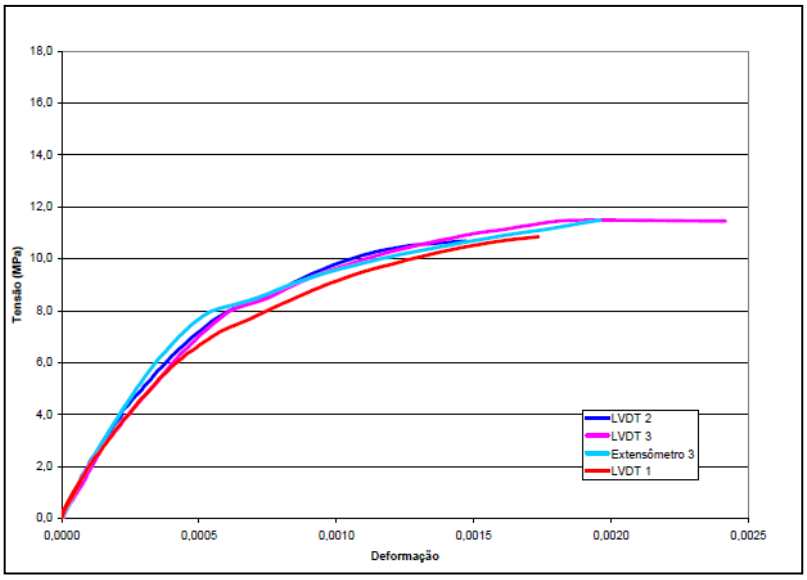
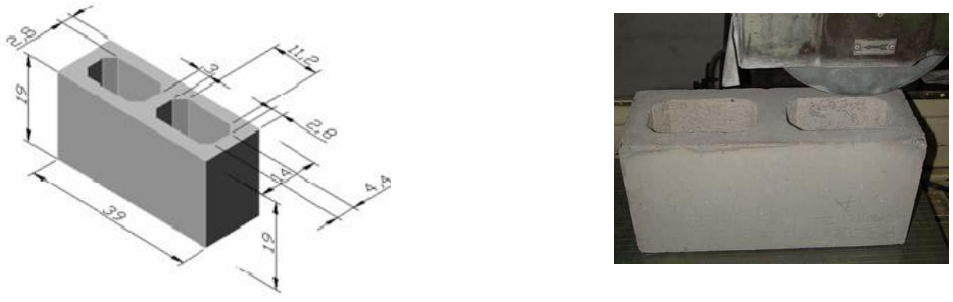


Figura 2.46 - Curva tensão x deformação do prisma B1G1. Logullo (2006)

2.3.7 ESTUDO EXPERIMENTAL DE BARBOSA (2008)

O estudo experimental de Barbosa (2008) foi realizado para diferentes metodologias de ensaios, visando correlacionar as propriedades elásticas do material com aquelas provenientes de ensaios padronizados do bloco e da junta de argamassa. As dimensões dos blocos utilizados no estudo foram 140 mm x 190 mm x 390 mm, com área líquida de 30663 mm². A espessura das paredes longitudinais e dos septos transversais era de 28 mm, com exceção do septo transversal central que possui 30 mm de espessura, conforme ilustra a Figura 2.47.



Geometria

Visão Geral

Figura 2.47 - Geometria e visão geral dos blocos. Barbosa (2008)

Os blocos foram produzidos com 3 faixas de resistência à compressão, sendo: 6,5 a 15 N/mm² (B1), de 17,5 a 25 N/mm² (B2) e de 27,5 a 35 N/mm² (B3). Os ensaios para determinação das propriedades dos blocos foram realizados utilizando dois tipos de placas: a padronizada e a escova, mostrado na Figura 2.48.

Ensaio com placa padronizada

Ensaio com placa- escova

Figura 2.48 - Esquema dos ensaios dos blocos. Barbosa (2008)

A argamassa foi produzida com cimento cal e areia em três grupos diferentes de resistência denominadas de A1, A2 e A3, ficando entre 70% e 100% da resistência do bloco. Para a obtenção das propriedades mecânicas da argamassa moldou-se dois tipos de corpos de provas; um cilíndrico 50 x 100 mm e vigas de 150 x 150 x 500 mm, como mostrado na Figura 2.49.

.

Moldagem dos Corpos de tipo vigas

Moldagem dos Corpos de Prova Cilíndricos

Ensaio do Cilindro

Ensaio da Viga

Figura 2.49 - Moldagem e ensaios dos corpos de prova de argamassa. Barbosa (2008)

Um dos objetivos do estudo experimental foi a observação do comportamento estrutural do conjunto (argamassa+bloco) de prismas e miniparedes para estabelecer correlações teóricas e experimentais entre eles.

No estudo laboratorial foram montados painéis de miniparedes constituídas de blocos e meio-blocos de concreto com dimensões de 790x790 mm. As unidades e as juntas de argamassa estão dispostas como ilustrado na Figura 2.50.

Figura 2.50 - Detalhe da miniparede de bloco de concreto. Barbosa (2008)

Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento em uma máquina de ensaio universal a uma velocidade de 0,001mm/s. A aplicação do carregamento foi feito por um perfil metálico disposto no topo da parede. Esse ensaio possibilitou medir o comportamento do bloco isolado e o comportamento global da miniparede. A Figura 2.51 mostra o esquema de fixação da instrumentação e a realização do ensaio.

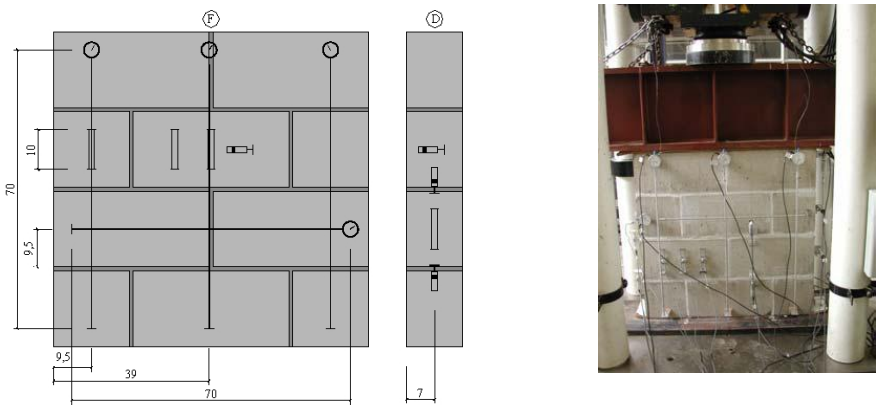


Figura 2.51 - Esquema da instrumentação e ensaio da miniparede.Barbosa (2008)

A referência citada realizou ensaios em 3 grupos de paredes denominados de PAR1, PAR2 e PAR3. Algumas das propriedades mecânicas das paredes e de seus materiais constituintes estão apresentadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Propriedades elásticas e inelásticas da argamassa e do concreto da unidade

Componente		**Resistência à tração (N/mm²)**	**Resistência à compressão (N/mm²)**	**Módulo de Elasticidade (N/mm²)**	**Poisson**
PAR 1	Argamassa	9,4	1,1	9745	0,13
	Bloco	22,8	2,2	20595	0,20
PAR 2	Argamassa	18,1	1,6	17553	0,15
	Bloco	21,5	2,1	22447	0,20
PAR 3	Argamassa	22,2	2,6	16672	0,15
	Bloco	36,2	3,1	27104	0,20

Em resumo, na análise de prismas grauteados o bloco tende a romper por tração devido às deformações do graute ou da argamassa, este fato foi observado por outros pesquisadores.

A parcela de carga que incide na região grauteada depende da rigidez do graute, quanto mais rígido, mais carregamento absorvido. A argamassa também influencia na distribuição de ações entre graute e alvenaria, para argamassas mais rígidas a carga transferida ao graute se torna maior.

2.4 ANÁLISE NUMÉRICA EM ALVENARIA ESTRUTURAL

Devido às dimensões e geometria dos painéis de alvenaria, muitas vezes os estudos experimentais em laboratório, em escala real, se tornam impossíveis. A modelagem computacional em elementos finitos, em diversos casos, contribui para minimizar algumas dificuldades do experimento. Quando usada com critério, a análise numérica torna-se uma ferramenta auxiliar poderosa na avaliação do comportamento estrutural da alvenaria.

Gonçalves Junior (2008) cita em seu trabalho que o método dos elementos finitos surgiu para resolver problemas de difícil solução ou analiticamente impossível da teoria da elasticidade. Para ele, a formulação do método dos elementos finitos pode ser baseado no

método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio ou em métodos híbridos ou mistos. A Figura 2.52 mostra um fluxograma da aplicação do método dos elementos finitos.

Segundo Gomes (2001) o método dos elementos finitos é o mais usado para modelar o comportamento estrutural da alvenaria, seja na área de projeto como na área de pesquisa. Justifica que o método é bastante utilizado devido sua grande flexibilidade na representação de qualquer tipo de geometria, condições de contorno e carregamento com uma implantação computacional relativamente fácil.

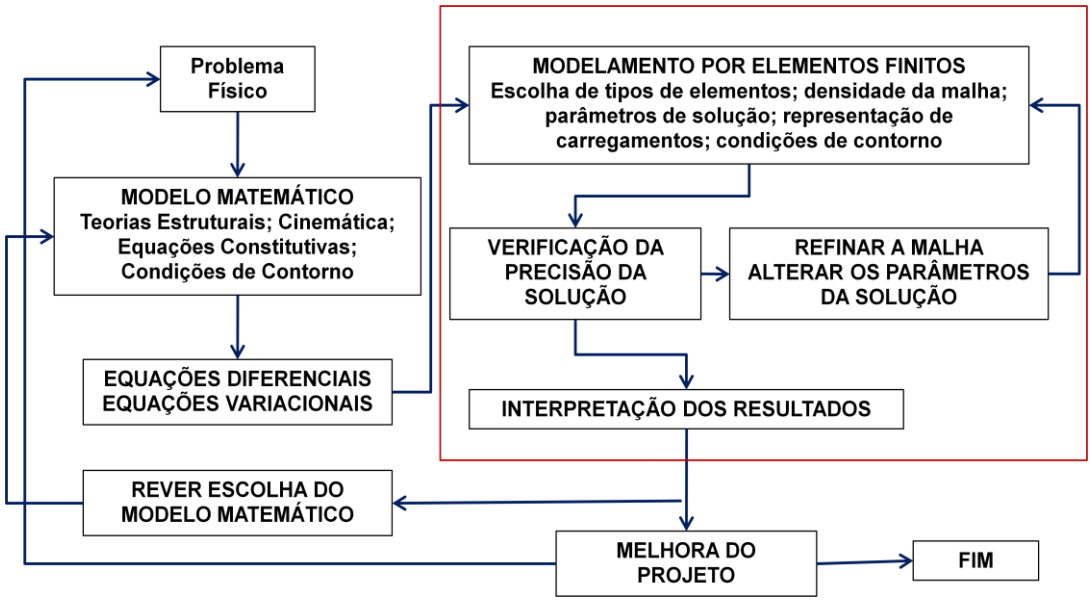


Figura 2.52 - Fluxograma da aplicação do método dos elementos finitos. Adaptado pelo autor de Gonçalves Junior (2008)

Segundo[8], a alvenaria é um material de natureza heterogênea, formada por juntas de argamassa e unidades (bloco cerâmico ou bloco de concreto), com propriedades mecânicas distintas em todas as direções. A resistência à compressão é elevada e a resistência à tração é baixa, estando vinculada à aderência entre bloco e argamassa. Já para o pesquisador Lourenço (1996), outros fatores influenciam no comportamento estrutural da alvenaria como as propriedades dos blocos e juntas, a disposição das juntas verticais e horizontais, as dimensões

[8] Gallegos *apud* Peleteiro (2002)

dos blocos, a qualidade da mão de obra, o grau de cura, fatores atmosféricos e cura da argamassa ou do bloco.

Peleteiro (2002) cita que devido à diversidade da alvenaria a modelagem torna-se trabalhosa. Pesquisas recentes têm trabalhado com modelos mais refinados para tornar o calculo da alvenaria mais sofisticado e menos empírico.

De maneira geral, a alvenaria pode ser modelada de duas formas diferentes. Uma delas, a chamada micromodelagem, envolve uma modelagem detalhada das juntas, dos blocos e interface bloco/argamassa. A outra é a macromodelagem, onde admite-se o material como sendo anisotrópico contínuo, e se estabelece uma relação entre extensões médias e tensões médias na alvenaria. Para Lourenço (1996), o uso de um ou outro modelo dependerá do nível de precisão e sofisticação desejada. Os modelos para estratégias de modelagem de alvenaria sugeridas pelo pesquisador são assim ordenados:

a) *Micro modelagem detalhada* – As unidades de alvenaria, as juntas de argamassa e o graute são representados por elementos contínuos e a interface bloco/argamassa por elementos especiais de interface (descontínuos), detalhe na Figura 2.53b.

b) *Micromodelagem simplificada* – Apenas as unidades e a interface estão representadas neste modelo. As unidades estão representadas por elementos contínuos que incorporam a junta de argamassa e a interface concentrada em elementos de interface, ver Figura 2.53c;

c) *Macromodelagem* – Unidade, junta de argamassa e interface são consideradas dispersas no meio continuo, com propriedades equivalentes, a Figura 2.53d ilustra o material compósito equivalente.

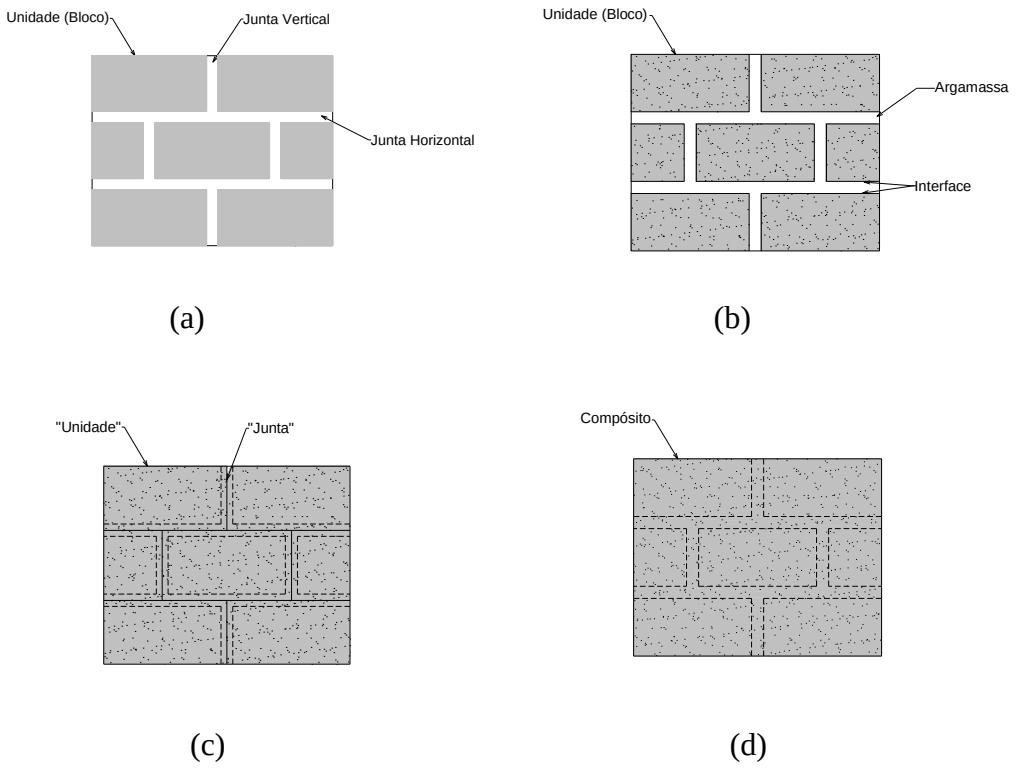


Figura 2.53 - Modelos (a) Elementos da alvenaria, (b) Micromodelagem detalhada, (c) Micromodelagem simplificada, (d) Macromodelagem.Adaptado pelo autor de Lourenço (1996)

No primeiro caso, as propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson que definem o comportamento linear da unidade e da argamassa são levados em consideração. A interface entre a unidade e a argamassa representa um plano de fissuração e deslizamento.

Na micromodelagem simplificada as dimensões das juntas são expandidas com a intenção de manter inalteradas as características geométricas da alvenaria. Peleteiro (2002) cita que as juntas são simuladas como uma interface média. As interfaces que neste caso são consideradas como planos de fratura e deslizamento fazem a união do conjunto de unidades elásticas.

A alvenaria na macromodelagem é tratada como um meio homogêneo, contínuo e anisotrópico, e não existe distinção entre a unidade, argamassa e interface.

O emprego do tipo de modelagem depende da precisão e dos objetivos a serem alcançados. O uso da micromodelagem é necessário quando pretende-se entender o comportamento local das estruturas de alvenaria, e é muito útil quando se deseja analisar

detalhes estruturais como, por exemplo, avaliação de tensões nas juntas de argamassa. Já a macromodelagem é usada quando se deseja conhecer o comportamento global da estrutura, e quando tem paredes de dimensões grandes o suficiente para garantir uma distribuição uniforme de tensões. O tempo de processamento, a praticidade de uso e a facilidade na geração da malha de elementos finitos são algumas vantagens dos modelos macro. De acordo com Gomes (2001), quando se deseja um meio termo entre precisão e eficiência o uso da macromodelagem é muito útil.

É imprescindível um estudo experimental prévio para a caracterização do material independentemente do tipo de modelagem a ser utilizada. Gomes (2001) chama a atenção da comunidade científica sobre a carência de ensaios laboratoriais capazes de alimentar os modelos numéricos com resultados que sejam úteis e confiáveis. Outro fato observado pela referência citada diz respeito ao uso de diferentes metodologias, equipamentos de ensaios e de materiais, o que dificulta comparações entre resultados experimentais e as conclusões. Informa, ainda, que é corrente medir e registrar somente valores de resistências e desprezar as características de deformações.

2.4.1 MICROMODELOS E MODELOS HOMOGENEIZADOS

Vários pesquisadores têm dedicado ao estudo de modelos e critérios de modelagem adequados para representarem de maneira confiável o comportamento da alvenaria estrutural. Os micromodelos (modelos discreto) e os modelos homogeneizados têm sido bastante utilizados para simular respostas lineares e não lineares da alvenaria.

2.4.1.1 MICROMODELO DE PAGE (1978)

Em sua publicação avaliou painéis de alvenaria em bloco cerâmico com carregamento aplicado no seu próprio plano, levando em consideração o comportamento não linear da alvenaria. No modelo Page (1978) considerou a ocorrências de redistribuição de tensões devido ao comportamento não linear, principalmente nas juntas de argamassa. Existência de descolamento entre argamassa e unidade (bloco), na ruptura localizada. A alvenaria foi tratada como material bifásico composto de unidades elásticas envolvida pela argamassa, sendo está última avaliada como material inelástico. Ocorrência da ruptura nas juntas, quando à

resistência a tração ou cisalhamento da argamassa for ultrapassado. Essas considerações foram implementadas em um programa de elementos finitos que simula a propriedade não linear das juntas e considera sua ruptura progressiva. As propriedades dos materiais e dos painéis necessárias para o modelo foram determinadas em ensaios de laboratório. As juntas foram modeladas como elementos de ligação que limita a tensão de tração, altas tensões de compressão (com características não lineares de deformação) e a tensão de resistente ao cisalhamento sendo dependente do valor da resistência à compressão.

Os resultados da distribuição de tensões obtidos com o modelo numérico mostraram uma boa precisão, quando comparado com valores experimentais, mesmo para níveis de tensões mais elevados. O trabalho é útil na determinação da distribuição de tensões na alvenaria, e não na obtenção de força de ruptura.

2.4.1.2 MODELO HOMOGENEIZADO DE PANDE *et al*.(1989)

As referências citadas apresentam um artigo onde as propriedades elásticas da alvenaria podem ser determinadas por um "material aproximado equivalente". O sistema é formado por duas camadas paralelas de materiais, formada de bloco e argamassa. As propriedades médias são determinadas para este sistema. Ao aplicar o modelo, no caso da alvenaria com juntas de argamassa (vertical e horizontal), a parede pode ser representada por um material equivalente elástico ortótropico. O processo para a formação do material equivalente consiste de duas fases: a primeira ocorre com a homogeneização horizontal, incluindo juntas verticais e as unidades, e a segunda é realizada com uma homogeneização vertical, incluindo o material anteriormente homogeneizado com as juntas horizontais, como pode ser visualizado na Figura 2.54b. A mesma metodologia pode ser adotada também para homogeneização vertical, começando com a inclusão das juntas horizontais e unidades e em seguida as juntas verticais unindo-se a homogeneização anterior, conforme ilustra a Figura 2.54c. A utilização de um ou outro procedimento não implica em obtenção de valores diferentes. As propriedades do material equivalente são determinadas a partir das características elásticas isotrópicas da argamassa e da unidade levando em consideração a espessura da junta.

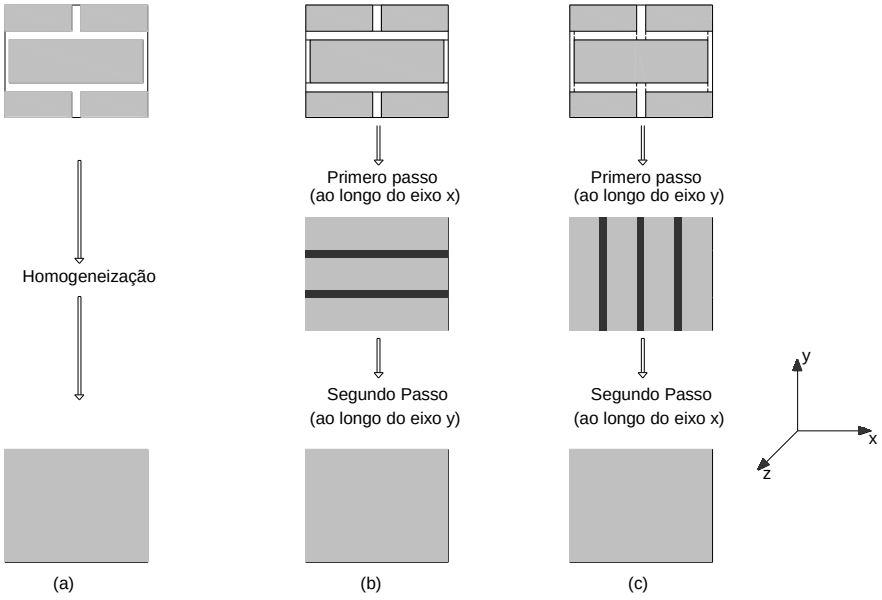


Figura 2.54 - Procedimentos de homogeneização: (a) Objeto de homogeneização, (b) Homogeneização em xy, (c) Homogeneização em yx. Adaptado pelo autor de Lourenço (1996)

Ao final dos estudos, os autores perceberam que o módulo de elasticidade longitudinal (E) normal às juntas verticais do material equivalente é menor do que aquele na direção paralela à junta. Eles observaram que a rigidez ao cisalhamento do material equivalente no plano paralelo às juntas horizontais é, em geral, maior que a rigidez ao cisalhamento perpendicular às juntas horizontais. Verificou-se que para o caso mais comum, em que o módulo de elasticidade da argamassa é menor que o módulo de elasticidade do bloco, o acréscimo da espessura da junta de argamassa resulta numa redução do módulo de elasticidade da alvenaria e o acréscimo no módulo de elasticidade da argamassa provoca um aumento do módulo de elasticidade da alvenaria.

2.4.1.3 MODELO NUMÉRICO DE HOMOGENEIZAÇÃO DE PELETEIRO (2002)

Peleteiro (2002) apresenta um modelo numérico de homogeneização obtido a partir da célula básica de alvenaria, idealizada por Lourenço (1996). A Figura 2.55 mostra a geometria dessa célula. As propriedades do bloco e da argamassa foram consideradas separadamente

como materiais de comportamento isotrópico. Para determinar o módulo de elasticidade em certa direção, aplica-se um carregamento uniformemente distribuído. Encontra-se a deformação média das faces da célula, e admite-se que a deformação do material equivalente é a mesma da célula, uma vez que os dois materiais possuem a mesma energia de deformação. Calcula-se o módulo de elasticidade longitudinal para a direção de aplicação da carga. A partir da média das deformações da direção perpendicular, obtém-se o coeficiente de Poisson.

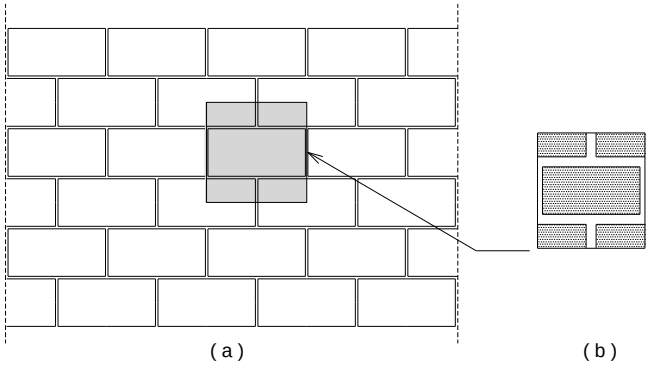
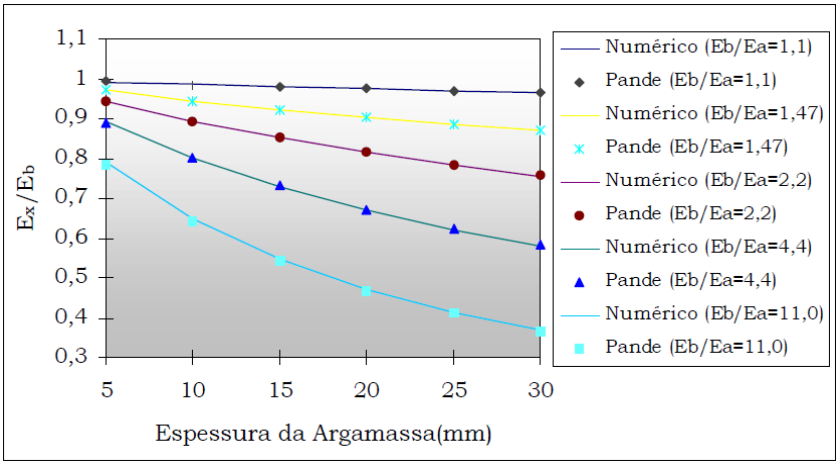


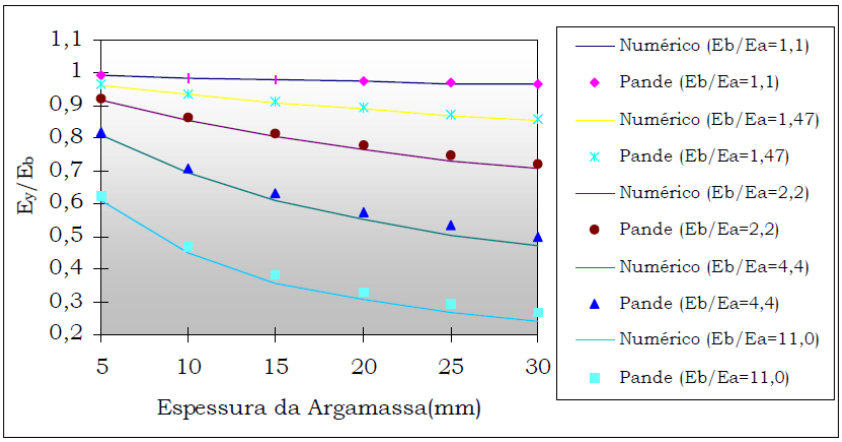
Figura 2.55 - Formação da célula básica de alvenaria, (a) Painel de alvenaria, (b) Célula básica de alvenaria. Adaptado pelo autor de Lourenço (1996)

A referência citada validou o seu modelo comparando os resultados obtidos com o modelo do material equivalente de Pande *et al*. (1989), fazendo uma variação entre os módulos de elasticidade do bloco e da argamassa numa razão de 1,1 até 11.

Ao analisar a razão entre o módulo de elasticidade nas direções x , y com o módulo de elasticidade do bloco, observou-se que os valores obtidos numericamente foram praticamente os mesmos do material equivalente de Pande *et al*. (1989), como mostra os gráficos das figuras 2.56a e 2.56b. A referência citada avaliou a variação da relação $E_x/E_{y,}$ como demonstra o gráfico da Figura 2.57. Nota-se uma discordância nos valores numéricos de Peleteiro (2002), com o material equivalente para razões entre módulos do bloco e da argamassa superiores a 1. Contrariamente quando os valores destes módulos de elasticidade tendem para a unidade os resultados dos métodos empregado na investigação se aproximam.



(a)



(b)

Figura 2.56 - Relação entre módulos de elasticidade e espessuara da argamassa, (a) Relação E_x/E_b x espessura da argamassa, (b) Relação E_y/E_b x espessura da argamssa. Peleteiro (2002)

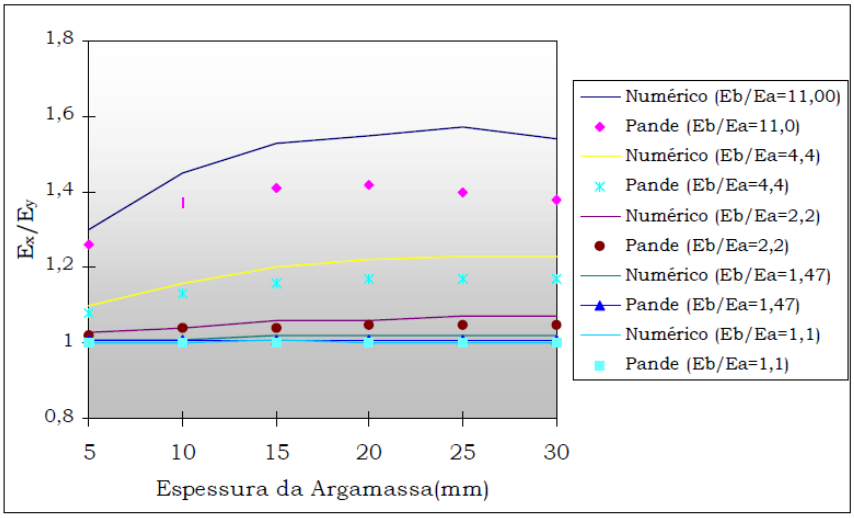


Figura 2.57 - Relação Ex/Ey x espessura da argamassa. Peleteiro (2002)

Peleteiro (2002) concluiu que um aumento na espessura da junta de argamassa resulta num decréscimo no módulo de elasticidade da alvenaria nas duas direções. Já um acréscimo no módulo de elasticidade da argamassa provoca um aumento nos valores dos módulos de elasticidade nas duas direções. Percebeu-se que o módulo de elasticidade do material equivalente na direção normal às juntas horizontais é menor que na direção paralela às mesmas. A referência citada indica que o processo só é válido, para a célula básica de alvenaria quando está sujeita ao comportamento elástico linear.

2.4.1.4 MODELO NUMÉRICO HOMOGENEIZADO DE LOURENÇO E ZUCCHINI (2002)

Lourenço e Zucchini (2002) apresentam nesse artigo um modelo numérico baseado na micro estrutura da alvenaria para análise não linear. O objetivo é descrever o comportamento da alvenaria com base na geometria e no comportamento mecânico de um elemento de volume representativo, conforme ilustra a Figura 2.58.

Este trabalho considera o comportamento tridimensional do elemento de volume representativo e apresenta uma comparação entre uma análise detalhada com elementos finitos e o modelo simplificado. Adotando um critério de ruptura simples para o bloco e argamassa, demonstram-se, ainda, que é possível obter uma superfície de ruptura do material compósito com forma semelhante às superfícies de ruptura obtidas experimentalmente para alvenaria.

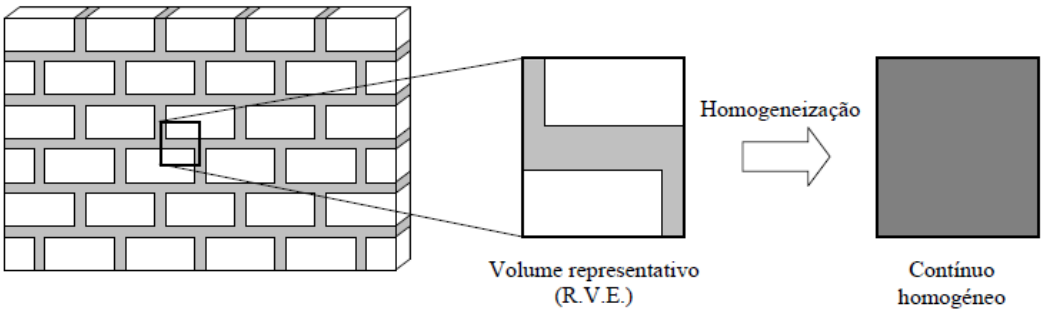


Figura 2.58 - Volume representativo de alvenaria. Lourenço e Zucchini (2002)

A notação geométrica adotada para a formulação do modelo está ilustrada na Figura 2.59. O modelo inclui os modos de deformação internos, que resultam no contrafiamento[9] das juntas que são ignorados nos processos de homogeneização simplificados.

A resposta elástica do elemento representativo é obtida por seis casos básicos de carregamento, três em compressão uniaxial e três em cisalhamento puro e do princípio da superposição de efeitos. As propriedades da alvenaria homogeneizada foram obtidas através do estado de tensões e deformações, tendo em vista os modos internos de deformação e a compatibilização da energia de deformação do modelo simplificado com o modelo original, assegurando o estado de equilíbrio do volume.

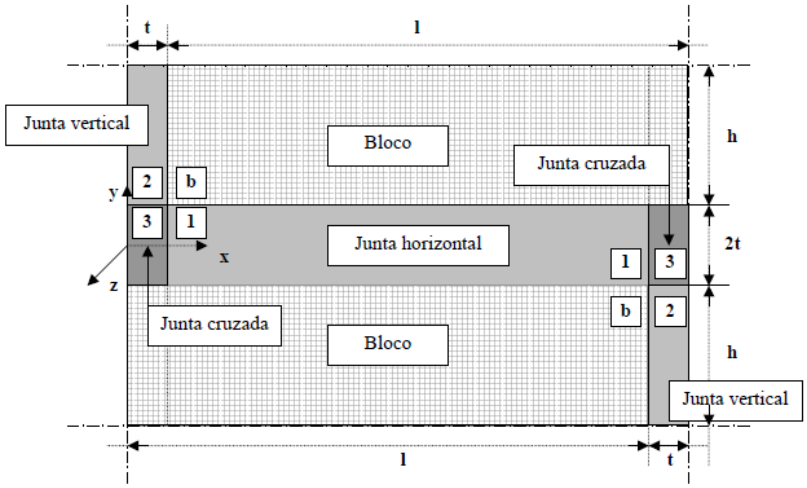


Figura 2.59 - Notação geométrica do volume representativo. Loureço e Zucchini (2002)

As referências citadas realizaram comparações de resultados do modelo homogeneizado calculados com recursos de elementos finitos do pacote computacional FEA. Nesta investigação adotou-se uma variação para a relação entre o módulo de elasticidade do bloco e da argamassa no intervalo de 1 até 1000. Os erros obtidos foram considerados muito pequenos, não ultrapassando a 6% daqueles obtidos pelo método de elementos finitos com o uso da técnica de micromodelagem detalhada. Quando os valores foram comparados com os

[9] *Contrafiamento refere-se as regiões nas quais há interseção de juntas horizontais e verticais.*

provenientes da técnica tradicional de homogeneização simplificada, o erro máximo foi de 50%.

2.4.2 PESQUISAS PARA AFERIÇÃO DE ALGUNS MODELOS

2.4.2.1 AFERIÇÃO DO MODELO DISCRETO DE ALI E PAGE (1988)

Através de dois programas em elementos finitos, ANSYS[10] e Abaqus[11], Peleteiro (2002) avaliou a curva força x deslocamento de um prisma que foi ensaiado e modelado por Ali e Page (1988), como mostra a Figura 2.60. Para efeito de modelagem utilizou-se dos modelos não lineares de concreto dos softwares. No ANSYS empregou o modelo CONCRETE 65. Esse modelo inclui a ruptura por fissuração em zonas tracionadas e esmagamento em zona comprimida. Considera que o material rompe quando atinge a força máxima de ruptura. No Abaqus foram utilizados dois elementos, um plano denominado CPS4 e outro modelo sólido denominado de C3D8.

O bloco e a argamassa foram analisados separadamente no modelo. Tanto para argamassa como para as unidades, o comportamento mecânico foi considerado isotrópico e apresentam características de deformação não lineares. As propriedades da alvenaria e da argamassa foram extraídas do trabalho de Ali e Page (1988). De acordo com estes autores, tanto o bloco quanto a argamassa são materiais frágeis com propriedades similares ao concreto.

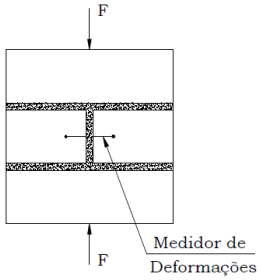


Figura 2.60 - Prisma ensaiado. Ali e Page *apud* Peleteiro (2002)

[10] ANSYS Software baseado no método dos elementos finitos
[11] Abaqus Software baseado no método dos elementos finitos

O gráfico da Figura 2.61 mostra a curva força x deslocamento para o prisma utilizando os dois softwares. As deformações foram obtidas a cada incremento de carga na junta vertical de acordo com os dois pontos marcados no prisma.

A referência citada observou que as respostas provenientes do Abaqus conseguem estimar a carga de ruptura com boa precisão quando comparado com o resultado experimental, enquanto que o ANSYS não acompanhou o comportamento da curva experimental como o esperado.

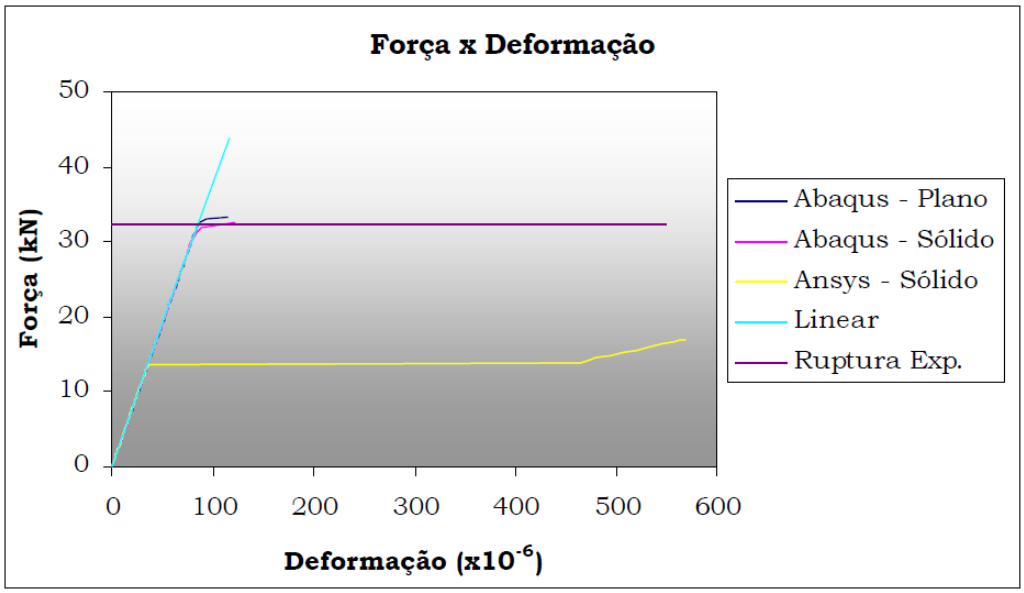


Figura 2.61 - Gráfico força x deformação. Peleteiro (2002)

2.4.2.2 ESTUDO COMPARATIVO DO MATERIAL EQUIVALENTE DE PANDE *et al.* (1989) COM O MACROMODELO NUMÉRICO DE PELETEIRO (2002)

Peleteiro (2002) realizou estudo num painel de alvenaria com 1970 mm x 1106 mm, com bloco de dimensões 210 x 52 x10 mm e juntas de argamassa de 10 mm. Aplicou-se um carregamento distribuído de 10 N/mm conforme mostrado na Figura 2.62. Utilizou quatro tipos de modelos para comparação, dois micromodelos ou naturais, sendo os blocos e argamassa modelados separadamente. No primeiro caso utilizou um elemento plano (PLANE42), no segundo utilizou um elemento sólido (SOLID65), ambos da biblioteca de elementos do ANSYS. Dois outros modelos homogeneizados foram utilizados, um considerou

as propriedades elásticas obtidas pelo processo de Pande *et al*. (1989) e o outro com as propriedades ortótropicas do material equivalente obtidas numericamente por Peleteiro (2002).

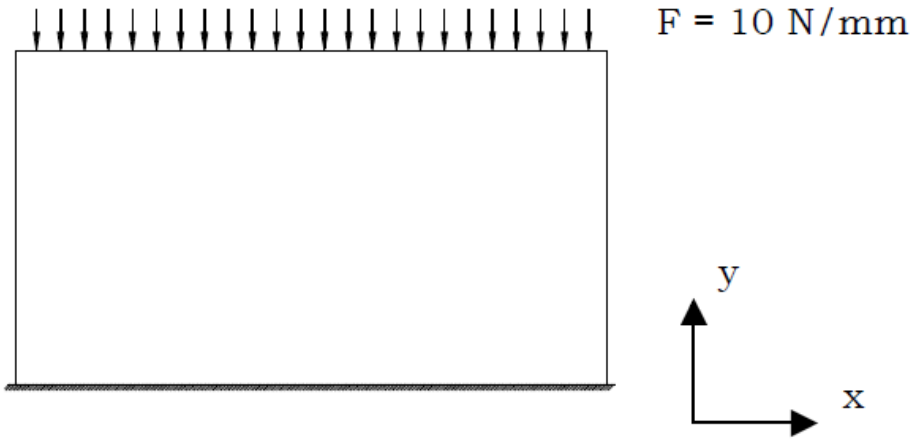


Figura 2.62 – Aspecto do carregamento. Peleteiro (2002)

Na investigação a referência citada comparou os resultados de deslocamentos verticais para os quatros modelos descritos. O micromodelo (natural), modelado com o elemento plano quadrilateral do ANSYS (PLANE42) foi tomado como referência. O erro proveniente do micromodelo sólido em relação a referência foi de -1,35%. O maior erro obtido foi proveniente do modelo numérico de Peleteiro (2002) com 5,17%, enquanto que para o modelo de Pande *et al.* (1989) o erro não ultrapassou 1,63 %.

Segundo as conclusões da referência, os micromodelos avaliados tanto o sólido como o plano apresentam resultados próximos, porém a modelagem plana apresenta mais simples e com tempo de processamento menor. Os modelos homogeneizados representam bem o estado de tensão global de uma estrutura, como pode ser visualizado através das curvas destes modelos na Figura 2.63. Já a nível local os resultados são bastante distintos, principalmente na avaliação de tensões nas juntas de argamassa, como mostra as curvas dos micromodelos .

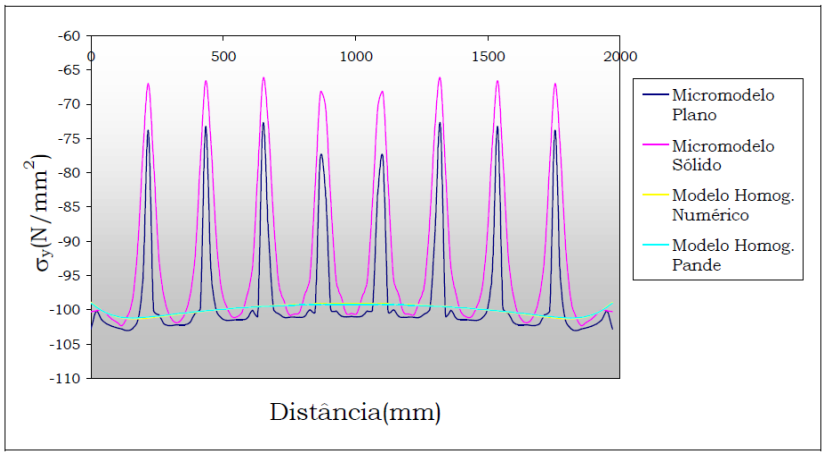


Figura 2.63 - Tensão vertical no painel para altura de 274 mm da base. Peleteiro (2002)

2.4.2.3 PROCESSO DE HOMOGENEIZAÇÃO AFERIDO POR BARRETO (2002)

Encontram-se presente no seu trabalho, sobre técnicas de homogeneização, vários exemplos para aferição de modelos homogeneizados. A referência citada considerou soluções da micromodelagem como sendo de maior precisão, servindo de referência para comparações com modelos de macromodelagem.

Barreto (2002) apresenta uma análise num painel de alvenaria dotada de abertura, com blocos de 14 x 19 x 39 cm, apoiado continuamente numa viga de concreto armado com seção de 14 cm x 40 cm, conforme ilustra a Figura 2.64. O carregamento corresponde uma carga de compressão aplicada no topo do painel de 0,38 MPa.

Utilizou o elemento plano da biblioteca do ANSYS (PLANE42) para modelar a parede. As propriedades elásticas da unidade e da argamassa foram consideradas separadamente na micromodelagem, e na homogeneização foi considerada as propriedades do material equivalente de Pande *et al*. (1989) com característica ortotrópica equivalente.

Da análise, percebeu-se que os resultados obtidos pela técnica da homogeneização, quando comparados com os valores da micromodelagem, foram bastante razoáveis. Encontrou uma diferença de 2,4 % para tensão máxima de compressão e de 11,6% para tensão máxima de tração.

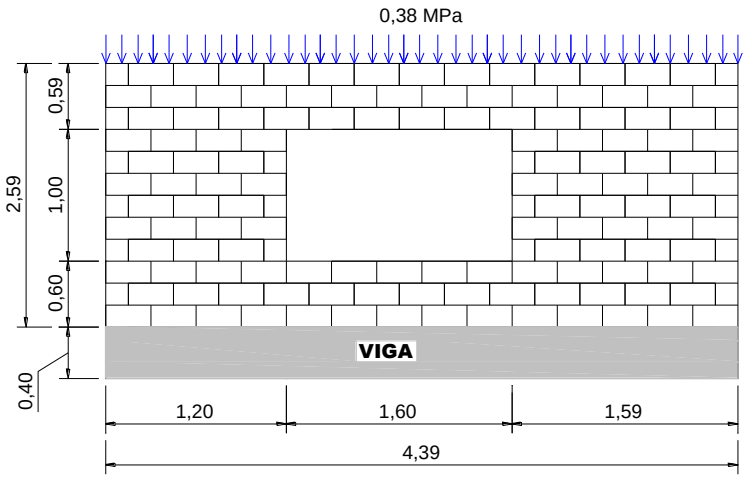


Figura 2.64 - Geometria do painel com abertura. Modificado pelo autor de Barreto (2002)

Conclusões sobre modelagem da alvenaria

Peleteiro (2002) fez comentários a respeito das vantagens e desvantagens dos principais modelos para modelagem da alvenaria estrutural. O modelo discreto com comportamento linear isotrópico traz bons resultados quando submetidos a baixos níveis de tensões, porém quando se deseja estudar a redistribuição de tensões ele é inadequado. O modelo linear, com comportamento ortotrópico, é útil para análise global da estrutura, traz como vantagem uma modelagem mais simples e um tempo de processamento menor, porém para análises locais as respostas são bastante distintas, pois o modelo não consegue capturar picos de tensões em regiões de pequenas dimensões como, por exemplo, juntas de argamassa. O modelo homogeneizado com comportamento não linear do material dará boas respostas também na determinação da carga de ruptura. Mas não é capaz de representar mecanismos essenciais para uma análise local como o escorregamento e a fissuração que ocorre nas unidades e juntas de argamassa. Já os micromodelos que possuem características de deformações não lineares, e critérios para ruptura da unidade e da junta argamassa são úteis na determinação da carga inicial de fissuração, da carga de ruptura e do padrão de ruptura. Eles trazem como desvantagens a realização de ensaios complexos de caracterização das unidades, da argamassa e de amostras de paredes, para fornecer dados coerentes na entrada de dados dos softwares de modelagem computacional.

3 PARÂMETROS DE MODELAGEM DOS PAINÉIS

Para garantir a representatividade de uma modelagem em elementos finitos, os diversos parâmetros que envolvem o estudo devem ser definidos e analisados criteriosamente. Nessa etapa algumas características e condições foram estabelecidas:

a) Definição do módulo de elasticidade equivalente dos trechos com graute
b) Tipos de restrições
c) Discretização da Malha
d) Propriedades elásticas dos materiais (Bloco, Argamassa, Graute e Aço)
e) Calibração do modelo

3.1 ANÁLISE DA ALVENARIA ESTRUTURAL NO REGIME ELÁSTICO LINEAR

Diversos autores concordam que a análise da alvenaria estrutural pode ser realizada no regime elástico linear, desde que o valor das ações seja limitado a uma parcela da carga de ruptura. O uso da análise linear é perfeitamente aceitável desde que os níveis de tensões não ultrapassem 30% da resistência ultima segundo Capuzzo Neto (2005). A mesma referência citada ressalta que este tipo de análise pode ser usado considerando um material isotrópico (modelo mais simples) ou um material ortotrópico que representa a anisotropia observada na alvenaria.

Uma maneira de simplificar o uso da modelagem nos estudos de painéis de alvenaria é considerar o comportamento linear. Para Page (1978) esta hipótese é satisfatória para avaliação de deformações a baixos níveis de tensões com a estrutura em situação de serviço.

Como citada pelas diversas referências, a análise utilizada neste trabalho foi no regime elástico linear, visto que, o objetivo é a avaliação do comportamento da alvenaria para ações de utilização. É de interesse observar o comportamento da alvenaria em situações relativamente afastadas das circunstâncias de colapso. Empregou-se, portanto, a micromodelagem simplificada para os painéis, ou seja, as unidades foram simuladas por modelos contínuos e a argamassa foi simulada separadamente sem levar em consideração a influência da interface argamassa/bloco. As propriedades elásticas das unidades e da argamassa foram consideradas no regime elástico linear com comportamento isotrópico.

3.2 DEFINIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EQUIVALENTE DOS TRECHOS GRAUTEADOS

Os trechos grauteados, apesar de terem características de material compósito, foram tratados como material único. Por isso, recorreu-se a modelos que represente o comportamento elástico linear deste tipo de material. Estudos experimentais foram fundamentais para validação destes modelos.

3.2.1 MODELOS TEÓRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS DOS TRECHOS GRAUTEADOS

Os modelos de Reuss e Voigt apresentados na publicação de Metha e Monteiro (2008) serviram de base para representam o comportamento elástico linear do material compósito formado pela unidade, argamassa e graute, para prismas vazios e grauteados. O Modelo de Reuss, ilustrado na Figura 3.1a, considera que as faces são arranjadas segundo uma configuração em série, impondo uma condição de tensão uniforme e o modelo de Voigt, Figura 3.1b, considera que as faces são arranjadas segundo uma configuração em paralelo impondo uma condição de deformação uniforme.

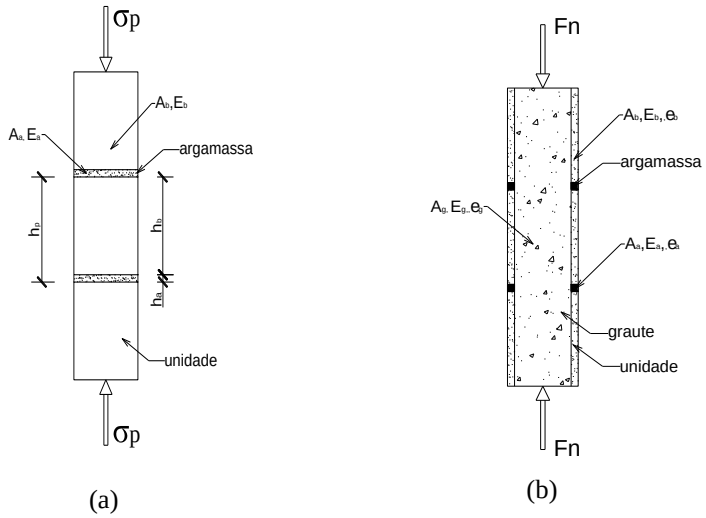


Figura 3.1 - Modelos que representam materiais compósitos
(a) Modelo de Reuss, (b) Modelo de Voigt

A partir das considerações dos dois modelos, calcula-se o cálculo do módulo de elasticidade para os trechos grauteados, como pode ser visualizado através do desenvolvimento numérico a seguir.

a) Hipóteses do modelo de Reuss

- A unidade e a argamassa tem áreas iguais da seção transversal iguais, ou seja:

$$A_a = A_b \tag{4.1}$$

Onde:

A_a área da junta de argamassa

A_b área líquida da seção transversal da unidade

- A tensão normal transmitida para as unidades e argamassa é equivalente à tensão normal σ_p aplicada no conjunto, ou seja:

$$\sigma_a = \sigma_b = \sigma_p \tag{4.2}$$

Onde:

σ_a tensão normal na junta de argamassa

σ_b tensão normal na unidade

Para o comportamento elástico linear sabe-se que: $\sigma = E\varepsilon$, substituindo σ na equação (4.2) , tem-se:

$$E_p \varepsilon_p = E_a \varepsilon_a = E_b \varepsilon_b \quad (4.3)$$

Onde:

E_p módulo de elasticidade do conjunto (argamassa+unidade)

E_a módulo de elasticidade da argamassa

E_b módulo de elasticidade da unidade

ε_p deformação do conjunto (argamassa+unidade)

ε_a deformação da argamassa

ε_b deformação da unidade

O deslocamento total é dado por:

$$\Delta h_p = \Delta h_a + \Delta h_b \text{ ou} \quad (4.4)$$

$$h_p \varepsilon_p = h_a \varepsilon_a + h_b \varepsilon_b \quad (4.5)$$

Onde:

Δh_p deslocamento total do conjunto (argamassa+unidade)

Δh_a deslocamento da junta de argamassa

Δh_b deslocamento da unidade

h_a altura da junta de argamassa

h_b altura do junta de unidade

h_p altura do conjunto (unidade+argamassa)

Substituindo as deformações obtidas da equação (4.3) na equação (4.5) tem-se que: $h_p \frac{\sigma_p}{E_p} = h_a \frac{\sigma_a}{E_a} + h_b \frac{\sigma_b}{E_b}$, seguindo a hipótese do modelo de Reuss onde todas tensões aplicadas são iguais, esta equação pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{h_p}{E_p} = \frac{h_a}{E_a} + \frac{h_b}{E_b} \quad \text{(prismas vazios)} \qquad 4.6$$

b) Hipóteses do modelo de Voigt

- A força aplicada no conjunto F_n (unidade+argamassa+graute) é subdividida em duas parcelas, uma transmitida diretamente no graute F_g e outra no conjunto (argamassa+bloco), denominada de F_p

$$F_n = F_g + F_p \qquad (4.7)$$

- As deformações que ocorrem no graute (ε_g), na argamassa + unidade (ε_p) são iguais a do conjunto (ε_n), ou seja.

$$\varepsilon_n = \varepsilon_g = \varepsilon_p \qquad (4.8)$$

Pela lei de Hooke, sabe-se que $\sigma = \frac{F}{A}$ ou $F = \sigma A$, sendo F a força aplicada, A área da seção transversal e σ é a tensão normal, ainda $\sigma = E\varepsilon$, sendo E o módulo de elasticidade do material e ε a sua deformação.

Substituindo o valor da força e da tensão normal na equação (4.7), tem-se:

$$E_n \varepsilon_n A_n = E_g \varepsilon_g A_g + E_p \varepsilon_p A_p \qquad (4.9)$$

Sendo:

E_n módulo de elasticidade do conjunto (unidade+argamassa+graute)

E_g modulo de elasticidade do graute

E_p módulo de elasticidade do conjunto (unidade+argamassa)

ε_n deformação do conjunto (unidade+argamassa+graute)

ε_g deformação do graute

ε_p deformação do conjunto (argamassa+unidade)

A_g área líquida do graute

A_p é a área líquida do conjunto (argamassa+bloco), sendo que a área líquida do bloco (A_b), da argamassa (A_a) e do conjunto (A_p) são idênticas, ou seja, $A_p=A_b=A_a$

A_n é a área total (conjunto+graute), ou seja $A_n = A_g + A_p$

Como $\varepsilon_n = \varepsilon_g = \varepsilon_p$ a equação (4.9) se transforma em:

$$E_n A_n = E_g A_g + E_p A_p \tag{4.10}$$

Substituindo E_p da equação (4.6) na equação (4.10), encontra-se:

$$E_n = \frac{E_g A_g + E_p A_p}{A_g + A_p} \text{ (prismas grauteados)} \tag{4.11}$$

3.2.2 COMPARAÇÃO COM VALORES EXPERIMENTAIS

Nesta seção comparou módulos de elasticidade de prismas vazios e grauteados obtidos com a equação 4.11, adaptada dos modelos de Voigt e Reuss, com os resultados experimentais das pesquisas de Logullo (2006) e Barbosa (2008).

Os valores experimentais dos módulos de elasticidades, dos prismas, blocos, argamassa e graute, foram avaliados pela curva tensão x deformação e da recomendação do ACI 530-92 (1995). Segundo a recomendação o módulo de elasticidade é extraído a partir da inclinação de uma reta secante. Essa reta é construída pela ligação entre os pontos correspondentes a 5% e 33% da tensão de ruptura, durante o ensaio à compressão. Sendo apresentado na Tabela 3.1 com os módulos individuais de cada material, e as Tabelas 3.2 e 3.3 com os módulos de elasticidade dos prismas, da pesquisa de Logullo (2006).

Tabela 3.1 – Características físicas dos materiais por Logullo (2006)

Altura da Unidade (mm)	Altura da Junta de Argamassa (mm)	Altura do Conjunto (bloco+junta) (mm)	Módulo de Elast. da Argamassa (N/mm²)	Módulo de Elast. da Unidade B1 (N/mm²)	Módulo de Elast. da Unidade B2 (N/mm²)	Módulo de Elast. do Graute G1 (N/mm²)	Módulo de Elast. do Graute G2 (N/mm²)
190	10	200	7494	13728	23410	24281	29345

As tabelas 3.2 e 3.3 apresentam os valores teóricos e experimentais dos módulos de elasticidade das diversas amostras de prismas estudadas por Logullo (2006).

Tabela 3.2 - Módulo de elasticidade de prismas vazios obtidos experimentalmente e pela expressão 4.6.

Logullo (2006)		**Expressão Numérica**	**Relação**
Prismas	E (Experimental) (N/mm²)	E (Teórico) (N/mm²)	Eteórico/Eexp.
B1	14802	13180	0,8904
B2	19139	21163	1,1057

Tabela 3.3 - Módulos de elasticidade de prismas grauteados obtidos experimentalmente e pela expressão 4.11.

Logullo 2006		**Expressão Numérica**	**Relação**
Prismas	E (Experimental) (N/mm²)	E (Teórico) (N/mm²)	Eteórico/Eexp.
B1G1	19398	18053	0,9306
B1G2	18854	20276	1,0754
B2G1	24294	22056	0,9079
B2G2	28859	23507	0,8145

Para um segundo momento, confrontou-se os resultados dos modelos teóricos com os valores do trabalho experimental de Barbosa (2008). A referência fez estudos sobre as propriedades elásticas de prismas vazios utilizando blocos de concreto. Sua pesquisa abrangeu um programa experimental e análise numérica por elementos finitos, avaliando quatro grupos de prismas (P1, P2, P3 e P4). Usou diferentes argamassas e blocos, ambos com módulos de elasticidades distintos em cada grupo, como descrito na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características físicas dos materiais empregados por Barbosa (2008).

Grupo	**Altura da Unidade (mm)**	**Altura da Junta de Argamassa (mm)**	**Altura do Conjunto (bloco+junta) (mm)**	**Módulo de Elast. da Argamassa (N/mm²)**	**Módulo de Elast. do Bloco (N/mm²)**
P1	190	10	200	8121	17449
P2	190	10	200	9745	20595
P3	190	10	200	13195	22175
P4	190	10	200	16672	27104

A Tabela 3.5 apresenta valores de módulo de elasticidade obtidos pela equação 4.11, resultados experimentais e numéricos da pesquisa de Barbosa (2008), sendo correspondentes a prismas vazios

Tabela 3.5 - Módulo de elasticidade de prismas vazios obtidos por diferentes métodos (experimental x numérrico x teórico)

Grupo	Barbosa (2008)		Expressão	Relação	
	E (Experimental) (N/mm²)	E (Numerico) (N/mm²)	E (Teórico) (N/mm²)	Eteórico/Eexp.	Enúmero/Eexp.
P1	18954	16326	16501	0.8706	0,8614
P2	18198	19313	19509	1.0720	1,0613
P3	20255	21524	21445	1.0588	1,0627
P4	23429	26456	26282	1.1218	1,1292

Conclui-se, portanto, que os valores do módulo de elasticidade do material compósito (prismas), seja ele formado pelas unidades e argamassa ou constituído de argamassa, unidades e graute, quando obtidos pelas equações (4.6) e (4.11) provenientes dos métodos de Reuss e Voigt, expressam valores próximos aos experimentais. Por essa razão optou-se em utilizá-las na pesquisa para obtenção dos módulos de elasticidade dos trechos grauteados.

3.3 DISCRETIZAÇÃO DA MALHA

Para modelagens dos painéis e dos trechos com graute, foi utilizado o elemento Shell 63 (elemento de casca para análise linear). Ver ilustração do elemento na Figura 3.2, disponível na biblioteca de elementos do ANSYS 6.1. O mesmo possui comportamento de placa e chapa, permitindo aplicação de ações em seu plano e normal a ele. Tem seis graus de liberdade em cada nó, translações nas direções x, y e z e rotações em torno dos eixos x, y e y.

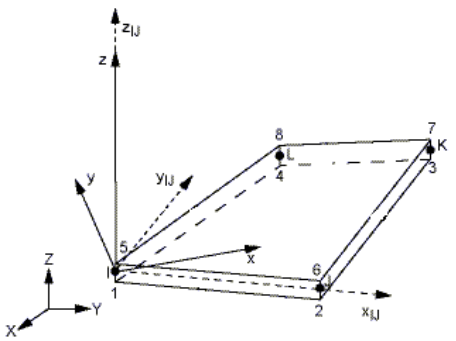


Figura 3.2 - Elemento shell 63. Adaptado da biblioteca do ANSYS 6.1

Devido a diferença existente entre a geometria da unidade e da junta de argamassa, a malha de elementos finitos foi discretizada em elementos de dimensões distintas. Elementos de 1 cm x 1 cm, 1 cm x 6,33 cm, 6,33 cm x 6,33 cm e 6,33 cm x 7 cm, como mostra a Figura 3.3.

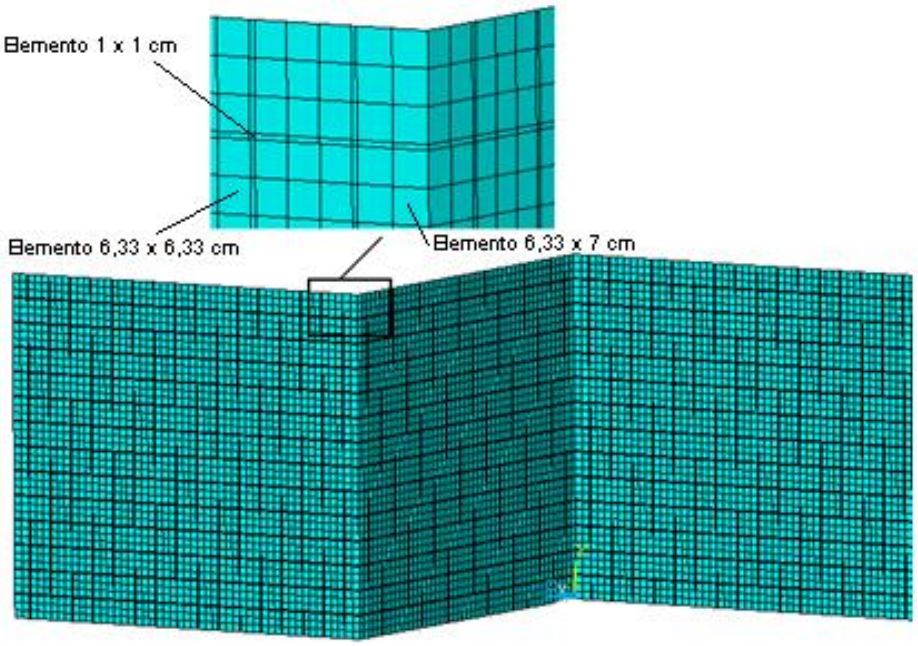


Figura 3.3 - Detalhe da malha de elementos finitos dos painéis

3.4 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO USADO NOS PAINÉIS

Para validar os parâmetros escolhidos para modelagem dos painéis realizou-se estudo comparativo de deformações obtidas experimentalmente, no trabalho de Barbosa (2008) com resultados da modelagem computacional. A amostra de miniparede denominada PAR2, da citada referência serviu de base para a investigação.

A Figura 3.4 apresenta o gráfico tensão x deformação do modelo PAR2, obtido experimentalmente.

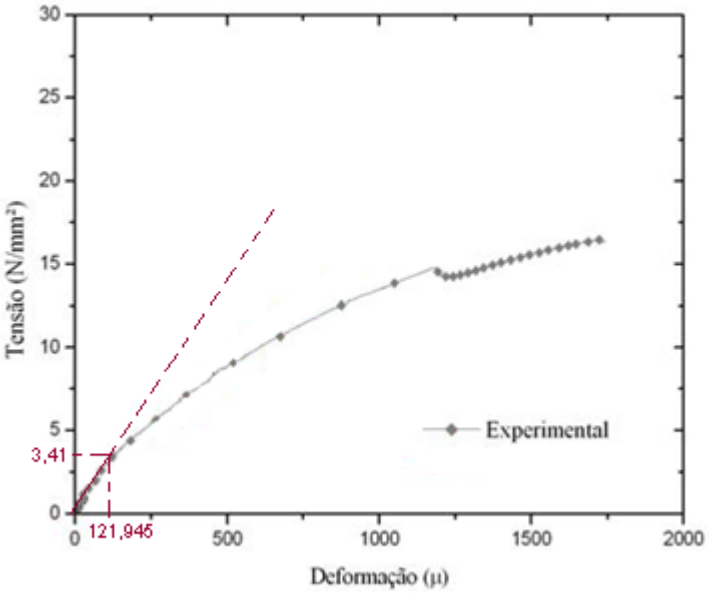


Figura 3.4 - Curva tensão x deformação do grupo PAR2. Adaptado pelo autor de Barbosa (2008)

A Figura 3.5 mostra as dimensões usadas no modelo da miniparede (PAR2), as juntas verticais e horizontais são de 10 mm de altura. A espessura equivalente da miniparede usada na modelagem foi de 78,623 mm, correspondendo à mesma área líquida do bloco concreto de comprimento 39 cm.

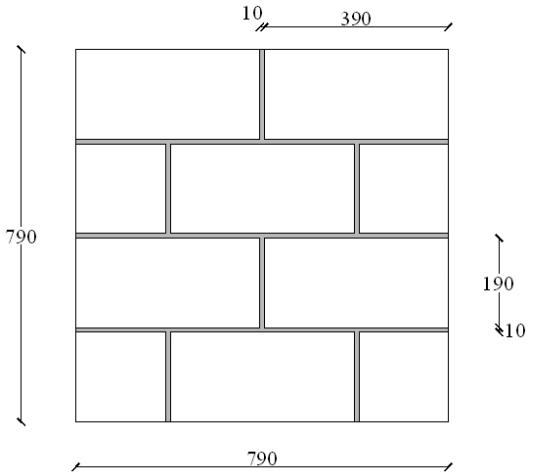


Figura 3.5 - Geometria da com miniparede. Barbosa (2008)

A discretização da malha foi feita com o elemento Shell 63 do ANSYS 6.1, com dimensões diferenciadas, conforme ilustra a Figura 3.6.

Foram impedidos os movimentos de translação nas direções x, y e z na base da parede.

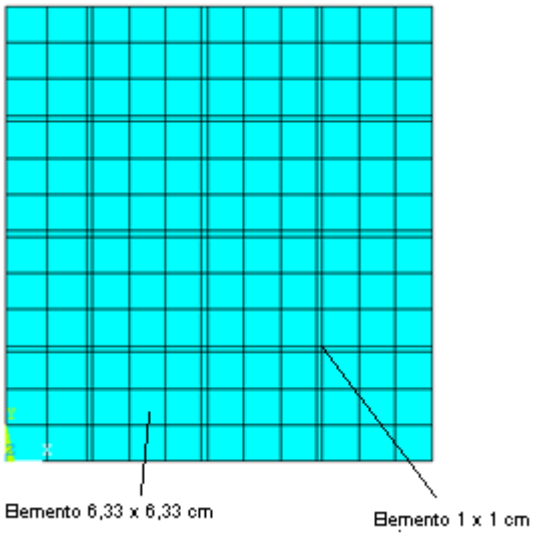


Figura 3.6 - Malha de elementos finitos da miniparede

Para aferir o modelo, aplicou-se valores de tensões normais verticais no topo da parede obtendo-se assim, respostas de deformações, conforme mostra a Figura 3.7 de deformações verticais.

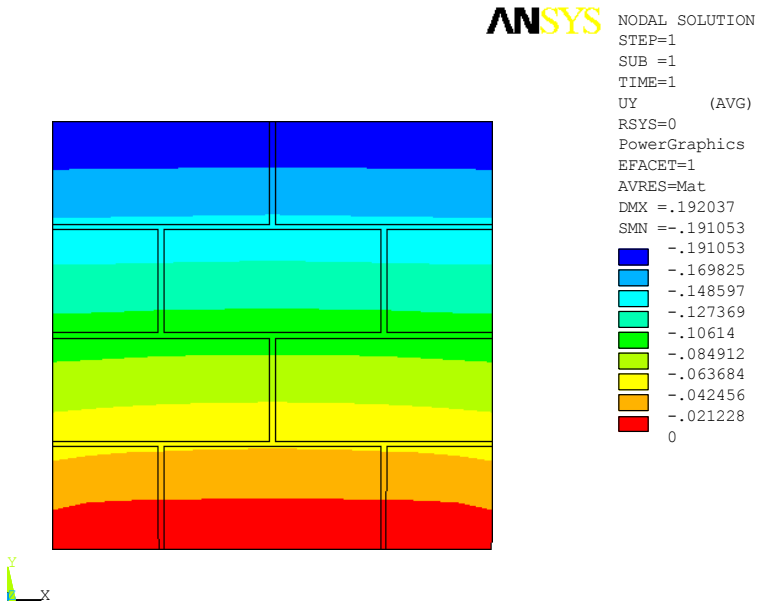


Figura 3.7 - Deformações da miniparede PAR2 - Para tensão aplicada de 5,37 N/mm²

As deformações obtidas pela modelagem e experimentalmente estão presentes na Tabela 3.6. Esses valores foram razoavelmente próximos até a tensão de 3,41 N/mm²,

evidenciando que até esse nível a miniparede trabalha no regime elástico linear. Sendo assim a modelagem computacional proposta neste trabalho mostra-se razoável para as respostas que pretende obter (situação de serviço).

Tabela 3.6 – Deformações da miniparede do grupo PAR2 obtidas com modelgem numérica e experimentamente

Tensão Aplicada (N/mm²)	**Deformações Verticais (μ)**		**Diferença**
	Experimental	**Númerica**	
1,30	48,740	46,489	-4,62%
2,50	88,470	89,404	+1,06%
3,41	120,63	121,945	+1,09%
4,50	187,14	160,924	-14,01%
5,37	246,99	192,037	-22,25%

Observação:

Tensão aplicada aos painéis:

$\sigma_p = \frac{10}{78,623} = 0,127\ \mathrm{N/mm^2}$)

Sendo:

10 N/mm (carga distribuída)

78,623 mm (espessura equivalente da parede)

A tensão de 0,127 N/mm², corresponde a 3% da tensão limite para o regime linear observado no modelo (PAR2).

Estruturas de andares múltiplos (ver capítulo 5, item 5.1):

Tensão aplicada $\sigma_e = \frac{100}{78,623} = 1,27\ \mathrm{N/mm^2}$,

Sendo:

100 N/mm (carga distribuída)

78,623 mm (espessura equivalente da parede)

A tensão de 1,27 N/mm² corresponde a 37,24% da tensão limite (3,41 N/mm²).

Para esses dois casos, o comportamento linear é garantido.

4 DISTRIBUIÇÃO DE AÇÕES VERTICAIS NOS PAINÉIS

Analisou-se a distribuição de ações verticais nos diversos painéis, tanto nos painéis sem grauteamento, como naqueles com grauteamento vertical e horizontal. Para os painéis sem graute o estudo avaliou a representatividade de algumas metodologias que calculam esforços em painéis de alvenaria; e naqueles com graute, a pesquisa analisou o grau de influência do grauteamento na distribuição de forças.

4.1 DEFINIÇÃO DOS PAINÉIS

As características dos painéis como número de fiadas e dimensões em planta obedeceu a modulação para o bloco de concreto da família "39" que são normalmente utilizados na alvenaria estrutural. Dimensões dos painéis, como comprimento e altura, corresponderam a medidas comumente encontradas em ambientes construídos com este tipo de sistema. As regiões de graute vertical foram posicionadas em cantos e encontros de paredes, as cintas horizontais seguiram três modelos: um com cinta intermediária, um com cinta de topo e outro com as duas cintas (intermediária e de topo).

Os painéis foram distribuídos segundo as séries, 1, 2 e 3, mediante a quantidade de paredes que possuem, ou seja, série 1 com 3 paredes, série 2 com 5 paredes e série 3 com 7 paredes. Cada painel foi denominado de acordo com as suas características, "P" representa a paredes, "G" a inserção de graute vertical, "H" a inserção de graute horizontal. O Numeral que antecede a letra P corresponde ao número de paredes que se encontram na mesma região, ou que se interceptam. O segundo numeral mostram uma determinada variação, seja ela de para quantidade de furos grauteados ou presença de cintas.

Os painéis investigados encontram-se listados da seguinte maneira:

Série 1 – Painéis com 3 paredes

2P0G, sem graute;

2P1G, 1 furo grauteado do bloco;

2P3G, 3 furos grauteados do bloco;

2P1H, cinta graute horizontal a 1 metro de altura da base da parede;

2P2H, graute horizontal na cinta de topo

2P3H, graute horizontal na cinta de topo e a 1 m de altura da base da parede;

Série 2 - Painéis com 5 paredes

3P0G, ausência de graute;

3P1G, 1 furo grauteado do bloco;

3P4G, 4 furos grauteados do bloco;

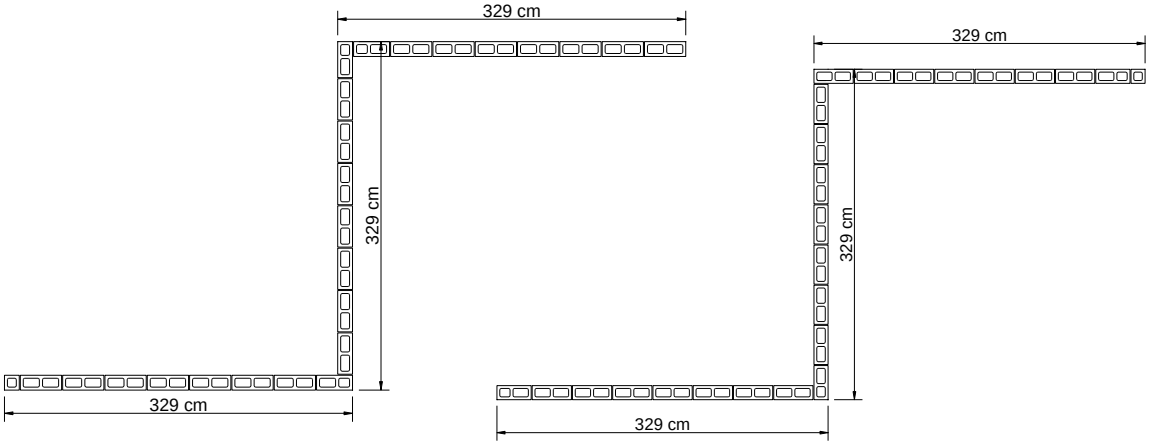
Série 3 - Painéis com 7 paredes

4P0G, ausência de graute;

4P1G, 1 furo grauteado do bloco;

4P5G, 5 furos grauteados do bloco;

O esquema de amarração das paredes da série 1 é mostrado nas Figura 4.1 e 4.2, sendo a espessura das juntas horizontais e verticais de 1 cm.



Fiada Ìmpar Fiada Par

Figura 4.1 - Esquema das fiadas da série 1

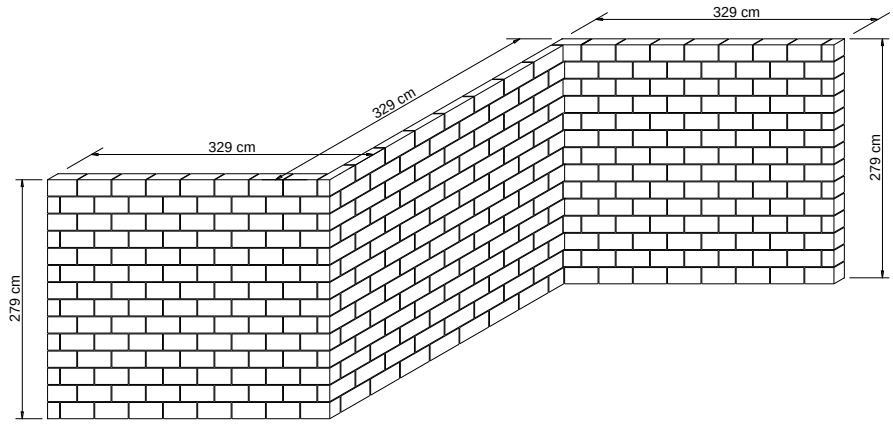


Figura 4.2 - Disposição dos blocos nas diferentes fiadas da série 1

Os encontros de paredes dos painéis da série 1 com furos dos blocos grauteados, estão representados pelas regiões 1 e 2, conforme ilustra a Figura 4.3. Horizontalmente foram grauteadas duas cintas, a primeira a 1 m de altura a partir da base e a outra no topo na parede na última fiada.

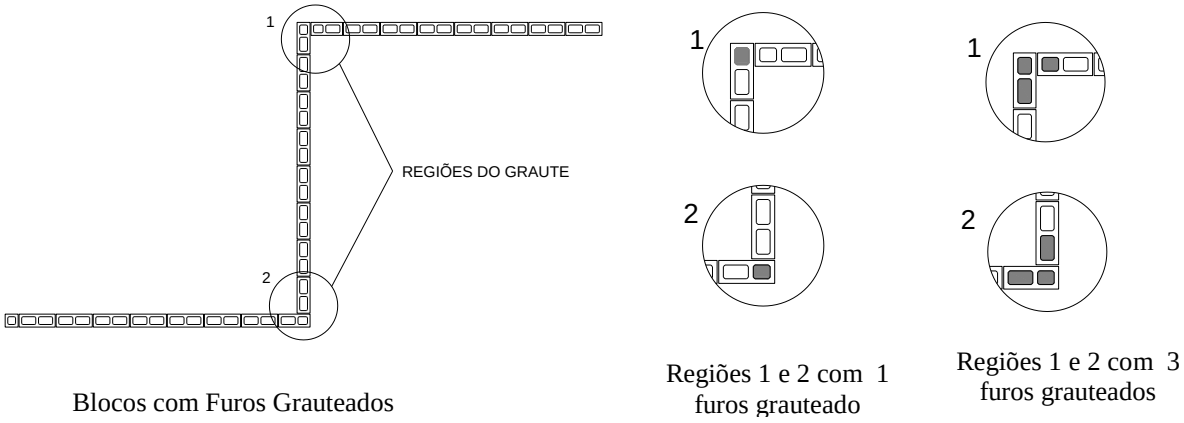


Figura 4.3 - Regiões grauteadas dos painéis da série 1

As fiadas dos painéis da série 2 estão representadas nas figuras 4.4 e 4.5, a espessura das juntas horizontais e verticais é idênticas da série 1. Os furos dos blocos são preenchidos como indicado na Figura 4.6.

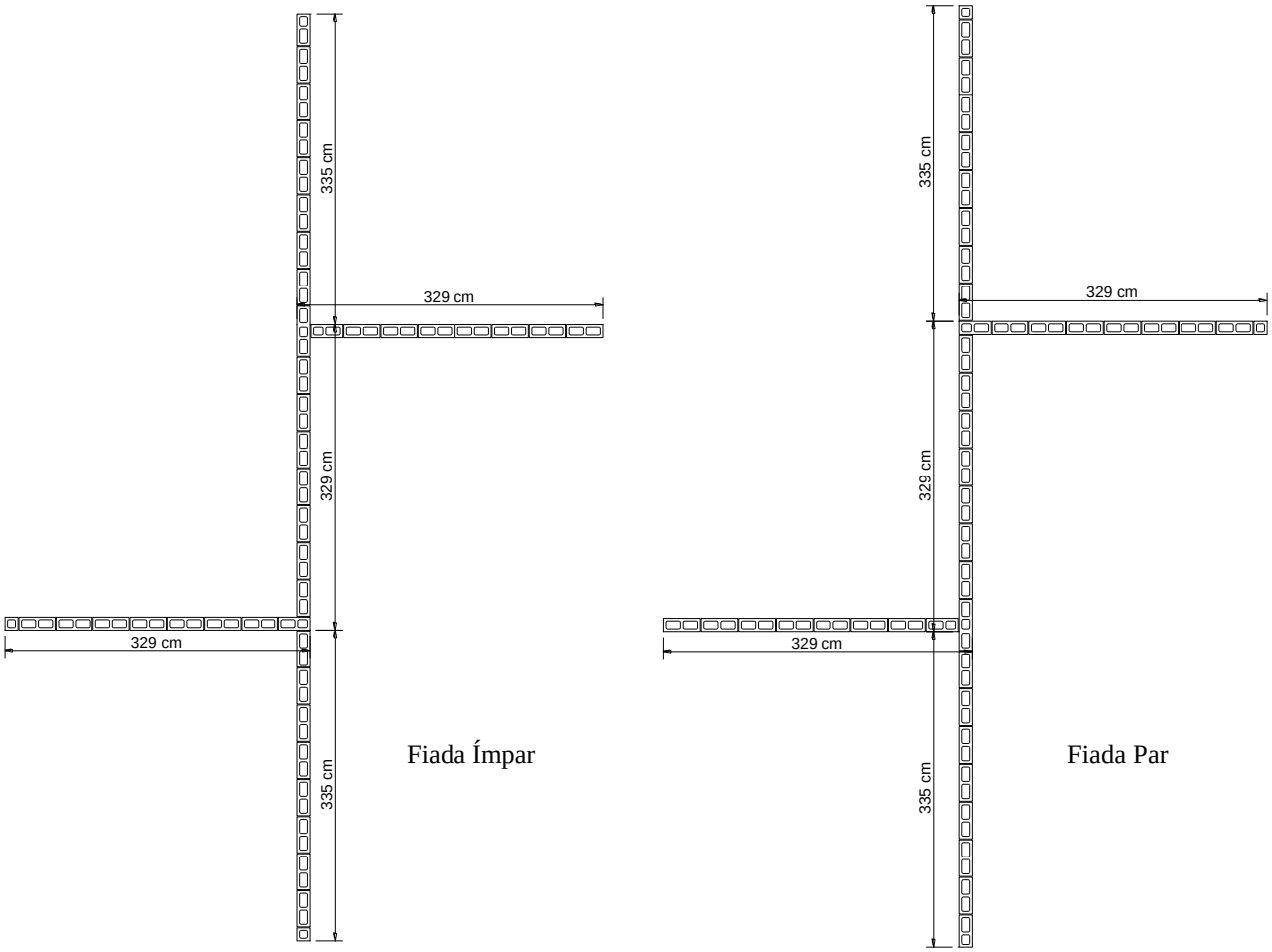


Figura 4.4 -Esquema das fiadas da série 2

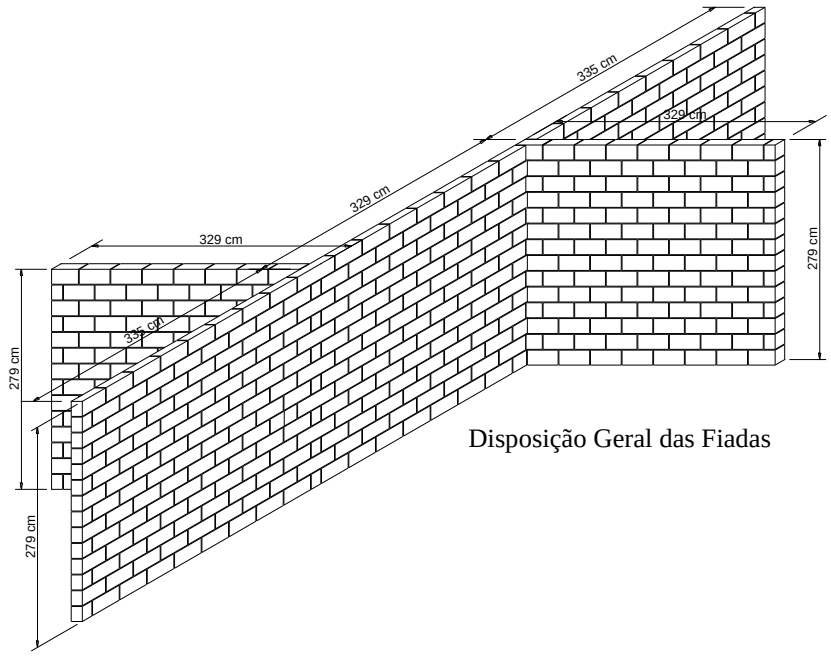


Figura 4.5 - Disposição geral das fiadas da série 2

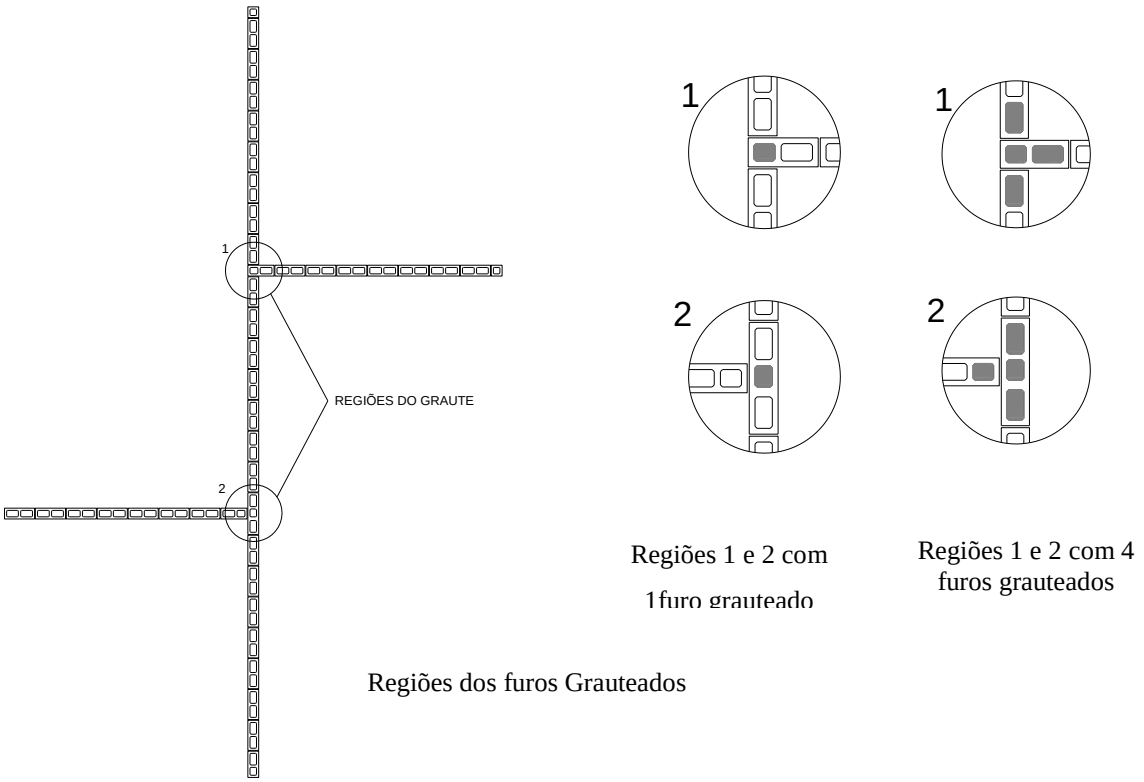


Figura 4.6 - Regiões grauteadas dos painéis da série 2

As fiadas dos painéis da série 3 estão representadas nas figuras 4.7 e 4.8, a espessura das horizontais e verticais é idênticas das séries 1 e 2.

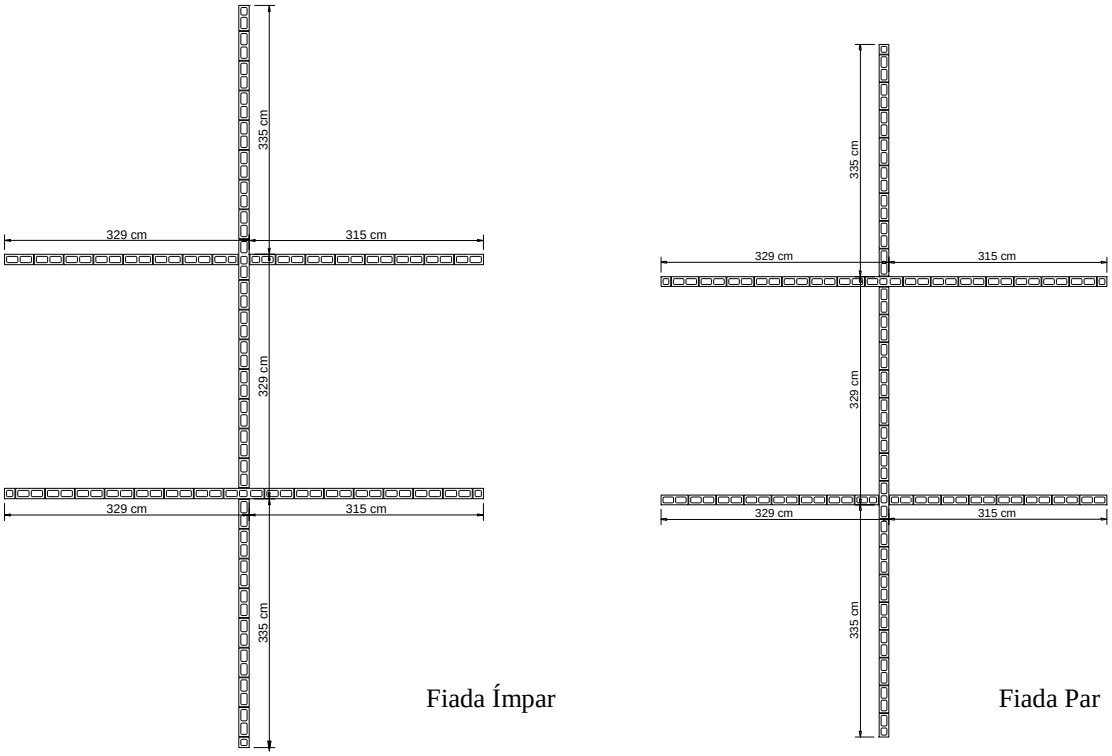
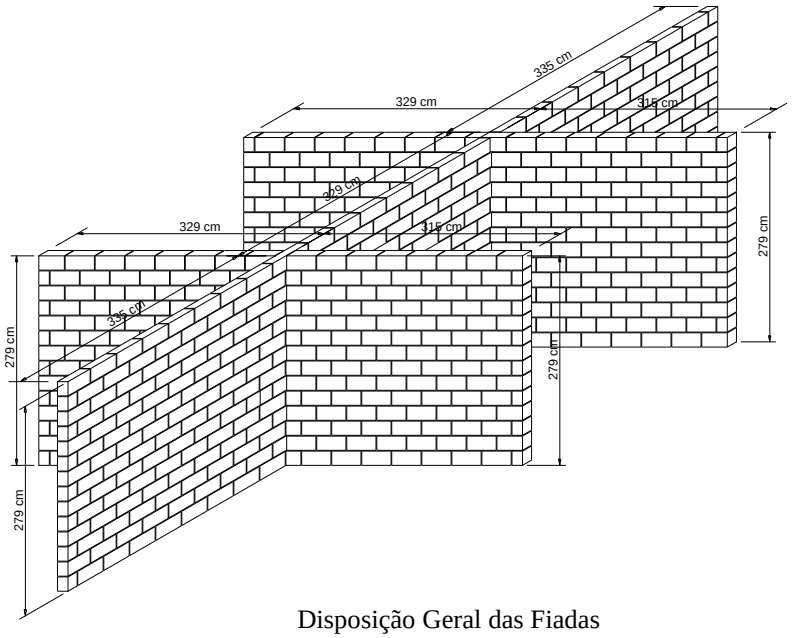


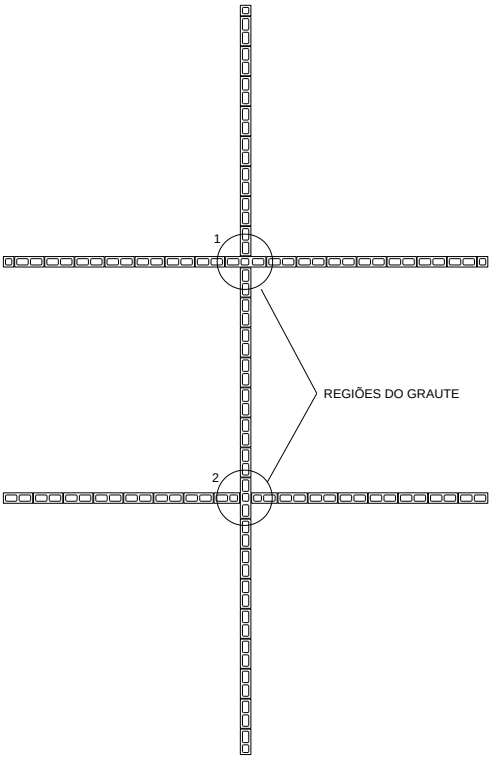
Figura 4.7 - Esquema dass fiadas da série 3

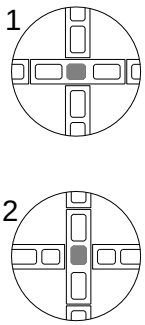


Disposição Geral das Fiadas

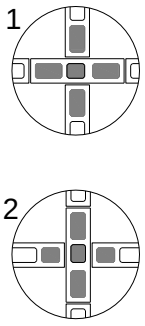
Figura 4.8 - Disposição geral das fiadas da série 3

Assim como nos painéis das séries 1 e 2 a Figura 4.9 mostra o grauteamento dos furos dos blocos dos painéis desta série.





Regiões 1 e 2 com 1 furo grauteado



Regiões 1 e 2 com 5 furos grauteados

Figura 4.9 - Regiões grauteadas dos painéis da série 3

4.2 CARREGAMENTO E RESTRIÇÕES

Nos painéis das séries 1, 2 e 3 aplicou-se carregamento linear de 10 N/mm no topo da parede central como mostra a Figura 4.10. O carregamento corresponde a 5,8 N/mm oriundo da laje (peso próprio+revestimentos+carga acidental) e 4,2 N/mm proveniente do peso próprio da alvenaria.

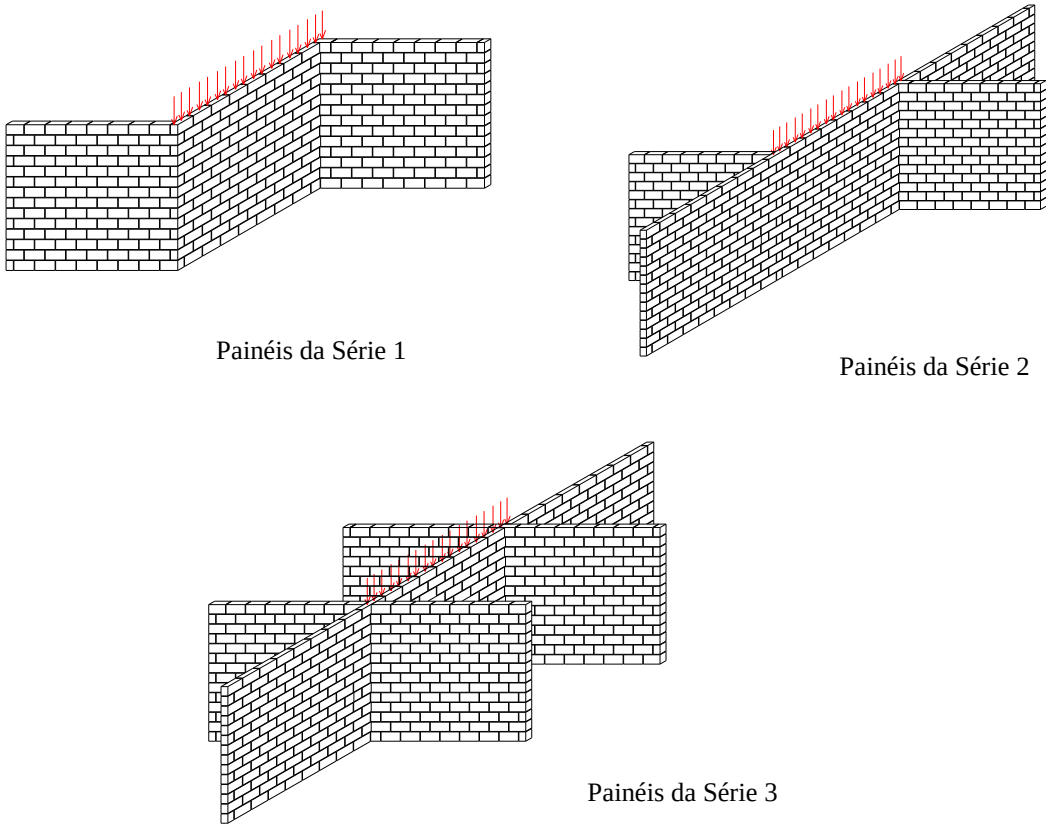


Figura 4.10 - Carregamento dos painéis de alvenaria da séries 1,2 e 3

Na base dos painéis de todas as séries foram impedidos os movimentos de translação nas direções x, y e z. No topo dos painéis foram restringidas as translações nas direções x e z para simular o efeito da laje.

As análises numéricas dos painéis de todas as séries foram feitas com o pacote computacional ANSYS 6.1, fundamentado no método dos elementos finitos. O MEF é uma ferramenta útil na determinação de parâmetros das estruturas, realizam previsões do seu comportamento. Seja pelas tensões ou deslocamentos dos modelos investigados.

Para obter um modelo confiável de modelagem, alguns quesitos foram avaliados, como descritos a seguir:

- Entendimento do problema físico a ser simulado;

- Conhecimento do comportamento estrutural desejado;

- Conhecimento das propriedades dos materiais envolvidos;

- Definição das condições de contorno – cargas e vínculos da estrutura.

4.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Os parâmetros elásticos individuais do bloco e da argamassa e suas propriedades foram provenientes de trabalhos experimentais. O Módulo de elasticidade do graute foi obtido da pesquisa de Logullo (2006). Já as propriedades do bloco e da argamassa vieram da pesquisa de Barbosa (2008).

As dimensões da seção transversal do bloco usado no modelo foi de 78,623 x 390 mm, correspondente a mesma área líquida do bloco pesquisado por Barbosa (2008), sendo de 30663 mm².

A espessura dos segmentos grauteados de 140 mm foram tomadas como sendo a seção completa do bloco.

A Tabela 4.1 resume os parâmetros usados na modelagem dos painéis e dos trechos grauteados.

Tabela 4.1 - Propriedades dos materiais empregados na modelagem dos painéis

Materiais	**Módulo de Elasticidade (N/mm²)**	**Coeficiente de Poisson**	**Altura (mm)**	**Trabalho de Origem**
Bloco	22447	0,20	190	Barbosa (2008)
Argamassa	17553	0,15	10	Barbosa (2008)
Graute	29345	0,20	-	Logullo (2006)
Compósito (Bloco+Argam.+Graute)	25718 *	0,20 **	-	-

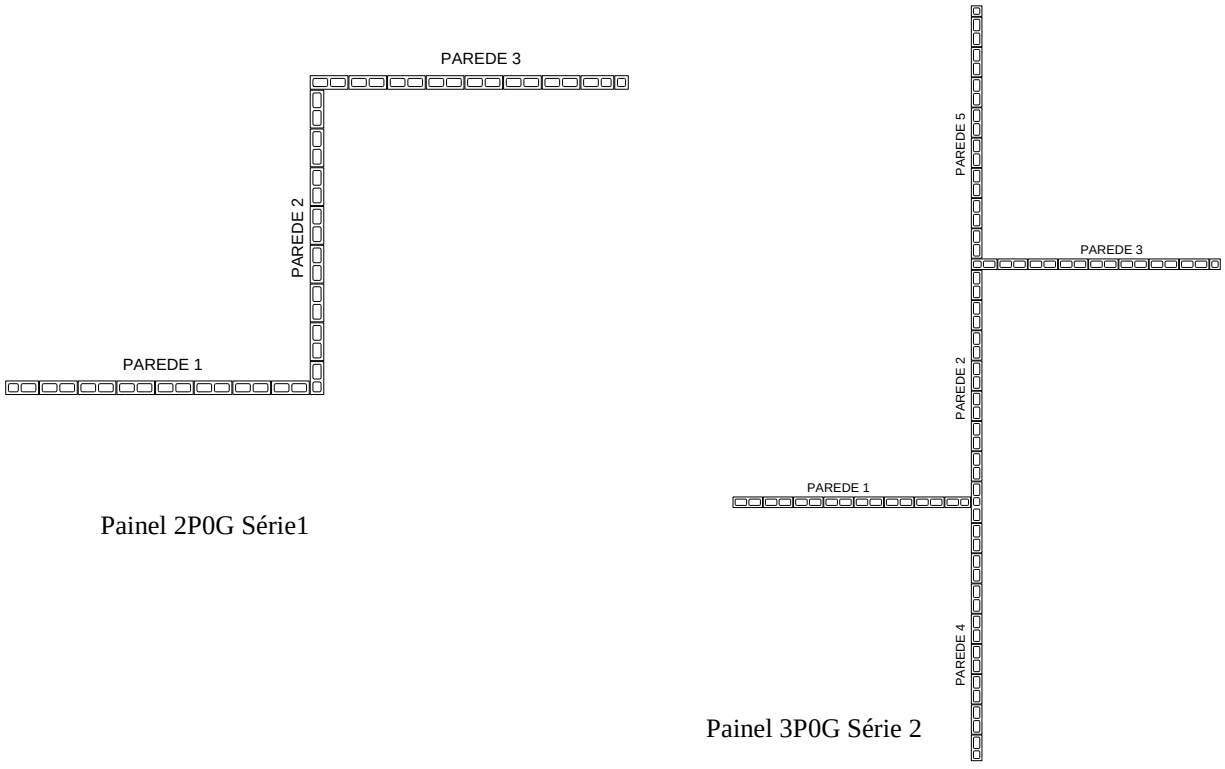
* Valor obtido a partir da equação (4.11) ** Valor adotado tendo como referência o Coeficiente de Poisson do Concreto

4.4 PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DE ESFORÇOS EM PAINÉIS DE ALVENARIA

Esta seção avalia os diversos procedimentos que calcula as ações verticais em paredes de alvenaria estrutural, como; paredes isoladas, grupo isolado de paredes, recomendação da NBR10837 (ABNT,1989), método proposto por Parsekian e Franco (2002). Os resultados destas metodologias foram comparados com respostas do Método dos Elementos Finitos (MEF). A investigação foi realizada com os painéis sem graute da série 1 (2P0G), da série 2 (3P0G) e da série 3 (4P0G).

4.4.1 PAREDE ISOLADA E GRUPO DE PAREDES.

O carregamento foi aplicado na parede 2 de todas as séries, como ilustra as figuras 4.11 e 4.12.



Painel 2P0G Série1

Painel 3P0G Série 2

Figura 4.11 – Denominação das paredes dos painéis das séries 1 e 2

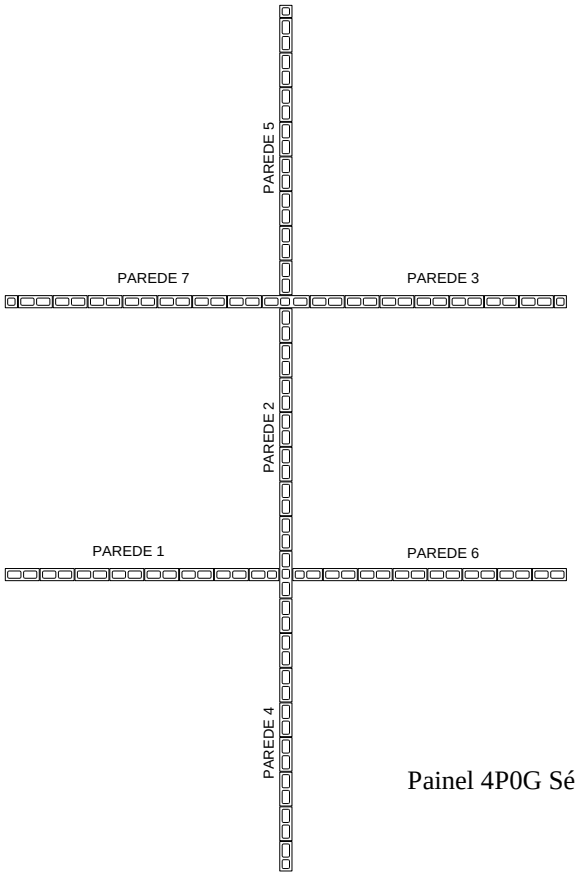


Figura 4.12 – Denominação das paredes dos painéis das série 3

A Tabela 4.2 apresenta os valores de cargas verticais absorvida por cada parede por estes dois procedimentos (parede isolada e grupo isolado de paredes).

Tabela 4.2 – Valores de forças resultantes, em newton (N), para os procedimentos de parede isolada e grupo de paredes nos painéis das séries, 1, 2 e 3.

Paredes	**Painel 2P0G**		**Painel 3P0G**		**Painel 4P0G**	
	Parede Isolada	**Grupo Isolado de Paredes**	**Parede Isolada**	**Grupo Isolado de Paredes**	**Parede Isolada**	**Grupo Isolado de Paredes**
1	0,00	10.966,67	0,00	6.532,30	0,00	4.675,60
2	32.900,00	10.966,67	32.900,00	6.532,30	32.900,00	4.675,60
3	0,00	10.966,67	0,0	6.532,30	0,0	4.675,60
4	-	-	0,0	6.651,50	0,0	4.760,90
5	-	-	0,0	6.651,50	0,0	4.760,90
6	-	-	-	-	0,0	4.675,60
7	-	-	-	-	0,0	4.675,60

4.4.2 RECOMENDAÇÃO DA NORMA NBR 10387 (ABNT, 1989) E DO MÉTODO PASERKIAN E FRANCO (2002)

Para a NBR 10387 (ABNT, 1989) a distribuição da carga se dá segundo um ângulo de 45º, assim como procedimento de Parsekian e Franco (2002). A Tabela 4.3 mostra os valores para as duas metodologias avaliadas. Percebe-se uma coincidência de valores, visto que o método de Parsekian e Franco (2002) usa o mesmo princípio da norma.

Tabela 4.3 – Valores de forças resultantes, em newton (N), para os procedimentos da NBR 10837(ABNT, 1989) e Parsekian e Franco (2002) nos painéis das séries, 1, 2 e 3.

Paredes	Painel 2P0G		Painel 3P0G		Painel 4P0G	
	NBR 10387/89	Parsekian e Franco	NBR 10387/89	Parsekian e Franco	NBR 10387/89	Parsekian e Franco
1	10.348,48	10.348,48	6.352,32	6.352,32	4.582,68	4.582,68
2	12.203,04	12.203,04	7.490,72	7.490,72	5.403,94	5.403,94
3	10.348,48	10.348,48	6.352,32	6.352,32	4.582,68	4.582,68
4	-	-	6.352,32	6.352,32	4.582,68	4.582,68
5	-	-	6.352,32	6.352,32	4.582,68	4.582,68
6	-	-	-	-	4.582,68	4.582,68
7	-	-	-	-	4.582,68	4.582,68

4.4.3 RESULTANTES OBTIDAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Utilizou-se a modelagem simplificada para obtenção dos valores das resultantes em cada painel. Estes valores estão indicados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores de forças resultantes, em newton (N), obtidas pelo método dos elementos finitos nos painéis das séries, 1, 2 e 3.

Paredes	Resultantes em Newton (N)		
	Painel 2P0G	Painel 3P0G	Painel 4P0G
1	6.691,33	4.126,02	3.018,54
2	19.520,11	15.777,83	14.013,31
3	6.688,56	4.121,13	3.014,72
4	-	4.434,61	3.407,05
5	-	4.440,41	3.413,14
6	-	-	3.017,61
7	-	-	3.015,61

Os gráficos das figuras 4.13, 4.14 e 4.15 mostram os valores das resultantes para cada parede, obtidas por diferentes metodologias.

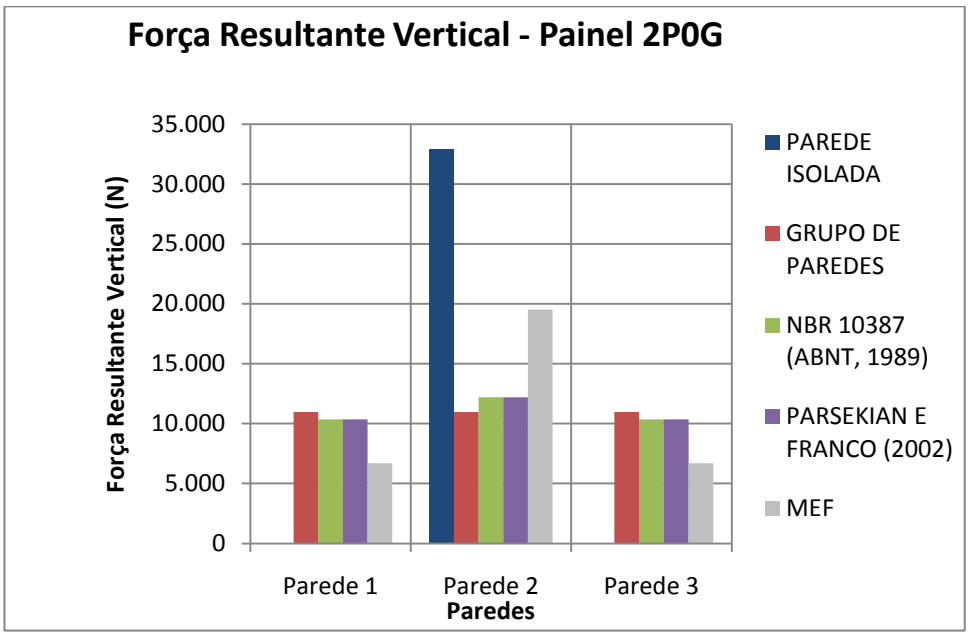


Figura 4.13 - Resultantes verticais nas paredes do painel 2P0G

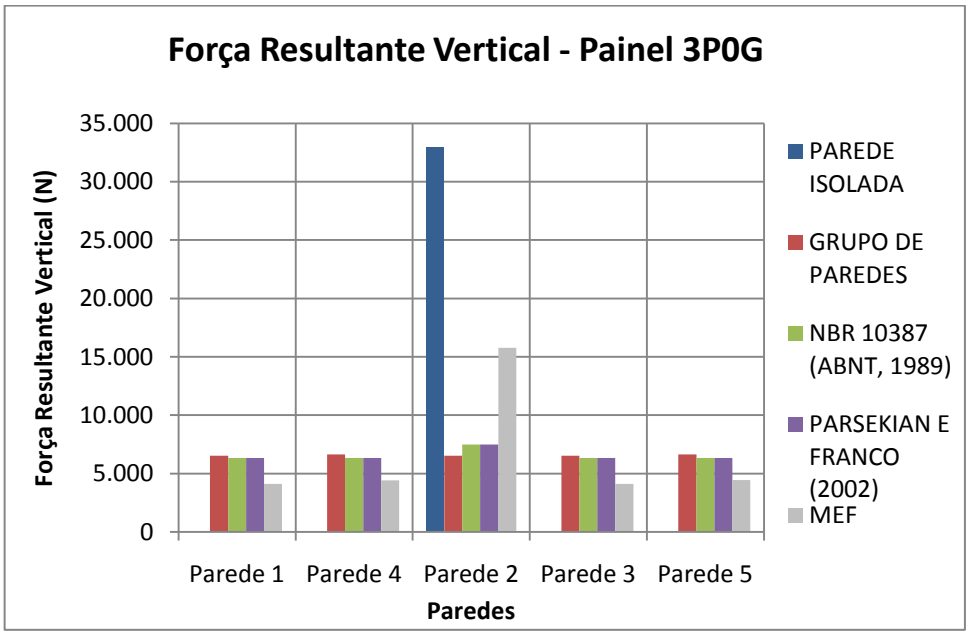


Figura 4.14 - Resultantes verticais nas paredes do painel 3P0G

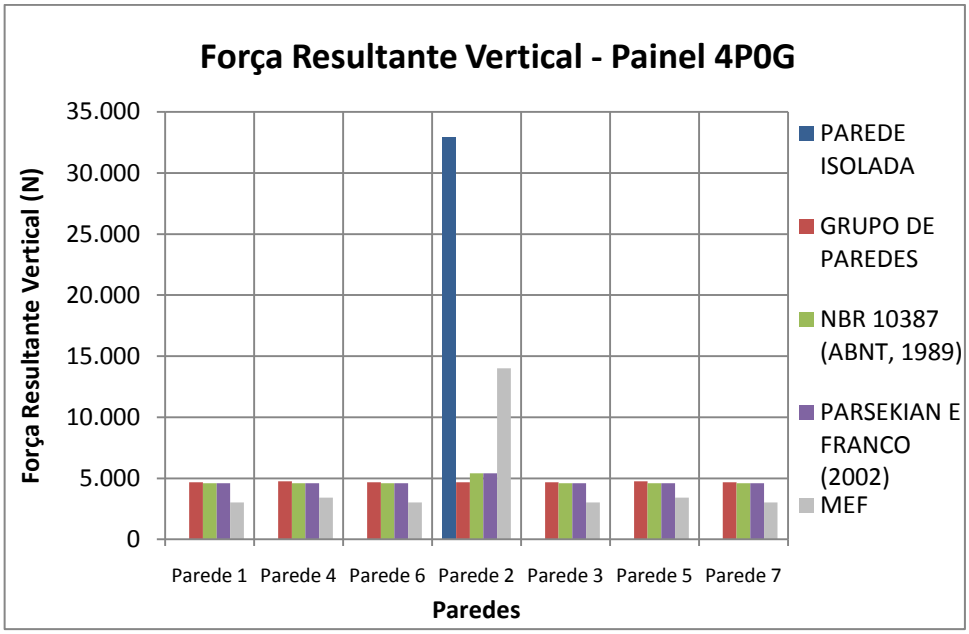


Figura 4.15 - Resultantes verticais nas paredes do painel 4P0G

Os gráficos das Figuras de 4.13 até a 4.15 mostram a força resultante média de cada parede, conforme valores apresentados nas Tabelas do anexo D. Em todas as séries analisadas, buscou-se compreender as causas que levam a obtenção de valores distintos para distribuição de esforços, quando se usa metodologias diferentes. Os gráficos das forças resultantes e da avaliação do carregamento distribuído, como mostram os gráficos das Figuras de 4.16 a 4.21, ajudam nesse entendimento.

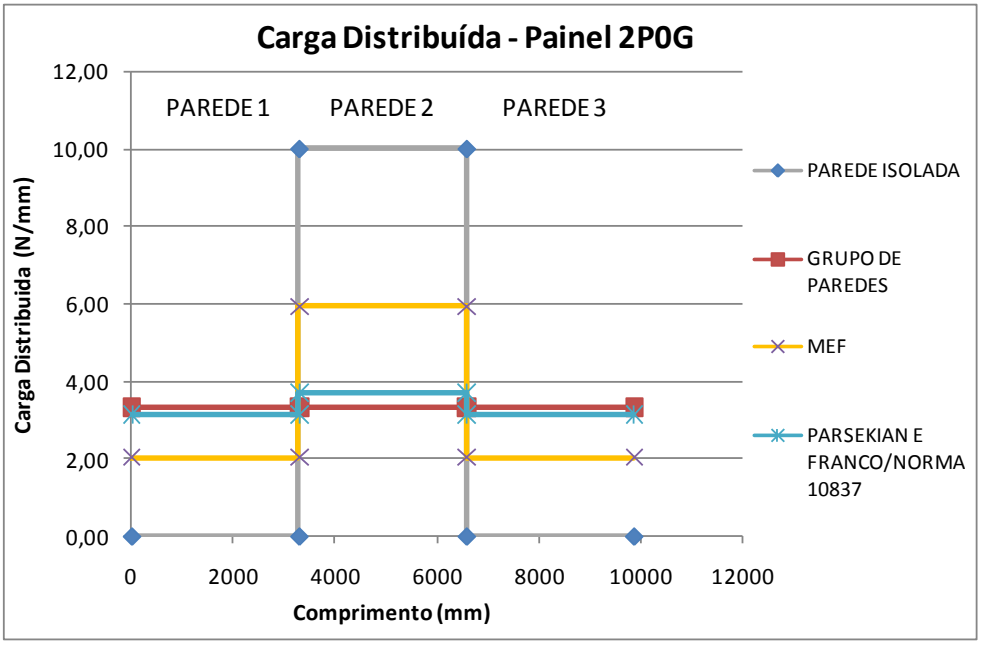


Figura 4.16 - Cargas distribuídas no painel 2P0G

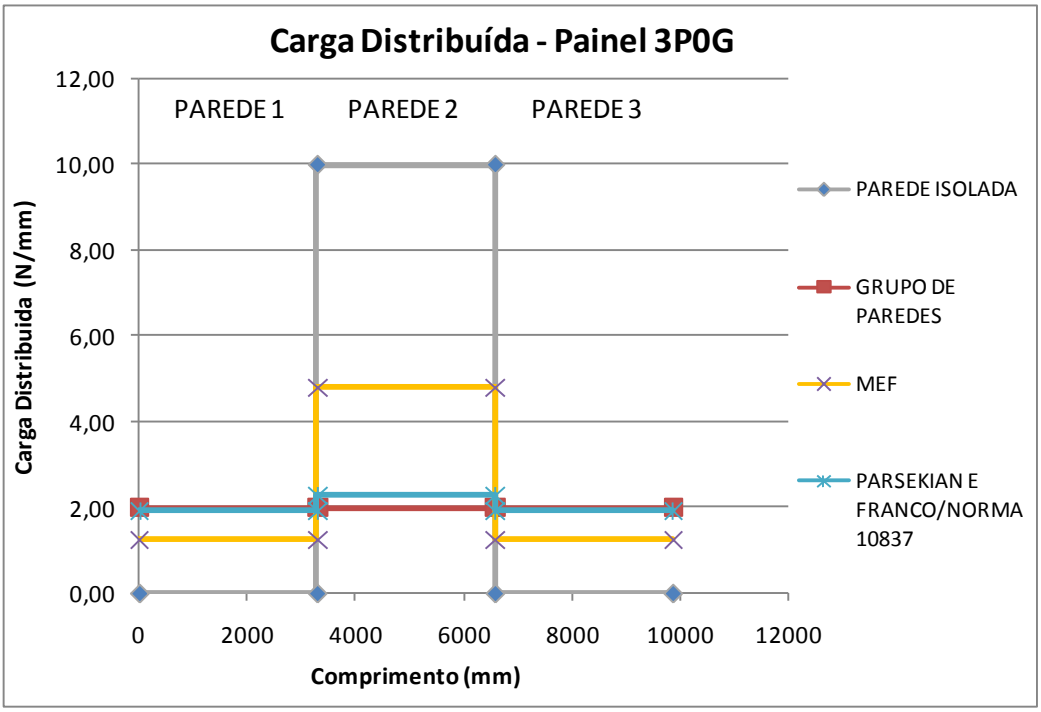


Figura 4.17 - Cargas distribuídas no painel 3P0G - paredes 1,2 e 3

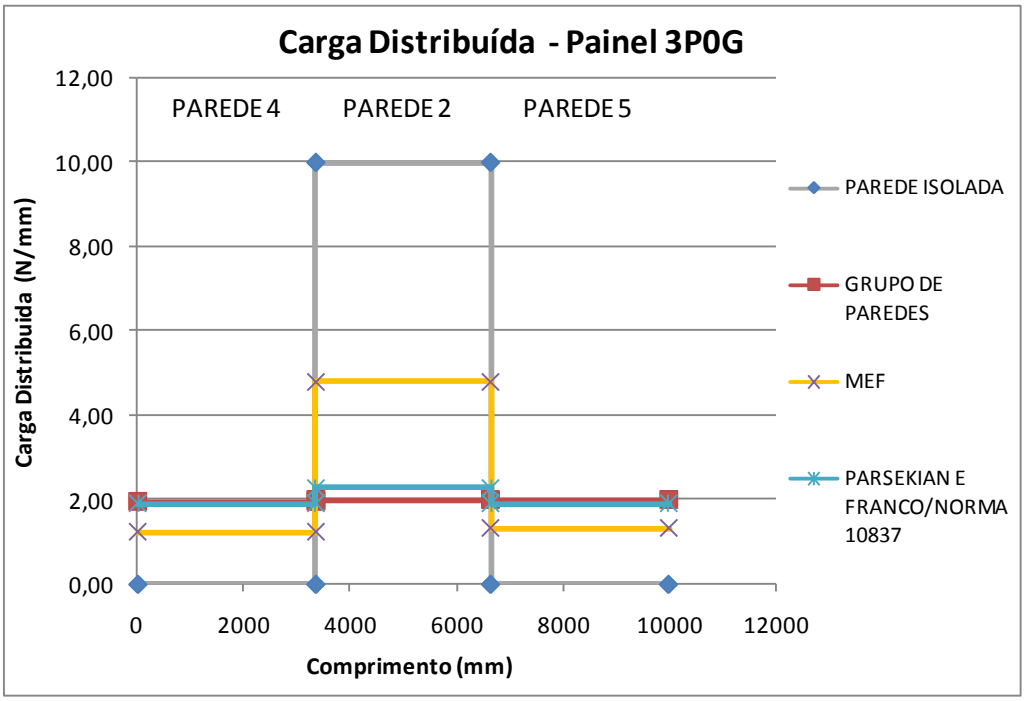


Figura 4.18 - Cargas distribuídas no painel 3P0G - paredes 4,2 e 5

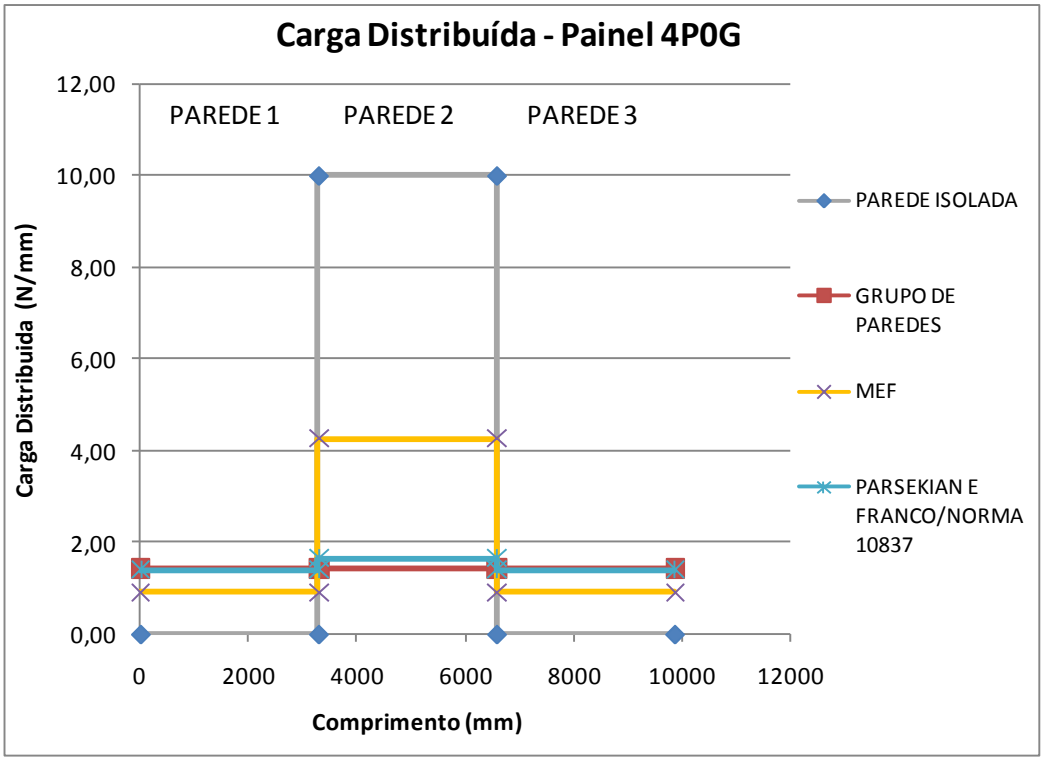


Figura 4.19 - Cargas distribuídas no painel 4P0G - paredes 1, 2 e 3

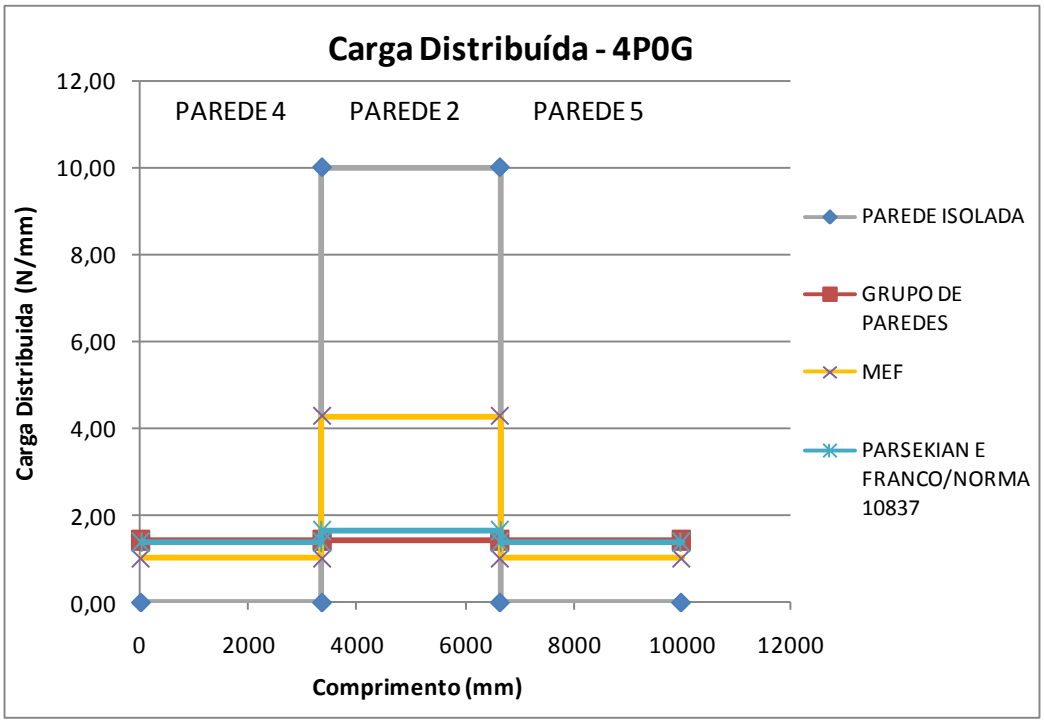


Figura 4.20 - Cargas distribuídas no painel 4P0G - paredes 4, 2 e 5.

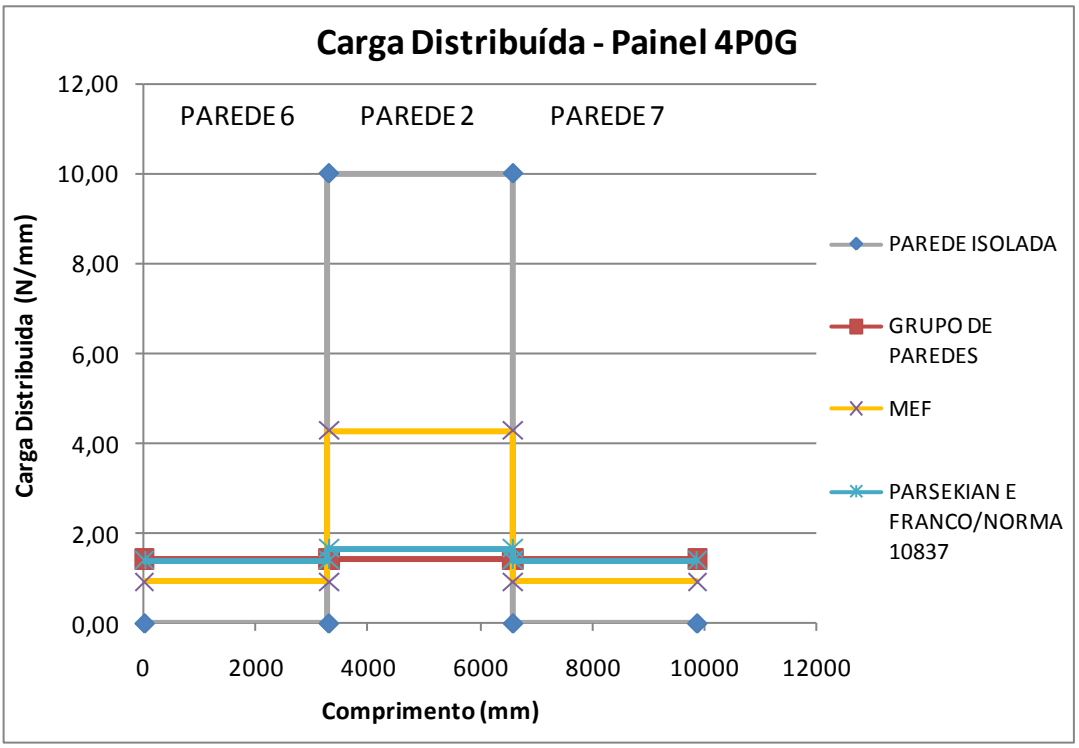


Figura 4.21 - Cargas distribuídas no painel 4P0G - paredes 6,2 e 7

Por se tratar do método de maior precisão, o método dos elementos finitos foi tomado como referência. Este fato é explicado porque ele considera outras características da alvenaria como; juntas de argamassa e condições de apoio, que outras metodologias não avaliam. Portanto os valores obtidos com outros procedimentos foram comparados ao MEF (método dos elemntos finitos), como apresenta as Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7.

Tabela 4.5 – Diferença percentual para cálculo da carga distribuída entre o MEF e outros procedimentos no painel 2P0G

Paredes	**Parede Isolada**	**Grupo de Paredes**	**NBR 10387 (ABNT, 1989)**	**Parsekian e Franco (2002)**
Parede 1	-100,0%	63,9%	54,7%	54,7%
Parede 2	68,5%	-43,8%	-37,5%	-37,5%
Parede 3	-100,0%	64,0%	54,7%	54,7%

Tabela 4.6 – Diferença percentual para cálculo da carga distribuída entre o MEF e outros procedimentos no painel 3P0G

Paredes	**Parede Isolada**	**Grupo de Paredes**	**NBR 10387 (ABNT, 1989)**	**Parsekian e Franco (2002)**
Parede 1	-100,0%	58,3%	54,0%	54,0%
Parede 2	108,5%	-58,6%	-52,5%	-52,5%
Parede 3	-100,0%	58,5%	54,1%	54,1%
Parede 4	-100,0%	50,0%	43,2%	43,2%
Parede 5	-100,0%	49,8%	43,1%	43,1%

Tabela 4.7 – Diferença percentual para cálculo da carga distribuída entre o MEF e outros procedimentos no painel 4P0G

Paredes	**Parede Isolada**	**Grupo de Paredes**	**NBR 10387 (ANT, 1989)**	**Parsekian e Franco (2002)**
Parede 1	-100,0%	54,9%	51,8%	51,8%
Parede 2	134,8%	-66,6%	-61,4%	-61,4%
Parede 3	-100,0%	55,1%	52,0%	52,0%
Parede 4	-100,0%	39,7%	34,5%	34,5%
Parede 5	-100,0%	39,5%	34,3%	34,3%
Parede 6	-100,0%	54,9%	51,9%	51,9%
Parede 7	-100,0%	55,0%	52,0%	52,0%

Comentários

Verifica-se que não há valores suficientemente coincidentes para os diversos procedimentos abordados, exceto o de Parsekian e Franco (2002) e a recomendação da Norma NBR 10837 (ABNT, 1989). Este fato é perfeitamente explicável, visto que o primeiro é uma derivação do segundo.

O procedimento da parede isolada é o mais conservador, pois não considera a interação entre as paredes. Isso leva a uma distribuição de ações apenas na parede onde o carregamento está sendo aplicado, como pode ser visto pelos gráficos. Contrariamente, os outros procedimentos consideram a distribuição em todas as paredes. Cuidados devem ser tomados na adoção do procedimento de parede isolada, visto que nesse método pode-se incorrer em erros grosseiros no cálculo da alvenaria.

Outra disparidade observada são os valores encontrados pelo procedimento do grupo isolado de paredes. Este considera uma distribuição uniforme em todas as paredes, como ilustrado nos gráficos das figuras. A escolha do método do grupo isolado de paredes também pode induzir erros grosseiros no cálculo da alvenaria quando comparado com o MEF.

O Método dos Elementos Finitos, por sua vez, mostra uma distribuição maior na parede central (parede 2), onde o carregamento foi aplicado, com valores menores nas demais. Os demais métodos apresentados, como o de Parsekian e Franco (2002) e o método recomendado pela norma NBR 10387 (ABNT, 1989), mostram também essa tendência, porém ainda, com razoável distanciamento do Método dos Elementos Finitos.

4.5 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GRAUTEAMENTO VERTICAL NOS PAINÉIS

Nessa seção é avaliada a influência do graute inserido nas regiões 1 e 2 nos furos dos blocos dos painéis. O objetivo é realizar uma análise detalhada do perfil da distribuição da tensão normal vertical e entender qual a parcela do carregamento é absorvida nas regiões grauteadas e nas paredes. Os painéis 2P0G, 3P0G e 4P0G (sem graute) foram adotados como referência.

4.5.1 DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO NORMAL NOS PAINÉIS

Foi oportuna fazer a avaliação das tensões verticais normais que chegam na base da parede, pois é ela o principal fator para o dimensionamento da alvenaria estrutural.

Para de avaliar coerentemente o perfil de distribuição de tensão, as paredes dos painéis foram analisadas separadamente. Esses perfis podem ser visualizados através das curvas tensão x comprimento mostradas nas Figuras de 4.22 a 4.29.

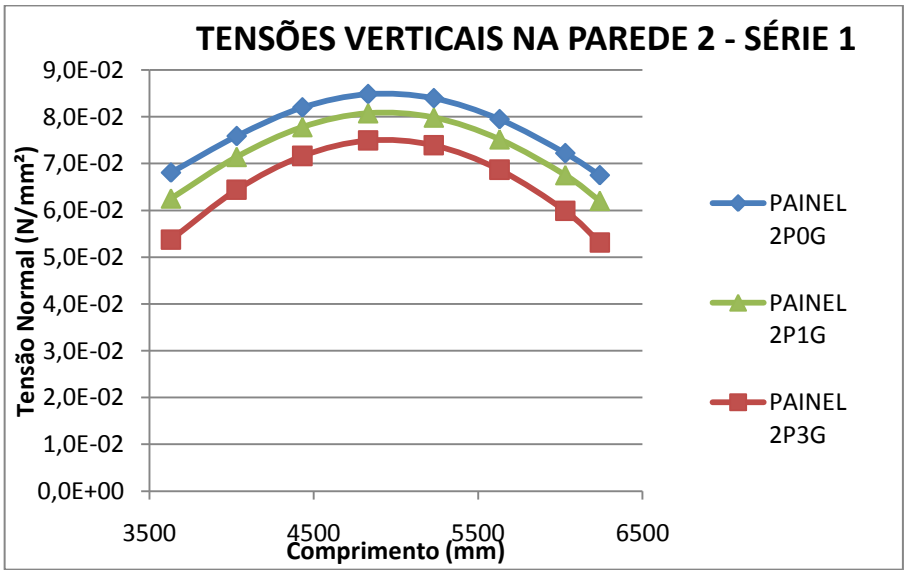


Figura 4.22 - Distribuição de tensões verticais normais na parede 2- série 1.

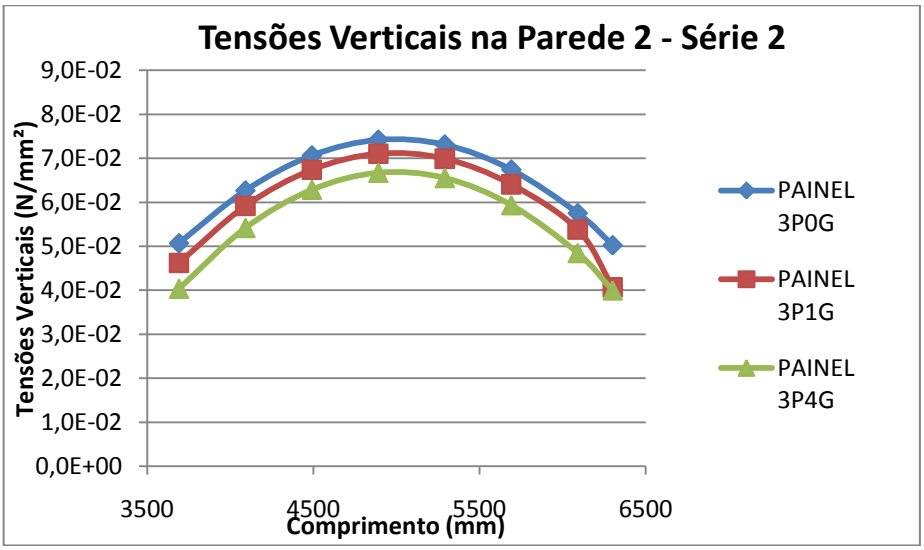


Figura 4.23 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 2 - série 2

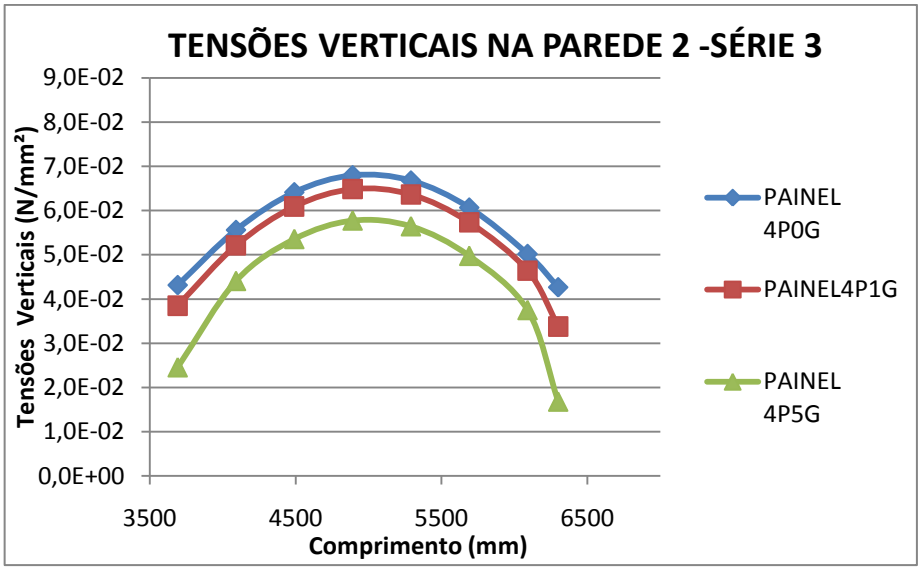


Figura 4.24 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 2 - série 3

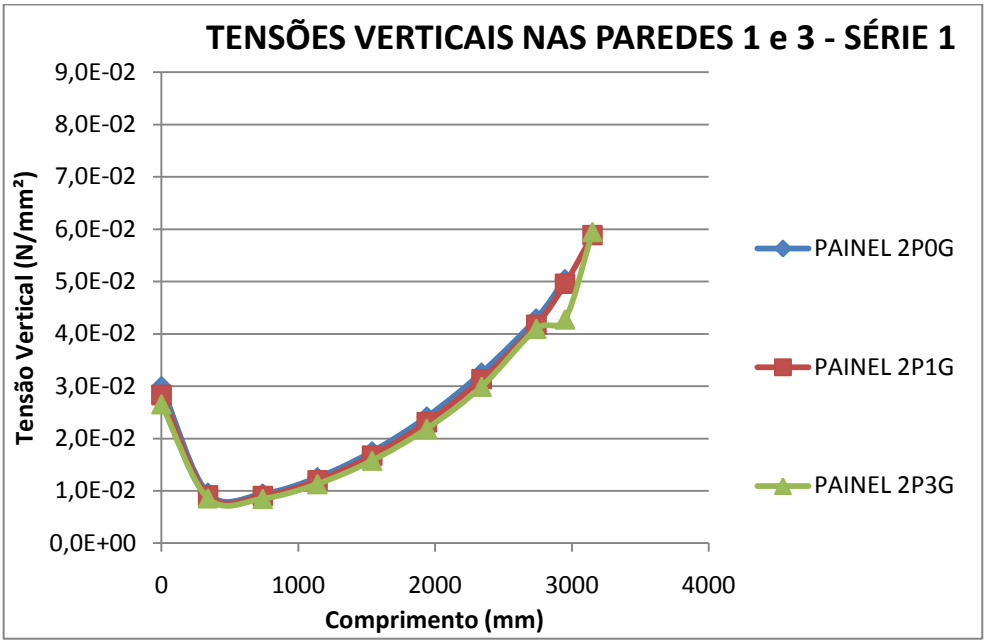


Figura 4.25 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 1 e 3 - série 1

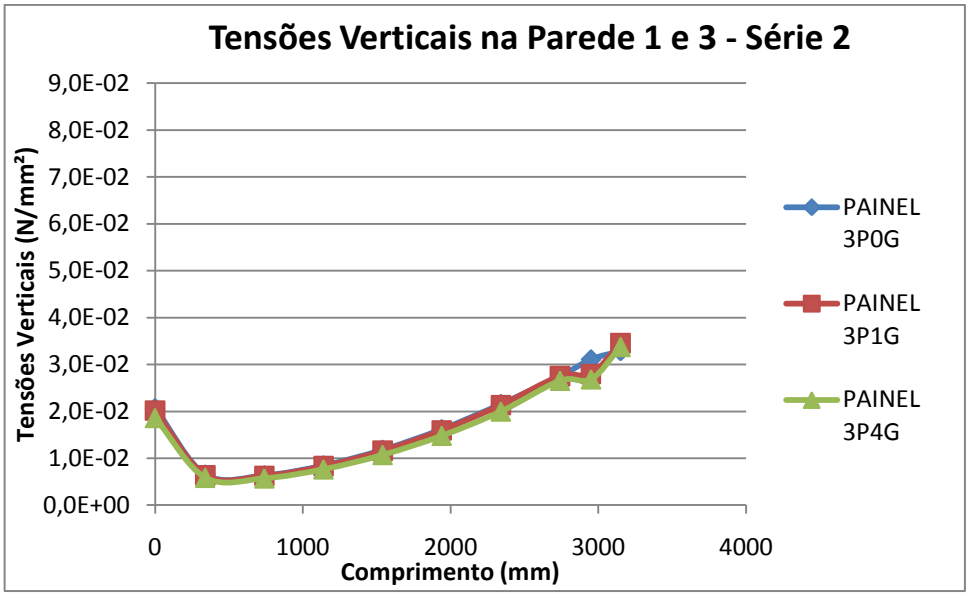


Figura 4.26 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 1 e 3 - série 2

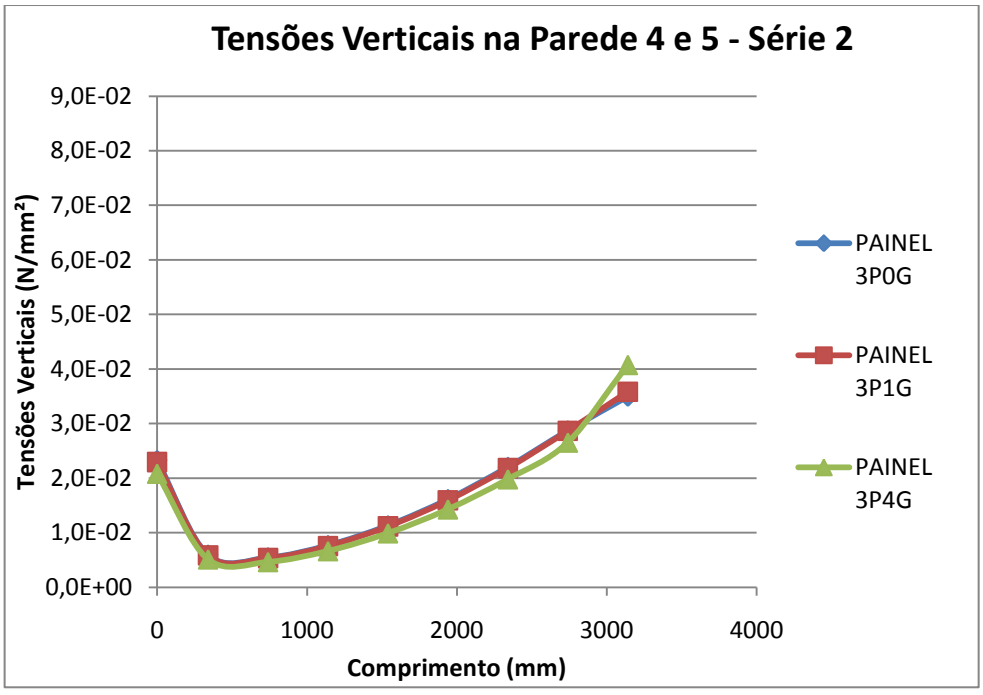


Figura 4.27 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 4 e 5 - série 2

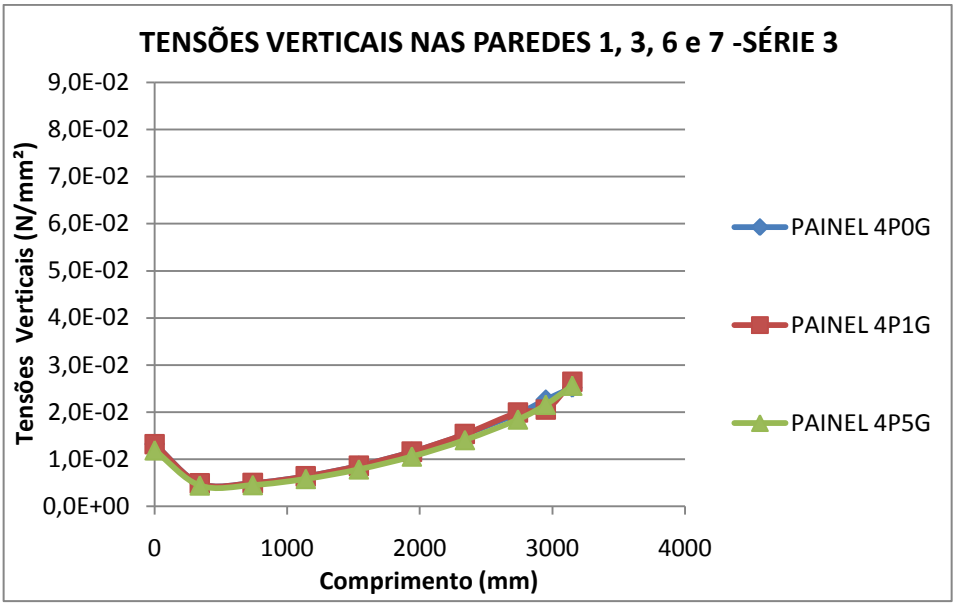


Figura 4.28 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 1, 3, 6 e 7 - série 3

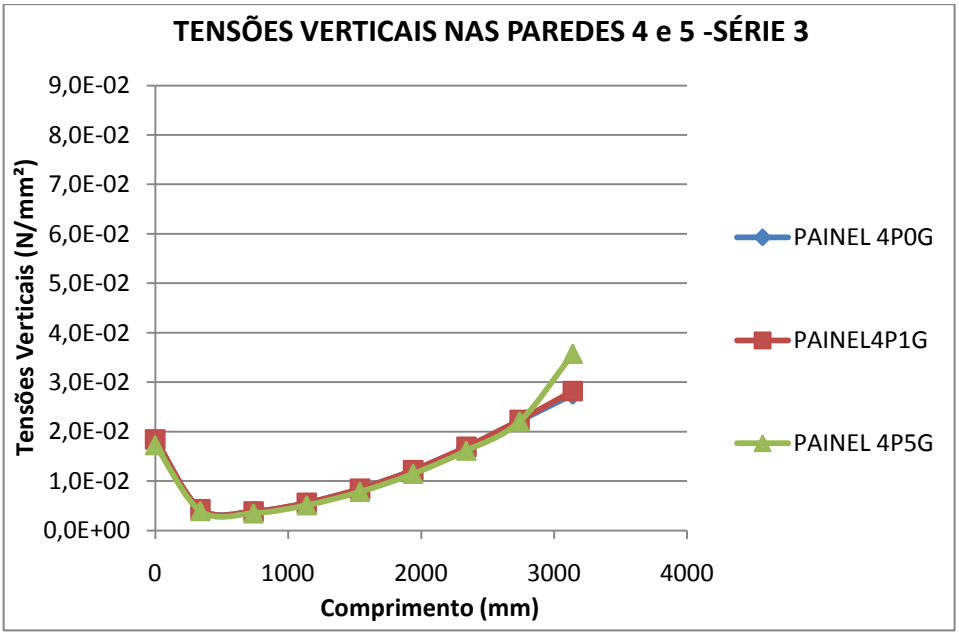


Figura 4.29 - Distribuição de tensões verticais normais na paredes 4 e 5 - série 3

Comentários

Verifica-se que a presença do graute nos furos dos blocos faz baixar a tensão vertical nas paredes, sendo mais acentuada na parede 2 (parede central) como demonstram as curvas

dos gráficos das figuras 4.18 a 4.20. A redução na tensão está relacionada com a quantidade de furos grauteados e com o tipo de painel.

As maiores diferenças percentuais encontradas ocorreram sempre na parede central (parede 2). O maior pico de diferença de tensão observada aconteceram nos painéis 2P3G da série 1 com 16% de redução, e no 4P5G da série 3 com 25 % de redução. Para as demais paredes a influência do grauteamento é menor. Chega-se a uma redução de 9% , para a tensão de pico, para as paredes 1 e 3 no painel 2P2G e de 7,4% nas paredes 1, 3, 4, 5, 6 e 7 do painel 4P5G.

A quantidade de paredes que se encontram na região grauteada não causa influência significativa na distribuição de tensões. Analisando apenas os painéis com graute em 1 furo do bloco, percebe-se que a redução da tensão passa de 3,6% no painel 2P1G para 0,3% no painel 4P1G. Indica que esta redução é causada pelo aumenta de regidez desta região.

4.5.2 PARCELA DE AÇÕES ABSORVIDA NAS PAREDES E REGIÕES GRAUTEADAS

Avaliou-se neste tópico a parcela do carregamento aplicada que é absorvida pelas regiões grauteadas e pelas paredes. Para melhor compreensão dos efeitos do graute, separou-se as regiões grauteadas das paredes, conforme ilustra a Figura 4.30.

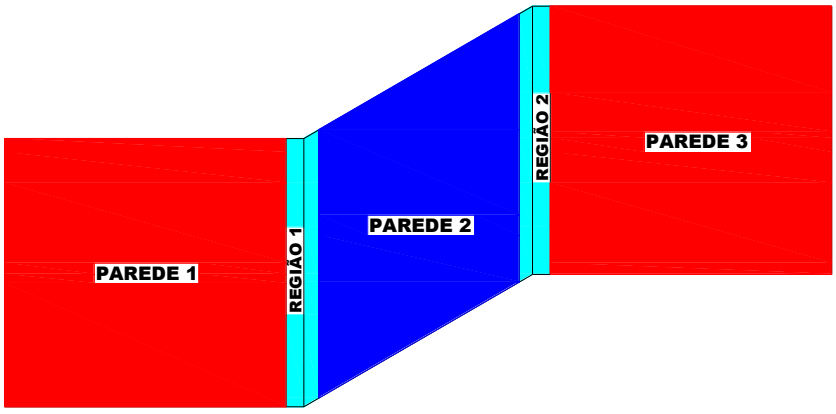


Figura 4.30 - Ilustração da separação entre paredes e regiões grauteadas

O percentual das cargas absorvida foi calculada pela relação entre a força resultante da parede ou região e a força resultante total que é aplicada na parede 2 de cada painel, ou seja, $\%\text{absorvido} = \frac{\text{Resultante na parede /região}}{\text{Resultante aplicada na parede 2}}.100\%$, conforme apresenta a Tabela 4.8

Tabela 4.8– Percentuais de Cargas Absorvidas nas Paredes e nas Regiões do Graute

Paredes	**Percentuais Absorvido do Carregamento Aplicado**					
	Painéis da Série 1		**Painéis da Série 2**		**Painéis da Série 3**	
	2P1G	2P3G	3P1G	3P4G	4P1G	4P5G
Parede 1 e Parede 3	38,7%	27,9 %	22,6 %	18,6 %	16,9 %	15,4 %
Parede 2	51,5%	46,4 %	45,7%	39,1 %	41,6 %	29,6 %
Parede 4 e Parede 5	-	-	24,3%	21,3 %	19,7 %	17,4 %
Parede 6 e Parede 7	-	-	-	-	17,2 %	15,4%
Região 1 e Região 2	9,9 %	25,7 %	7,4 %	21,0 %	4,7 %	22,2 %

A absorção de cargas por cada parede e regiões (painéis com graute) foram comparadas, com as mesmas regiões e paredes equivalentes dos painéis de referência (painéis sem graute). Exclui-se as regiões 1 e 2 desses painéis de referência, pois são regiões que correspondem aos segmentos verticais que foram grauteados. Por esta razão, os painéis e regiões de referência aparecerão nos gráficos das figuras de 4.31 a 4.42, com valores de cargas absorvidas diferenciados. Apresenta-se também os painéis 2P0G, 3P0G e 4P0G sem exclusão das regiões, com a carga total absorvida em cada parede.

Os gráficos das Figuras 4.31 a 4.33 mostram o comportamento das paredes e regiões quanto a absorção de cargas, para a série 1.

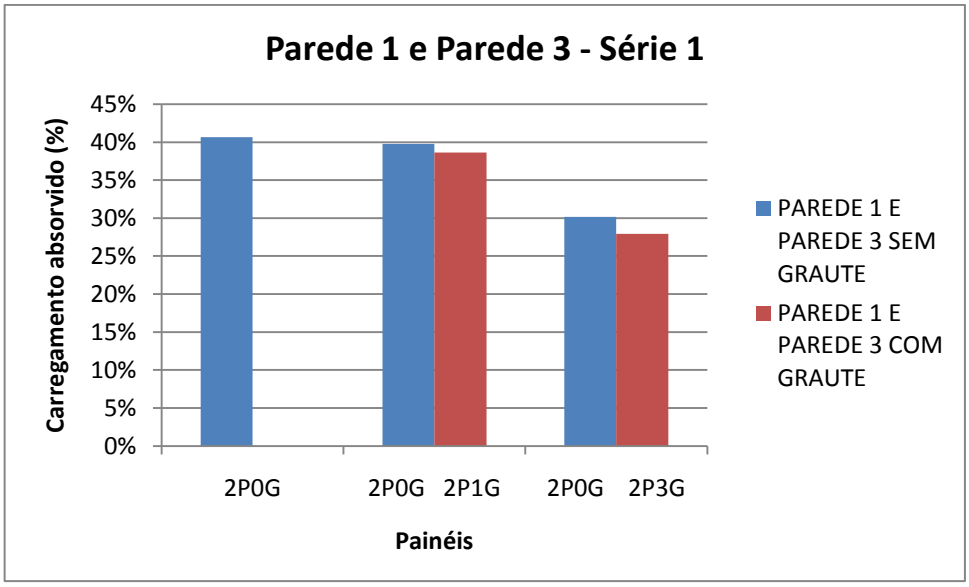


Figura 4.31 - Carregamento absorvido na parede1 e na parede 3 da série 1

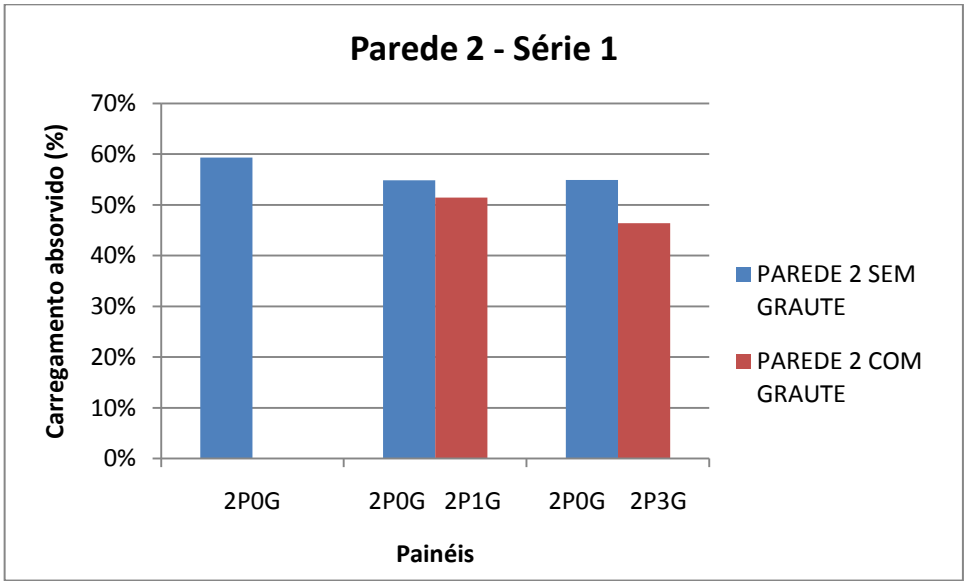


Figura 4.32 - Carregamento absorvido na parede 2 da série 1

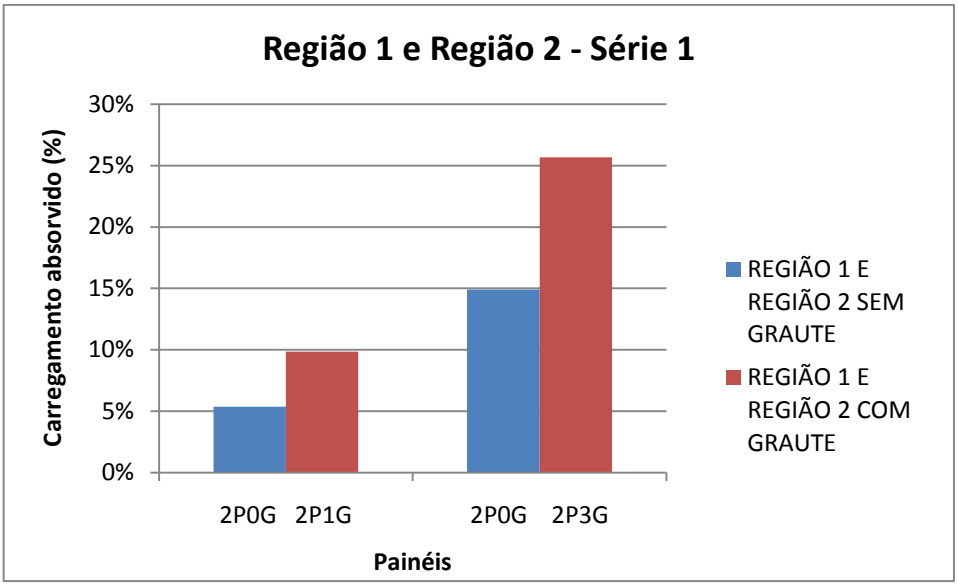


Figura 4.33 - Carregamento absorvido pelas regiões 1 e 2 da série 1

Assim como na série 1, os gráficos das Figuras a seguir apresentam o grau de absorção das paredes e regiões dos painéis das série 2.

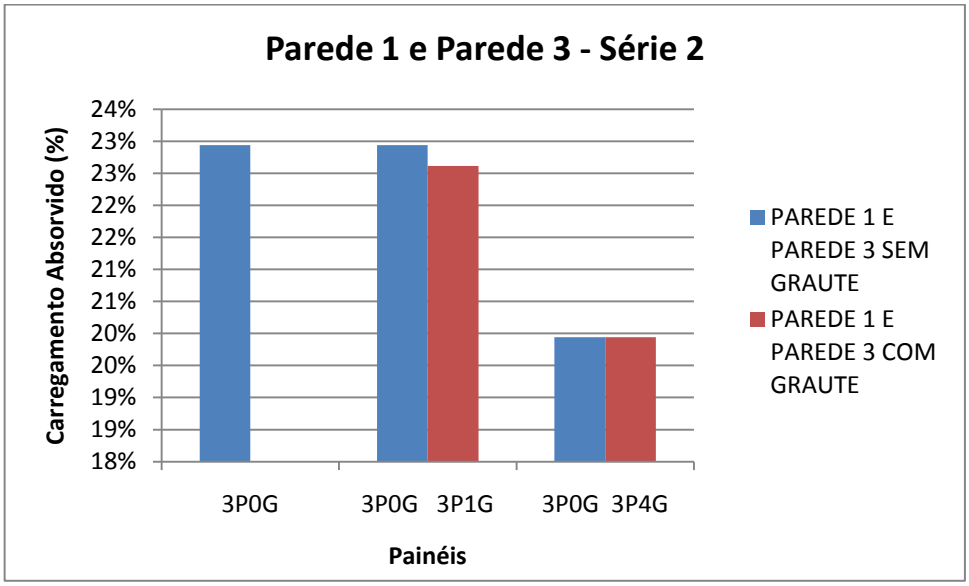


Figura 4.34 - Carregamento absorvido pela parede 1 e parede 2 da série 2

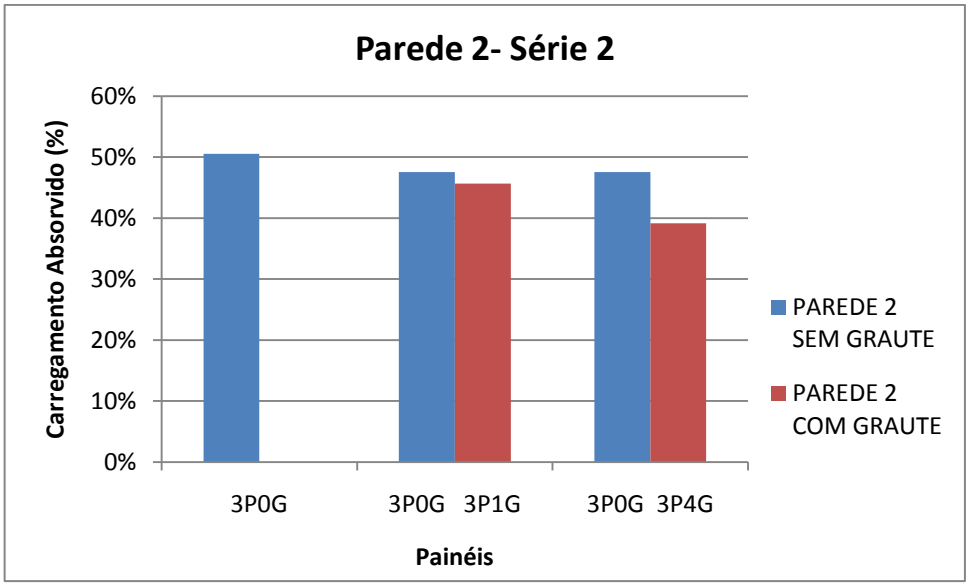


Figura 4.35 - Carregamento absorvido na parede 2 da série 2

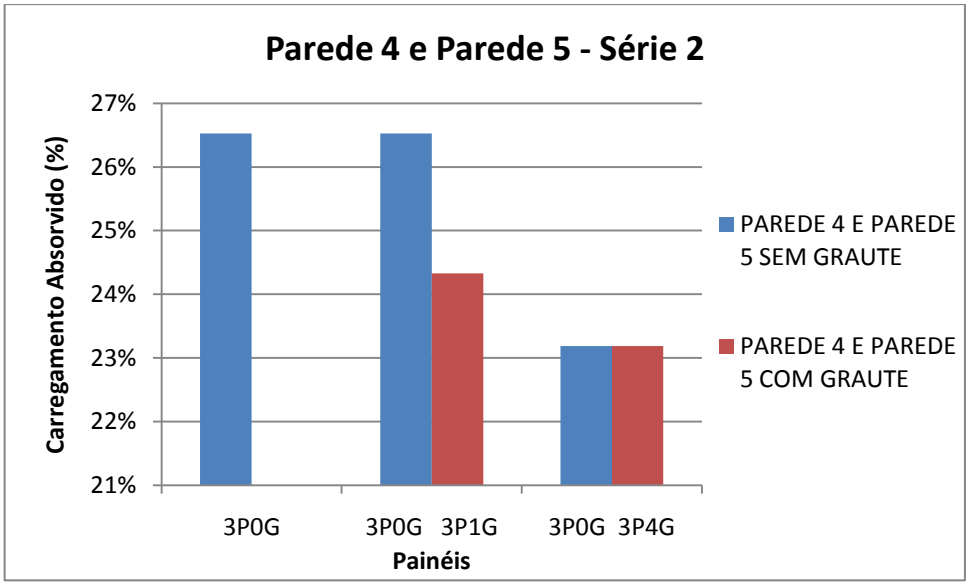


Figura 4.36 - Carregamento absorvido pela parede 4 e paredes 5 da série 2

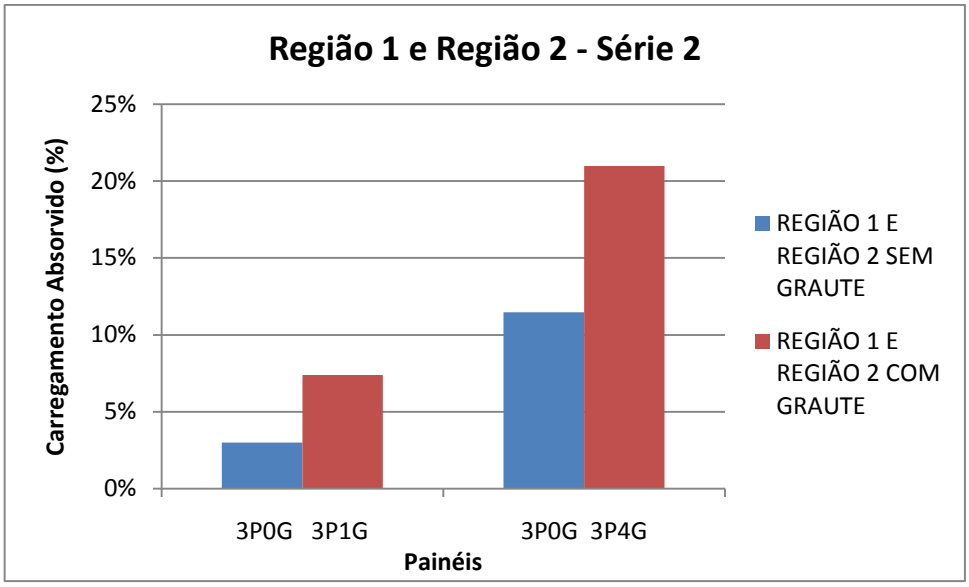


Figura 4.37 - Carregamento absorvido na região 1 e região 2 da série 2

Os mesmos procedimentos adotados para a série 1 e série 2, foram usados para os painéis da série 3 de acordo com os gráficos das Figuras 4.38 até 4.42.

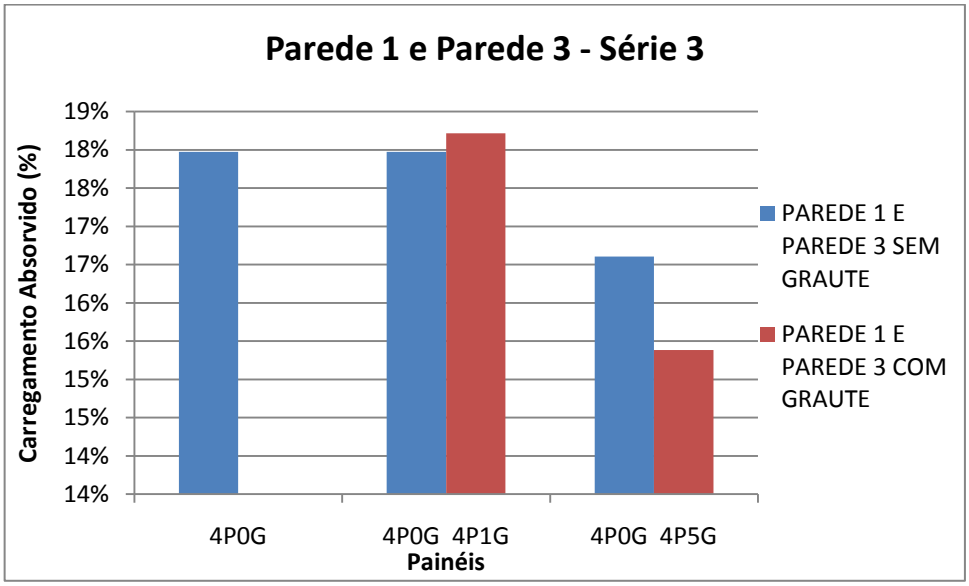


Figura 4.38 - Carregamento absorvido pela parede 1 e parede 3 da série 3

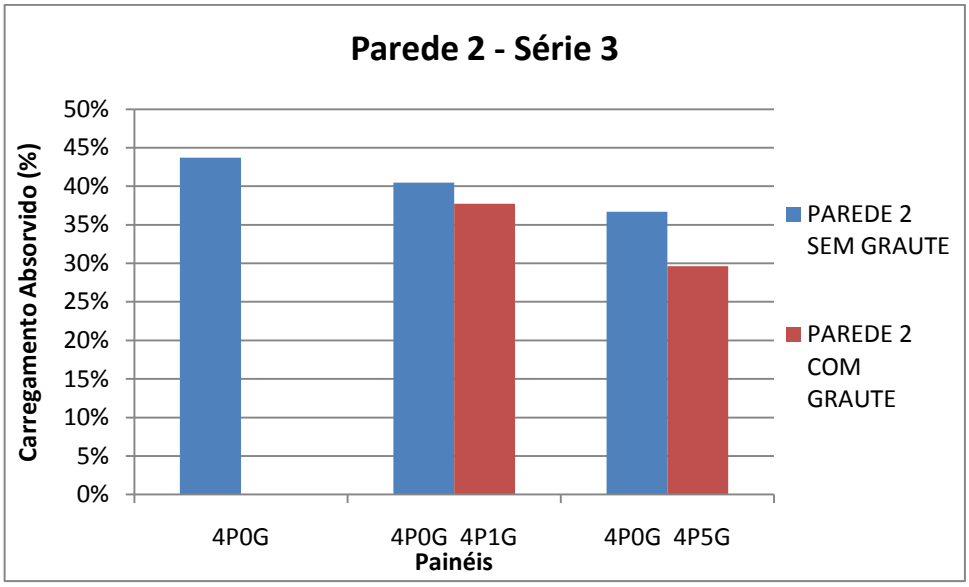


Figura 4.39 - Carregamento absorvido pela parede 2 da série 3

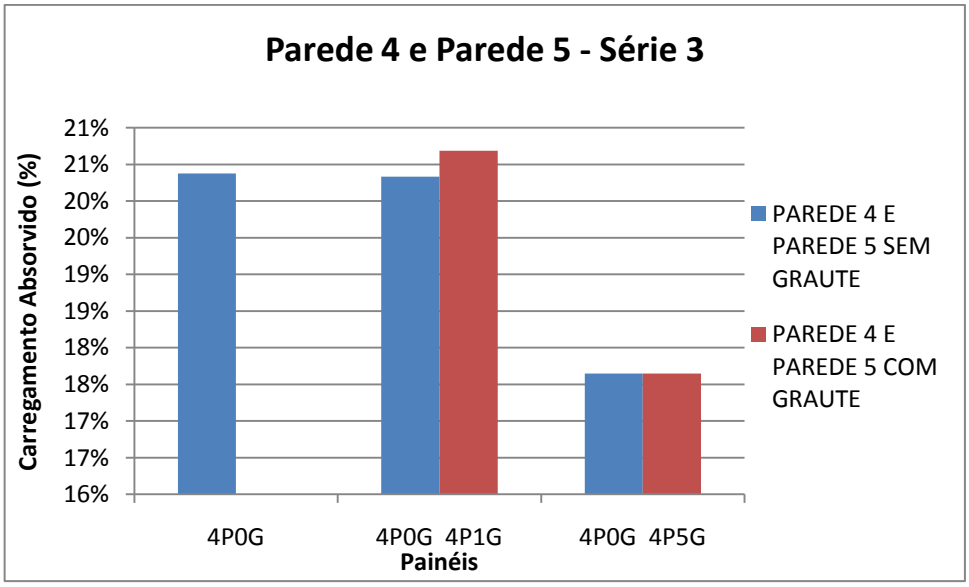


Figura 4.40 - Carregamento absorvido pela parede 4 e parede 5 da série 3

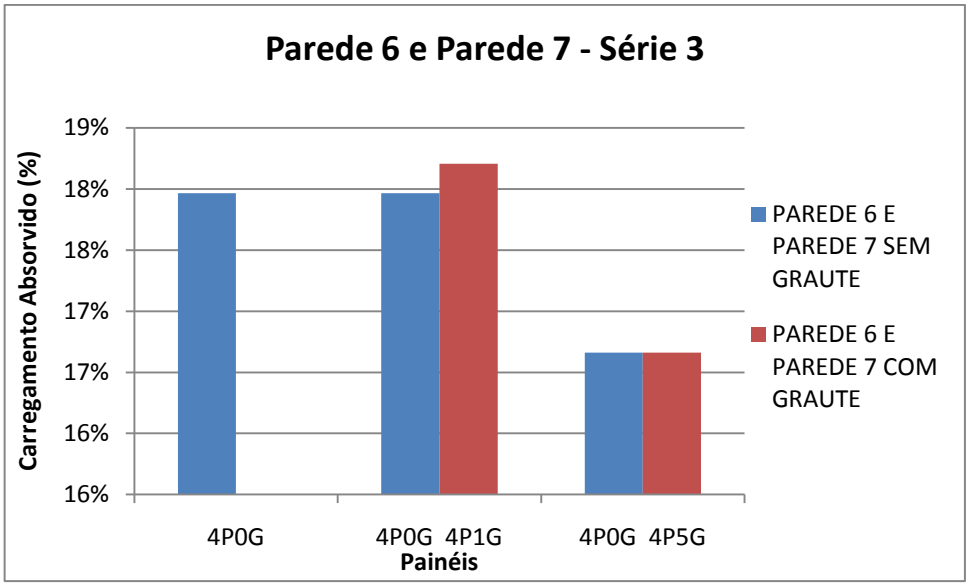


Figura 4.41 - Carregamento absorvido pela parede 6 e parede 7 da série 3

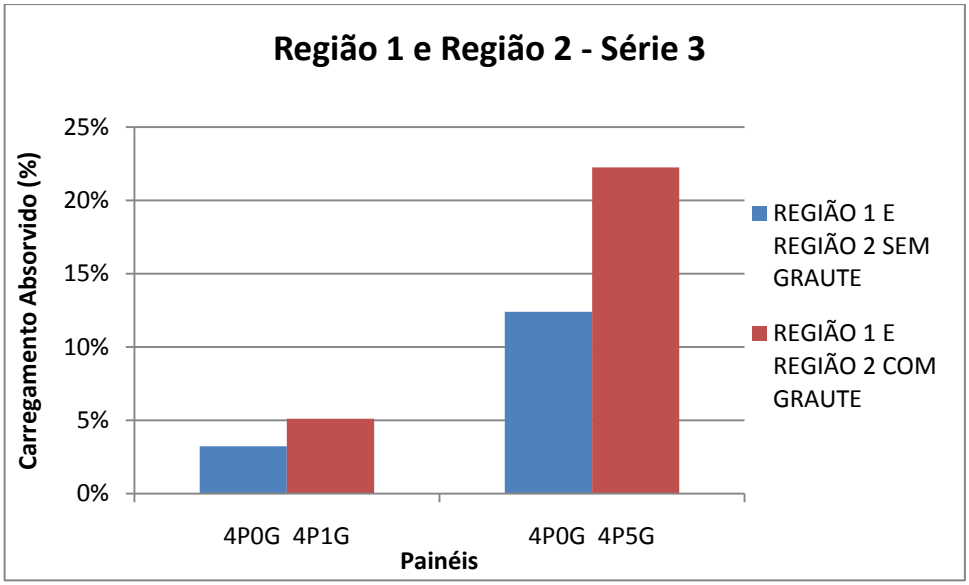


Figura 4.42 - Carregamento absorvido pela região 1 e região 2 da série 3

Comentários

Observa-se que a presença do graute reduz o carregamento absorvido pelas paredes. A parede 2 é mais susceptível à influência do graute chegando a diferença da ordem de 25% (entre o grauteado e o painel correspondente sem graute), nesse caso o painel 4P5G da série 3. Não foram observadas diferenças significativas para as paredes 1 e 3, comuns a todos os painéis, tanto para os casos com 1 furo ou mais furos grauteados. Nos casos de 1 furo

grauteado a diferença observada variou entre 1,5% e 2,5% e para os demais casos a variação ficou entre 6,6% e 7,5%, sinalizando que a maior ou menor quantidade de paredes que se encontram na região do graute tem pouco influência na absorção de cargas nas paredes 1 e 3.

As regiões 1 e 2 absorvem mais cargas na presença do graute, como demonstram os gráficos das figuras 4.33, 4.37 e 4.42. As regiões que mais absorvem carga são aquelas dos painéis da série 1, conforme mostra a Tabela 4.8.

4.5.3 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GRAUTEAMENTO HORIZONTAL

Investigou-se o perfil da distribuição de tensões e a parcela do carregamento transferido para as paredes e regiões dos painéis 2P1H, 2P2H e 2P3H da série 1. Analisou-se o comportamento de cada um deles em relação ao painel 2P0G, considerado como referência. A absorção de cargas fundamentou-se na resultante de forças verticais em cada parede, como indicado no gráfico da Figura 4.43 sendo que as tensões normais verticais foram tomadas na 1ª fiada. Os gráficos das figuras 4.44 e 4.45 mostram o perfil da distribuição nas diferentes paredes.

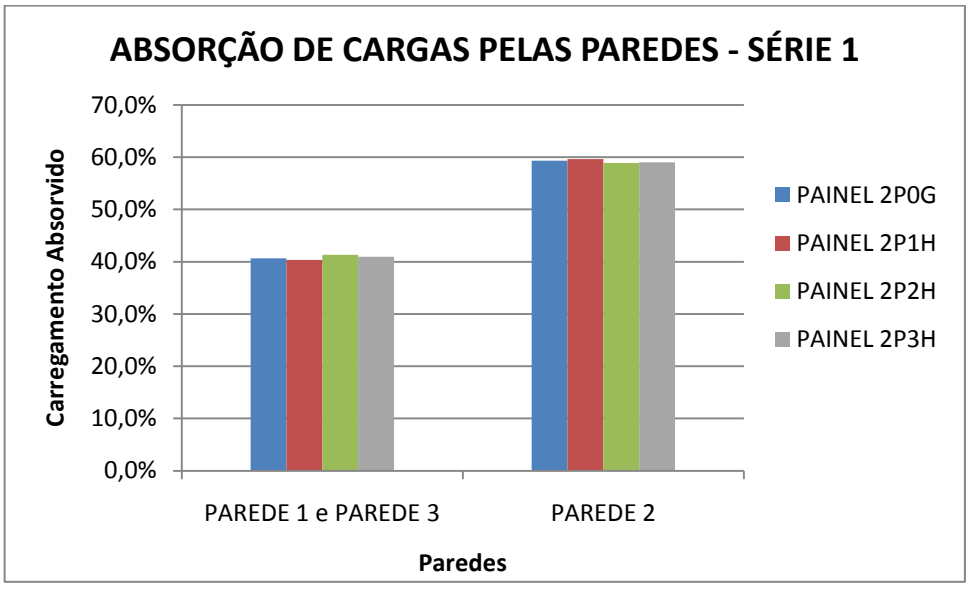


Figura 4.43 - Absorção de carregamento nas paredes dos painéis da série 1 com grauteamento horizontal

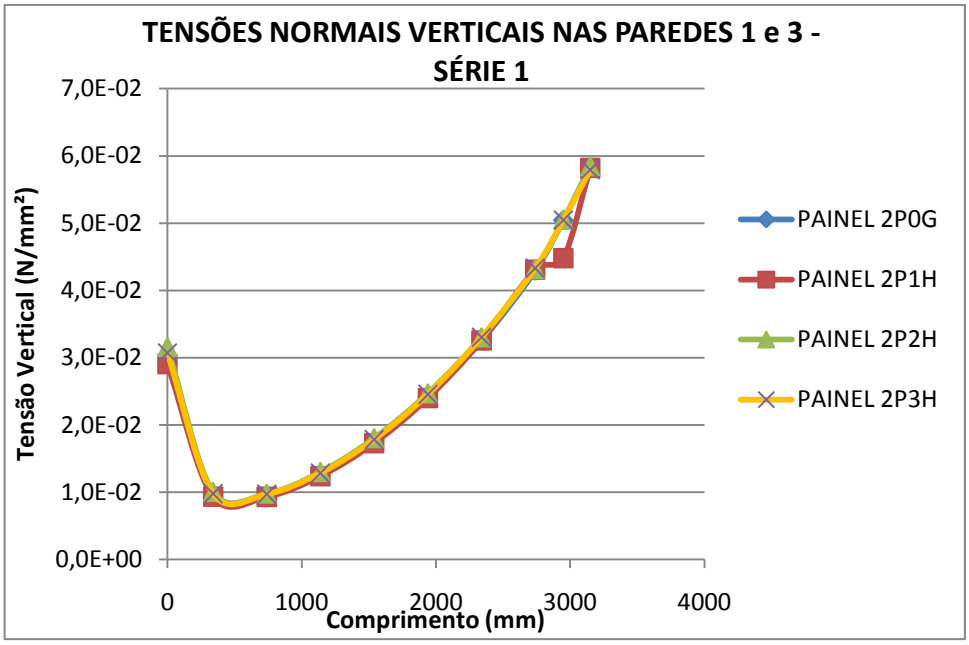


Figura 4.44 - Perfil da distribuição de tensões nas paredes 1 e 3 em painéis com grauteamento horizontal da série 1

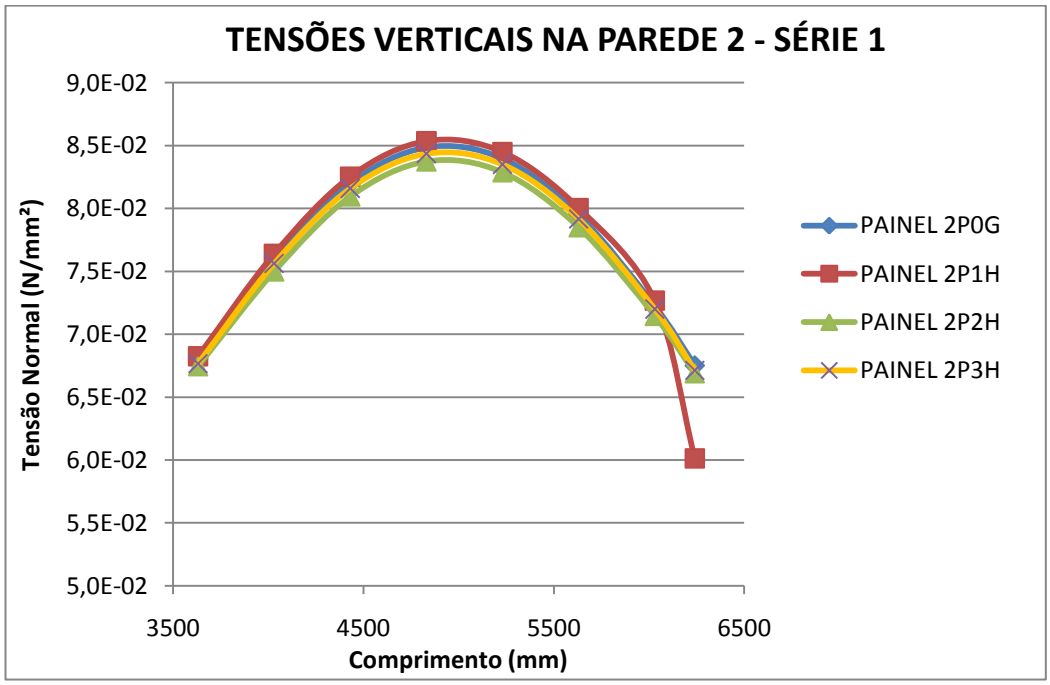


Figura 4.45 - Perfil da distribuição de tensões na parede 2 em painéis com grauteamento horizontal da série 1

Comentários:

Pelas observações feitas, quando se compara o carregamento absorvido nas paredes dos painéis com graute horizontal e o painel 2P0G, ausente de graute horizontal, há evidências de

que a absorção de cargas é praticamente a mesma, como pode ser visualizado através do gráfico da Figura 4.43.

O perfil das tensões mostra que as curvas para as várias situações (cinta intermediária, cinta de topo, e cinta intermediária e de topo) estão próximas, no caso das paredes 1 e 3, como mostra o gráfico da Figura 4.44. Indicando pouca influência das cintas na distribuição de tensões. Já o gráfico 4.45 mostra que a presença do graute horizontal na cinta de topo causa uma pequena queda nos valores das tensões verticais.

Para as condições que foi tratado o modelo, na avaliação desses tipos de painéis (com grauteamento horizontal), da análise dos resultados, suspeita que a presença da cinta a meia altura ou no topo causa pouca ou nenhuma influência no carregamento das paredes.

5 INFLUÊNCIA DO GRAUTEAMENTO VERTICAL EM ESTRUTURA DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS

Neste capitulo foi realilizado um estudo para investigar a influência do grauteamento vertical na distribuição do carregamento em estruturas de múltiplos pavimentos de alvenaria. O grauteamento vertical está quase sempre presente nesses tipos de estruturas, ocupando principalmente cantos e encontros das paredes resistentes. No caso deste trabalho foi avaliada uma estrutura com arquitetura simplificada de blocos de concreto com 10 pavimentos, pé direito de 2,80 metros. O croqui da Figura 5.1 ilustra a planta do pavimento tipo. O objetivo principal se concentra na avaliação da influência do grauteamento na velocidade da uniformização das cargas ao longo da altura da edificação.

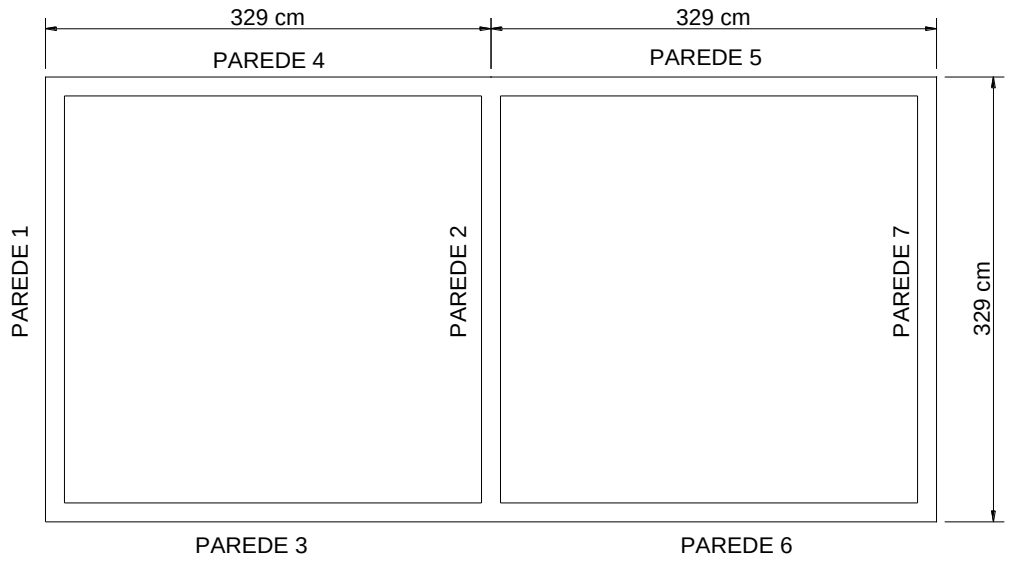


Figura 5.1- Croqui da planta baixa da estrutura de andares múltiplos

Os furos grauteados estão localizados nas amarrações das paredes. Os encontros das paredes 1 e 4, 1 e 3, 5 e 7 e 6 foram grauteados em 3 furos. Os encontros das paredes 5 e 4 com a 2 e 3 e 6 com a 2 foram grauteados em 4 furos, como pode ser visualizado pela Figura 5.2.

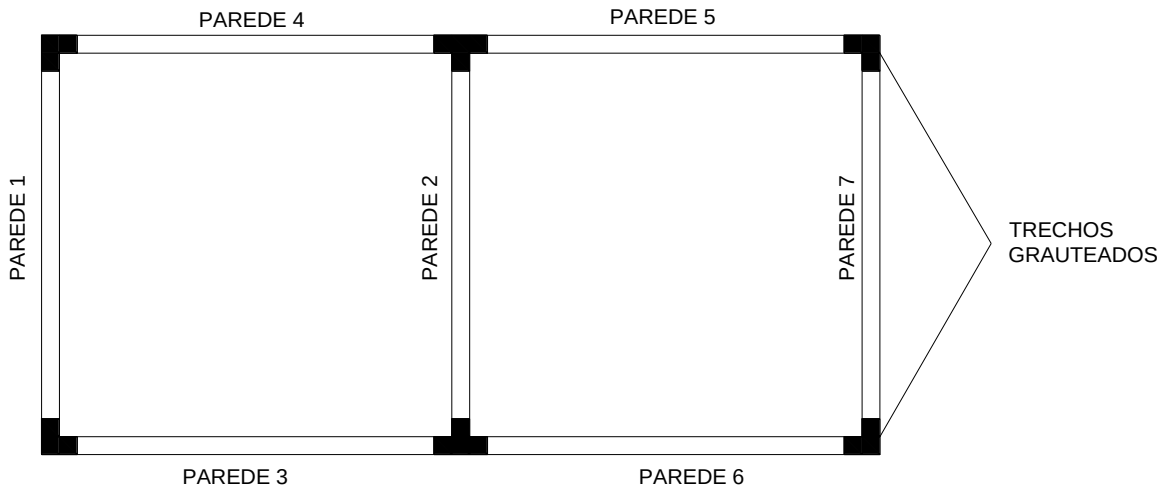


Figura 5.2 – Esquema do grauteamento para estrutura de múltiplos pavimentos

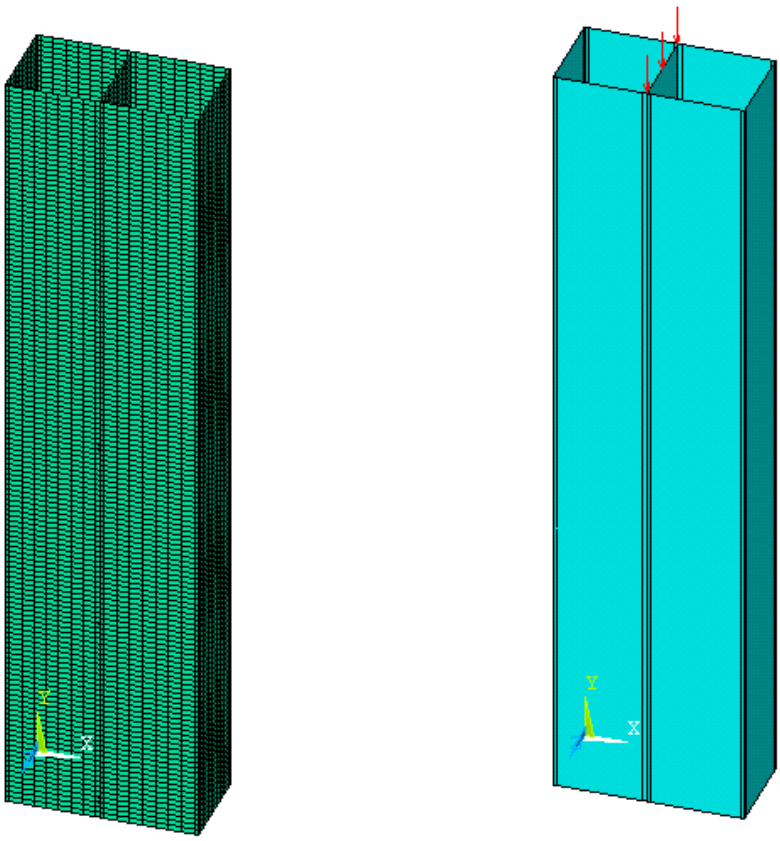
5.1 ANÁLISE NUMÉRICA DA ESTRUTURA

A estrutura foi modelada com o pacote computacional ANSYS 6.1 no regime elástico linear. Utilizou-se a técnica da homogeneização na análise, ou seja, as unidades e as juntas de argamassa foram tratadas como material único pelo método do material equivalente de Pande *et al.* (1989), considerando a ortotropia da alvenaria.

Os trechos grauteados foram modelados como material compósito com suas propriedades elásticas determinada pela equação 4.11. Os parâmetros dos materiais usados na estrutura foram os mesmos usados na análise dos painéis individuais conforme apresentados na Tabela 4.1.

A estrutura foi submetida a uma carga linear de 100 N/mm (correspondente a 10 vezes o carregamento dos painéis), distribuída no topo da parede 2 do último pavimento como ilustra a Figura 5.3b.

Os trechos grauteados e os painéis foram modelados com o elemento Shell 63 da biblioteca do ANSYS 6.1, malha definida com elemento de 40 x 20 cm, como mostra a Figura 5.3ª.



(a) (b)

Figura 5.3 – Modelagem da estrutura (a) Malha (b) Carregamento da Estrutura de 10 Pavimentos

5.1.1 USO DA MACROMODELAGEM

O uso desta técnica se justifica por dois motivos. Primeiro, pelo porte da estrutura, pois a utilização de outras técnicas demandaria um maior esforço computacional. O outro motivo é o desejo de compreender como ocorre a distribuição de esforços de maneira global. A fim de validar a técnica da homogeneização, comparou-se os valores com os obtidos pela técnica da micromodelagem. O painel 2P0G da série 1 serviu de base para o estudo, onde foram confrontados os valores de tensão máxima e mínima das duas técnicas. As propriedades elásticas individuais dos materiais usadas na estrutura foram as mesmas dos painéis que estão presentes no Tabela 4.1. Já as propriedades médias da homogeneização, vieram do processo do material equivalente de Pande *et al*. (1989), como apresentado na Tabela 5.1 (ver anexo A)

Tabela 5.1 – Propriedades elásticas segundo a ortotropia do material equivalente de Pande *et al*. (1989)

Módulo de Elasticidade (N/mm²)	**Módulo de Elasticidade Transvesal (N/mm²)**	**Coeficiente de Poisson**
$E_x = 22059$	$G_{xy} = 9199,9$	$\nu_{xy} = 0,1958$
$E_y = 22023$	$G_{yz} = 9208,2$	$\nu_{y\,z} = 0,1966$
$E_z = 22086$	$G_{xz} = 9217,5$	$\nu_{xz} = 0,1967$

A malha foi discretizada da mesma maneira da que foi utilizada na análise dos painéis (elementos de 1 x 1 cm, 6,33 x 6,33 cm e 6,33 x 7 cm), conforme detalhe ilustrado na Figura 5.4, com o elemento Shell 63 do ANSYS 6.1, para as duas técnicas empregada.

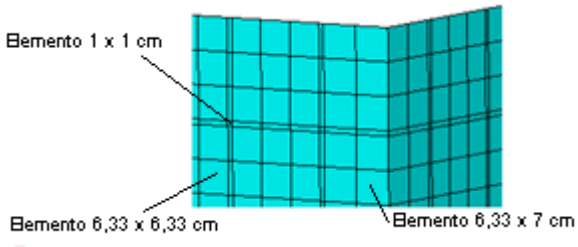


Figura 5.4 – Detalhe da malha de elementos finitos utilizada na macromodelagem e na micromodelagem

A configuração das tensões verticais é praticamente a mesma para as duas técnicas empregadas, como pode ser verificado pelas figuras 5.5 e Figura 5.6.

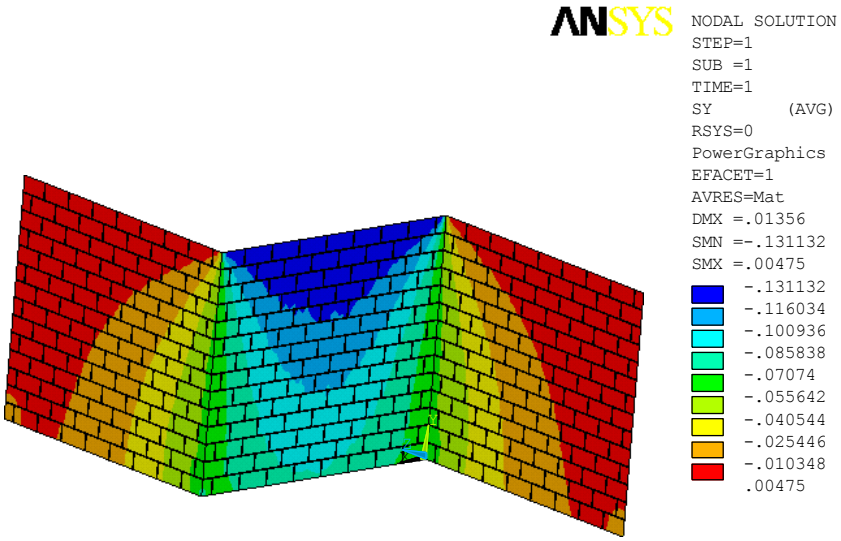


Figura 5.5 - Tensões verticais obtidas por micromodelagem simplificada

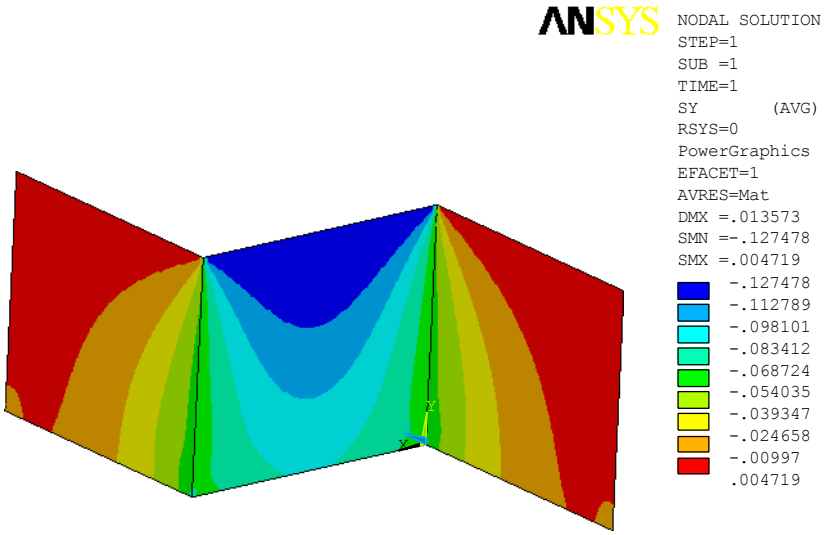


Figura 5.6 - Tensões verticais obtidas por macromodelagem

Os valores das tensões provenientes das duas técnicas foram próximos, conforme Tabela 5.2. Este fato assegura confiança no uso da técnica da homogeneização.

Tabela 5.2 – Resultados de tensões pela micromodelagem e homogeneização

Técnicas de Modelagem	**Tensões Máximas**	
	Compressão (N/mm²)	**Tração(N/mm²)**
Micromodelagem	0,004750	0,131132
Homogeneização (Ortotropia)	0,004719	0,135730
DiferençaPercentual	-0,65%	3,51%

5.2 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Os resultados foram avaliados por meio de tensões verticais normais em 3 pontos distintos do pavimento, na base das paredes 1, 2 e 3, conforme ilustra a Figura 5.7. O mesmo procedimento foi seguido para todos os pavimentos.

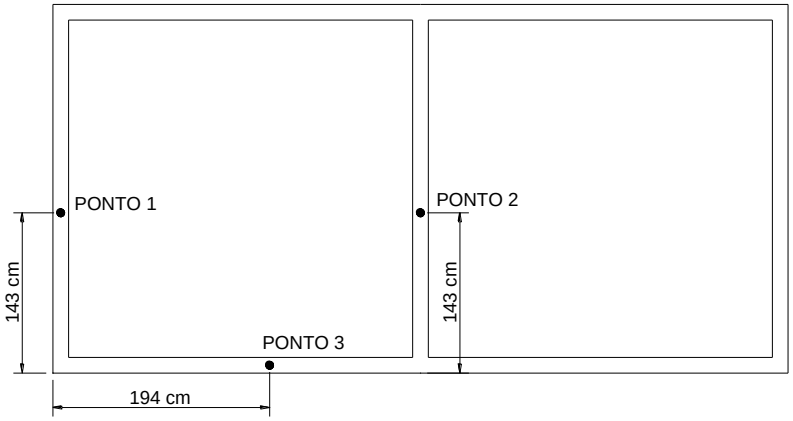


Figura 5.7 - Pontos de obtenção de tensões

A distribuição das tensões verticais, ocorre ao longo da altura dos 10 pavimentos, nos pontos 1, 2 e 3 . O gráfico da Figura 5.8 mostra a distribuição da tensão para o ponto 1, em duas situações distintas: a primeira sem presença de graute e a outra com grauteamento vertical nos encontros das paredes.

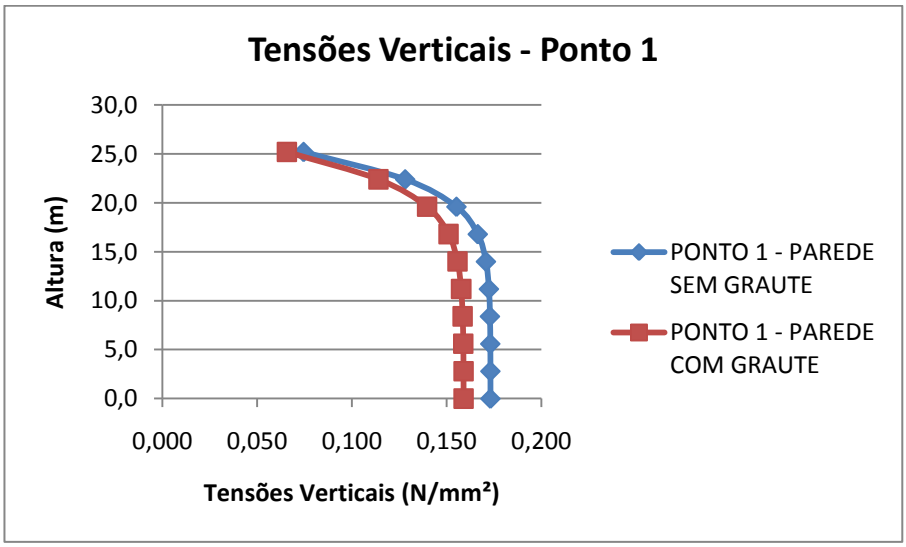


Figura 5.8 - Tensões verticais ao longo da altura do ponto 1

Verificou-se que a tensão da parede sem graute é maior em todos os pavimentos. A diferença é menor nos primeiros pavimentos, sendo em média de 8%, já nos últimos pavimentos aumenta para 11,5%.

Como pode ser visualizado nos gráficos das Figuras 5.8, 5.9 e 5.10. A partir de aproximadamente de 15 metros de altura as tensões tendem a um valor constante, tanto na parede sem graute como na que possui o graute.

A Figura 5.9 ilustra a distribuição de tensões do ponto 2 com os mesmos critérios usados para o ponto 1.

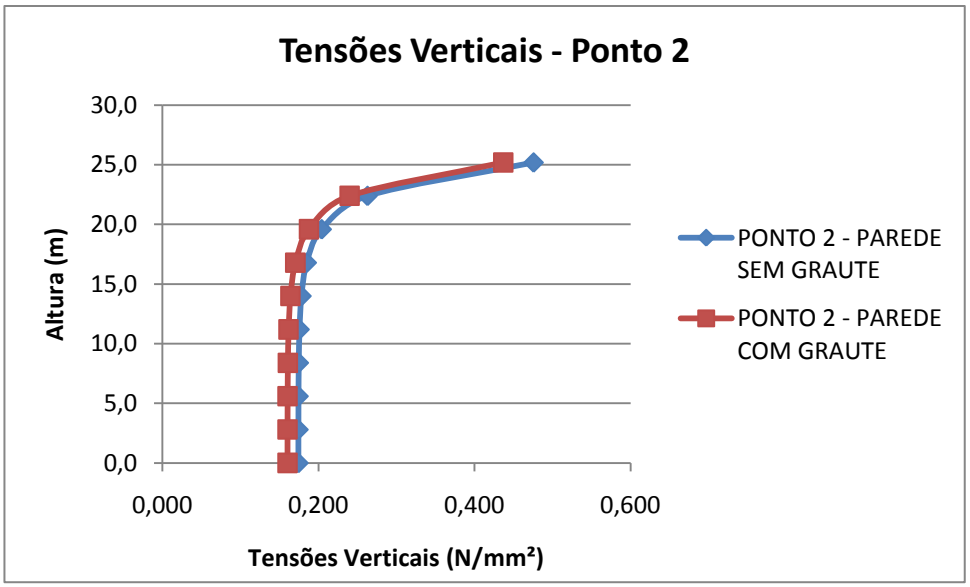


Figura 5.9 - Tensões verticais ao longo da altura do ponto 2

Observou-se que as tensões na parede grauteada, assim como ocorreu no ponto 1 foram menores. A diferença permaneceu quase constante em todos os pavimentos, numa média de 8% de diferença entre a parede com graute e sem graute.

As tensões do ponto 3 estão representadas no gráfico da Figura 5.10, usando-se os mesmos procedimentos para os pontos 1 e 2.

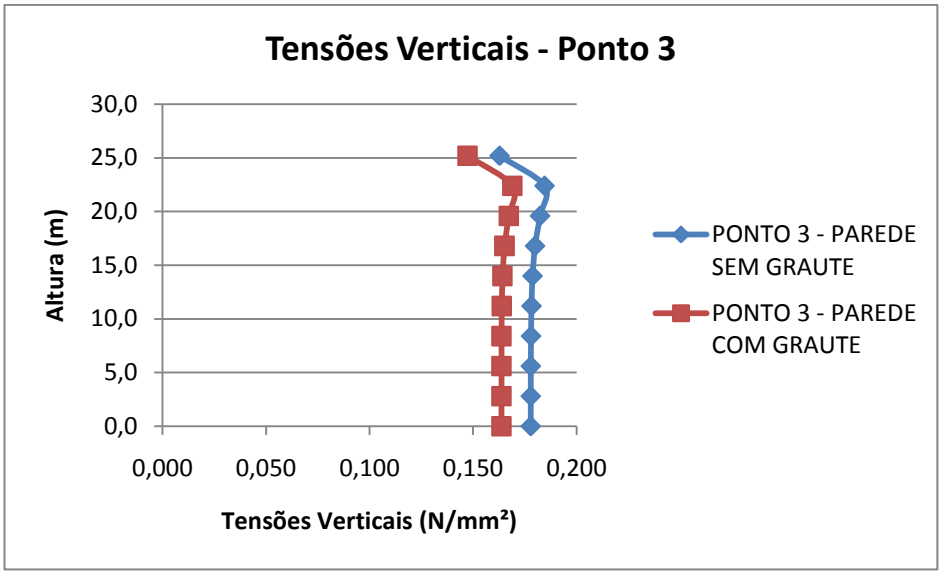


Figura 5.10 - Tensões ao longo da altura do ponto 3

As tensões para a parede com graute são também menores como ocorreu com os pontos 1 e 2, com uma diferença da ordem de 8 % .

O comportamento das tensões ao longo da altura de todos os pontos pode ser visto nos gráficos da Figura 5.11 e Figura 5.12. Percebe-se a tendência de uniformização das ações nos gráficos das paredes com graute e sem graute.

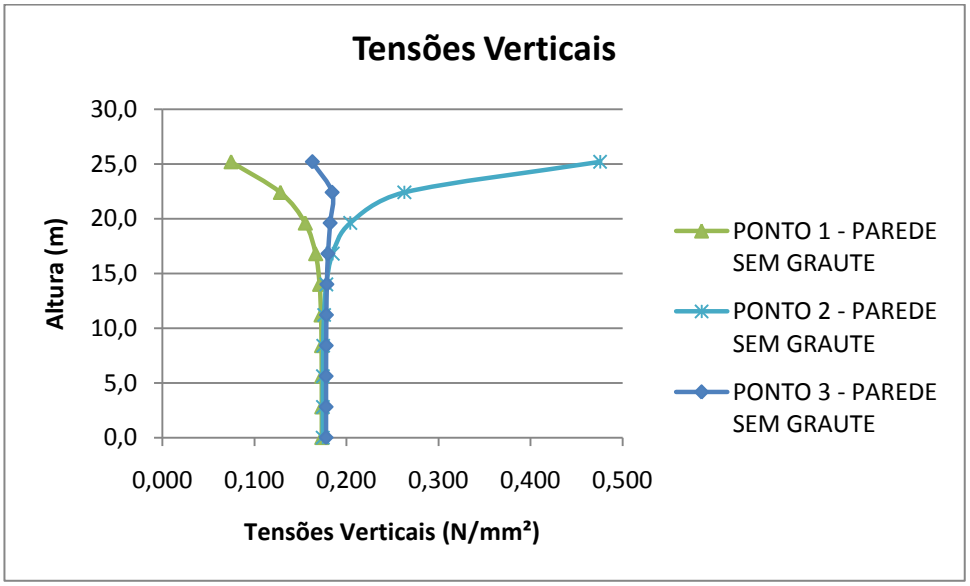


Figura 5.11 - Tensões nos pontos 1, 2 e 3 nas paredes sem graute ao longo da altura

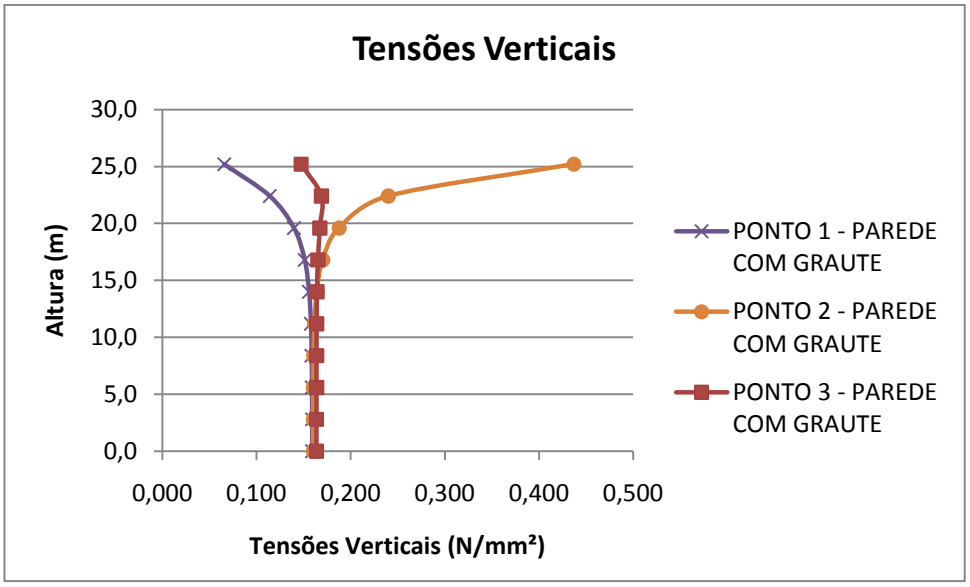


Figura 5.12 - Tensões nos pontos 1, 2 e 3 nas paredes com graute ao longo da altura

Comentários:

Há uma tendência de uniformização do carregamento nos dois casos, porém não existem evidências que o graute vertical influência na velocidade da uniformização das ações.

Da mesma maneira que ocorreu nos painéis, o grauteamento vertical fez diminuir a tensão nas paredes, medida nos pontos 1, 2 e 3. Certamente o graute seja um captador de ações como observado também nos painéis.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido focou os aspectos referentes à influência causada pelos segmentos grauteados comumente usados na alvenaria estrutural de blocos de concreto. O uso da ferramenta de modelagem computacional foi importante para esta investigação, pois um estudo experimental poderia ser dispendioso e de alta complexidade, diante das dimensões dos painéis de em escala real. Para fundamentar esta pesquisa, inicialmente foi levada a efeito uma ampla revisão bibliográfica nos diversos ramos dentro do contexto da pesquisa. Deste modo, foram estudados os seguintes temas: interação de paredes, grauteamento de paredes e análise numérica da alvenaria estrutural. Outro capítulo importante foi a definição dos painéis e as estratégias de modelagem. Esse último foi fundamental para a obtenção de respostas seguras.

Nos trechos grauteados foi utilizada uma estratégia de modelagem diferenciada das demais regiões dos painéis, ou seja, a unidade, a junta de argamassa e o graute foram tratados como único material, analogicamente às propriedades elásticas de materiais compósitos. Esse tratamento foi apoiado em duas modelos o de Reuss e o de Voigt. Os resultados provenientes dessa abordagem foram considerados satisfatórios, uma vez que ficaram muito próximos dos experimentais. A relação entre os resultados teóricos quando comparados aos experimentais variaram dentro de uma faixa de 0,8145 a 1,0754 para o trabalho de Logullo (2006) e de 0,8706 a 1,1218 para o trabalho Barbosa (2008).

Os parâmetros de modelagem adotados para os painéis mostraram-se aceitáveis, pois os valores obtidos na calibração do modelo numérico aproximaram-se dos experimentais considerados na pesquisa de Barbosa (2008) para o regime elástico linear. Para este caso é considerado regime elástico linear até o valor aproximado de 3,41 N/mm² de tensão de compressão como observado na Tabela 3.6 na miniparede PAR2 em Barbosa (2008). Verificou-se que os resultados oriundos da modelagem estão próximos aos experimentais para o limite de linearidade observada, não ultrapassando a 4,62% destes.

As tensões normais verticais obtidas da análise numérica dos painéis sem grauteamento apresentaram significativa diferença na distribuição quando comparadas com as tensões

obtidas de outras metodologias (parede isolada, grupo isolado de paredes, método de Parsekian e Franco (2002) e recomendação da NBR 10837 (ABNT, 1989). Essa constatação sugere que para o dimensionamento da alvenaria estrutural, deverá adotar o método dos elementos.

O grauteamento vertical induziu reduções das tensões verticais nas paredes dos painéis de todas as séries, sendo que na parede central a influência foi mais significativa, chegando a uma redução de 25% em relação a mesma parede sem grauteamento no painel 4P5G da série 3. Dessa análise, sugere-se interpretar que o grauteamento possa estar sistematicamente absorvendo uma parcela do carregamento vertical. A maior diferença encontrada para a região analisada, considerando grauteada e não grauteada foi de 146,2 % (3P1G). Há evidências de que um aumento na quantidade de furos grauteados e o número de paredes que encontram nestas regiões aumentam o percentual absorvido.

Quando investigou-se os efeitos do graute horizontal através das cintas intermediária e superior, observou-se que a sua influência é praticamente imperceptível, como mostram os resultados da análise numérica. Evidencia-se a observação feita por Capuzzo Neto (2000), quando avaliou as conseqüências causada pelas cinta em painéis "H". Ficou claro para a citada referência que a mesma não interfere na transmissão de cargas entre as paredes. A NBR 10837 (ABNT, 1989) apenas cita que a função principal das cintas é de amarração.

Uma edificação com projeto simplificado de 10 pavimentos foi analisada com o intuito de avaliar os efeitos do grauteamento vertical. A macromodelagem usada nesta análise originou valores de tensões máximas de tração e compressão aceitáveis, ou seja, a diferença encontrada em relação a micromodelagem foi de -0,65% para a tensão de compressão e de 3,51% para a tensão de tração. De acordo com os gráficos de tensões verticais dos pontos 1, 2 e 3, há uma evidência de uniformização das tensões a partir de aproximadamente 15 metros de altura com relação à base. Esse valor está coerente com o estudo de Corrêa e Page (2001), e posteriormente investigado por Capuzzo Neto (2005), que considera que a altura necessária para que haja uniformização corresponde a duas vezes o valor do diâmetro que circunscreve o pavimento em planta. No caso desta pesquisa o valor encontrado é de 14,78 metros. Tanto para a estrutura com o grauteamento como para estrutura sem o grauteamento, a igualdade das tensões como observado nos gráficos ocorre próximo dos 15 m. Em resumo, pode-se constatar que o grauteamento vertical em edifícios de pavimentos múltiplos não altera a velocidade de uniformização, porém altera o valor da tensão vertical uniformizada.

O grauteamento vertical evidencia uma redução nos valores das tensões verticais nas paredes da estrutura de múltiplos pavimentos, como ilustram os gráficos dos pontos 1, 2 e 3. A maior diferença observada foi de 10,2% no ponto 1 (parede 1) do último pavimento e a menor diferença também no ponto 1 (parede 1) do primeiro pavimento. Considerando as paredes sem grauteamento, a redução média com a introdução do graute em todos os pontos monitorados foi de 6,5%.

Sugere-se, para dar continuidade ao tema, a investigação de painéis grauteados e a avaliação da influência do grauteamento na distribuição do carregamento nos estágios mais avançados da não-linearidade. Outro estudo complementar se refere ao tratamento experimental em escala reduzida de painéis com grauteamento vertical, com intuito de confrontar ou validar os estudos numéricos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCETI, K. M. **Contribuição ao projeto estrutural de edifícios em alvenaria**. São Carlos: EESC. 1998.247p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

ALI, S. S., PAGE, A. W. Finite element model for masanry subjected to concentrated loads**. Journal of Structural Engineering**, 1988. v 114, [s.l], n. 8, p. 1761–1784, 1988.

AMERICAN INSTITUTE CONCRETE.ACI 530-92. **Buiding code requeriments for masonry structures**.Detroit. Michigan, 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10837 - Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto**.20p. Rio de Janeiro. ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 8798**: **Execução e controle de obras em alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto**. 15p. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

AUTRALIAN STANDARD. **AS 3700 – Masonry structures.** 2. ed. Homebush, Australia, 1998.

BARBOSA, C.S.. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte**. Dissertação (Mestrado). 153 p - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

BARBOSA, C.S.. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto, prismas e paredes e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte**. Tese (Doutorado). 262 p - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

BARRETO, A. S. P. **Análise Numérica de Painéis de Alvenaria Estrutural Utilizando Técnica de Homogeneização** Recife, 2002. 148p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION - BS 5628: **Structural use of unreinforced masonry**, 1978. London, Part 1.

CAMACHO, J. S.; RAMALHO, M. A.; ANDOLFATO, R. P. **An experimental study of the interaction among walls submitted to vertical loads**. , 2001. v. 1, p. 95-104. Proceedings of the 6th Australasian Masonry Conference, Adelaide: Griffith, 2001.

CAPUZZO NETO, V. **Estudo Teórico e Experimental da Interação de Paredes de Alvenaria Estrutural Submetidas a Ações Verticais** . 2000.111 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

CAPUZZO NETO, V. **Interação de paredes em alvenaria estrutural cerâmica sob ações verticais**. 2005.334 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CORRÊA,M.R.S; PAGE A.W. **The Interaction of load-bearing masonry walls subjected to vertical load**: Research Report.Nº 218.12.2001.61p Callaghan: The University of Newcastle,2001.

CUNHA, E. H. **Análise experimental do comportamento de prismas grauteados em alvenaria estrutural**. 2001. 150p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001.

GARCIA, P. D. **Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos**. 2000. 173 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GOMES, I. R. **Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface**.2001.160 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GOMES, N.S. **A resistência das paredes de alvenaria**. 1983. 190p.. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.

GONÇALVES JÚNIOR, L. A. **Avaliação de incertezas em modelo de dano com aplicação a prismas de alvenaria sob compressão**. 2008. 195 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GROHMANN, L.Z. **Análise do comportamento de prismas grauteados de alvenaria estrutural cerâmica.** 2006.160p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. Suggested failure criteria for grouted masonry under axial compressive. **American Concrete Institute Journal**, [s.l], p. 1047- 1061, 1979

HENDRY, A.W. Structural Brickwork. **The Macmillan Press Ltd**, Londres,. 1981.

JUSTE, A.E. **Estudo da Resistência e da Deformabilidade da Alvenaria de Blocos de Concreto Submetidos a Esforços de Compressão**. 2001. 237 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LEÃO, C.T. **Resistência de prismas de blocos estruturais cerâmicos submetidos a esforços de compressão e tração na flexão**. 2008. 188 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LOGULLO, B. G. **Influência do Graute e da Taxa de Armadura no Comportamento da Alvenaria de Blocos de Concreto**. 2006. 192 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira ,Universidade Paulista, Ilha Solteira, 2006.

LOURENÇO, P. B. **Computational Strategies for Masonry Structures**. 1996. 210p. Tese (Doutorado) - Delft University of Technology, Netherlands, 1996.

LOURENÇO, P. B; ZUCCHINI. A. Um modelo com micro-estrutura para a homogeneização de alvenaria. **Métodos Numéricos en Ingeniería V, SEMNI,** España, 12p, 2002.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2.ed. São Paulo: IBRACON, 2008, 674p.

PAGE, A.W. Finite element model for masonry. **Journal of the Structural Division, ASCE**, [s.l], v 104, p. 1267–1285, 1978.

PANDE, G.N.; LIANG, J.X.: MIDDLETON, J. Equivalent Elastic Moduli for Brick Masonry. **Computers and Geotechincs**, [s.l], v.8, p.243-265, 1989.

PARSEKIAN, G.A. e FRANCO, L.S. Método para distribuição de esforços verticas entre paredes de edifícios de Alvenaria Estrutural. **Revista TECHNE**, São Paulo, Ed. PINI, v. 61, p. 48-53, 2002.

PELETEIRO, S.C.. **Contribuição a Modelagem Numérica de Alvenaria Estrutural.** 2002. 143 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: Editora PINI, , 2003, 174p.

ROTS, J.G. Smeread and discrete representations of localized fracture. **International Journal of Fracture**, [s.l], v51, p.45-59, 1991.

SINHA, B.P.; HENDRY.A.W. Compressive strength of axially loaded brick walls stiffened along their vertical edges. In: 5 th INTERNATIONAL BRICK MASONRY CONFERENCE WASHINGTON, **USA, 05-10 Oct. 1979.Proceedings** Washington, Brick Institute of America, 1979, p.254-261.

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

ANEXO A – CÁLCULO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAL EQUIVALENTE DE PANDE *et al*. (1989)

Cálculo das Propriedades Ortotropicas do Material Equivalente de Pande *et al.* (1989)

Dados do Bloco

h = 190 mm (altura)

l = 390 mm (comprimento)

t_b = 140 mm (espessura)

ν_b = 0,20 (coeficiente de Poisson)

E_b = 22447 N/mm^2 (Módulo de elasticidade)

- Cálculo do módulo de elasticidade transversal do bloco

$$G_b = \frac{E_b}{2(1+\nu_b)} \Longrightarrow G_b = 9.352{,}9\ \mathrm{N/mm^2}$$

Dados da Argamassa

t_{bj} = 10 mm (espessura da junta horizontal)

t_{bh} = 10 mm (espessura da junta vertical)

E_{bj} = 17553 N/mm² (módulo de elasticidade horizontal)

E_{bh} = 17553 N/mm² (módulo de elasticidade vertical)

ν_{bj} = 0,15 (coeficiente de Poisson horizontal)

ν_{bh} = 0,15 (coeficiente de Poisson vertical)

- Cálculo do módulo de elasticidade transversal da argamassa

$$G_{bj} = \frac{E_{bj}}{2(1+\nu_{bj})} \Longrightarrow G_{bj} = 7.631{,}70\ \mathrm{N/mm^2}\ (\text{ horizontal })$$

$G_{bh} = \frac{E_{bh}}{2(1+\nu_{bh})} \Longrightarrow G_{bh} = 7.631{,}79\ \mathrm{N/mm^2}$ (vertical)

- Calculo da fração do volume do bloco

$$\mu_b = \frac{h}{h + t_{bj}} \Longrightarrow \mu_b = 0{,}95$$

- Calculo da fração do volume da argamassa

$$\mu_{bj} = \frac{t_{bj}}{h + t_{bj}} \Longrightarrow \mu_{bj} = 0{,}05$$

- Calculo dos Coeficientes α, ζ, χ (obs.: o índice "b" representa o bloco e o índice "bj" representa a junta horizontal da argamassa)

$$\alpha = \frac{\mu_b E_b (1-\nu_{bj}^2) + \mu_{bj} E_{bj} (1-\nu_b^2)}{(1-\nu_b^2)(1-\nu_{bj}^2)} \Longrightarrow \alpha = 2{,}3111 \times 10^4$$

$$\zeta = \frac{\mu_b E_b \nu_b (1-\nu_{bj}^2) + \mu_{bj} E_{bj} \nu_{bj} (1-\nu_b^2)}{(1-\nu_b^2)(1-\nu_{bj}^2)} \Longrightarrow \zeta = 4{,}5773 \times 10^3$$

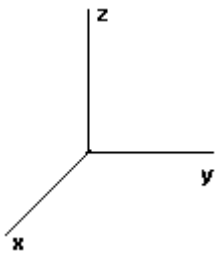
$$\chi_b = \frac{\mu_b}{1-\nu_b} \Longrightarrow \chi_b = 0{,}2375$$

$$\chi_{bj} = \frac{\mu_{bj}}{1-\nu_{bj}} \Longrightarrow \chi_{bj} = 0{,}0088$$

- Cálculo das Propriedades Ortotropicas de Cada Camada Homogeneizada

$$\nu`_{xz} = \frac{\zeta}{\alpha} \Longrightarrow \nu`_{xz} = 0{,}1981$$

$$\nu`_{xy} = \chi(1-\nu`_{xz}) \Longrightarrow \nu`_{xy} = 0{,}1975$$



$$\nu`_{zx} = \nu`_{xz} = 0{,}1981$$

$$\nu`_{zy} = \chi(1-\nu`_{zx}) \Longrightarrow \nu`_{zy} = 0{,}1975$$

$$\nu`_{yz} = \nu`_{zy} = 0{,}1975$$

$$E`_x = \alpha - \zeta.\nu`_{xz} \Longrightarrow E`_x = 2{,}2204 \times 10^4$$

$$E`_z = E`_x = 2{,}2204 \times 10^4$$

$$\frac{1}{E`_y} = \left[\frac{\mu_b}{E_b} + \frac{\mu_{bj}}{E_{bj}} + 2\chi_b\left(\frac{\nu`_{zy}}{E`_z} - \frac{\nu_b}{E_b}\right) + 2\chi_{bj}\left(\frac{\nu`_{zy}}{E`_z} - \frac{\nu_{bj}}{E_{bj}}\right)\right] \implies E`_y = 2{,}2139 \times 10^4$$

$$\frac{1}{G'_{yz}} = \frac{\mu_b}{G_b} + \frac{\mu_{bj}}{G_{bj}} \implies G`_{yz} = 9{,}2486 \times 10^3$$

$$G`_{xy} = G`_{yz} = 9{,}2486 \times 10^3$$

$$G'_{xz} = \mu_b G_b + \mu_{bj} G_{bj} \implies G'_{xz} = 9{,}2669 \times 10^3$$

$$\nu`_{yx} = \nu`_{xy}\frac{E`_y}{E`_x} \implies \nu`_{yx} = 0{,}1969$$

- Homogeneização para Camada de Material e Junta Perpendicular (obs.: o índice "eq" representa a camada de material e o índice "hj" representa a junta perpendicular)

$$\mu_{eq} = \frac{l}{l + t_{hj}} \implies \mu_{eq} = 0{,}975$$

$$\mu_{hj} = \frac{t_{hj}}{l + t_{hj}} \implies \mu_{hj} = 0{,}025$$

- Calculo dos Coeficientes α_1, β_1, ζ_1, χ_1, λ (obs.: o índice "eq" representa a camada de material e o índice "hj" representa a junta perpendicular)

$$\alpha_1 = \frac{\mu_{eq} E'_y}{1 - \nu'_{yz}\nu'_{zy}} + \frac{\mu_{hj} E_{hj}}{1 - \nu_{hj}^2} \implies \alpha_1 = 2{,}2910 \times 10^4$$

$$\beta_1 = \frac{\mu_{eq} E'_z}{1 - \nu'_{yz}\nu'_{zy}} + \frac{\mu_{hj} E_{hj}\nu_{hj}}{1 - \nu_{hj}^2} \implies \beta_1 = 2{,}2977 \times 10^4$$

$$\zeta_1 = \frac{\mu_{eq}\nu'_{yz}E'_z}{1 - \nu'_{yz}\nu'_{zy}} + \frac{\mu_{hj} E_{hj}\nu_{hj}}{1 - \nu_{hj}^2} \implies \zeta_1 = 4{,}5166 \times 10^3$$

$$\chi_{eq} = \frac{\mu_{eq}(\nu'_{zx} + \nu'_{yx}\nu'_{zy})}{1 - \nu'_{yz}\nu'_{zy}} \implies \chi_1 = 0{,}2404$$

$$\lambda_{eq} = \frac{\mu_{eq}(\nu'_{yx} + \nu'_{yz}\nu'_{zx})}{1 - \nu'_{yz}\nu'_{zy}} \implies \lambda_{eq} = 0{,}2395$$

$$\chi_{hj} = \frac{\mu_{hj}\nu_{hj}}{1 - \nu_{hj}} \implies \chi_{hj} = 0{,}0044$$

$$\chi_{l} = \chi_{eq} + \chi_{hj} \implies \chi_{l} = 0{,}2448$$

$$\lambda_{hj} = \frac{\mu_{hj}\nu_{hj}}{1 - \nu_{hj}} \implies \lambda_{hj} = 0{,}0044$$

$$\lambda_{l} = \lambda_{eq} + \lambda_{hj} \implies \lambda_{l} = 0{,}2439$$

- Propriedades Ortotropicas do Material Equivalente

$$\nu_{xy} = \lambda - \zeta_1 \frac{\chi_l}{\beta_1} \implies \nu_{xy} = 0{,}1958$$

$$\nu_{yz} = \frac{\zeta_l}{\beta_1} \implies \nu_{yz} = 0{,}1966$$

$$\nu_{zx} = \upsilon_{xz} = \chi_l - \zeta_1 \frac{\lambda}{\alpha_1} \implies \nu_{zx} = 0{,}1967$$

$$\nu_{zy} = \frac{\zeta_l}{\alpha_1} \implies \nu_{zy} = 0{,}1971$$

$$E_y = \frac{\alpha_1\beta_1 - \zeta_1^2}{\beta_1} \implies E_y = 2{,}2023 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

$$E_z = \frac{\alpha_1\beta_1 - \zeta_1^2}{\alpha_1} \implies E_z = 2{,}2086 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{1}{E_x} = \left[\frac{\mu_{eq}}{E'_x} + \frac{\mu_{hj}}{E_{hj}} + \lambda_{eq}\left(\frac{\nu_{yx}}{E_y} - \frac{\nu'_{xy}}{E'_x}\right) + \lambda_{hj}\left(\frac{\nu_{yx}}{E_y} - \frac{\nu_{hj}}{E_{hj}}\right) + \chi_1\left(\frac{\nu_{zx}}{E_z} - \frac{\nu'_{xz}}{E'_x}\right) + \chi_{hj}\left(\frac{\nu_{zx}}{E_z} - \frac{\nu_{hj}}{E_{hj}}\right)\right]$$

$$\implies E_x = 2{,}2059 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{\mu_{eq}}{G'_{xy}} + \frac{\mu_{hj}}{G_{hj}} \implies G_{xy} = 9{,}1999 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{yz} = \mu_{eq} G'_{yz} + \mu_{hj} G_{hj} \implies G_{yz} = 9{,}2082 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{1}{G_{xz}} = \frac{\mu_{eq}}{G'_{xz}} + \frac{\mu_{hj}}{G_{hj}} \implies G_{xz} = 9{,}2175 \times 10^3 \ \mathrm{N/mm^2}$$

ANEXO B –MÓDULOS DE ELASTICIDADES DE PRISMAS

Cálculo dos Módulos de Elasticidade de Prisma Vazios e Grauteados pela Expressão Teórica.

- Cálculo do Módulos de Elasticidade Referente aos Prismas do Trabalho de Logullo (2006)

Dados dos Blocos B1 e B2

h_b = 190 mm (altura)

E_{b1} = 13728 N/mm^2 (Módulo de elasticidade do bloco B1)

E_{b2} = 23410 N/mm^2 (Módulo de elasticidade do bloco B2)

A_{b1} = 22777mm² (Área líquida do bloco B1)

A_{b2} = 28948 mm² (Área líquida do bloco B2)

Dados da Argamassa

h_a = 10 mm (altura da junta de argamassa)

$f_a = 6{,}77\ N/mm^2 (\ tensão\ de\ ruptura)$

$E_a = f_a^{0,66}$ (Expressão para obtenção do módulo de elasticidade – Barbosa (2008))

E_a = 7494 N/mm^2 (Módulo de elasticidade)

Dados dos Grautes G1 e G2

E_{g1} = 24281 N/mm^2 (Módulo de elasticidade do graute G1)

E_{g1} = 29345 N/mm^2 (Módulo de elasticidade do graute G2)

A_{g1} = 17823 mm² (Área graute p/ o bloco B1)

A_{g2} = 11652 mm² (Área graute p/ o bloco B2)

- Cálculo do Módulo de Elasticidade para os Prismas Vazios B1 e B2

$h_p = h_b + h_a \implies h_p = 200$ mm (altura do conjunto bloco e argamassa)

$$\frac{h_p}{E_p} = \frac{h_a}{E_a} + \frac{h_b}{E_b} \therefore \frac{200}{E_p} = \frac{10}{7494} + \frac{190}{13728} \implies E_p = 13180\ \text{N/mm}^2 \text{(Prisma B1)}$$

$$\frac{h_p}{E_p} = \frac{h_a}{E_a} + \frac{h_b}{E_b} \therefore \frac{200}{E_p} = \frac{10}{7494} + \frac{190}{23410} \implies E_p = 21163\ \text{N/mm}^2 \text{(Prisma B2)}$$

- Cálculo do Módulo de Elasticidade para os Prismas Grauteados B1G1, B1G2, B2G1 e B2G2.

$A_p = A_b \implies A_{p1} = 22777\ \text{mm}^2$ e $A_{p2} = 28948\ \text{mm}^2$

$$E_n = \frac{E_g A_g + E_p A_p}{A_g + A_p}$$

Para o Prisma B1G1

$$E_n = \frac{24281\text{x}17823 + 13180\text{x}22777}{17823 + 22777} = 18053\ \text{N/mm}^2$$

Para o Prisma B1G2

$$E_n = \frac{29345\text{x}17823 + 13180\text{x}22777}{17823 + 22777} = 20276\ \text{N/mm}^2$$

Para o Prisma B2G1

$$E_n = \frac{24281\text{x}11652 + 21163\text{x}28948}{11652 + 28948} = 22056\ \text{N/mm}^2$$

Para o Prisma B2G2

$$E_n = \frac{29345x11632 + 21163x28968}{11632 + 28968} = 23507\ N/mm^2$$

Módulos de Elasticidade Referente aos Prismas Vazios do Trabalho de Barbosa (2008)

Dados dos Blocos e Argamassa

Grupo	Módulo de Elast. da Argamassa (N/mm²)	Módulo de Elastasticidade do Bloco (N/mm²)
P1	8121	17449
P2	9745	20595
P3	13195	22175
P4	16672	27104

h_b = 190 mm (altura do bloco)

h_a = 10 mm (altura da junta de argamassa)

$h_p = h_b + h_a \implies h_p = 200$ mm (altura do conjunto bloco e argamassa)

Para Prisma do Grupo P1

$$\frac{h_p}{E_p} = \frac{h_a}{E_a} + \frac{h_b}{E_b} \therefore \frac{200}{E_p} = \frac{10}{8121} + \frac{190}{17449} \implies E_p = 16501\ N/mm^2$$

Para Prisma do Grupo P2

$$\frac{h_p}{E_p} = \frac{h_a}{E_a} + \frac{h_b}{E_b} \therefore \frac{200}{E_p} = \frac{10}{9745} + \frac{190}{20595} \implies E_p = 19509\ N/mm^2$$

Para Prisma do Grupo P3

$$\frac{h_p}{E_p} = \frac{h_a}{E_a} + \frac{h_b}{E_b} \therefore \frac{200}{E_p} = \frac{10}{13195} + \frac{190}{22175} \implies E_p = 21445\ N/mm^2$$

Para Prisma do Grupo P4

$$\frac{h_p}{E_p} = \frac{h_a}{E_a} + \frac{h_b}{E_b} \therefore \frac{200}{E_p} = \frac{10}{16672} + \frac{190}{27104} \implies E_p = 26282\ N/mm^2$$

ANEXO C – TENSÕES NOS PONTOS DA ESTRUTURA

Tensões nos pontos 1, 2 e 3 nas paredes da estrutura de múltiplos pavimentos

Tabela 1 – Valores de tensões para os pontos 1, 2 e 3 da estrutura de múltiplo pavimentos.

Pavimento	Altura (m)	Ponto 1 - Parede 1		Ponto 2 - Parede 2		Ponto 3 - Parede 3	
		Tensões nas paredes sem graute (n/mm²)	Tensões em paredes com graute (n/mm²)	Tensões nas paredes sem graute (n/mm²)	Tensões em paredes com graute (n/mm²)	Tensões nas paredes sem graute (n/mm²)	Tensões em paredes com graute (n/mm²)
10	25.2	0.07453	0.06571	0.47567	0.43692	0.16285	0.14730
9	22.4	0.12811	0.11398	0.26281	0.23984	0.18452	0.16898
8	19.6	0.15517	0.13963	0.20411	0.18771	0.18234	0.16723
7	16.8	0.16642	0.15100	0.18496	0.17038	0.17993	0.16517
6	14.0	0.17072	0.15571	0.17819	0.16405	0.17874	0.16422
5	11.2	0.17229	0.15764	0.17571	0.16165	0.17822	0.16386
4	8.4	0.17283	0.15844	0.17478	0.16073	0.17800	0.16372
3	5.6	0.17302	0.15876	0.17443	0.16038	0.17790	0.16373
2	2.8	0.17308	0.15888	0.17432	0.16026	0.17787	0.16368
1	0.0	0.17309	0.15892	0.17429	0.16022	0.17786	0.16368

ANEXO D – FORÇAS RESULTANTES NOS PAINÉIS

Tabela 1 - Forças resultantes nos painéis da série 1 em Newton (N)

Paredes ou Regiões	Tipo de Painel		
	2P0G	**2P1G**	**2P3G**
Parede 1	6691,33	6358,58	4591,05
Parede 2	19520,11	16931,49	15264,36
Parede 3	6688,56	6356,18	4596,59
Região 1	-	1621,90	4222,72
Região 2	-	1631,91	4225,29

Tabela 2 - Forças resultantes nos painéis da série 2 em Newton (N)

Paredes ou Regiões	Tipo de Painel		
	3P0G	**3P1G**	**3P4G**
Parede 1	4.126,02	3720,18	3063,24
Parede 2	15.777,83	15026,26	12875,95
Parede 3	4.121,13	3718,47	3069,59
Parede 4	4.434,61	4001,64	3496,89
Parede 5	4.440,41	4008,67	3496,89
Região 1	-	1216,24	3450,99
Região 2	-	1208,56	3456,37

Tabela 3 - Forças resultantes nos painéis da série 3 em Newton (N)

Paredes ou Regiões	Tipo de Painel		
	4P0G	**4P1G**	**4P5G**
Parede 1	3018,54	2772,36	2530,68
Parede 2	14013,31	13673,58	9747,17
Parede 3	3014,72	2770,21	2528,87
Parede 4	3407,05	3228,83	2858,49
Parede 5	3413,14	3236,33	2852,24
Parede 6	3017,61	2810,92	2529,14
Parede 7	3015,61	2862,75	2530,41
Região 1	-	775,19	3660,08
Região 2	-	769,83	3662,92

Tensões Verticais Normais nas paredes dos painéis das séries 1, 2 e 3.

Tabela 4 - Tensões verticais normais na base das paredes 1 e 3 dos painéis da série 1

Distância	Tensões em N/mm²		
mm	Painel 1P0G	Painel 2P1G	Painel 2P3G
0	3.00E-02	2.83E-02	2.66E-02
340	9.60E-03	9.14E-03	8.59E-03
740	9.44E-03	9.01E-03	8.49E-03
1140	1.26E-02	1.20E-02	1.13E-02
1540	1.75E-02	1.67E-02	1.58E-02
1940	2.42E-02	2.31E-02	2.19E-02
2340	3.26E-02	3.14E-02	2.99E-02
2740	4.29E-02	4.18E-02	4.10E-02
2950	5.04E-02	4.96E-02	4.28E-02
3150	5.86E-02	5.89E-02	5.95E-02

Tabela 5 - Tensões verticais normais na base da parede 2 dos painéis da série 1

Distância	Tensões em N/mm²		
mm	Painel 1P0G	Painel 2P1G	Painel 2P3G
3630	6.81E-02	6.25E-02	5.37E-02
4030	7.59E-02	7.14E-02	6.44E-02
4430	8.20E-02	7.78E-02	7.16E-02
4830	8.48E-02	8.08E-02	7.49E-02
5230	8.40E-02	7.98E-02	7.39E-02
5630	7.95E-02	7.52E-02	6.87E-02
6030	7.22E-02	6.75E-02	5.99E-02
6240	6.75E-02	6.20E-02	5.32E-02

Tabela 6 - Tensões verticais normais na base das paredes 1 e 3 dos painéis da série 2

Distância	**Tensões em N/mm²**		
mm	**Painel 3P0G**	**Painel 3P1G**	**Painel 3P4G**
0	2.07E-02	2.02E-02	1.86E-02
340	6.50E-03	6.38E-03	5.86E-03
740	6.33E-03	6.24E-03	5.73E-03
1140	8.45E-03	8.32E-03	7.66E-03
1540	1.18E-02	1.16E-02	1.07E-02
1940	1.62E-02	1.60E-02	1.48E-02
2340	2.16E-02	2.13E-02	2.00E-02
2740	2.75E-02	2.75E-02	2.66E-02
2950	3.11E-02	2.80E-02	2.69E-02
3150	3.29E-02	3.46E-02	3.38E-02

Tabela 7 - Tensões verticais normais na base da parede 2 dos painéis da série 2

Distância	**Tensões em N/mm²**		
mm	**Painel 3P0G**	**Painel 3P1G**	**Painel 3P4G**
3690	5.07E-02	4.62E-02	4.04E-02
4090	6.27E-02	5.92E-02	5.42E-02
4490	7.06E-02	6.74E-02	6.29E-02
4890	7.42E-02	7.10E-02	6.67E-02
5290	7.31E-02	6.99E-02	6.55E-02
5690	6.74E-02	6.41E-02	5.94E-02
6090	5.75E-02	5.38E-02	4.85E-02
6300	5.03E-02	4.07E-02	4.00E-02

Tabela 8 - Tensões verticais normais na base das paredes 4 e 5 dos painéis da série 2

Distância	**Tensões em N/mm²**		
mm	**Painel 3P0G**	**Painel 3P1G**	**Painel 3P4G**
0	2.33E-02	2.30E-02	2.08E-02
340	5.95E-03	5.85E-03	5.12E-03
740	5.46E-03	5.35E-03	4.64E-03
1140	7.69E-03	7.56E-03	6.64E-03
1540	1.13E-02	1.12E-02	9.91E-03
1940	1.61E-02	1.59E-02	1.43E-02
2340	2.20E-02	2.18E-02	1.98E-02
2740	2.87E-02	2.87E-02	2.65E-02
3140	3.49E-02	3.58E-02	4.08E-02

Tabela 9 - Tensões verticais normais na base das paredes 1, 3, 6 e7 dos painéis da série 3

Distância	**Tensões em N/mm²**		
mm	**Painel 4P0G**	**Painel 4P1G**	**Painel 4P5G**
0	1.32E-02	1.32E-02	1.19E-02
340	4.85E-03	4.84E-03	4.39E-03
740	4.92E-03	4.92E-03	4.47E-03
1140	6.36E-03	6.35E-03	5.78E-03
1540	8.59E-03	8.59E-03	7.81E-03
1940	1.16E-02	1.16E-02	1.05E-02
2340	1.53E-02	1.53E-02	1.40E-02
2740	1.97E-02	1.99E-02	1.84E-02
2950	2.26E-02	2.05E-02	2.16E-02
3150	2.52E-02	2.65E-02	2.56E-02

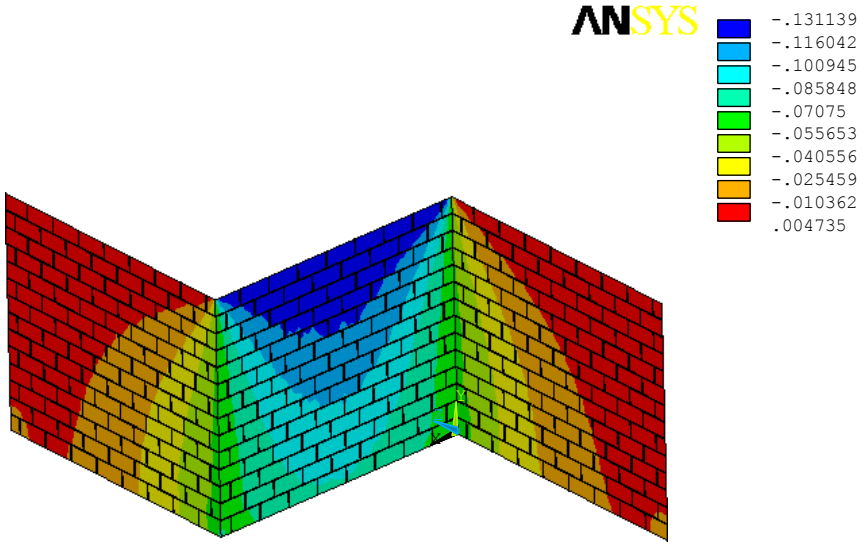
Tabela 10 - Tensões verticais normais na base das paredes 4 e 5 dos painéis da série 3

Distância	**Tensões em N/mm²**		
mm	**Painel 4P0G**	**Painel 4P1G**	**Painel 4P5G**
0	1.84E-02	1.84E-02	1.73E-02
340	4.33E-03	4.33E-03	3.95E-03
740	3.85E-03	3.85E-03	3.48E-03
1140	5.58E-03	5.58E-03	5.12E-03
1540	8.41E-03	8.43E-03	7.82E-03
1940	1.22E-02	1.22E-02	1.15E-02
2340	1.68E-02	1.69E-02	1.62E-02
2740	2.21E-02	2.23E-02	2.21E-02
3140	2.75E-02	2.82E-02	3.57E-02

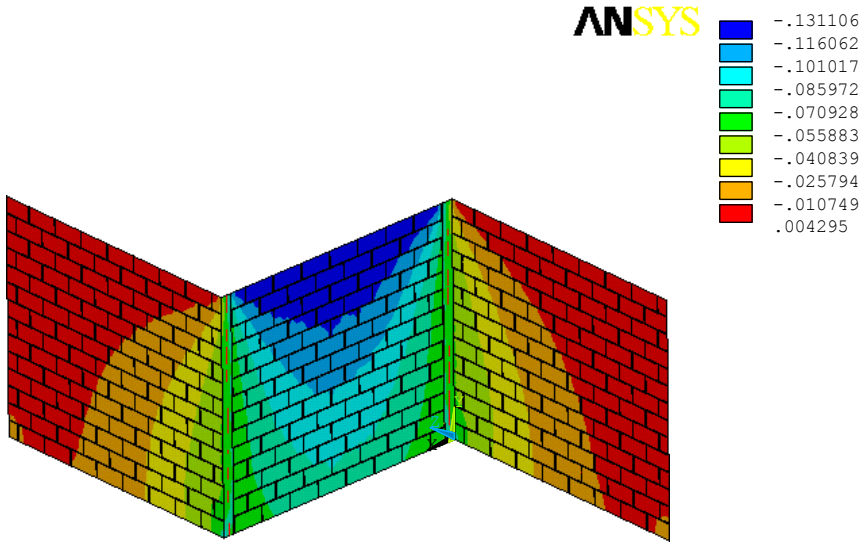
Tabela 11 - Tensões verticais normais na base da parede 2 dos painéis da série 3

Distância	**Tensões em N/mm²**		
mm	**Painel 4P0G**	**Painel 4P1G**	**Painel 4P5G**
3690	4.31E-02	3.85E-02	2.45E-02
4090	5.56E-02	5.21E-02	4.41E-02
4490	6.41E-02	6.09E-02	5.36E-02
4890	6.80E-02	6.49E-02	5.78E-02
5290	6.68E-02	6.37E-02	5.65E-02
5690	6.07E-02	5.74E-02	4.98E-02
6090	5.02E-02	4.64E-02	3.75E-02
6300	4.26E-02	3.38E-02	1.68E-02

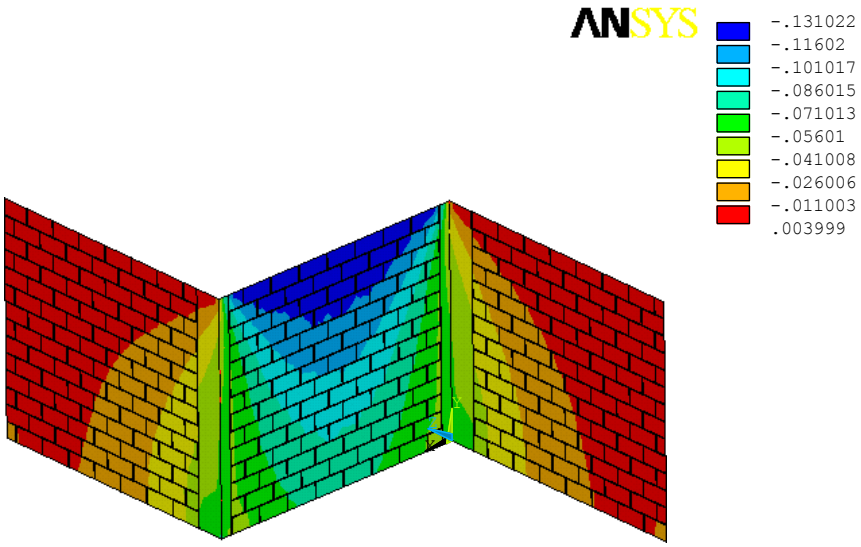
ANEXO E –TENSÕES DOS PAINÉIS



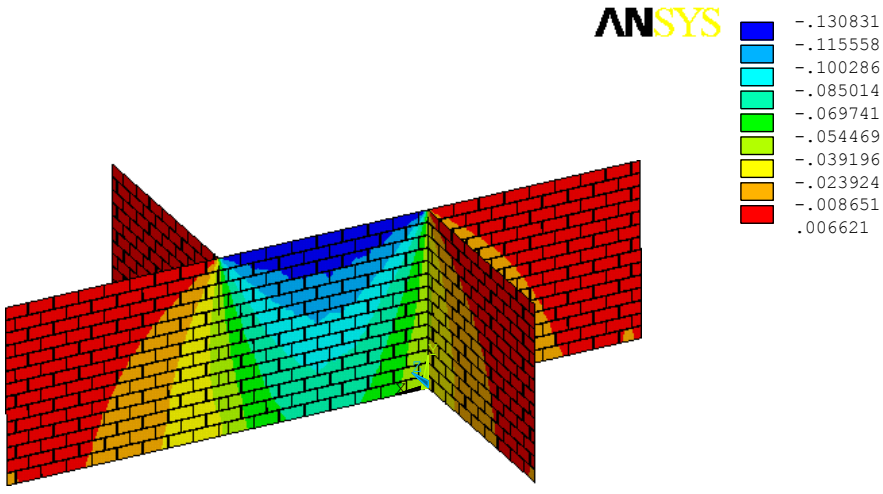
Tensões normais verticais - Painel 2P0G



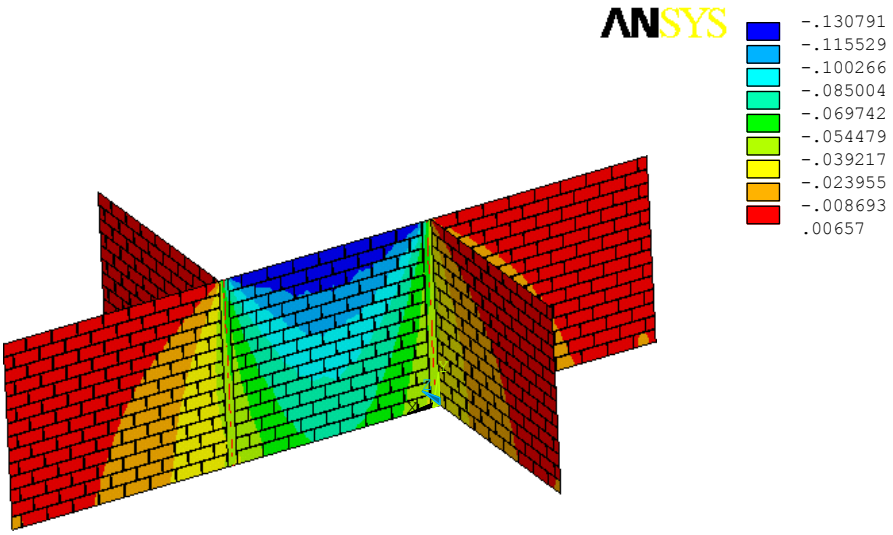
Tensões normais verticais - Painel 2P1G



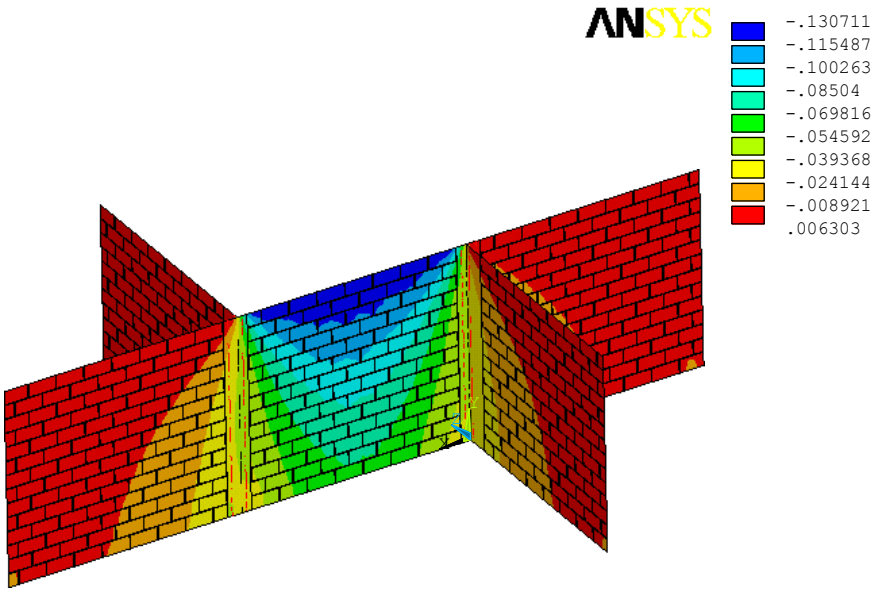
Tensões normais verticais - Painel 2P3G



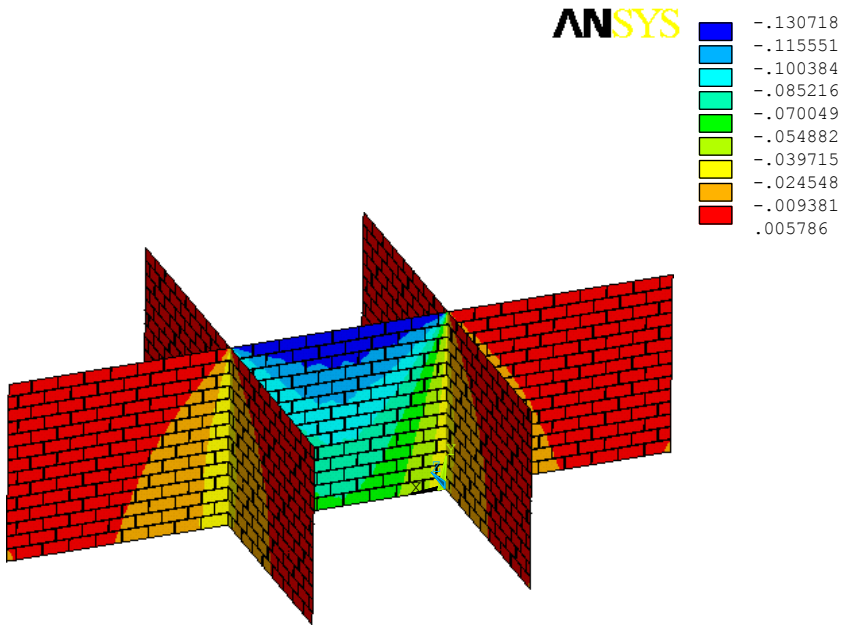
Tensões normais verticais - Painel 3P0G



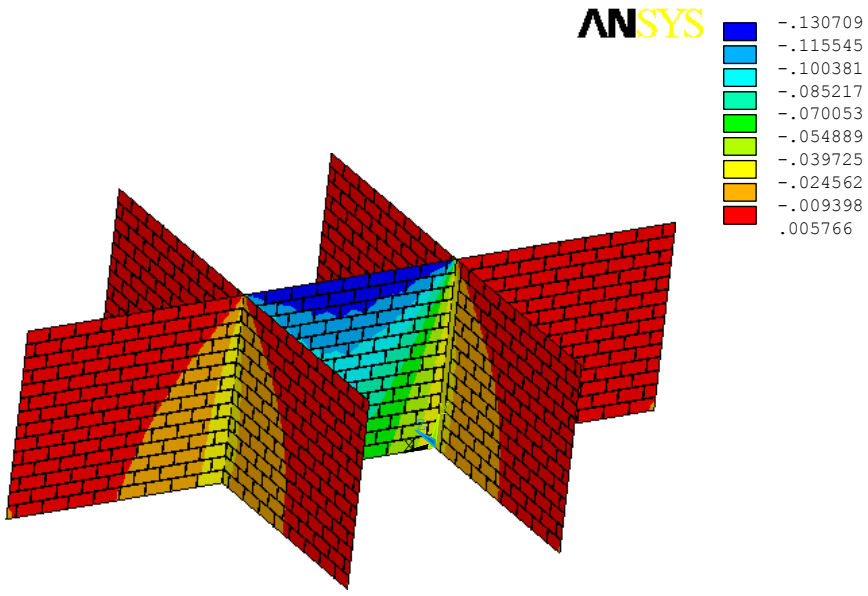
Tensões normais verticais - Painel 3P1G



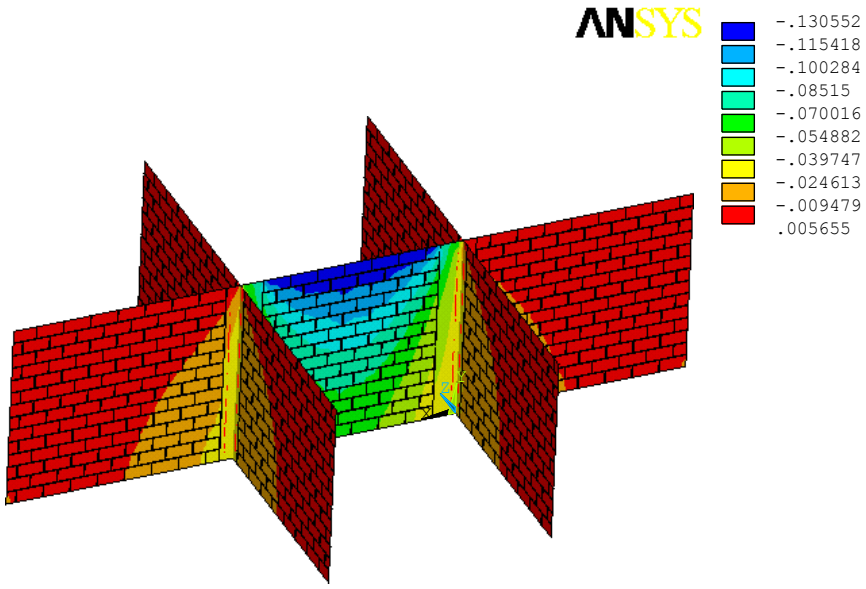
Tensões normais verticais - Painel 3P4G



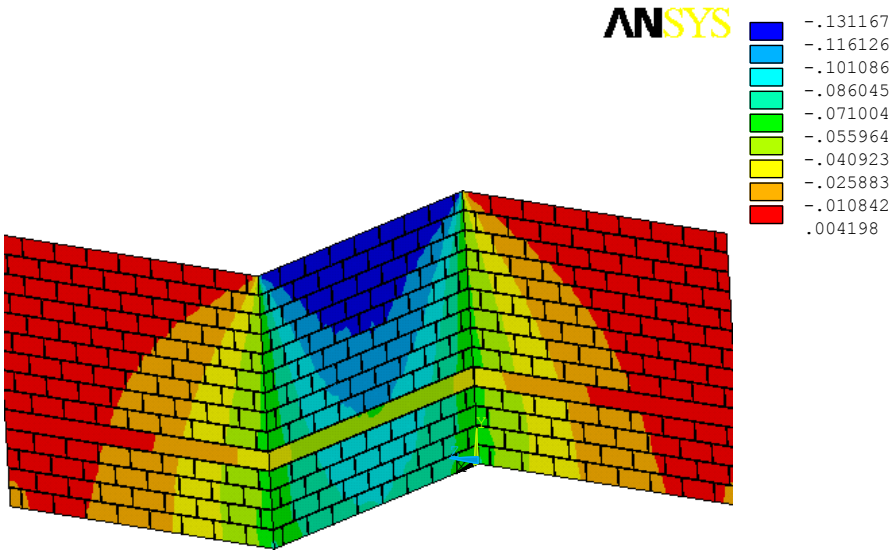
Tensões normais verticais - Painel 4P0G



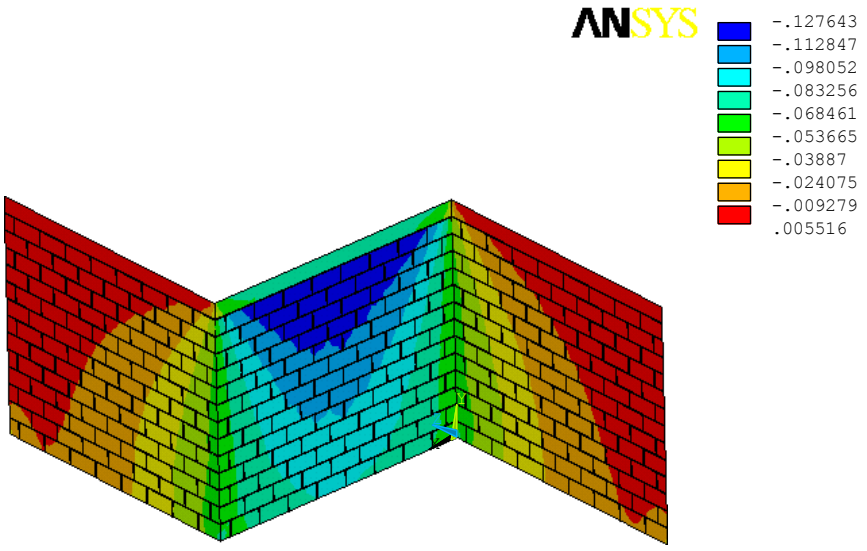
Tensões normais verticais - Painel 4P1G



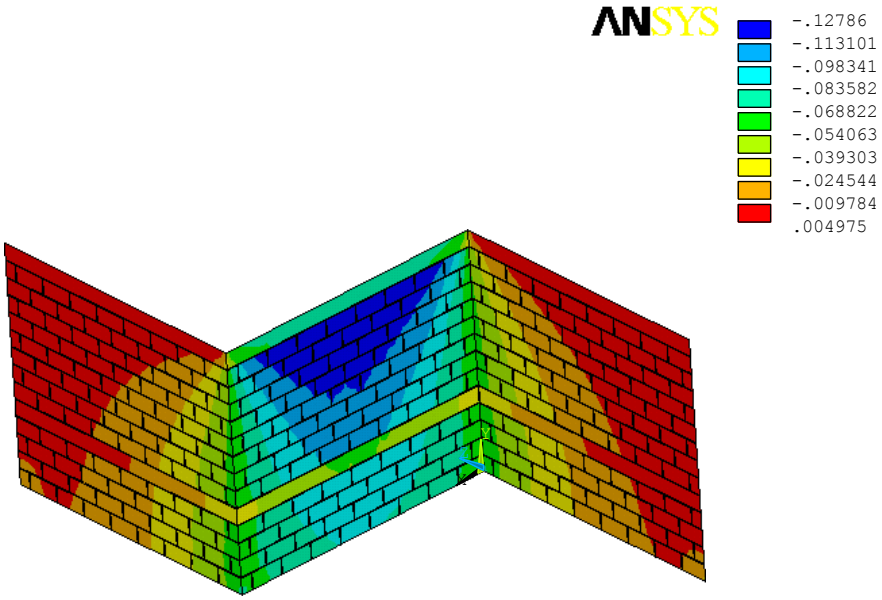
Tensões normais verticais - Painel 4P5G



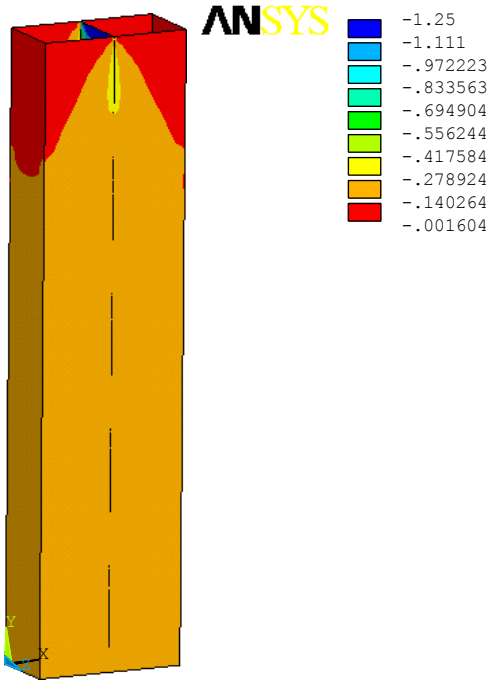
Tensões normais verticais - Painel 2P1H



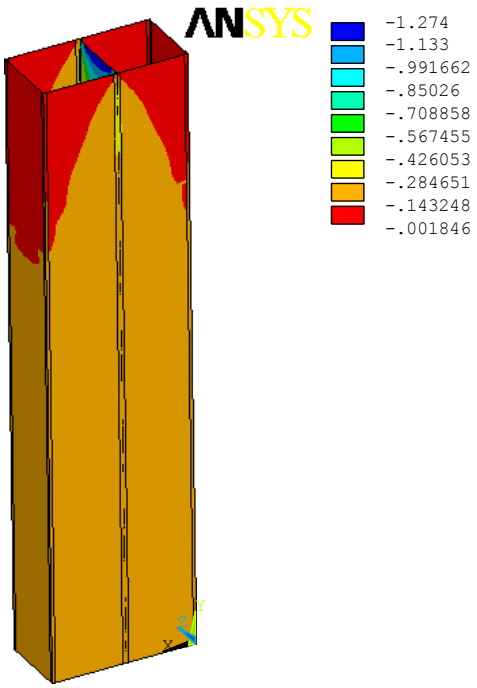
Tensões normais verticais - Painel 2P2H



Tensões normais verticais - Painel 2P3H



Tensões normais verticais na estrutura de múltiplos pavimentos sem graute



Tensões normais verticais na estrutura de múltiplos pavimentos com graute