

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL  
MODALIDADE ESTRUTURAS

**ANÁLISE NUMÉRICA DE PAINÉIS DE ALVENARIA  
ESTRUTURAL UTILIZANDO TÉCNICA DE  
HOMOGENEIZAÇÃO**

**por**

**ADRIANO SIEBRA PAES BARRETO**

Orientador: Prof. Romilde Almeida de Oliveira

**ANÁLISE NUMÉRICA DE PAINÉIS DE ALVENARIA  
ESTRUTURAL UTILIZANDO TÉCNICA DE  
HOMOGENEIZAÇÃO**

**Adriano Siebra Paes Barreto**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE “MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL”.

Aprovada por:

---

Orientador: Prof. Romilde Almeida de Oliveira, DSc  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. João Bento de Hanai, DSc  
Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

---

Prof. José Inácio de Souza Leão Ávila, DSc

Universidade Federal de Pernam

Barreto, Adriano Siebra Paes

Análise numérica de painéis de alvenaria estrutural utilizando técnica de homogeneização / Adriano Siebra Paes Barreto. – Recife : O Autor, 2002.

148 folhas: il., fig., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2002.

Inclui bibliografia e apêndices.

1. Engenharia Civil – Estruturas. 2. Estruturas (Engenharia Civil) – Painéis de alvenaria (Modelagem numérica). 3. Alvenaria – Técnicas de homogeneização. I. Título.

624.012:519.6 CDU (2.ed.) UFPE  
624.17 CDU (21.ed.) BC2002-363

Aos meus pais,  
Winston e Altina  
e irmãos  
Fernanda, Júnior, Jorge,  
Raquel e Diane

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que em todos os momentos de minha vida está presente, guiando-me com sua luz divina, dando-me força de vontade, perseverança e amor incontestável. Obrigado, Ó Pai, pelos benefícios que me tem concedido. Seria indigno se atribuisse esta minha vitória aos meus próprios esforços. Mais importante que o lugar que ocupa em mim é a intensidade de Sua presença em tudo o que faço.

Aos meus pais, símbolos de amor, ternura e família, por terem me dado base sólida de moral e apoio incondicional em todas as etapas de minha vida. Agradeço principalmente pela liberdade de pensar, de desejar, de querer e de optar. De não ser nada, mas de poder ter me tornado quem realmente sou.

Ao Prof. Romilde Almeida de Oliveira, pela dedicação, empenho, apoio e atenção dispensados na elaboração deste trabalho. Saiba que te considero fonte enriquecedora. Homem íntegro, profissional, culto e humano. Ensinaste-me não apenas a arte da engenharia, mas, através de teus exemplos, a arte de educar.

A CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior) pela bolsa de estudo concedida.

A UNICAP pela inteira disponibilização do Laboratório de Computação de Engenharia, o que me forneceu suporte laboratorial adequado ao desenvolvimento da pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Computação de Engenharia da UNICAP (Gustavo Melo, André Malta e Patrícia Farias), pela agradável convivência. Não esqueçam que terei agradecimento eterno pela ajuda inesgotável dispendida.

A Coordenação do mestrado, pela confiança e apoio no desenvolvimento da pesquisa.

A minha segunda mãe, Maria Madalena (Deda), por todo zelo, respeito e dedicação.

A minha noiva, Tatiana Catão, pela compreensão nas incansáveis horas de ausência, pelo carinho, atenção e amizade.

Ao professor Fernando Artur Nogueira, pelos conhecimentos transmitidos, pela sua disponibilidade e profissionalismo.

Ao professor Paulo José Chaves de Araújo e Silva (in memoriam). Deste-me apoio e incentivo na graduação para seguir adiante. Fostes, mas onde quer que estejas saiba que serei eternamente grato. Obrigado, Paulo Chaves.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Conceituação básica	2
1.2 Histórico	5
1.3 Objetivos do trabalho	13
1.4 Justificativas	14
1.5 Organização do trabalho	16
<b>2 CONCEITOS PRELIMINARES</b>	<b>18</b>
2.1 Análise dos principais materiais constituintes da alvenaria	29
2.1.1 Argamassas de assentamento	30
2.1.2 Unidades cerâmicas	34
2.1.3 Unidades de concreto	34
2.2 Evolução das normas de alvenaria estrutural	34
2.2.1 As normas brasileiras	36
2.2.2 Comparação das normas de argamassa de assentamento	37
2.2.2.1 Especificações inglesas	37
2.2.2.2 Especificações americanas	39
2.2.2.3 Especificações brasileiras	41
2.3 A escolha da argamassa	42
<b>3 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E AÇÕES ATUANTES</b>	<b>44</b>
3.1 Sistema estruturais	45
3.1.1 Sistema de paredes transversais	45
3.1.2 Sistema de paredes celulares	46
3.1.3 Sistema complexo	47
3.2 Ações atuantes	48

3.2.1 Cargas verticais	48
3.2.2 Cargas horizontais	48
3.3 Distribuição das ações verticais	49
3.3.1 Amarração entre paredes	50
3.3.2 Procedimentos de distribuição	51
3.3.2.1 Paredes isoladas	51
3.3.2.2 Grupos de paredes isolados	51
3.3.2.3 Grupos de paredes com interação	51
3.3.2.4 Modelagem em elementos finitos	52
3.4 Distribuição das ações horizontais	53
<b>4 MODELAGEM EFETUADA</b>	<b>56</b>
4.1. Pórtico equivalente	53
4.2. Ligações rígidas	57
4.3. Elementos finitos	58
4.3.1 Micromodelagem	59
4.3.2 Macromodelagem / Homogeneização	61
4.3.2.1 Propriedades do material equivalente considerando isotropia transversal	71
4.3.2.2 Propriedades do material equivalente considerando ortotropia	72
<b>5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO</b>	<b>75</b>
5.1 Exemplo 1	75
5.1.1 Resultados e Discussões	81
5.2 Exemplo 2	84
5.2.1 Resultados e discussões	85
5.3 Exemplo 3	88
5.3.1 Resolução numérica considerando-se a técnica de homogeneização	92
5.3.1.1 Características dos materiais empregados	92
5.3.2 Resultados e Discussões	94
<b>6 CONCLUSÕES</b>	<b>108</b>
<b>Apêndice A</b>	<b>111</b>
<b>Apêndice B</b>	<b>115</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>129</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Aplicação de unidades cerâmicas em parede de alvenaria	03
Figura 1.2 – Fotos ilustrativas de unidades de alvenaria: blocos (a) e tijolos (b)	04
Figura 1.3 – Construção de alvenaria em taipa de mão	06
Figura 1.4 – Catedral de São Pedro dos Clérigos (Recife-PE). Uso de cantaria	07
Figura 1.5 – Casarão n <sup>o</sup> 158 da Rua Benfica, com elementos originais de cantaria	07
Figura 1.6 – Rua do Bom Jesus – Recife Antigo	08
Figura 1.7 – Rua da Aurora	08
Figura 1.8 – Central Parque Lapa (1972)	09
Figura 1.9 – Pirâmide de Quéops no Egito	11
Figura 1.10 – Farol de Alexandria	11
Figura 1.11 – Catedral de Reims	12
Figura 1.12 – Edifício Monadnock	13
Figura 2.1 – Detalhe construtivo de alvenaria não armada	19
Figura 2.2 – Detalhe construtivo de um painel de alvenaria estrutural	19
Figura 2.3 – Detalhe de alvenaria estrutural armada que sofreu colapso	20
Figura 2.4 – Blocos vazados de concreto	24
Figura 2.5 – Edifício em alvenaria armada com blocos vazados de concreto	25
Figura 2.6 – Bloco cerâmico com furo na horizontal	27
Figura 2.7 – Bloco cerâmico com furo na vertical	27
Figura 2.8 – Edifício utilizando blocos cerâmicos	28
Figura 2.9 – Primeiro prédio construído com bloco sílico-cacáreo	29
Figura 3.1 – Sistema de paredes transversais	46
Figura 3.2 – Sistema de paredes celulares	47
Figura 3.3 – Sistema complexo	47
Figura 3.4 – Distribuição das ações do vento entre painéis de contraventamento	48
Figura 3.5 – Espalhamento de um carregamento concentrado ou parcialmente distribuído	49
Figura 3.6 – Espalhamento do carregamento em parede	50
Figura 3.7 – Modelo tridimensional para um painel de alvenaria	52

Figura 3.8 – Paredes de contraventamento	53
Figura 3.9 – Dimensão dos flanges, segundo a NB-1228	54
Figura 3.10 – Sistema de eixos no plano da laje	55
Figura 4.1 – Pórtico Plano Equivalente	57
Figura 4.2 – Ligações Rígidas	58
Figura 4.3 – Arranjo típico de uma parede de alvenaria	59
Figura 4.4 – Representação esquemática da micromodelagem	60
Figura 4.5 – Micromodelagem Detalhada	60
Figura 4.6 – Micromodelagem Simplificada	61
Figura 4.7 – Homogeneização	62
Figura 4.8 – Hipóteses de Homogeneização	63
Figura 4.9 – Sistema bloco-argamassa de camadas igualmente espaçadas	64
Figura 4.10 – Distorção do corpo devido às tensões de cisalhamento	65
Figura 4.11 – Sistema de Coordenadas usado no painel de alvenaria	66
Figura 4.12 – Estado de tensões nos constituintes da alvenaria devido a um carregamento vertical uniformemente distribuído	74
Figura 5.1 – Geometria da parede	76
Figura 5.2 – Elemento Plane 42	77
Figura 5.3 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem sem abertura	78
Figura 5.4 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem (ortotropia) sem abertura	78
Figura 5.5 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem (isotropia transversal) – sem abertura	79
Figura 5.6 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem com abertura	79
Figura 5.7 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem (ortotropia) com abertura	80
Figura 5.8 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem (isotropia transversal) – com abertura	80
Figura 5.9 – Detalhe dos elementos utilizados	83
Figura 5.10 – Geometria da Parede	84

Figura 5.11 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem – sem abertura	85
Figura 5.12 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de homogeneização – sem abertura	85
Figura 5.13 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem – com abertura	86
Figura 5.14 – Tensões Normais $\sigma_x$ , via técnica de homogeneização – com abertura	86
Figura 5.15 – Detalhes geométricos dos painéis estudados	90
Figura 5.16 – Planta do pavimento tipo, destacando os painéis analisados.	91
Figura 5.17 – Planta do pavimento tipo, contemplando os painéis analisados em 3D	92
Figura 5.18 – Element Solid 45	93
Figura 5.19 – Geometria tridimensional do painel 1	95
Figura 5.20 – Detalhe da malha utilizada e ações horizontais atuantes	95
Figura 5.21 – Distribuição das tensões na direção $S_y$ ( $t/m^2$ )	96
Figura 5.22 – Detalhe de elementos utilizados da zona de compressão	96
Figura 5.23 – Gráfico tensão x comprimento (painel 1)	98
Figura 5.24 – Geometria tridimensional do painel 2	99
Figura 5.25– Detalhe da malha utilizada e ações horizontais atuantes	99
Figura 5.26 – Distribuição das tensões na direção $S_y$ ( $t/m^2$ )	100
Figura 5.27 – Detalhe de elementos utilizados da zona de compressão	100
Figura 5.28 – Gráfico tensão x comprimento (painel 2)	102
Figura 5.29 – Geometria tridimensional do painel 3	103
Figura 5.30– Detalhe da malha utilizada e ações horizontais atuantes	103
Figura 5.31 – Distribuição das tensões na direção $S_y$ ( $t/m^2$ )	104
Figura 5.32 – Detalhe de elementos utilizados da zona de compressão	104
Figura 5.33 – Gráfico tensão x comprimento (painel 3)	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Classificação das unidades de alvenaria	03
Tabela 2.1 – Dimensões dos blocos de acordo com NBR 6136	23
Tabela 2.2 – Espessura mínima de paredes de blocos	23
Tabela 2.3 – Resistência à compressão de blocos estruturais comuns	26
Tabela 2.4 – Traços de argamassa recomendadas na Inglaterra (em volume)	38
Tabela 2.5 – Resistência das alvenarias à compressão na Inglaterra (MPa) BS 5628	38
Tabela 2.6 – Traços de argamassa recomendada pelas normas americanas (em volume)	39
Tabela 2.7 – Argamassas recomendadas	40
Tabela 2.8 – Resistência das alv. à compressão (MPa) pela norma americana ACI 531	41
Tabela 2.9 – Recomendações dos traços de argamassa – NBR 8798	41
Tabela 2.10 – Desempenho da argamassa, conforme NB7-8798	41
Tabela 5.1 – Propriedades elásticas dos componentes	76
Tabela 5.2 – Propriedades elásticas segundo a ortotropia	77
Tabela 5.3 – Propriedades elásticas segundo a isotropia transversal	77
Tabela 5.4 – Comparação entre resultados das técnicas de homogeneização e micromodelagem	79
Tabela 5.5 – Valores das tensões obtidas no bloco (a) e nas juntas horizontais (b)	83
Tabela 5.6 – Propriedades Elásticas	84
Tabela 5.7 – Comparação entre resultados das técnicas de micromodelagem e homogeneização	87
Tabela 5.8 – Valores de tensão nas fibras extremas do 1º pavimento, com as abas	88
Tabela 5.9 – Valores de tensão nas fibras extremas do 1º pavimento, sem as abas	88
Tabela 5.10 – Forças horizontais atuantes	89
Tabela 5.11 – Propriedades Elásticas dos Componentes	92
Tabela 5.12 – Propriedades Elásticas Ortotrópicas	93

Tabela 5.13 – Resultados obtidos via análise numérica para painel 1. (a) compressão e (b) tração	97
Tabela 5.14 – Resultados obtidos via análise numérica para painel 2. (a) compressão e (b) tração	101
Tabela 5.15 – Resultados obtidos via análise numérica para painel 3. (a) compressão e (b) tração	105
Tabela 5.16 – Resultados obtidos via análise numérica para painel 4 e 5	106
Tabela 5.17 – Resultados obtidos via análise numérica sem as abas	107

## LISTA DE SÍMBOLOS

$p'_1$	Espessura relativa da camada de bloco para um sistema bloco-argamassa
$p'_2$	Espessura relativa da camada de argamassa para um sistema bloco-argamassa
$t_1$	Espessura da camada de bloco
$t_2$	Espessura da camada de argamassa
$\varepsilon_x$	Deformação linear segundo o eixo x
$\varepsilon_y$	Deformação linear segundo o eixo y
$\varepsilon_z$	Deformação linear segundo o eixo z
$\sigma_x$	Tensão normal na direção do eixo x
$\sigma_y$	Tensão normal na direção do eixo y
$\sigma_z$	Tensão normal na direção do eixo z
$\gamma_{xy}$	Deformação angular no plano xy
$\gamma_{xz}$	Deformação angular no plano xz
$\gamma_{yz}$	Deformação angular no plano yx
$\tau_{xy}$	Tensão de cisalhamento na direção y, na face cuja normal é x
$\tau_{xz}$	Tensão de cisalhamento na direção z, na face cuja normal é x
$\tau_{yz}$	Tensão de cisalhamento na direção z, na face cuja normal é y
$E_x$	Módulo de elasticidade na direção x
$E_y$	Módulo de elasticidade na direção y
$E_z$	Módulo de elasticidade na direção z
$\nu_{xy}$	Coefficiente de Poisson no plano xy
$\nu_{xz}$	Coefficiente de Poisson no plano xy
$\nu_{yz}$	Coefficiente de Poisson no plano xy
$G_{xy}$	Módulo de elasticidade transversal no plano xy
$G_{xz}$	Módulo de elasticidade transversal no plano xz

$G_{yz}$	Módulo de elasticidade transversal no plano yz
$\bar{\sigma}_x$	Tensão normal na direção do eixo x do material homogeneizado
$\bar{\sigma}_y$	Tensão normal na direção do eixo y do material homogeneizado
$\bar{\sigma}_z$	Tensão normal na direção do eixo z do material homogeneizado
$\bar{\epsilon}_x$	Deformação linear segundo o eixo x do material homogeneizado
$\bar{\epsilon}_y$	Deformação linear segundo o eixo y do material homogeneizado
$\bar{\epsilon}_z$	Deformação linear segundo o eixo z do material homogeneizado
$\bar{\tau}_{xy}$	Tensão de cisalhamento na direção y, na face cuja normal é x, do material homogeneizado
$\bar{\tau}_{xz}$	Tensão de cisalhamento na direção z, na face cuja normal é x, do material homogeneizado
$\bar{\tau}_{yz}$	Tensão de cisalhamento na direção z, na face cuja normal é y, do material homogeneizado
$\bar{\gamma}_{xy}$	Deformação angular no plano xy do material homogeneizado
$\bar{\gamma}_{xz}$	Deformação angular no plano xz do material homogeneizado
$\bar{\gamma}_{yz}$	Deformação angular no plano yx do material homogeneizado
$U_{re}$	Energia de deformação prisma representativo
$U_e$	Energia de deformação do material equivalente
$A_{xi}$	Tensão normal auxiliar na direção do eixo x da iésima camada
$A_{yi}$	Tensão normal auxiliar na direção do eixo y da iésima camada
$A_{xyi}$	Tensão auxiliar de cisalhamento no plano xy da iésima camada
$e_{zi}$	Deformação auxiliar segundo o eixo z na iésima camada
$e_{xzi}$	Deformação auxiliar segundo o plano xz na iésima camada
$e_{yzi}$	Deformação auxiliar segundo o plano yz na iésima camada
$h_i$	Altura da iésima camada de bloco
$A$	Área da base do prisma
$L$	Comprimento do prisma

## RESUMO

BARRETO, A.S.P. (2002). **Análise Numérica de Painéis de Alvenaria Estrutural Utilizando Técnica de Homogeneização**. Recife, 2002. 132p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Através da modelagem numérica de alvenaria estrutural, empregando-se o método dos elementos finitos, consegue-se prever o comportamento mecânico dos painéis, entender melhor os mecanismos de transmissão de cargas e de falha, além de avaliar com mais precisão a segurança da estrutura. Desde que se conheçam as propriedades físicas e mecânicas dos materiais, obtidas a partir de ensaios laboratoriais, com o emprego deste método, pode-se efetuar verdadeiros experimentos numéricos que conduzem a resultados que anteriormente só seriam possíveis por via experimental.

Neste trabalho são efetuados estudos relativos à técnica de homogeneização, que emprega propriedades elásticas médias da estrutura, obtendo-se um sistema equivalente. Esta técnica se mostra adequada como eficiente ferramenta de projeto, competitiva em termos de simplicidade com os processos manuais. Utiliza princípios matemáticos consistentes e representa de maneira satisfatória o comportamento global do perfil de distribuição de tensões ao longo do painel submetido aos diversos tipos de ações.

Foram comparados os resultados obtidos com esta abordagem, utilizando modelos bi e tridimensionais, com processos manuais e com a técnica de micromodelagem, onde são discretizadas individualmente as unidades (blocos ou tijolos) e as juntas de argamassa integrantes do painel com elementos finitos que bem representem o seu comportamento.

As análises foram realizadas considerando-se o regime elástico linear e mostraram que a técnica da homogeneização conduz a resultados que oferecem excelente aproximação.

Palavras chaves: Homogeneização, Alvenaria Estrutural, Modelagem Numérica, Macromodelagem.

## ABSTRACT

BARRETO, A.S.P. (2002). **Numerical analysis of Structural Masonry Panels Using the Technique of Homogenization**. Recife, 2002. 132p. Dissertation (Master of Sciences). Federal University of Pernambuco (UFPE)

Through the numerical structural masonry modeling, using the finite elements method, it is possible to predict the mechanical behavior of the panels, to better understand the mechanisms of fails and load transmission, besides evaluating with more precision the safety of the structure. Since that the physical and mechanical properties of the materials, gotten from assays are known, with the use of this method, can be effected true numerical experiments that lead the results that would previously only be possible for saw experimental. In this work relative studies to the homogenization technique are effected, that uses average elastic properties of the structure, getting themselves a equivalent system. This technique if shows adequate as efficient tool of project, competitive in terms of simplicity with the manual processes. It uses consistent mathematical principles and it represents in satisfactory way the global behavior it profile of distribution of tensions to long it panel submitted to the diverse types of action. The results gotten with this boarding had been compared, models 2D and 3D, with manual processes and the technique of micromodeling, where the units (blocks or bricks) and mortar the integrant meetings of the panel with finite elements are discretized individually that represent its behavior well. The analyses had been carried through considering the linear elastic regimen and had shown that the technique of the homogenization leads the results that offer excellent approach.

Words keys: Homogenization, Structural Masonry, Numerical Modeling and Macromodilling.

# ***1***

## *INTRODUÇÃO*

---

---

Alvenaria estrutural é uma das técnicas construtivas mais antigas, utilizada como forma de construção em habitações, monumentos e templos religiosos e que tem, a nível nacional e internacional, larga utilização na indústria da construção civil. É um processo construtivo simples que não requer equipamentos sofisticados e que permite um elevado grau de racionalização construtiva

Este sistema construtivo tem demonstrado satisfatório desempenho nos mais variados tipos de obras, aliando alta produtividade, custos compatíveis e bom desempenho estrutural.

As vantagens econômicas proporcionadas, por si só, justificariam o sucesso atual da alvenaria estrutural, mas, aliado a estas, estão as características multifuncionais de sua utilização em edifícios.

Diferentemente das estruturas em concreto armado ou em aço que têm tão somente a função de prover a estabilidade à edificação, nas construções de paredes estruturais, além dessa função, as paredes têm concomitantemente o propósito de

vedação externa e interna, daí a alvenaria estrutural poder ser entendida como um sistema que atua simultaneamente como estrutura resistente e elemento de vedação.

As facilidades construtivas são diversas e se traduzem em vantagens econômicas devidas: (SABBATINI,1984).

- A aplicação de técnicas de execução simplificadas;
- A menor diversidade de materiais empregados;
- A eliminação de interferências, no cronograma executivo, entre os diversos subsistemas.

Entretanto, o desempenho da alvenaria estrutural é diretamente relacionado às propriedades dos materiais que a compõem e à maneira de como ela é executada, o que exige um controle de qualidade eficiente dos materiais empregados e do componente alvenaria como um todo.

Um outro fator condicionante à utilização de alvenaria estrutural, sobretudo em edifícios, é que o projeto arquitetônico é interdependente dos projetos complementares desta técnica construtiva.

## **1.1 Conceituação Básica**

Alvenaria estrutural é um sistema construtivo em que se permite efetuar um mapeamento das paredes (evitando desperdícios e otimizando os custos), um controle de qualidade individual e, especificamente, em que se permite a aplicação dos conceitos modernos de racionalização, predominantemente laminar e dimensionada por procedimentos de cálculo para suportar cargas além do peso próprio.(ARAUJO, et al, 1981)

Devido à dupla função, de vedação e resistência, que seus elementos (paredes) desempenham nas edificações, o sistema estrutural se confunde com o próprio processo construtivo.

De forma sintetizada, as unidades de alvenaria podem ser classificadas conforme Tabela 1.1:

<b>Unidades de Alvenaria</b>	Blocos	Cerâmicos De Concreto Sílico-Calcários	
	Tijolos	Maciços	Cerâmicos De Concreto Sílico-Calcários
		Furados	Cerâmicos

Tabela 1.1: Classificação das unidades de alvenaria.

Os tijolos diferenciam-se dos blocos pelas dimensões. São tijolos as unidades com dimensões máximas de 250x120x55mm. Segundo a NBR 7171, bloco é o componente de alvenaria que possui furos prismáticos e/ou cilíndricos perpendiculares às faces sobre as quais se apóiam. É considerado vazado se a área de vazios ultrapassa 25% da total. Em caso contrário, é considerado maciço. Em geral, para os blocos vazados, a porcentagem de vazios é da ordem de 50%. A Figura 1.1 ilustra a aplicação de tijolos maciços cerâmicos.

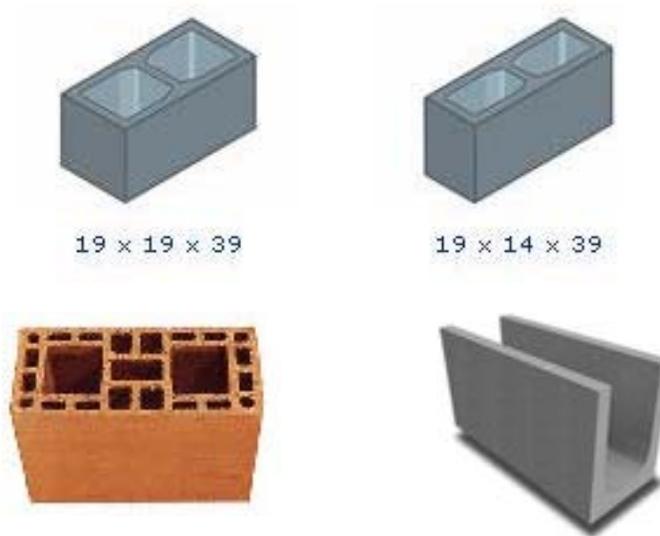


Figura 1.1 – Aplicação de unidades cerâmicas em parede de alvenaria.

(Wissembach,1990)

A Figura 1.2 mostra fotos ilustrativas de algumas unidades de alvenaria.

a)



b)

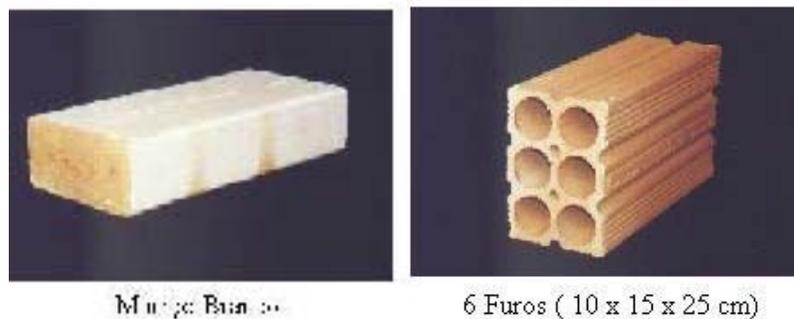


Figura 1.2 – Fotos ilustrativas de unidades de alvenaria: blocos (a) e tijolos (b).

(Ref. Site: [www.alvenaria.hpg.ig.com.br](http://www.alvenaria.hpg.ig.com.br))

A grande vantagem da utilização dos blocos é a possibilidade da aplicação dos princípios da coordenação modular, o que evita cortes e desperdício de materiais no canteiro de obras. Devido ao fato de serem ocos, permitem a passagem da tubulação hidráulica e elétrica. Estes vazios também podem ser preenchidos por micro concreto para a execução de cintas de amarração, vergas ou quando se deseja aumentar a resistência da alvenaria à compressão.

Os tijolos furados podem ser utilizados em alvenaria estrutural, entretanto não se aconselha o assentamento destes com os furos na horizontal pelo fato de se ter uma

ruptura brusca e pela forma progressiva de colapso, muito embora possam ser adotados meios para tornar a estrutura mais dúctil, como por exemplo com a colocação de cintas entre os pisos e as paredes.

## 1.2 Histórico

- **No Brasil:**

O passado revela como se avançou, embora morosamente, mas de acordo com o crescimento social e urbano, as fases de construções da história brasileira. Registra-se desde a utilização da taipa de pilão, pau-a-pique, a cantaria, alvenaria de tijolos, até as alvenarias estruturais com blocos industrializados.

A taipa de pilão consiste em comprimir a terra em formas de madeira, formando um caixão, onde o material a ser socado é disposto em camadas de 15 cm aproximadamente. Essas camadas reduzem-se à metade após o apiloamento. Quando a terra pilada atinge mais ou menos  $\frac{2}{3}$  da altura do taipal, são introduzidos, transversalmente, pequenos paus roliços envolvidos em folhas, produzindo orifícios cilíndricos denominados *cabodás* que permitem o ancoramento do taipal em nova posição (Ref. Site :[www.imoveisnordeste.com.br](http://www.imoveisnordeste.com.br)).

A taipa de mão ou pau-a-pique se caracteriza por uma trama de paus verticais e horizontais, eqüidistantes, e alternadamente dispostos. Essa trama é fixada verticalmente na estrutura do edifício e tem seus vãos preenchidos com barro atirado por duas pessoas simultaneamente uma de cada lado. A Figura 1.3 mostra uma habitação construída com este processo. Pode-se observar parte da trama usada com madeira entrelaçada



Figura 1.3 – Construção de alvenaria em taipa de mão.

(Wissembach,1990)

A Cantaria, entendida por pedra lavrada ou simplesmente aparelhada em formas geométricas para construção de edifícios e, em geral, para qualquer construção, difundiu-se entre nós. No seu uso, as rochas são cortadas segundo as regras da estereotomia, esta definida como "a arte de dividir e cortar com rigor os materiais de construção", a fim de serem aplicadas às diferentes partes do edifício, como constituição das paredes, bem como nas partes nobres do edifício, dando, assim, um toque de requinte e sofisticação no acabamento.

Exemplos diversos encontram-se, ainda, espalhados em todo o país e, especificamente no Recife, destaca-se a Catedral de São Pedro dos Clérigos, situada no pátio de São Pedro, bairro de São José, que é um autêntico exemplar da arte barroca setecentista. Sua construção foi iniciada em 1728 e concluída em 1759. A fachada é austera e apresenta construção em pedras de cantaria portuguesa onde se destaca sua porta principal em jacarandá (Figura 1.4).



Figura 1.4 – Catedral de São Pedro dos Clérigos (Recife-PE). Uso de Cantaria.

(Ref. Site: [www.terravista.pt/meiapraia/3157/igrejas.html](http://www.terravista.pt/meiapraia/3157/igrejas.html))

Diversas ruas do Recife conservam, também, ainda hoje algumas casas que surgiram no século XIX para residências de famílias abastadas e que representam o estilo neoclássico e um tanto afrancesado da época, conservando elementos originais de cantaria, Figura 1.5.



Figura 1.5 – Casarão n<sup>o</sup> 158 da Rua Benfica, com elementos originais de cantaria.

(Ref. Site: [www.cultura.pe.gov.br](http://www.cultura.pe.gov.br))

Tem-se o Recife Antigo e a Rua da Aurora como testemunho da utilização de alvenaria (Figuras 1.6 e 1.7), com seus sobrados de vários pavimentos onde residiram famílias importantes de Pernambuco e que se encontram tombados pelo IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). Trazido pelos portugueses, que herdaram dos árabes a tradição de construção com terra.



Figura 1.6 – Rua do Bom Jesus – Recife Antigo  
(Ref. Site: [www.frigoletto.com.br/Aulascampo/Recife0110](http://www.frigoletto.com.br/Aulascampo/Recife0110))



Figura 1.7 – Rua da Aurora  
(Ref. Site: [www.linksdeturismo.com.br/cidades/pe/recife.htm](http://www.linksdeturismo.com.br/cidades/pe/recife.htm))

Com a evolução das cidades, foram requeridas melhorias nas edificações urbanas e exigido um sentido estético mais compatível com as mudanças econômicas e políticas da sociedade.

Alguns historiadores assinalam que pelo menos até 1870 permaneceram os moldes coloniais tradicionais e, a partir desta data, começou uma apressada

transformação, sobretudo em 1875 com o Código de Posturas que proibia a construção de ranchos de palha, capim ou sapé (WISSEMBACH,1990). Abria-se, então, a possibilidade para o desenvolvimento do bloco de argila.

AZEREDO (1990) lembra que o tijolo foi concebido na dimensão exata da capacidade de trabalho manual do pedreiro. Em uma de suas mãos ele poderia segurar o tijolo e, na outra, a colher.

A largura do tijolo de barro cozido, ainda não industrializado, possuía a largura média da mão humana, ou seja, 15 cm.

Depois desses primórdios, o tijolo enraizou-se na tradição da construção brasileira.

Com o desenvolvimento da construção, ficou evidenciado que o tempo aplicado no assentamento, alinhamento e amarração era enorme e, por este motivo, evoluiu-se para o tijolo furado (20x20 cm), em cujo assentamento se ganha em termos de velocidade e de espaço construído. Daí progrediu-se posteriormente para o bloco de concreto que, entretanto, não excluiu o tijolo de barro cozido.

As primeiras experiências brasileiras com edifícios de vários pavimentos, teve início na década de 50 (pode ser citado o conjunto de São Carlos) e maior utilização a partir da década de 70.

Pode-se destacar o conjunto Central Parque Lapa (Figura 1.8) com quatro blocos de doze andares e o edifício Muriti, em São José dos Campos, de dezesseis andares.



Figura 1.8 – Central Parque Lapa (1972).  
(Ref. Site:www.revistaprisma.com.br)

Somente no final da década de 80 é apresentada a primeira norma brasileira para o cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto, a NB 10837 (1989).

Atualmente, no Brasil, o sistema construtivo em alvenaria estrutural tem experimentado um grande impulso. Devido à estabilização da economia, a concorrência tem feito com que um número crescente de empresas passe a se preocupar com os custos, acelerando as pesquisas e a utilização de novos materiais.

Com o avanço destas pesquisas, pode-se dizer que há, hoje, uma tendência para se utilizar, também, a alvenaria não armada de blocos de concreto. Isto se deve, principalmente, ao desenvolvimento de processos construtivos eficientes, conhecimento de métodos de cálculo que conduzem a melhores resultados, observações de ensaios e elaboração de normas. Sua utilização é mais indicada em edificações com até 12 pavimentos.

A utilização de alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto nas edificações é bastante equiparada sob diversos aspectos, inclusive no preço de mão de obra e produto. A escolha por um tipo ou outro é especificamente influenciada pela região, seus costumes e suas tradições, bem como pelas facilidades de matéria prima.

- **No Mundo:**

O uso da alvenaria pode ser datado antes mesmo da época dos Romanos, Mesopotâneos, Egípcios e Gregos. Desde a Antigüidade ela tem sido utilizada largamente pelo ser humano.

A pirâmide de Quéops no Egito (Figura 1.9), por exemplo, com 145 m de altura, onde foram utilizados aproximadamente dois milhões de blocos de pedra, é ainda uma das maiores estruturas construídas pelo homem.



Figura 1.9 – Pirâmide de Quéops no Egito  
(Ref. Site: [www.khemi.hpg.ig.com.br/khufu.html](http://www.khemi.hpg.ig.com.br/khufu.html))

Uma dos mais espetaculares e utilitários exemplos foi o farol de Alexandria. Construído em uma das ilhas do porto de Alexandria, servia de orientação aos navegadores do Mediterrâneo. Tinha 134 m de altura e foi destruído por um terremoto no século XIV (Figura 1.10)

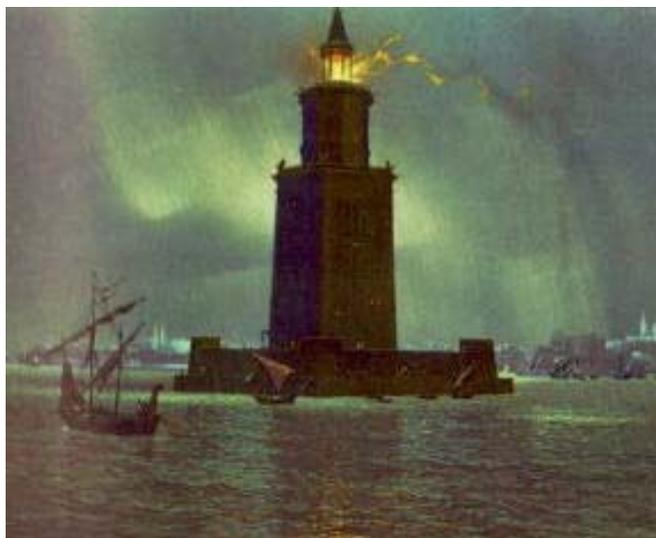


Figura 1.10 – Farol de Alexandria  
(Ref. Site: [www.historiaonline.pro.br/historia/7maravilhas.htm](http://www.historiaonline.pro.br/historia/7maravilhas.htm))

Como exemplos de construções com vãos expressivos e arquitetura belíssima, estão as grandes catedrais góticas, construídas na Idade Média, entre as quais ressalta-se a catedral de Reims (Figura 1.11). Esta demonstra a aprimorada técnica de se conseguir vãos relativamente grandes utilizando apenas estruturas comprimidas. Seu interior é amplo, com arcos que sustentam o teto apoiado em pilares esbeltos, que por sua vez são contraventados adequadamente por arcos externos.



Figura 1.11 – Catedral de Reims

(Ref. Site:[www.lasalle.org/Spanish/Mother/Resources/Iconog/icon89.html](http://www.lasalle.org/Spanish/Mother/Resources/Iconog/icon89.html))

Outro grande exemplo histórico é o edifício Monadnock, construído em Chicago de 1889 a 1891. Com 16 pavimentos e 65 m de altura foi considerado uma obra ousada, como se explorasse os limites dimensionais possíveis para edifícios de alvenaria (Figura 1.12). Entretanto, por causa dos métodos empíricos de dimensionamento empregados até então, as paredes na base têm 1,80 m de espessura.



Figura 1.12 – Edifício Monadnock

(Ref. Site: [www.bluffton.edu/~sullivanm/burnham/monadangle.jpg](http://www.bluffton.edu/~sullivanm/burnham/monadangle.jpg))

Apesar do uso intenso da alvenaria, apenas no início do século XX, por volta de 1920, passou-se a estudá-la com base em princípios científicos e experimentação laboratorial. Esta postura possibilitou o desenvolvimento de teorias racionais que fundamentam a arte de se projetar em alvenaria estrutural.

Segundo ACCETI (1998), na década de 50 a utilização da alvenaria ganhou novo impulso, após a realização de uma série de experimentos na Europa. Em 1951, Paul Hauler dimensionou e construiu na Suíça um edifício de 13 pavimentos em alvenaria não armada, com paredes internas de 15 cm de espessura e externas de 37,5 cm. Muitos edifícios foram construídos na Inglaterra, Alemanha e Suíça, e também nos Estados Unidos, onde a alvenaria estrutural passou a ser empregada mesmo em zonas sujeitas a abalos sísmicos, sendo neste caso utilizada a alvenaria armada.

### **1.3 Objetivos do Trabalho**

A alvenaria estrutural tem larga utilização na indústria da construção civil nacional e tem-se revelado, ao longo dos últimos anos, como uma importante alternativa tecnológica para a redução do déficit habitacional brasileiro.

Apesar, entretanto, da difundida utilização, as informações encontradas na literatura acerca do comportamento estrutural de paredes portantes submetidas a um dado carregamento são, na maioria das vezes, de origem experimental e, desta forma, a análise numérica se constitui um campo aberto a pesquisas.

Segundo OLIVEIRA & SILVA (2001-a), onde são efetuadas análises em painéis de alvenaria estrutural discretizando individualmente, com suas respectivas propriedades elásticas, os constituintes do painel, a modelagem numérica permite o estudo de diversos tipos de projetos que demandariam excessivos esforços e custos, se realizados por vias experimentais, e a sua utilização através das modernas ferramentas computacionais é recente e tem sido objeto de estudo de importantes centros de todo o mundo.

Diversas análises, inclusive, vêm sendo desenvolvidas no intuito de se formular um modelo numérico que bem represente as características peculiares à alvenaria, bem como forneça uma adequada interpretação dos mecanismos de sustentação das cargas e distribuição das tensões e deformações ao longo do painel da alvenaria.

#### **1.4 Justificativas**

Nos últimos anos, vários prédios executados em alvenaria resistente, entendida como processo empírico usado sem bases técnicas e científicas, vieram a ruir ou desabar no Estado de Pernambuco, especialmente nas cidades de Jaboatão dos Guararapes e Olinda, regiões metropolitanas do Recife.

Em seis anos, cinco edifícios de quatro pavimentos desabaram, deixando, inclusive, muitas vítimas fatais e feridas.

Estas construções, denominadas “prédio caixão” (onde o painel de alvenaria é executado um sobre o outro e é o responsável pela estabilidade da edificação, ou seja, destina-se a absorver o seu peso próprio e as cargas provenientes das lajes e ações externas) foram projetadas segundo regras empíricas e muitas vezes executadas apenas com a prática construtiva, onde elementos estruturais fundamentais foram sacrificados, relegando-se a segurança da estrutura. Um exemplo disto foi a não execução, durante o processo construtivo, das cintas, elementos de concreto armado que são usados com o

intuito de fornecer maior rigidez à estrutura, evitando o colapso brusco da edificação, em decorrência das ações solidárias do conjunto de paredes.

Os prédios sinistrados tinham algumas características comuns. No caso dos de blocos cerâmicos foram usados tijolos vazados de vedação com espessura média de 9 cm. Os edifícios que utilizaram blocos de concreto, tais como os construídos com blocos cerâmicos, foram executados com alvenaria de vedação, empregando blocos com 9 cm de espessura.

Na grande maioria dos casos, as fundações eram constituídas do denominado “caixão perdido”. Esta solução era composta de paredes singelas com alturas compatíveis às de um pavimento, assentadas sobre sapatas de concreto em forma de T invertido. O conjunto de paredes de fundação definia um porão em que o fundo era do terreno natural e a cobertura, da laje do pavimento térreo. Este porão abrigava parasitas, águas decorrentes das variações do lençol freático e dos efluentes dos esgotos, onde normalmente eram adotadas as soluções de valas de infiltração e sumidouros.

Dentre os casos mais recentes, pode-se citar o desabamento dos edifícios Aquarela e Ijuí em Jaboatão dos Guararapes, Enseada de Serrambi e Éricka, em Olinda.

O colapso, no caso do Aquarela e Enseada de Serrambi, foi consequência, entre outros, do fenômeno chamado EPU (Expansão por Umidade). A EPU é caracterizada pela expansão do material cerâmico, devido à constante variação do nível d'água do subsolo, ocasionando, ao longo do tempo, a perda de resistência e consequente degradação dos constituintes das alvenarias de fundação. Especificamente, adiciona-se o fato de que apenas 20% da Região Metropolitana do Recife é saneada e que boa parte dos esgotos não tratados infiltra-se no subsolo, contribuindo para a evolução do problema das alvenarias de fundação.

No caso do edifício Éricka, o colapso ocorreu devido a porosidade dos blocos: verificou-se o ataque dos íons livres de sulfatos aos blocos através das reações com os componentes do cimento, produzindo etringita, em concentrações maiores do que o normalmente encontrado, seguindo-se a lixiviação com perda de massa.

Sabe-se da existência de cerca de 6000 prédios construídos com esta metodologia e, considerando que se tem catalogado desabamentos ocorridos, chega-se a um índice deste tipo de acidente de 1/500, quando o recomendável internacionalmente é que seja de 1/100000. Estes números nos fornecem uma análise apurada da dimensão da

problemática enfrentada por toda a sociedade pernambucana e nos faz agir em favor de que novas catástrofes não venham se repetir.

Recentemente, a Caixa Econômica Federal aprovou documento em que faz exigências mínimas com respeito aos materiais empregados na alvenaria estrutural. A mais importante delas é a do uso de blocos estruturais de qualidade, produzidos por fábricas de produção controlada. Os blocos exigidos devem, necessariamente, ser assentados com os furos na posição vertical e com espessura mínima de 14cm.

Trata-se de um grande passo, uma vez que, na prática, exigirá a eliminação do uso de blocos de vedação, o que corresponde ao uso da alvenaria estrutural produzida dentro de padrões internacionais e que permitirá construções de maior número de pavimentos, resultando em um sistema construtivo capaz de competir com o concreto armado, dentro de sua faixa de emprego.

Restam medidas que disciplinem também o uso de projetos que não sejam financiados pela Caixa Econômica Federal. Neste caso, se faz necessário a intervenção do Poder Público com a implantação de dispositivos legais que permitam o mesmo ordenamento da atitude tomada pela Caixa Econômica.

Nesta mesma direção, coincidentemente, são dados os primeiros passos para a elaboração de uma norma de alvenaria de blocos cerâmicos, tendo a liderança da ANICER ( Associação Nacional da Indústria Cerâmica).

Ainda, é necessário um maior comprometimento entre os projetistas e construtores e, sobretudo, maior qualidade dos materiais que compõem a alvenaria estrutural, para que se possibilite o desenvolvimento deste processo construtivo de forma segura.

O tema Análise Numérica em Painéis de Alvenaria Estrutural foi escolhido já que, de acordo com os problemas ocorridos nos últimos tempos, ficou evidenciado que na sistemática local empregada não foram seguidos os princípios de tecnologia e que há a necessidade de se abordar alvenaria estrutural através de base científica.

## **1.5 Organização do Trabalho**

No capítulo 2 são enunciados os conceitos preliminares da alvenaria estrutural. É definida a sua classificação, segundo a NB 10837, os tipos de alvenarias encontradas

nas construções, desde a antiguidade até a atualidade, bem como as características das alvenarias de blocos de concreto, cerâmico e sílico-calcário.

No capítulo 3 são abordados os sistemas estruturais que mais se adequam ou que mais são empregados na alvenaria estrutural, as ações horizontais e verticais atuantes, a forma de distribuição destas ao longo da edificação e alguns dos procedimentos mais comuns que são adotados para tal distribuição.

No capítulo 4 é realizada uma descrição de alguns métodos de análise de paredes de alvenaria estrutural. Notadamente, evidencia-se, neste, a utilização do método dos elementos finitos como ferramenta eficaz para a análise numérica de painéis de alvenaria estrutural. Utilizando-se esta abordagem, são consideradas as técnicas da micromodelagem e macromodelagem. Nesta última, destaca-se a homogeneização, a qual é descrita detalhadamente, incluindo etapas e fundamentação matemática.

No capítulo 5 são mostrados os resultados de análises numéricas efetuadas com a técnica de homogeneização.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho.

# 2

## CONCEITOS PRELIMINARES

---

---

A alvenaria estrutural tem a seguinte classificação:

*1- Alvenaria Estrutural Não Armada (NBR 1228,1989)*

Aquela executada com blocos cerâmicos, de concreto e sílico-calcários. Esta contém armaduras apenas com finalidade construtiva ou de amarração, não sendo considerada na absorção dos esforços calculados (Figura 2.1).

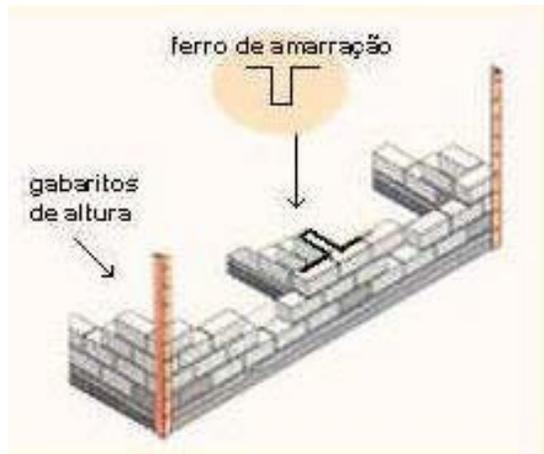


Figura 2.1 – Detalhe construtivo de alvenaria não armada. Neste, são utilizados armaduras sem função estrutural.  
(Ref. Site: [www.catep.com.br](http://www.catep.com.br))

## 2- Alvenaria Estrutural Armada (NBR 1228,1989)

Aquela executada com blocos vazados de concreto ou cerâmica, assentados com argamassa, contendo armaduras em certas cavidades e totalmente preenchidas com graute, destinadas a absorver os esforços calculados, além daquelas armaduras com finalidade construtiva ou de amarração (Figuras 2.2 e 2.3).

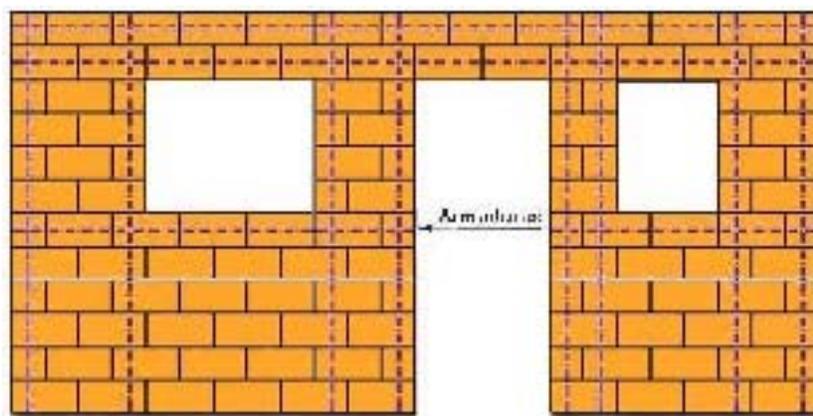


Figura 2.2 – Detalhe construtivo de um painel de alvenaria estrutural  
(Ref. Site: [www.alvenaria.hpg.ig.com.br](http://www.alvenaria.hpg.ig.com.br))



Figura 2.3 – Detalhe de alvenaria estrutural armada que sofreu colapso. Observe a presença de armaduras horizontais e verticais, estas preenchidas por graute.

(Ref. Site: [www.alvenaria.hpg.ig.com.br](http://www.alvenaria.hpg.ig.com.br))

### *3- Alvenaria Estrutural Parcialmente Armada (NBR 1228,1989)*

Aquela em que algumas paredes são executadas segundo as recomendações da alvenaria armada, ou seja, com armaduras que contribuam para a resistência da estrutura e o restante das paredes consideradas não armadas.

### *4- Alvenaria Estrutural Protendida*

Tem sido pouco empregada no Brasil. Neste tipo construtivo são introduzidos esforços de sinais contrários àqueles para o qual o elemento estrutural se destina resistir.

A região Metropolitana do Recife conta com algumas estruturas de cobertura construídas com sistema estrutural em cascas protendidas de alvenaria empregando blocos cerâmicos. São obras bastante ousadas e dignas de admiração pela beleza arquitetônica.

De forma geral, podemos classificar as alvenarias freqüentemente encontradas nas construções, desde a antigüidade até nossa atualidade, em duas grandes classes:

- a) Alvenarias não estruturais ou de vedação;
- b) Alvenarias estruturais ou portantes.

Dentre os tipos de alvenaria não estrutural, pode-se citar (MOLITERNO, 1995):

- Alvenaria de pedra arrumada: Utilizada preferencialmente em revestimentos de taludes de canais, cercas, aterros e ombreiras das barragens de terra, conhecidas pela designação de “rip-rap”;
- Alvenaria de tijolos vazados: Geralmente utilizada em paredes de vedação e divisórias (tijolos de 4,6 e 8 furos ou blocos de cerâmica extrudada). A utilização é justificada com a vantagem de reduzir o peso próprio da parede em relação aos tijolos maciços e como material isolante termo-acústico;
- Alvenaria de blocos de concreto leve: Utilizada como elemento de vedação;

Dentre os tipos de alvenaria estrutural, pode-se citar:

- Alvenaria de pedra argamassada: É muito empregada em muros de arrimo e pequenas barragens de gravidade;
- Alvenaria de tijolos maciços: É um tipo bem adequado, graças á facilidade de manuseio e por permitir travamentos e amarrações adequadas face as dimensões e peso destes tijolos.

Destacam-se, entretanto, os três seguintes tipos de alvenaria estrutural:

### 1) Alvenaria de blocos vazados de concreto

Apesar de que podem ser fabricados tijolos de concreto, os tipos de unidade mais comuns são os blocos. Estes podem ser produzidos em diferentes geometrias e com resistências a compressão variável, de acordo com o proporcionamento das matérias primas que o constitui.

Condições Gerais:

a) *Classificação*: Os blocos classificam-se em:

- Classe A: Destinados à execução de alvenarias externas e que não recebem nenhum tipo de revestimento;
- Classe B: Destinados à execução de alvenarias internas ou de alvenarias externas e que recebem de revestimento

b) *Materiais*: O concreto deve ser constituído de cimento Portland, agregados e água. Os cimentos devem ser normalizados e os agregados podem ser areia, pedrisco, argila expandida ou outros tipos, desde que satisfaçam às especificações próprias de cada um destes materiais. A dimensão máxima característica do agregado deve ser menor que  $\frac{1}{4}$  da menor espessura da parede do bloco.

Condições Específicas:

- a) São definidos blocos com duas larguras padronizadas, denominados M-15 e M-20, apresentados na Tabela 2.1.

Dimensão (cm)	Designação	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)
20	M-20	190	190	390
		190	190	190
		190	90	390
		190	90	190
15	M-15	140	190	390
		140	190	190
		140	90	390
		140	90	190

Tabela 2.1 – Dimensões dos blocos de acordo com NBR 6136

- b) A espessura mínima de quaisquer paredes dos blocos deve ser a indicada na Tabela 2.2.

Designação	Paredes Longitudinais (A) (mm)	Paredes Transversais	
		Paredes (A) (mm)	Espessura Equivalente (B) (mm)
M-15	25	25	188
M-20	32	25	188

Tabela 2.2 – Espessura mínima de paredes de blocos

(A)- Média das medidas de três blocos tomados no ponto mais estreitos (em mm).

(B)- Soma das espessuras de todas as paredes transversais do bloco (em mm), dividido pelo comprimento do bloco (em metros).

- c) Os blocos devem ser fabricados e curados por processos que assegurem a obtenção de um concreto suficientemente homogêneo e compacto e devem ser manipulados com as devidas precauções para não terem as suas qualidades prejudicadas.

- d) Os blocos devem ter aspecto homogêneo, compacto e arestas vivas. Não devem apresentar trincas, fraturas ou outros defeitos que possam prejudicar o seu assentamento ou afetar a resistência e durabilidade da construção.
- e) Os blocos destinados a receber revestimento devem ter uma superfície áspera para garantir uma boa aderência, não sendo permitida qualquer pintura que oculte defeitos eventualmente existentes no bloco.
- f) Os blocos destinados à execução de alvenarias externas (que não vão receber revestimento) não devem apresentar trincas, lascas ou pequenas imperfeições na face que fica exposta.

A seguir, na Figura 2.4, fotos ilustrativas de blocos vazados de concreto.

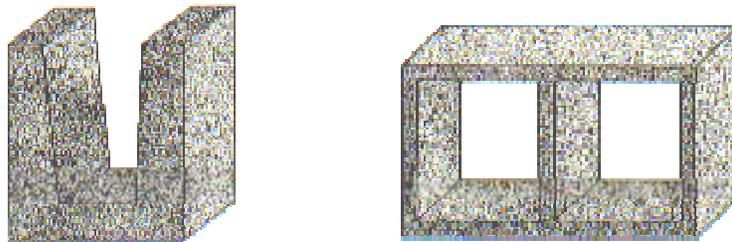


Figura 2.4 – Blocos vazados de concreto

(Ref. Site: [www.cdlnet.com.br](http://www.cdlnet.com.br))

A Figura 2.5 mostra edifício em alvenaria armada, com blocos vazados de concreto.



Figura 2.5 – Edifício em alvenaria armada com blocos vazados de concreto.

(Ref. Site:www.tatu.com.br)

## 2) Alvenaria de blocos cerâmicos

Condições Gerais:

- a) O bloco cerâmico é fabricado basicamente com argila, conformado por extensão e queimado a uma temperatura que permita ao produto final atender às condições especificadas na Norma NBR 7171 (1992),
- b) Para o uso em Alvenaria Estrutural, podem ser classificados em dois tipos:
  - Blocos Estruturais Comuns: São blocos de uso corrente, classificados conforme sua resistência à compressão, definida na Tabela 2.3.

<b>Classe</b>	<b>Resistência à Compressão na Área Bruta (Mpa)</b>
10	1,0
15	1,5
25	2,5
45	4,5
60	6,0
70	7,0
100	10,0

Tabela 2.3 – Resistência à Compressão de blocos estruturais comuns

- Blocos Estruturais Especiais: Aqueles que podem ser fabricados em formatos e dimensões especiais acordados entre as partes.

c) Os blocos estruturais comuns devem possuir a forma de um paralelepípedo, sendo suas dimensões a seguir definidas:

- Considera-se largura L a dimensão da menor aresta da face perpendicular aos furos;
- Considera-se altura H a dimensão da aresta paralela ao eixo dos furos;
- Considera-se comprimento a dimensão da maior aresta da face perpendicular aos furos.

As Figuras 2.6 e 2.7 mostram as dimensões dos blocos cerâmicos para alvenaria, conforme NBR 8042.

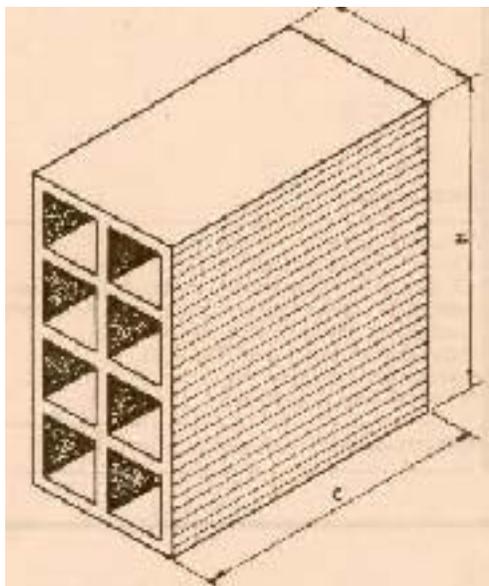


Figura 2.6 – Bloco cerâmico com furo na horizontal  
(NBR 8042)

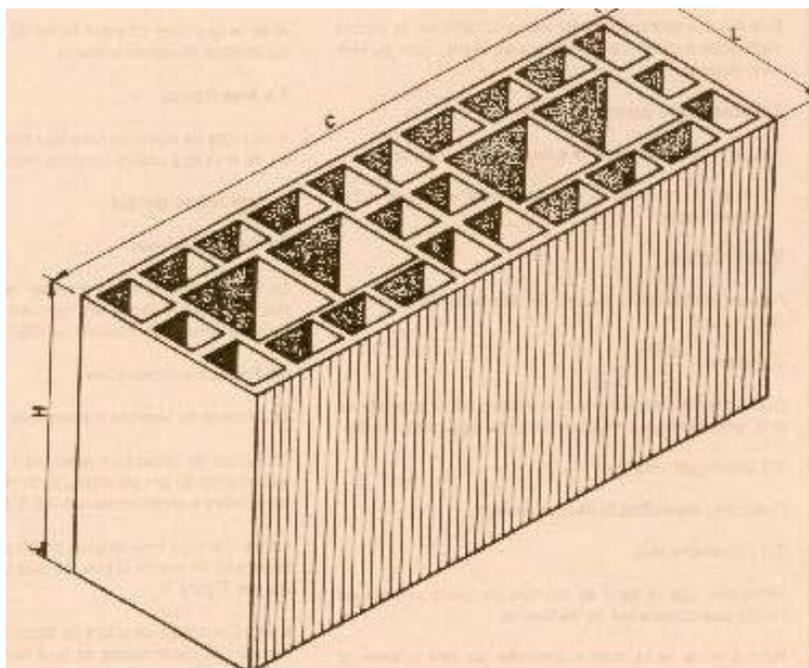


Figura 2.7 – Bloco cerâmico com furo na vertical  
(NBR 8042)

A Figura 2.8 mostra exemplo de edifício de cinco pavimentos com a utilização de bloco cerâmico no Guarujá, SP.

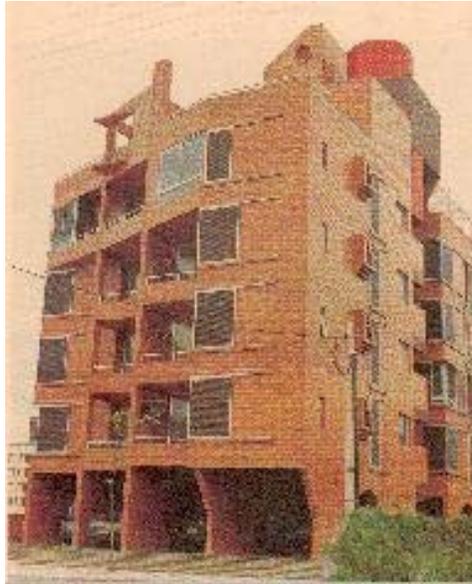


Figura 2.8 – Edifício utilizando blocos cerâmicos.  
(WISSEMBACK, 1990)

### 3) Alvenaria de blocos sílico-calcários

Os tijolos e blocos sílico-calcários são unidades de alvenaria compostas por uma mistura homogênea e adequadamente proporcionada de cal e areia quartzosa, moldadas por prensagem e curadas por vapor a alta pressão.

Os processos atuais de fabricação são inteiramente mecanizados. Isto permite uma produção em larga escala, em instalações reduzidas e com alta produtividade de mão de obra.

As normas trazem sempre exigências quanto às resistências à compressão e às dimensões. Algumas incluem exigências referentes a uma ou mais das seguintes propriedades:

- Retração na secagem;
- Densidade;
- Módulo de Ruptura;

- Resistência ao congelamento.

O primeiro prédio brasileiro construído em alvenaria não armada com bloco sílico-calcário foi o Edifício Jardim Prudência, em 1978. Este possui 9 pavimentos com a alvenaria interna e externa aparentes (Figura 2.9).

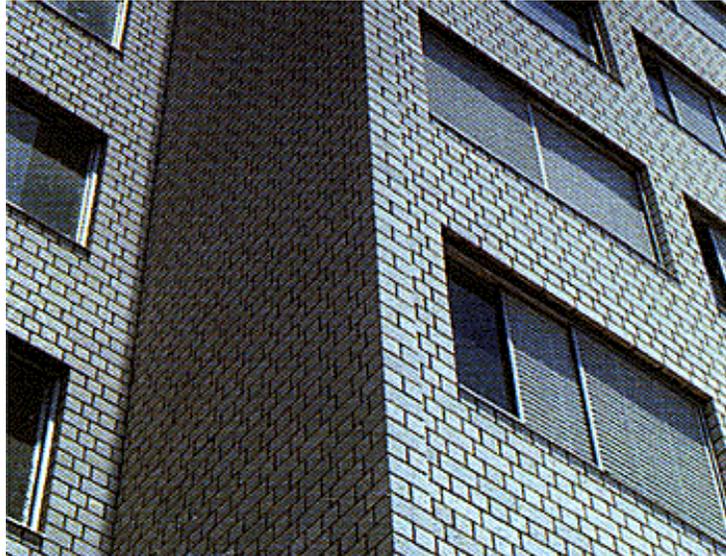


Figura 2.9 – Primeiro prédio construído com bloco sílico-calcário. (alvenaria não armada) (Ref. Site: [www.arquitetura.ufmg.br](http://www.arquitetura.ufmg.br))

## 2.1 Análise dos Principais Materiais Constituintes da Alvenaria (Unidades e Argamassas)

Estudos realizados revelam que as propriedades elásticas dos blocos e das argamassas são fortemente variáveis e este aspecto contribui de maneira importante para a expressiva variabilidade de resultados obtidos em ensaios experimentais. Com relação aos blocos, esta variação está associada ao processo de fabricação e, no caso da argamassa, ela é influenciada, entre outros aspectos, pelas várias possibilidades de traços utilizados. Além destes aspectos, sabe-se que tais propriedades podem ainda variar com a orientação da junta de argamassa com relação ao carregamento aplicado. Portanto, o analista deve ser cauteloso ao utilizar valores tabulados para estas propriedades elásticas.

A seguir, efetua-se uma análise das propriedades das argamassas de assentamento e um estudo dos processos de fabricação das unidades cerâmicas e de concreto, constituintes de um painel de alvenaria.

### **2.1.1 Argamassas de assentamento**

São fundamentais para a solidarização entre os blocos (GOMES b - 1988), exercem importante influência na distribuição dos esforços, na resistência à compressão e no processo de ruptura da alvenaria. Na prática construtiva de nossa região, é comum o uso de argamassa para assentamento de blocos constituídos de cimento e areia sem utilização da cal. Com o uso generalizado de alvenaria racionalizada que se seguirá, deverá passar a ser utilizada argamassa mista dentro dos padrões das normas internacionais. As argamassas mistas são feitas com apropriadas proporções de cal e cimento. Apresentam, como grande vantagem, características e propriedades médias iguais às dos outros dois tipos de argamassa. É a de emprego mais adequado na alvenaria estrutural não armada. Uma das propriedades da cal é o de reter água impedindo que o bloco a absorva.

Os outros dois tipos de argamassa são a de cimento e a de cal:

- *De cimento*: quando o aglomerante é apenas o cimento. Adquirem resistências elevadas com rapidez e, portanto, desenvolvem, sem problemas, resistências adequadas para suportar as cargas atuantes durante uma construção em alvenaria estrutural. É recomendável o seu uso quando se tem condições adversas, tais como: fundações em solos agressivos e fundações abaixo do nível freático.

- *De cal*: quando é utilizada apenas a cal como ligante. Desenvolve resistência lentamente e os valores máximos são pequenos, além de que para atingir estes valores, requer condições específicas, como a manutenção da umidade e a garantia de acesso de dióxido de carbono durante todo o tempo de endurecimento. Além disso, ela não dá pega, endurecendo inicialmente por perda d'água para os blocos e por evaporação.

Segundo SOLÓRZANO (1995), as principais funções que as argamassas de assentamento desempenham na alvenaria estrutural são:

- Unir as unidades de alvenaria;
- Resistir a esforços mecânicos;
- Distribuir as cargas uniformemente;
- Absorver as deformações da parede estrutural.

Para cumprir com estas funções, as argamassas devem satisfazer determinadas exigências, das quais destaca-se como principais:

- Capacidade de aderência;
- Capacidade de resistir a esforços mecânicos;
- Capacidade de distribuição de cargas;
- Capacidade de absorver deformações;
- Durabilidade;
- Eficiência.

Qualitativamente, segundo OLIVEIRA JUNIOR (USP-1992) e SABBATINI (1986), as principais propriedades das argamassas são:

a) Trabalhabilidade:

Dela depende o fácil espalhamento sobre o bloco, sendo considerada como a principal propriedade da argamassa no estado plástico. Apesar de se conseguir reconhecer a trabalhabilidade de uma argamassa, pelo seu simples manuseio, é geralmente avaliada pelos fatores que nela influem, como consistência, plasticidade, viscosidade, adesão e coesão.

Na prática, diz-se que uma argamassa tem boa trabalhabilidade quando:

- Distribui-se facilmente ao ser assentada preenchendo todas as reentrâncias;
- Adere facilmente à colher e se solta com facilidade ao ser lançada sobre o bloco ou tijolo;

- Não segrega ao ser transportada;
- Não endurece em contato com blocos de sucção elevada;
- Permanece plástica por tempo suficiente para que os blocos sejam ajustados facilmente no nível e no prumo.

#### b) Retenção de água

É a capacidade que a argamassa possui de reter a água de amassamento, impedindo que hajam perdas acentuadas, ou por evaporação antes do uso, ou pela absorção dos blocos após o assentamento. A não retenção adequada de água pela argamassa, prejudicará a durabilidade e estanqueidade da parede.

#### c) *Aderência*

Segundo RILEM/CIB (1996), a aderência não é uma propriedade intrínseca da argamassa, pois ela depende também das características das unidades que irá ligar.

A resistência da aderência, SABBATINI (1986), pode ser definida como a capacidade que a interface bloco-argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se.

Não existem métodos ou ensaios adequados para medir o valor da aderência como uma característica independente, mesmo porque desta resistência depende a monoliticidade da parede e a resistência da alvenaria frente às solicitações provocadas por deformações volumétricas, forças perpendiculares excêntricas, ações perpendiculares à parede, etc.

Atualmente utiliza-se uma série de métodos que consistem em separar duas ou mais unidades ligadas por argamassa.

Mede-se a força de separação e divide-se pela área de contato argamassa-unidade. A tensão obtida será a medida da aderência. Entretanto, os ensaios para determinação da resistência de aderência são de escassa confiabilidade, difíceis de repetir e exigem medidas muito precisas de laboratório.

#### *d) Elasticidade*

No caso específico das argamassas, é o estado tal de deformação em que a ruptura ocorre sob a forma de microfissuras. Quando a argamassa tem baixo módulo de deformação longitudinal, ela é capaz de absorver os movimentos causados pela retração hidráulica ou térmica, impedindo que surjam nas juntas da argamassas as fissuras que lhes são prejudiciais.

#### *e) Durabilidade*

As argamassas podem ter a sua integridade comprometida por uma série de fatores, dentre os quais pode-se destacar: retração na secagem; absorção de água de chuva; temperaturas de congelamento; choque térmico; agentes corrosivos atmosféricos, agentes agressivos biológicos. Contudo, apenas dois aspectos têm relevância dentro de nossa realidade habitual: A retração na secagem e a infiltração de água.

O primeiro sempre ocorre, pois as argamassas são um material com teor de água em excesso, além daquela necessária à combinação química dos aglomerantes. A infiltração de água é o agente que mais prejudica a argamassa em suas condições de exposição. Normalmente penetrando através das juntas, satura a argamassa, dificultando desta maneira a evaporação da água aprisionada, acelerando o processo de decomposição da argamassa.

#### *f) Resistência à Compressão*

O seu valor, dentro de determinada faixa de variação, não é de grande importância, já que a influência da resistência da argamassa na resistência final da alvenaria é pequena.

A resistência à compressão das argamassas se inicia com o endurecimento, aumenta continuamente com o tempo e é função do aglomerante com que é preparada. Quanto maior o teor de cimento, maior a resistência e quanto maior o teor de cal ou de água, menor será a resistência.

### **2.1.2 Unidades Cerâmicas**

A qualidade das unidades cerâmicas está intimamente relacionada à qualidade das argilas empregadas na fabricação e também ao processo de produção. Pode-se obter unidades de baixa resistência (0,1 Mpa) ou de altíssima resistência (70Mpa). Devido a este fato, torna-se imprescindível a realização de ensaios de caracterização das unidades. Dentre eles pode-se destacar:

- Resistência à compressão (NBR 6440);
- Determinação das dimensões e de sua variabilidade;
- Taxa de absorção inicial

A resistência de uma unidade cerâmica, como mencionado acima, pode apresentar valores compreendidos numa faixa bastante ampla. Desta forma, não há como estimar o valor da resistência apenas com procedimentos tais como percussão da peça, coloração e aspecto da fratura.

### **2.1.3 Unidades de Concreto**

Para a fabricação de blocos de concreto normalmente se utiliza cimento portland, agregado miúdo (areia natural e/ou areia artificial) e agregado graúdo (pedrisco).

## **2.2 Evolução das Normas de Alvenaria Estrutural**

Durante séculos, as construções de alvenaria eram erguidas tendo por base a experiência acumulada dos construtores. Os conhecimentos adquiridos na época permitiram a execução de grandiosas obras.

A partir de determinado período, entretanto, especificamente em 1891 com a construção do Monadnock Building, as construções em alvenaria passaram a ser anti-econômicas e a concorrência do concreto armado e do aço passou a ficar dramática para as estruturas de alvenaria.

Pesquisa realizada por GOMES-a revelou que desde a década de 20, os estudos da alvenaria se concentraram na elaboração de especificações para os materiais de construções. Era o início da preocupação com o controle de qualidade dos produtos.

Segundo GOMES, apenas em 1948, na Inglaterra, foi elaborada a primeira norma consistente para o cálculo da alvenaria de tijolos.

Na Alemanha, a norma DIN-1053 surgiu em 1952, sendo modificada em 1962 e posteriormente em 1974. É mais uma série de recomendações construtivas do que uma norma de cálculo.

Na Itália, onde grandes construções foram erguidas no passado, a norma mais completa é de 1980.

Nos Estados Unidos existem várias normas desde 1953, porém apenas em 1966 é que foi publicada uma norma mais científica e menos empírica. Na década de 70 surgiu a primeira norma que trata especificamente do cálculo da alvenaria de blocos de concreto que é a “Specification for the Designad Construction of Load-bearing Concrete Masonry” sendo esta a norma que mais influenciou a evolução da alvenaria de blocos de concreto no Brasil.

A primeira tentativa de comparar as normas de vários países mostrou a falta de uniformidade das várias normas em vários aspectos, existindo omissões em umas e afirmações isoladas em outras, o que dificulta a comparação. Dentre as principais diferenças, destaca-se:

- Para o caso de paredes pouco esbeltas, as normas britânicas, americanas e alemãs apresentam uma tensão admissível entre 2,5 e 3,5 Mpa. A norma canadense é a que admite maiores tensões, quando são usados tijolos de alta resistência: 84 a 98Mpa;
- As tensões admissíveis nas normas norte-americanas e canadense, são determinadas a partir da resistência dos prismas;
- A maioria das normas considera as armaduras verticais para resistirem a esforços de flexão e não de compressão. Considera-se que prover armaduras para resistir a 10% da carga de ruptura de paredes é algo difícil;
- A comparação do cisalhamento horizontal mostrou falta de uniformidade entre as normas; algumas consideram o efeito da compressão na tensão de cisalhamento, outras não consideram.

### 2.2.1 As Normas Brasileiras

O sistema de alvenaria estrutural em blocos vazados de concreto teve um surto de aplicação durante a década de setenta. Em São Paulo, vários projetistas e calculistas voltaram-se para o estudo e aplicação desta técnica.

Segundo SÁNCHEZ (1994), o Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON) foi a primeira entidade a sentir a necessidade de agrupar os conhecimentos sobre os materiais e métodos utilizados na execução de alvenaria estrutural em blocos vazados de concreto e, juntamente do Comitê Brasileiro de Construção Civil (CB-2), propiciou o início do desenvolvimento das normas nacionais.

As normas norte americanas influenciaram os projetos de normas brasileiras em alvenaria estrutural. A produção de blocos vazados de concreto no Brasil realizou-se com a importação de máquinas e equipamentos norte-americanos, daí uma natural adoção do padrão de blocos produzidos nos EUA, induzindo os projetistas e calculistas a adotarem esses padrões e de modo natural as normas que balizariam esses produtos.

A seguir relacionam-se algumas normas da ABNT que abordam a técnica de alvenaria estrutural:

- NBR-08215: Prismas de Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria Estrutural – Projeto e Ensaio à Compressão; 1983;
- NBR-08798: Execução e Controle de Obras em Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados de Concreto; 1984;
- NBR-08949: Paredes de Alvenaria estrutural – Ensaio à Compressão Simples; 1985;
- NBR-10837: Cálculo de Alvenaria Estrutural de Blocos vazados de Concreto; 1989;
- NBR-05712: Bloco Vazado Modular de Concreto; 1981;
- NBR-06136: Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria Estrutural; 1978;
- NBR-07184: Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria – Determinação da Resistência à Compressão; 1991;
- NBR-12118: Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria – Determinação da Absorção de Água, do Teor de Umidade e da Área Líquida; 1991;

- NBR-07171: Bloco Cerâmico para Alvenaria; 1992;
- NBR-08042: Bloco Cerâmico para Alvenaria – Formas e Dimensões; 1992;
- NBR-08043: Bloco Cerâmico Portante para Alvenaria – Determinação da Área Líquida; 1983.

## **2.2.2 Comparação das Normas de Argamassa de Assentamento**

As normas brasileiras não especificam classes de argamassa para assentamento de blocos em alvenaria estrutural. Além da falta de tradição em pesquisas tecnológicas, explicam este fato a inexistência de (SABBATINI, 1986):

- Especificações para a areia e especificações adequadas para a cal;
- Controle de qualidade para os componentes citados acima;
- Métodos de ensaios normalizados para caracterização de propriedades das composições-tipo, amens da resistência à compressão;
- Métodos de ensaios normalizados para avaliação do desempenho de argamassas considerando-se o conjunto bloco-argamassa.

As tabelas apresentadas a seguir apresentam as classes de argamassas recomendadas pelas normas inglesa e americana.

### **2.2.2.1 Especificações Inglesas.**

Nas Tabelas 2.4 e 2.5 tem-se, respectivamente, as recomendações dos traços de argamassa e as resistências das alvenarias à compressão, conforme o BS 5628 “Code of Practice for Structural Use of Masonry – Part 1 – Unreinforced Masonry”.

<b>Tipo</b>	<b>f<sub>ak</sub> (Mpa)</b>	<b>Cimento</b>	<b>Cal</b>	<b>Areia</b>
i	11.0	1.00	=0.25	3.00
ii	4.5	1.00	0.50	4.00/4.50
iii	2.5	1.00	1.00	5.00/6.00
iii*	1.0	1.00	2.00	8.00/9.00

Tabela 2.4 – Traços de argamassa recomendadas na Inglaterra (em volume).

\* Não estrutural.

Obs.:

- 1) Proporções para areia seca: Quando há variações na quantidade de areia, os valores maiores referem-se a areia bem graduada e os menores quando for grossa ou uniformemente fina;
- 2) Proporções para pasta de cal: Quando for empregada cal hidratada em pó na mistura, seu volume deve ser aumentado por mais de 50%, até o necessário para se obter trabalhabilidade adequada.

<b>Bloco</b>	<b>Argamassa</b>			
	<b>i</b>	<b>ii</b>	<b>iii</b>	<b>iii*</b>
=35.0	11.4	9.4	8.5	7.3
20.0	7.5	6.5	5.9	5.3
15.0	6.8	6.1	5.7	5.1
10.0	6.1	5.7	5.5	4.9
7.0	5.7	5.5	5.4	4.8
5.0	5.0	5.0	4.0	4.4
3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
2.8	2.8	2.8	2.8	2.8

Tabela 2.5 – Resistência das alvenarias à compressão na Inglaterra (MPa) BS 5628

\* Não estrutural

- 1) Os valores apresentados referem-se à área bruta.

### 2.2.2.2 Especificações Americanas.

As normas americanas especificam quatro tipos de argamassas mistas, designadas pelas letras M, S, N e O. São empregadas de forma que se segue:

- *Argamassa tipo M* : Recomendada para alvenarias em contato com o solo, tais como fundações, muros de arrimo, etc. Possui alta resistência à compressão e excelente durabilidade;
- *Argamassa tipo S* : Recomendada para alvenaria sujeita a esforços de flexão. É de boa resistência à compressão e à tração na interface com a maioria dos tipos de unidades.
- *Argamassa tipo N* : Recomendada para uso geral em alvenarias expostas, sem contato com o solo. É de média resistência à compressão e boa durabilidade.
- *Argamassa tipo O* : pode ser usada em alvenaria de unidades maciças onde a tensão de compressão não ultrapasse 0,70 MPa e não esteja exposta a meio agressivo. É de baixa resistência à compressão e conveniente para uso em paredes de interior em geral.

A Tabela 2.6 apresenta os traços de argamassas recomendados (em volume) pelo ASTM-C270.

Tipo	$f_{ak}$ (Mpa)	Cimento	Cal	Areia
M	17.5	1.00	=0.25	2.81/3.75
S	12.5	1.00	=0.25	2.81/3.75
			=0.50	3.37/4.50
N	5.3	1.00	=0.50	3.37/4.5
			=1.25	5.06/6.75
O	2.5	1.00	=1.25	5.06/6.75
			=2.50	7.87/10.50

Tabela 2.6 – Traços de argamassa recomendada pelas normas americanas (em volume).

Obs.:

- 1) Cal hidratada em pó ou cal em pasta;
- 2) Areia úmida e solta;
- 3) Cimento Portland conforme ASTM C150; cal virgem ASTM C5; cal hidratada ASTM C 207; areia ASTM C 144; ensaio de resistência à compressão ASTM C91.

De forma sucinta, apresenta-se na Tabela 2.7, estes quatro tipos de argamassas recomendados para tipos distintos de situação.

Localização	Elemento construtivo	Tipo de argamassa	
		Recomendado	Alternativo
Exterior, acima do terreno.	Parede resistente	N	S ou M
	Parede não resistente	N	O ou S
	Platibanda, chaminé ou parede de máscara.	N	S
Exterior, ao nível do terreno ou abaixo.	Parede de fundação, parede de suporte, caixas de visita, sumidouros, pavimentos, passeios e pátios.	M	S ou N
Interior	Parede resistente	N	S ou M
	Parede não resistente	O	N

Tabela 2.7 – Argamassas recomendadas

(Ref: Site: [www.lisboa-abandonada.net/conservacao\\_textos/nota\\_tecnica\\_8B.doc](http://www.lisboa-abandonada.net/conservacao_textos/nota_tecnica_8B.doc))

Na Tabela 2.8, apresenta-se a resistência das alvenarias à compressão em MPa, pelo ACI 531.

Bloco	Argamassa	
	(S,M)	(N)
41.4 (20.7)	16.5	9.3
27.5 (13.8)	13.8	8.6
17.2 (8.6)	10.7	7.6
13.8 (6.9)	9.3	7.0
10.3 (5.1)	7.9	6.0
7.0 (3.5)	6.2	4.8

Tabela 2.8 – Resistência das alv. à compressão (MPa) pela norma americana ACI 531

### 2.2.2.3 Especificações Brasileiras.

Nas Tabelas 2.9 e 2.10 tem-se, respectivamente, as recomendações dos traços de argamassa pela NBR 8798 e o desempenho da argamassa, conforme o NB7-8798.

$f_{ak}$	Cimento	Cal	Areia	Obs.
-	1.00	=0.12	=4.00	em massa
-	1 Saco	=10 dm <sup>3</sup>	=166 dm <sup>3</sup>	em volume

Tabela 2.9 – Recomendações dos traços de argamassa – NBR 8798

Propriedades	Argamassa
	Exigência
Consistência *	230 ± 10 mm
Retenção de água	= 75%
Resistência à Compressão Axial	= 9Mpa ou = $f_{akj}$ **

Tabela 2.10 – Desempenho da argamassa, conforme NB7-8798

\* Medida no máximo após 15 minutos do amassamento com a quantidade máxima de água a ser empregada;

\*\*  $f_{kj}$  é a resistência característica à idade de  $j$  dias expressas no projeto da obra para a argamassa.

### **2.3 A Escolha da Argamassa.**

O desempenho da alvenaria é influenciado pelas diversas propriedades das argamassas tais como a sua trabalhabilidade, retenção de água, resistência de ligação, durabilidade, deformabilidade, e resistência à compressão. Como estas propriedades variam com o tipo da argamassa, é muito importante que esta seja selecionada de acordo com a especificidade da obra. A seleção de um tipo de argamassa deve ser também baseada no tipo das unidades de alvenaria que irão ser usadas, assim como nos requisitos normativos dos códigos construtivos e de engenharia aplicáveis, tais como os esforços de cálculo.

Convém salientar que as propriedades elásticas dos constituintes do painel (blocos e argamassas) são fortemente variáveis e, devido a este fato, os resultados obtidos nas análises experimentais apresentam muita variação, alertando-nos ao fato de que quanto maior for a acurácia na escolha dos parâmetros dos materiais, maior a possibilidade de se obter um modelo que forneça resultados satisfatórios, com bom nível de aproximação.

Segundo ROMAN (1995), é completamente desinteressante que uma argamassa tenha uma altíssima resistência à compressão não tendo simultaneamente uma boa aderência e/ou uma boa trabalhabilidade. Também não é aceitável que uma argamassa tenha um elevado consumo de cimento, alta resistência à compressão e características de retração que cause fissuras de separação na interface junta/unidade, resultando em um caminho preferencial para a penetração de umidade.

A seleção de um tipo particular de argamassa para um projeto específico é uma função de um balanço de necessidades das alvenarias que serão construídas e as propriedades dos vários tipos de misturas disponíveis. Nesta seleção devem ser considerados dois pontos fundamentais:

- Não existe um único tipo de argamassa que seja melhor para todos os tipos de aplicações possíveis;
- Não deve ser utilizada uma argamassa com resistência à compressão superior à necessária a atender as exigências estruturais de projeto;

Esta última regra requer alguns cuidados na interpretação. Por exemplo, seria anti-econômico e pouco prático uma mudança contínua do tipo de argamassa para as várias partes de uma mesma estrutura. Contudo, a idéia geral é válida desde que seja seguida com bom senso.

# 3

## *CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E AÇÕES ATUANTES*

---

---

A concepção estrutural de uma edificação consiste em se efetuar uma análise da estrutura em relação ao restante da construção, delinear um arranjo estrutural e identificar os elementos resistentes, ou seja, definir no projeto quais são os elementos responsáveis pelo suporte dos carregamentos atuantes.

Estes elementos para a alvenaria estrutural são:

- As paredes portantes (paredes dimensionadas para resistir cargas além do seu peso próprio);
- As lajes (têm a finalidade de transmitir esforços de seu plano médio às paredes);
- Os pilares (todo elemento estrutural em que a seção transversal, utilizada no cálculo do esforço resistente, possui relação de lados inferior ou igual a cinco, prevalecendo, no caso de seções compostas, as dimensões de cada ramo distinto) e

- As vigas (elemento estrutural linear sobre vãos geralmente maiores que 1,20 m, dimensionado para suportar cargas verticais, transmitindo-as para pilares ou paredes). Estes dois últimos elementos, na eventualidade de se ter pilotis.

Para que se tenha simplicidade na concepção estrutural de um edifício, basta que se utilize uma geometria e uma organização do sistema estrutural, de tal maneira que sejam evitadas as tensões de tração (OLIVEIRA JUNIOR, 1992). A estabilidade da construção em alvenaria estrutural e de seus elementos deve ser garantida de forma satisfatória, apenas através de paredes resistentes e de paredes e lajes enrijecedoras, que, formando um conjunto rígido, devem resistir aos esforços oriundos das ações verticais e horizontais, transferindo-os para as fundações.

### **3.1 Sistemas Estruturais**

Na alvenaria estrutural a distribuição em planta das paredes deve atender, ao mesmo tempo, requisitos funcionais e implicações estruturais. De maneira geral, entretanto, sua forma geométrica deve ser disposta de tal maneira que se contemple fatores de grande importância para a estrutura, tais como rigidez e resistência lateral.

Os sistemas que mais se adequam ou que mais são empregados são:

- Sistema de paredes transversais;
- Sistema de paredes celulares;
- Sistema complexo.

#### **3.1.1 Sistema de Paredes Transversais**

É um sistema comumente utilizado para edifícios retangulares com estrutura modulada e alongada, como escritórios, lojas, hotéis, salas de aula, etc.

Este sistema pode ser classificado em simples e duplo. No simples, as paredes carregadas formam ângulos retos com o eixo longitudinal da construção, podendo,

também, serem paralelas a este. As paredes externas podem ser apenas de vedação (Figura 3.1). No duplo, os edifícios são projetados em forma de cruz, T, L, Y ou outras, sendo portantes as paredes paralelas a ambos os eixos (SILVA, 1996)

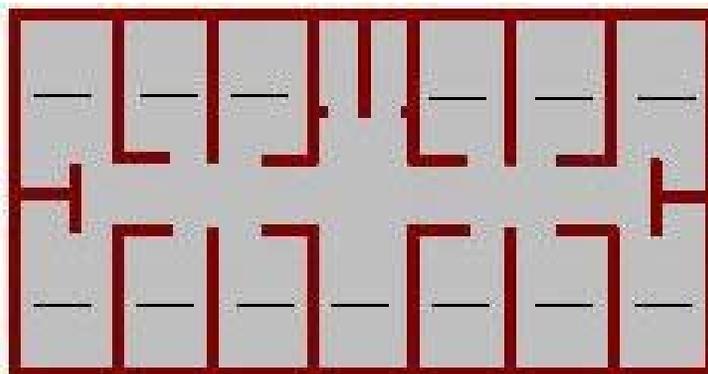


Figura 3.1 – Sistema de paredes transversais.

### 3.1.2 Sistema de Paredes Celulares

É o que oferece maiores vantagens estruturais, uma vez que a edificação é provida de rigidez semelhante nas duas direções principais, fato que gera uma maior distribuição das tensões atuantes entre as paredes.

Outra vantagem é o de proporcionar contraventamento para resistir às ações horizontais em qualquer direção (Figura 3.2).

Este sistema é adequado para as pequenas edificações residenciais por ser um conduzirem a estruturas mais econômicas, uma vez que nesta forma de construção geralmente se trabalha com vãos pequenos e lajes armadas nas duas direções, o que leva a uma melhor distribuição das cargas.

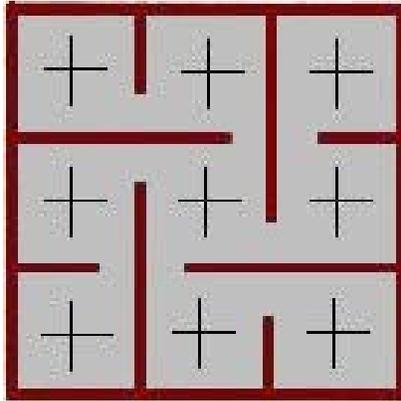


Figura 3.2 – Sistema de paredes celulares

### 3.1.3 Sistema Complexo

Este sistema é uma combinação dos dois sistemas anteriores, ou seja, é a utilização de cada um deles em regiões distintas da edificação. É adequado para edifícios de apartamentos de grandes dimensões. A estabilidade lateral é provida por algumas paredes resistentes transversais e longitudinais, tais como caixas de escada e de elevadores.

Deve ser evitado um arranjo excessivamente assimétrico, a fim de se provocar efeitos prejudiciais de torção (Figura 3.3).

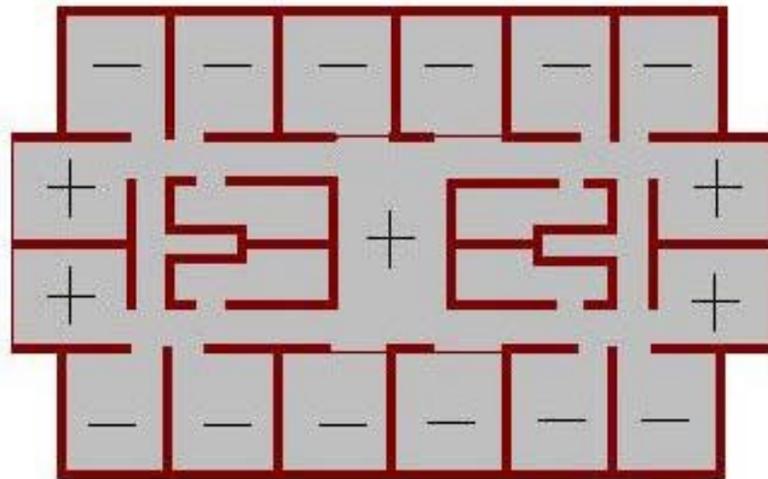


Figura 3.3 – Sistema complexo

## 3.2 Ações Atuantes

### 3.2.1 Cargas Verticais

Para os edifícios residenciais em alvenaria estrutural as ações verticais atuantes nas paredes estruturais são o peso próprio e a reação das lajes.

Os valores mínimos a serem adotados para os carregamentos podem ser obtidos da NBR 6120 (Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações).

Nas lajes devem ser consideradas as ações permanentes (peso próprio, revestimento, piso, paredes não-portantes) e as variáveis (sobrecarga devido à utilização).

### 3.2.2 Cargas Horizontais

No Brasil, as ações horizontais que devem obrigatoriamente ser consideradas são as do vento e do desaprumo. Em casos de áreas sujeitas a terremotos, a sua consideração também é indispensável.

O vento atua sobre paredes que são perpendiculares à sua direção, as quais transmitem para as lajes dos pavimentos. Sendo as lajes consideradas como diafragmas rígidos no seu plano, distribuem parcelas da ação do vento aos painéis de contraventamento, proporcionalmente à rigidez de cada um (Figura 3.4).

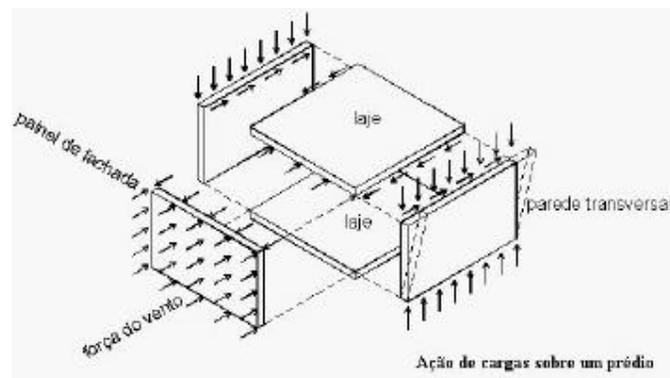


Figura 3.4 – Distribuição das ações do vento entre painéis de contraventamento.

(Ref. Site:www.arq.ufsc.br)

O desaprumo é comumente considerado tomando por base a norma alemã DIN 1053.

A ação lateral equivalente ao desaprumo, a ser aplicada ao nível de cada pavimento, é obtida pela multiplicação do peso total do pavimento considerado pelo ângulo definido pelo desaprumo do eixo da estrutura, em radianos.

### 3.3 Distribuição das Ações Verticais

A Norma Brasileira NBR-1228 (Cálculo de Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados de Concreto) prescreve que “nas paredes estruturais, uma carga concentrada ou parcialmente distribuída pode ser suposta repartida uniformemente em seções horizontais limitadas por dois planos inclinados  $45^\circ$  sobre a vertical e passando pelo ponto de aplicação de carga ou pelas extremidades da faixa de aplicação”. Em outras palavras, numa parede de alvenaria quando se coloca um carregamento localizado sobre apenas uma parte de seu comprimento, tende haver um espalhamento desta carga ao longo de sua altura. Este espalhamento deve ser efetuado segundo um ângulo de  $45^\circ$  (Figura 3.5).

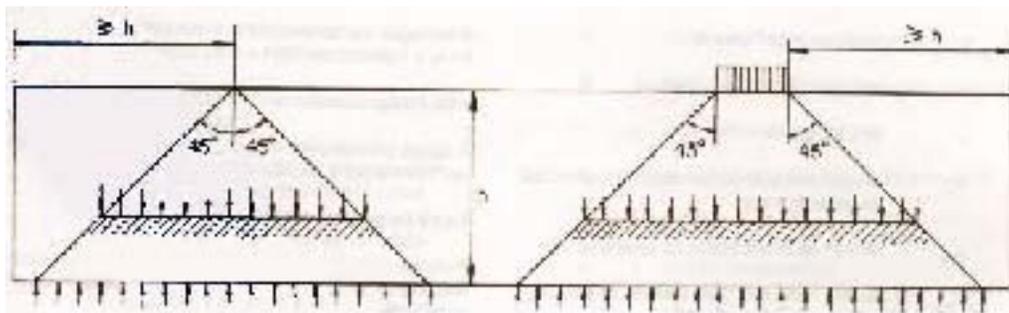


Figura 3.5 – Espalhamento de um carregamento concentrado ou parcialmente distribuído

### 3.3.1 Amarração entre Paredes

De acordo com NBR-1228, a união e solidarização de paredes que se cruzam podem ocorrer por um dos seguintes métodos:

- Amarração direta;
- Amarração indireta.

No primeiro, com 50% dos blocos penetrando alternadamente na parede interceptada. No segundo, com barras metálicas convenientemente dispostas ou em forma de treliças soldadas, tendo-se como alternativa o uso de peças em forma de chapa metálica de resistência comprovada.

O fato merecedor de destaque é que se garantindo a amarração entre as paredes da alvenaria, obtêm-se um maior espalhamento das cargas e conseqüente melhor uniformização das tensões verticais ao longo da altura da edificação.

Segundo RAMALHO & CORRÊA (1999), a amarração garante a transmissão de ações de uma parede para outra, o que alivia uma parede muito carregada, promovendo a uniformização de tensões. O espalhamento ocorre em paredes planas e em paredes em “L”, Figura 3.6, se estiverem devidamente amarradas, conforme descrição de amarração direta de parede da NBR-1228.

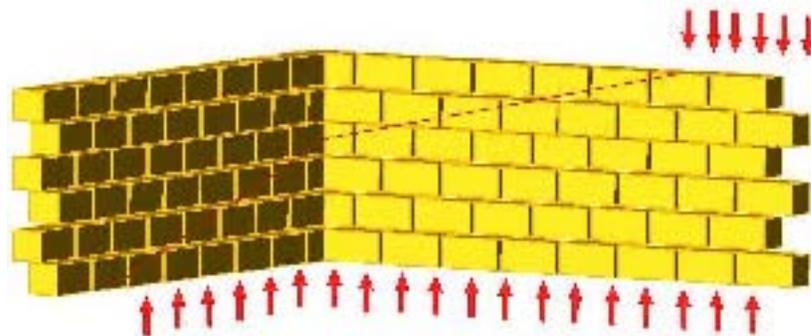


Figura 3.6 – Espalhamento do carregamento em parede.

### **3.3.2 Procedimentos de Distribuição**

Apresenta-se, a seguir, alguns dos procedimentos mais utilizados na distribuição das cargas verticais, destacando-se suas vantagens e desvantagens.

#### **3.3.2.1 Paredes Isoladas**

Neste caso, considera-se a parede atuando isoladamente sem a interação das demais paredes do sistema.

Tem a vantagem de ser um processo simples, rápido e seguro, uma vez que se considera separadamente o valor de tensão para cada painel.

Em contrapartida, além de anti-econômico (resulta blocos de diversas resistências e relativamente elevadas), torna-se impraticável trabalhar com blocos de variadas especificações.

#### **3.3.2.2 Grupos de Paredes Isoladas**

Neste, considera-se um grupo de paredes totalmente interagindo entre si, não havendo uma norma que indique a definição dos grupos, embora se considere que as aberturas determinam a separação entre os grupos.

A vantagem deste procedimento é o fato de considerar a uniformização das tensões dentro do grupo selecionado, uma vez que se contempla a interação das paredes.

É fundamental que se avalie a possibilidade de ocorrerem forças de interação em cantos e bordas, condição indispensável para sua correta aplicação.

#### **3.3.2.3 Grupos de Paredes com Interação**

Os grupos de paredes interagem entre si. É mais trabalhoso que os procedimentos anteriores, sendo recomendada sua modelagem computacional.

A uniformização conduz a tensões médias menores, o que favorece a especificação da resistência dos blocos.

#### 3.3.2.4 Modelagem em Elementos Finitos

A modelagem numérica por elementos finitos é um procedimento adequado, pois permite obter resultados com boa aproximação do comportamento real da estrutura e se constitui em uma importante ferramenta no entendimento do mecanismo de sustentação e transmissão de cargas da alvenaria estrutural.

Possibilita a obtenção do perfil de tensões e deformações atuantes ao longo de um painel, permite o refinamento da malha, favorecendo a análise global e localizada da estrutura.

A Figura 3.7 mostra a distribuição de tensões em um painel típico isolado, dotado de abertura, modelado com elemento tri-dimensional.

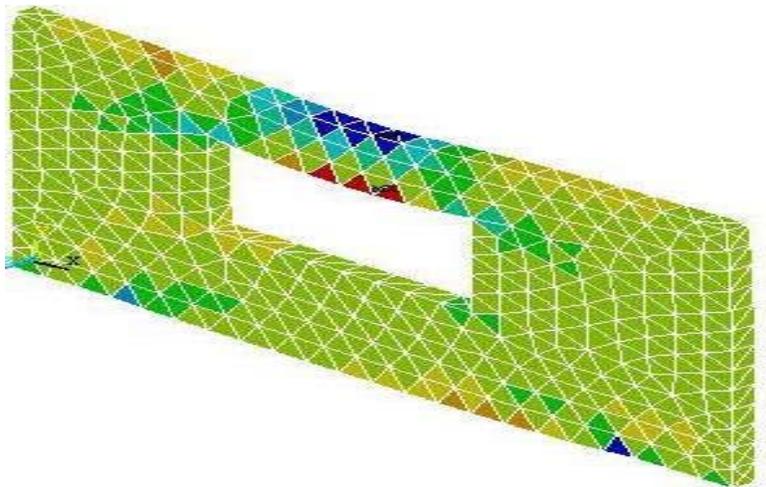


Figura 3.7 – Modelo tridimensional para um painel de alvenaria

Este tipo de modelagem é descrito com maiores detalhes no Capítulo 4.

### 3.4 Distribuição das Ações Horizontais

As lajes, por hipótese, trabalham como diafragmas rígidos no seu plano e distribuem parcelas da ação do vento aos painéis de contraventamento, proporcionalmente à rigidez de cada um.

Pelo exposto, é de grande importância o estudo das estruturas de contraventamento.

As paredes de contraventamento são elementos que resistem às ações horizontais segundo seu próprio plano. São elas que dão estabilidade à construção, transmitindo as ações do vento às fundações.

Considerando uma direção principal para a ação do vento, as paredes de contraventamento podem ser definidas (Figura 3.8):

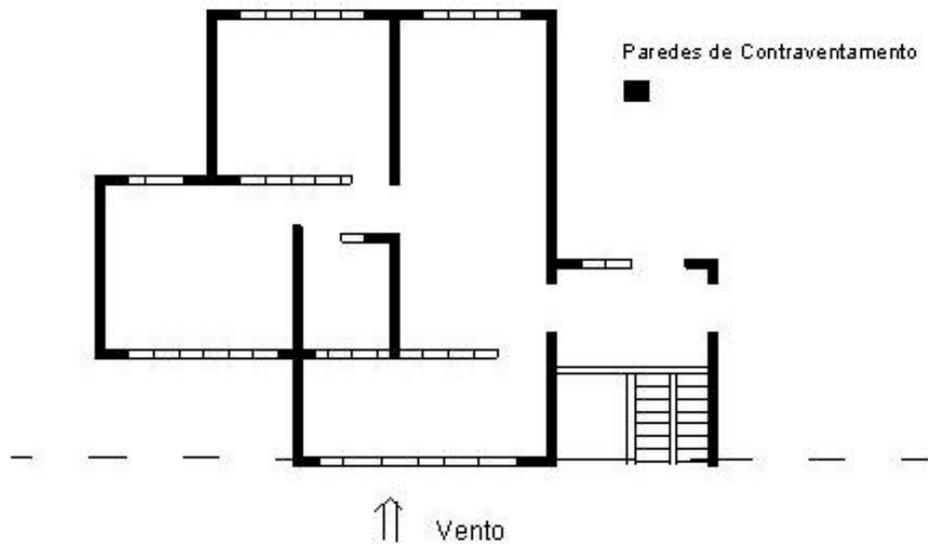


Figura 3.8 – Paredes de contraventamento

As paredes perpendiculares à ação do vento somente são consideradas quando unidas à outras paredes (formando seções T,L U,etc.), mesmo assim sua contribuição é limitada. Como forma de expressar essa limitação, as normas definem as dimensões máximas das abas das paredes de seção composta.

Segundo a NB-1228, na interseção das paredes, uma hipótese adequada deve ser adotada para se calcular a rigidez relativa das paredes para a distribuição dos momentos devido ao vento. O efeito de flange pode ser suposto desde que uma parede intercepte outra ou várias, tendo-se em vista que a largura do flange não deve exceder 1/6 da altura total da parede acima do nível considerado; a largura para cada lado do pilar-parede não exceda seis vezes a espessura da parede que a intercepta. Quando um pilar-parede intercepta uma parede ou paredes em forma de L ou C, a largura dos flanges que se sobressaem não deve exceder 1/16 da altura total da parede acima do nível analisado, nem seis vezes a espessura da parede interceptante (Figura 3.9).

$$2 b_f \leq h / 6 \quad \text{e} \quad b_f \leq 6 t \quad : \text{ para o caso de seção em T ou I}$$

$$b_f \leq h / 16 \quad \text{e} \quad b_f \leq 6 t \quad : \text{ para o caso de seção em L ou C}$$

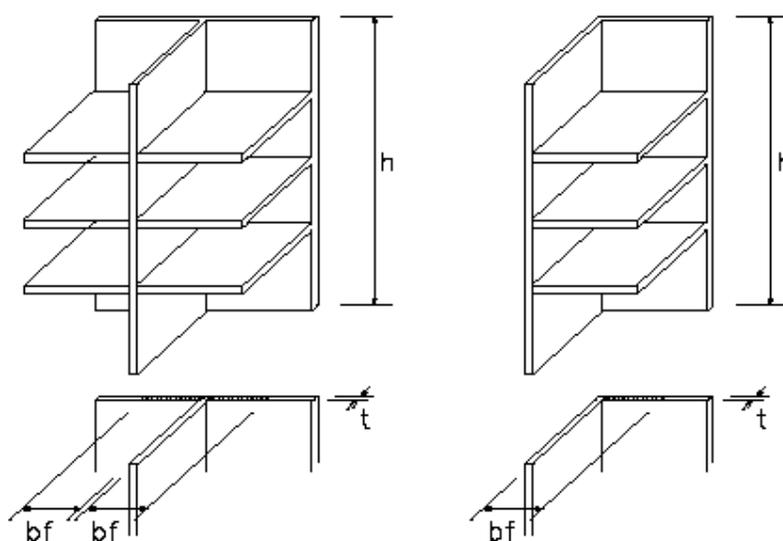


Figura 3.9 – Dimensão dos flanges, segundo a NB-1228  
(RAMALHO e CORREA, 1999)

Devem ser evitadas as assimetrias significativas da estrutura de contraventamento.

Seja um sistema de eixos no plano de uma laje, conforme esquematizado na Figura 3.10:

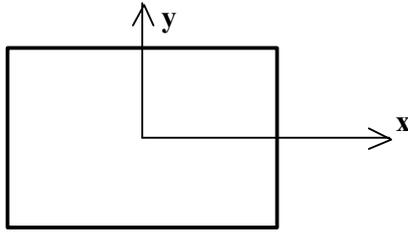


Figura 3.10 – Sistema de eixos no plano da laje

As lajes podem estar sujeitas a translações e rotação no seu plano ou unicamente translações.

A disposição das paredes estruturais, figura 3.10, pode ser simétrica em relação a um desses eixos ou a ambos. Quando o vento atua na direção paralela à do eixo de simetria, a laje apenas translada nesta direção. Supondo-se, agora, o vento atuando na direção em que não há simetria, além de transladar, a laje estará sujeita a rotação em torno do eixo perpendicular ao seu plano. Desse modo, assimetrias acentuadas, além de tornarem a distribuição das ações muito mais complicada para o projeto, são inconvenientes para o próprio funcionamento da estrutura, gerando tensões nos planos das lajes (SILVA, 1996).

# 4

## *MODELAGEM EFETUADA*

---

---

O comportamento de painéis de alvenaria de dimensões e características usuais (dotados de abertura), submetidos a um dado carregamento é assunto de grande interesse em projetos executivos de alvenaria estrutural. Muitos pesquisadores vêm tratando deste assunto e, dentre os métodos estudados que fornecem informações acerca do comportamento da distribuição das cargas ao longo destes painéis, pode-se citar: Pórtico Equivalente, Ligações Rígidas e Elementos Finitos.

### **4.1- Pórtico Equivalente**

Neste método, as paredes e as lajes são substituídas por colunas e vigas que possuem rigidezes equivalentes, isto é, a coluna tem rigidez equivalente à parede e a viga, à laje. Os eixos das vigas são representados pelas linhas médias horizontais e os

pilares pelas linhas médias aos trechos verticais que têm continuidade. Os nós coincidem com a intersecção entre as linhas médias. Este modelo estrutural equivale a um pórtico plano (Figura 4.1).

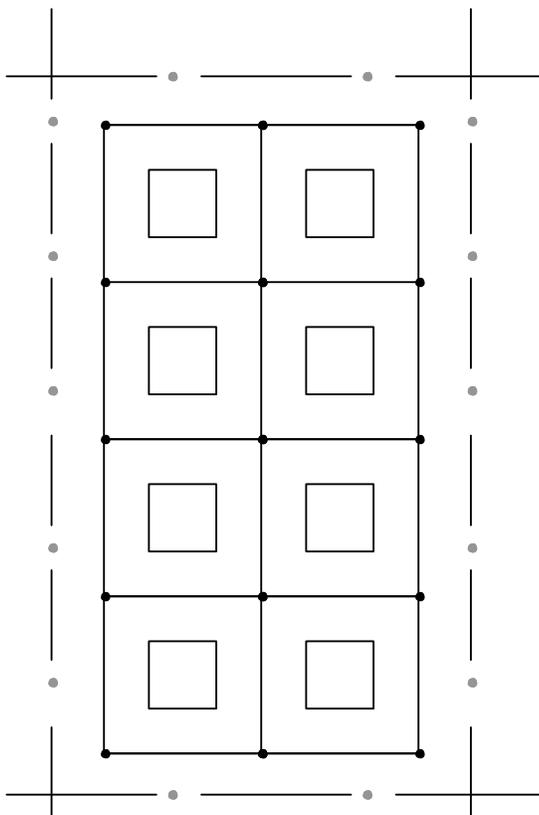


Figura 4.1 – Pórtico Plano Equivalente

#### 4.2- Ligações Rígidas

A diferença deste para o método do Pórtico Equivalente é que se consideram infinitamente rígidas as ligações entre os elementos. Há, da mesma maneira, a modelagem por elementos de pórtico plano, considerando os trechos rígidos nos nós. Figura 4.2.

Análises realizadas por LA ROVERE (1994) mostram que este método fornece bons resultados nos casos em que as vigas são bem mais flexíveis do que as colunas, o mesmo não ocorrendo para os casos em que as vigas têm rigidez similar às mesmas.

Ainda, que, considerando-se o método dos elementos finitos como exato, os resultados de deslocamentos obtidos pelo método do pórtico equivalente são bem maiores do que aos da solução exata, enquanto os obtidos pelo método das ligações rígidas são bem menores. Isto mostra que o primeiro é mais flexível do que a estrutura real, enquanto que o segundo mais rígido.

Neste método, é importante cautela na definição do trecho rígido, uma vez que o módulo de elasticidade da alvenaria (no caso, o pilar) é bem menor do que o módulo de elasticidade do concreto (no caso, a laje), o que influencia diretamente no comprimento dos trechos.

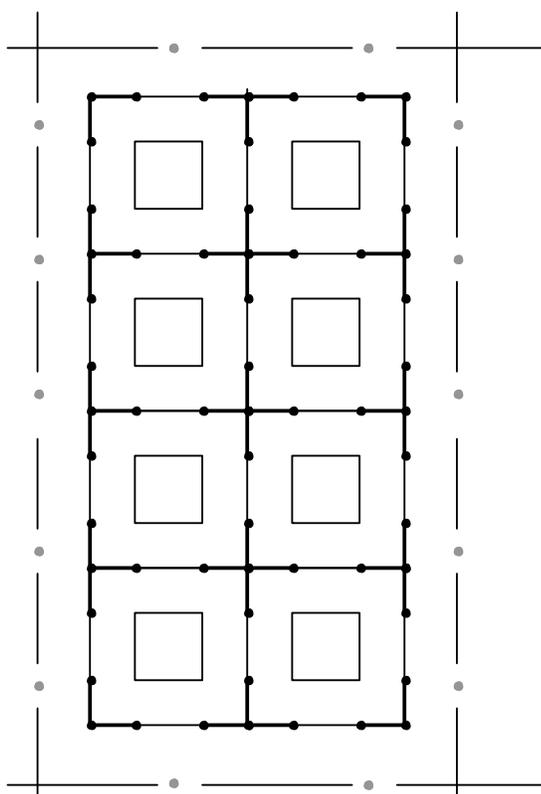


Figura 4.2 – Ligações Rígidas

### 4.3 – Elementos Finitos

A presente seção descreve o uso do método dos elementos finitos na modelagem da estrutura quando submetida a um dado carregamento. Utilizando-se este método,

torna-se possível entender o comportamento dos mecanismos de transferência de carga e falha de um painel de alvenaria estrutural e avaliar satisfatoriamente o desempenho da segurança da estrutura.

Os modelos de elementos finitos podem ser aplicados para combinações bloco-argamassa, desde que os parâmetros físicos e mecânicos do material tenham sido obtidos de testes de laboratório, quer uniaxiais para comportamento linear, objeto deste estudo, ou não. A qualidade da resposta depende do nível de conhecimento das propriedades dos materiais.

A Figura 4.3 ilustra um arranjo típico de uma parede de alvenaria. Uma composição de material que consiste basicamente de unidades (blocos ou tijolos) e juntas de argamassas (horizontais e verticais).

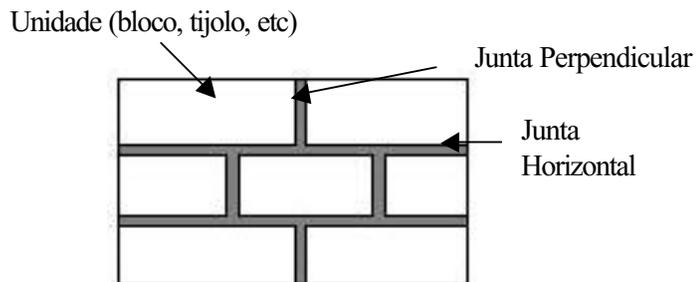


Figura 4.3 – Arranjo típico de uma parede de alvenaria.

Tradicionalmente os procedimentos de projeto de alvenaria estrutural foram sempre baseados em processos empíricos que se tentava validar através de experimentos de laboratório. Com o desenvolvimento do método dos elementos finitos foram introduzidos nos últimos 30 anos modelos numéricos refinados que permitem introduzir princípios de ciência da engenharia.

Modelagens numéricas são fundamentais, pois, além de serem capazes de explicar o comportamento das estruturas e fornecer suporte de normas racionais, se constituem em verdadeiros experimentos virtuais.

Do ponto de vista da modelagem computacional, (LOURENÇO et al, 1995), que efetua estudos relativos às técnicas de análise numérica de alvenaria estrutural com o uso do método dos elementos finitos, um painel de alvenaria sujeito a um dado carregamento pode ser modelado através de uma das seguintes abordagens: Micromodelagem e Macromodelagem.

### 4.3.1 Micromodelagem:

O objetivo da micromodelagem é a representação da alvenaria com as propriedades conhecidas de cada constituinte, bem como as da interface (Figura 4.4). A micromodelagem é, provavelmente, a melhor ferramenta disponível para o entendimento do comportamento de alvenaria.

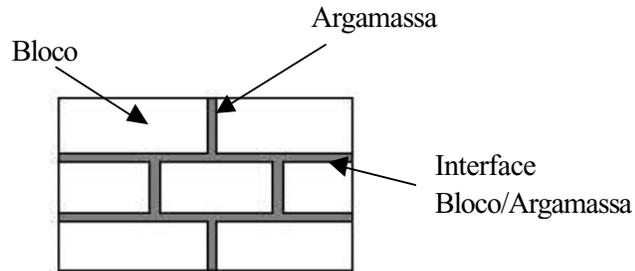


Figura 4.4 – Representação esquemática da micromodelagem.

Dependendo do nível de precisão exigida, uma das seguintes estratégias de micromodelagem pode ser utilizada:

- Micromodelagem detalhada: Unidades e juntas de argamassa são representadas por elementos contínuos, podendo eventualmente representar a interface unidade-argamassa. Nesta abordagem, são discretizados individualmente todos os elementos integrantes do painel, cada um com suas respectivas propriedades elásticas (Figura 4.5). Os modelos gerados possibilitam uma detalhada visão do perfil de distribuição de tensões e deformações ao longo do painel, mas, por outro lado, conduzem a um elevado número de graus de liberdade ativos do sistema de equações resultantes, gerando um problema de supercomputação, aspecto que se constitui em um empecilho de sua utilização na análise de grandes estruturas de alvenaria estrutural.

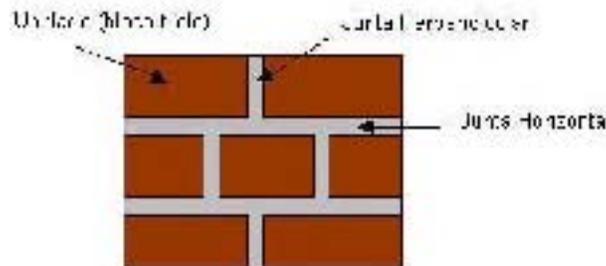


Figura 4.5 – Micromodelagem Detalhada

- Micromodelagem simplificada: A diferença deste tipo de modelagem para a modelagem detalhada consiste no fato de que nela as propriedades elásticas das argamassas de assentamento dos blocos não são levadas em consideração. Com efeito, ao invés de modelar as juntas, consideram-se os planos por elas formados como planos potenciais de ruptura, usualmente modelados através de elementos de interface; Tal representação da alvenaria conduz a um grande consumo de memória e de tempo, o que exige uma simplificação da micromodelagem. Vide Figura 4.6.

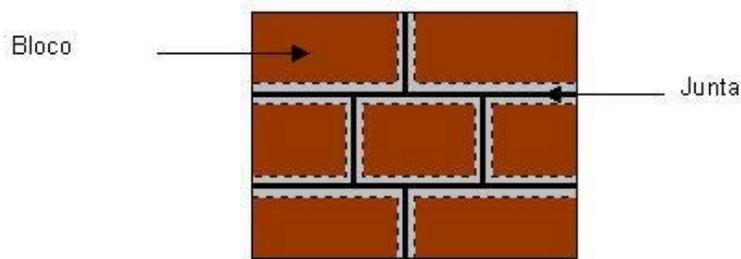


Figura 4.6 – Micromodelagem Simplificada

#### 4.3.2 Macromodelagem / Homogeneização

Macromodelagem é mais prática devido à redução do tempo requerido como também uma geração de malhas mais simples. Não é feita a distinção entre unidades individuais e juntas, tratando a alvenaria como material equivalente de propriedades homogêneas.

O procedimento de obtenção destas propriedades é referido como homogeneização e sua utilização na análise numérica é usualmente referida como macro modelagem.

Nesta abordagem, os componentes do painel (blocos e juntas de argamassa) são considerados como um único sólido com propriedades elásticas homogêneas (Figura 4.7). A técnica da homogeneização supera um importante problema na análise numérica da alvenaria estrutural, que é o elevado número de graus de liberdade envolvidos na análise, mas, por outro lado, este tipo de abordagem impossibilita a obtenção do perfil detalhado de distribuição de tensões e deformações do painel que, em

certos casos, pode ser de interesse do projetista. A seguir são apresentados os procedimentos para implementação da homogeneização.

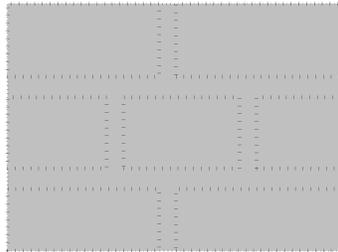


Figura 4.7 – Homogeneização

As propriedades do material equivalente podem ser obtidas usando o conceito de energia potencial de deformação, introduzindo as seguintes hipóteses (LEE et al, 1996):

- a) Perfeita aderência entre blocos e argamassas;
- b) Alinhamento das juntas verticais de argamassas.

A primeira hipótese assegura a integridade da ligação argamassa-bloco, garantindo a inexistência de deslocamentos relativos entre os materiais constituintes.

A segunda hipótese é fundamental no procedimento da homogeneização e, apesar de não corresponder à exata representação geométrica das juntas reais do painel, tem pouca influência do estado de tensão dos materiais constituintes da parede.

Na primeira etapa de homogeneização, os blocos e argamassas, Figura 4.8 (a), são homogeneizados admitindo-se que as juntas perpendiculares (*head joints*) estejam perfeitamente alinhadas, o que resulta na geometria indicada na Figura 4.8 (b).

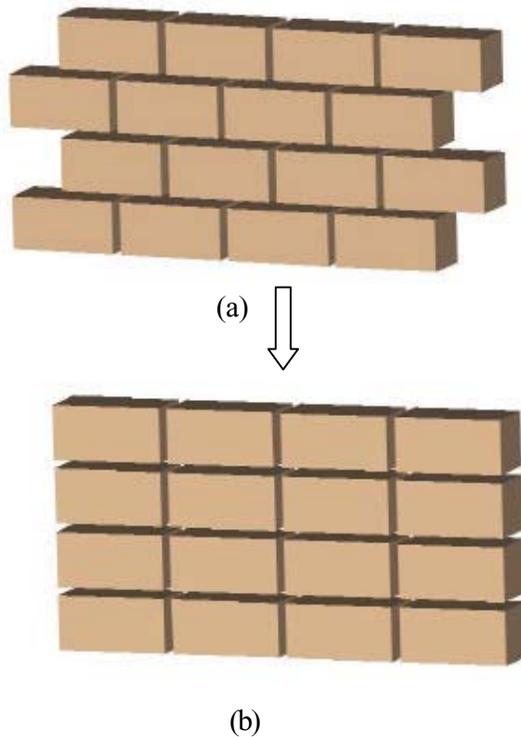


Figura 4.8 – Hipótese de homogeneização

Concebe-se a hipótese de que as juntas verticais são alinhadas pelo fato de que, se não as fossem, não se poderia assegurar o mesmo comportamento para os prismas verticais formados e, conseqüentemente, não seria possível usar propriedades unidirecionais dos materiais, na vertical.

Na segunda etapa, o modelo resultante, referido *stacked system*, é homogeneizado com as juntas horizontais e as propriedades ortotrópicas equivalentes para alvenaria são obtidas.

Considere um sistema bloco-argamassa com duas camadas alternadas (Figura 4.9), igualmente espaçadas, e com espessuras  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente. As espessuras relativas  $p'_1$  e  $p'_2$  são dadas como:

$$\begin{aligned}
 p'_1 &= \frac{t_1}{t_1 + t_2} \\
 p'_2 &= \frac{t_2}{t_1 + t_2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



Figura 4.9 – Sistema bloco-argamassa de camadas igualmente espaçadas.

As camadas são consideradas paralelas entre si e o eixo z é normal ao plano das camadas de argamassa.

Em geral, a relação deformação-tensão para um material com propriedades quaisquer pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{array}{c}
 \left. \begin{array}{l} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} & E_{15} & E_{16} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & E_{24} & E_{25} & E_{26} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & E_{34} & E_{35} & E_{36} \\ E_{41} & E_{42} & E_{43} & E_{44} & E_{45} & E_{46} \\ E_{51} & E_{52} & E_{53} & E_{54} & E_{55} & E_{56} \\ E_{61} & E_{62} & E_{63} & E_{64} & E_{65} & E_{66} \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{array} \right\} \\
 \left. \begin{array}{l} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{array} \right\} \rightarrow \text{Vetor Deformação} \\
 \left. \begin{array}{l} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{array} \right\} \rightarrow \text{Vetor Tensão} \\
 \begin{array}{l} \text{Matriz de Deformação} \\ \text{Vetor Tensão} \end{array}
 \end{array}
 \tag{2}$$

Para um modelo ortotrópico, esta relação se reduz a:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & -\frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{yz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Ou seja, são nulas as influências das tensões de cisalhamento sobre as deformações lineares e das tensões normais sobre as deformações angulares.

Para o modelo proposto, as tensões de cisalhamento exercem somente influência na deformação angular do corpo, conforme Figura 4.10:

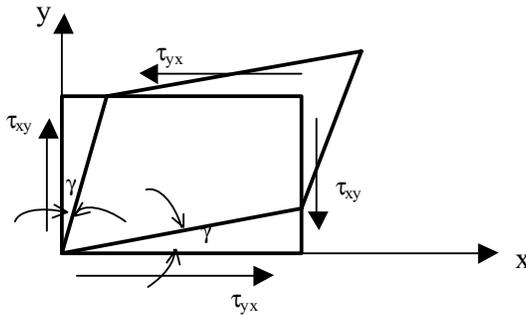


Figura 4.10 – Distorção do corpo devido às tensões de cisalhamento

As relações tensão-deformação, para o sistema adotado na figura 4.11, para cada camada podem ser escritas como : (GUERRARD, 1982) e (PANDE et al, 1989).

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xi} &= \frac{1}{E_{xi}} (\sigma_{xi} - \nu_{xyi} \sigma_{yi} - \nu_{xzi} \sigma_{zi}) \\ \varepsilon_{yi} &= \frac{1}{E_{yi}} (-\nu_{xyi} \sigma_{xi} + \sigma_{yi} - \nu_{yzi} \sigma_{zi}) \\ \varepsilon_{zi} &= \frac{1}{E_{zi}} (-\nu_{xz} \sigma_{xi} - \nu_{yzi} \sigma_{yi} + \sigma_{zi}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\gamma_{xyi} = \frac{\tau_{xyi}}{G_{xyi}}; \quad \gamma_{xzi} = \frac{\tau_{xzi}}{G_{xzi}}; \quad \gamma_{yzi} = \frac{\tau_{yzi}}{G_{yzi}}$$

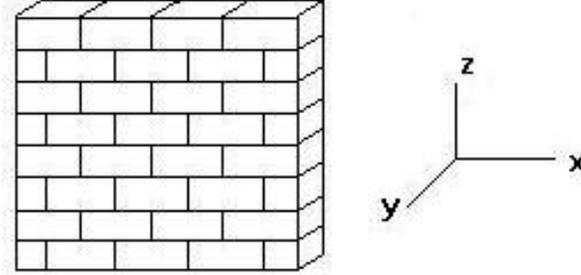


Figura 4.11 – Sistema de Coordenadas usado no painel de alvenaria.

no qual, o subscrito  $i$  é 1 para tijolos e 2 para argamassas. Sendo  $\bar{\sigma} = (\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \dots, \bar{\sigma}_z)^T$  definido como a tensão volumétrica média e  $\bar{\varepsilon} = (\bar{\varepsilon}_x, \bar{\varepsilon}_y, \dots, \bar{\gamma}_{zx})^T$  como a média de deformação no sólido homogeneizado, então:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} \sigma_{xi} dv & \bar{\sigma}_y &= \frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} \sigma_{yi} dv & \bar{\sigma}_z &= \frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} \sigma_{zi} dv \\ \bar{\varepsilon}_x &= \frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} \varepsilon_{xi} dv & \bar{\varepsilon}_y &= \frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} \varepsilon_{yi} dv & \bar{\varepsilon}_z &= \frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} \varepsilon_{zi} dv \end{aligned} \quad (5)$$

onde  $V_i$  é o volume da  $i$ ésima camada do prisma representativo e  $V$  é o volume do prisma equivalente. GUERRARD (1982).

Seja agora a energia de deformação do prisma representativo, que pode ser escrita como:

$$U_{re} = \sum_i \frac{1}{2} \int (\sigma_{xi} \varepsilon_{xi} + \sigma_{yi} \varepsilon_{yi} + \sigma_{zi} \varepsilon_{zi} + \tau_{xyi} \gamma_{xyi} + \tau_{xzi} \gamma_{xzi} + \tau_{yzi} \gamma_{yzi}) dv \quad (6)$$

e a energia de deformação do material equivalente, dado por:

$$U_e = \frac{1}{2} \int (\bar{\sigma}_x \bar{\varepsilon}_x + \bar{\sigma}_y \bar{\varepsilon}_y + \bar{\sigma}_z \bar{\varepsilon}_z + \bar{\tau}_{xy} \bar{\gamma}_{xy} + \bar{\tau}_{xz} \bar{\gamma}_{xz} + \bar{\tau}_{yz} \bar{\gamma}_{yz}) dv \quad (7)$$

Então, pela definição de energia de deformação, para cada sistema deverá ter igualdade das equações:

$$U_{re} = U_e \quad (8)$$

Com a introdução de tensões auxiliares ( $S_{xi}$ ,  $S_{yi}$ ,  $S_{xyi}$ ) e deformações auxiliares ( $e_{zi}$ ,  $e_{xzi}$ ,  $e_{yzi}$ ), consideradas como sendo os desvios dos valores das tensões e deformações, em virtude da introdução da hipótese de homogeneização, os componentes de tensão e deformação podem ser escritos como:

$$\begin{aligned} \sigma_{xi} &= \bar{\sigma}_x + S_{xi} \\ \sigma_{yi} &= \bar{\sigma}_y + S_{yi} \\ \sigma_{zi} &= \bar{\sigma}_z \\ \tau_{xyi} &= \bar{\tau}_{xy} + S_{xyi} \\ \tau_{xzi} &= \bar{\tau}_{xz} \\ \tau_{yzi} &= \bar{\tau}_{yz} \end{aligned} \quad (9)$$

e

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xi} &= \bar{\varepsilon}_x \\ \varepsilon_{yi} &= \bar{\varepsilon}_y \\ \varepsilon_{zi} &= \bar{\varepsilon}_z + e_{zi} \\ \gamma_{xyi} &= \bar{\gamma}_{xy} \\ \gamma_{xzi} &= \bar{\gamma}_{xz} + e_{xzi} \\ \gamma_{yzi} &= \bar{\gamma}_{yz} + e_{yzi} \end{aligned} \quad (10)$$

Agora, introduzindo a expressão  $\sigma_{xi} = \bar{\sigma}_x + S_{xi}$ , obtida em (9) na equação (5),

ou seja,  $\bar{\sigma}_x = \frac{1}{V} \sum_i \int_{v_i} \sigma_{xi} dv$ , chega-se a :

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{V} \sum_i \int_{v_i} (\bar{\sigma}_x + S_{xi}) dv$$

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{V} \int_{V_i} \bar{\sigma}_x dV + \frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} S_{xi} dV \quad , \text{mas}$$

$$\frac{1}{V} \int_{V_i} \bar{\sigma}_x dV = \frac{V}{V} \cdot \bar{\sigma}_x = \bar{\sigma}_x \quad (\bar{\sigma}_x \text{ é constante}), \text{ assim:}$$

$$\bar{\sigma}_x = \bar{\sigma}_x + \frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} S_{xi} dV \quad \text{o que implica em} \quad \frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} S_{xi} dV = 0$$

Como  $dv = dA \cdot h_i$ , tem-se:

$$\frac{1}{V} \sum_i \int_{V_i} S_{xi} dA \cdot h_i = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{A_i} h_i \cdot \int S_{xi} dA = 0$$

Sendo  $S_{xi}$  constante ao longo de uma camada, tem-se que:

$$\sum_i h_i \cdot S_{xi} \cdot A = 0 \quad \text{Multiplicando-se ambos os lados da equação por } \frac{1}{L},$$

onde  $L$  é a aresta do cubo representativo, chega-se a:

$$\sum_i \frac{h_i \cdot S_{xi} \cdot A}{L} = 0 \quad \text{Mas } \frac{h_i}{L} = p'_i, \text{ então: } A \cdot \sum p'_i \cdot S_{xi} = 0$$

Como a área é diferente de zero, implica que  $\sum p'_i \cdot S_{xi} = 0$

Ou seja, combinando as equações (7) e (8) com a (5) e considerando que  $\sum p'_i = 1$ , obtêm-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \sum_i p'_i S_{xi} &= 0; & \sum_i p'_i S_{yi} &= 0; & \sum_i p'_i S_{xyi} &= 0 \\ \sum_i p'_i e_{zi} &= 0; & \sum_i p'_i e_{xzi} &= 0; & \sum_i p'_i e_{yzi} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

A igualdade das energias de deformação, de acordo com a equação (8), pode, então ser demonstrada. Considerando-se a equação (6)

$$U_{re} = \sum_i \frac{1}{2} \int (\sigma_{xi} \varepsilon_{xi} + \sigma_{yi} \varepsilon_{yi} + \sigma_{zi} \varepsilon_{zi} + \tau_{xyi} \gamma_{xyi} + \tau_{xzi} \gamma_{xzi} + \tau_{yzi} \gamma_{yzi}) dv$$

e aplicando-se as igualdades das equações (9) e (10), obtêm-se:

$$U_{re} = \sum_i \frac{1}{2} \int [(\bar{\sigma}_x + S_{xi}) \cdot \bar{\varepsilon}_x + (\bar{\sigma}_y + S_{yi}) \cdot \bar{\varepsilon}_y + \bar{\sigma}_z \cdot (\bar{\varepsilon}_z + e_{zi})] + \\ + \sum_i \frac{1}{2} \int [(\bar{\tau}_{xy} + S_{xyi}) \cdot \bar{\gamma}_{xy} + \bar{\tau}_{xz} \cdot (\bar{\gamma}_{xz} + e_{xzi}) + \bar{\tau}_{yz} \cdot (\bar{\gamma}_{yz} + e_{yzi})] dv$$

Procedendo-se com as devidas operações matemáticas:

$$U_{re} = \sum_i \frac{1}{2} \int (\bar{\sigma}_x \bar{\varepsilon}_x + \bar{\sigma}_y \bar{\varepsilon}_y + \bar{\sigma}_z \bar{\varepsilon}_z + \bar{\tau}_{xy} \bar{\gamma}_{xy} + \bar{\tau}_{xz} \bar{\gamma}_{xz} + \bar{\tau}_{yz} \bar{\gamma}_{yz}) dv + \\ + \sum_i \frac{1}{2} \int (\bar{\varepsilon}_x \cdot S_{xi} + \bar{\varepsilon}_y \cdot S_{yi} + \bar{\sigma}_z \cdot e_{zi} + \bar{\gamma}_{xy} \cdot S_{xyi} + \bar{\tau}_{xz} \cdot e_{xzi} + \bar{\tau}_{yz} \cdot e_{yzi}) dv$$

Considerando-se um termo qualquer da segunda parcela, por exemplo:

$$\sum_i \frac{1}{2} \int (\bar{\varepsilon}_x \cdot S_{xi}) dv$$

Sabe-se que  $dv = dA \cdot h_i$  e que  $\frac{h_i}{L} = p'_i$ , então efetuando-se as devidas operações,

obtêm-se para a expressão acima:

$$\frac{1}{2} \sum_i \bar{\varepsilon}_x \cdot \int_A S_{xi} \cdot h_i \cdot dA = \frac{1}{2} \sum_i \bar{\varepsilon}_x \cdot \int_A S_{xi} \cdot p'_i \cdot L \cdot dA = \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_x \cdot L \int_A \sum_i p'_i \cdot S_{xi} \cdot dA$$

Mas, conforme equação (11),

$$\sum_i p'_i S_{xi} = 0$$

Como todos os termos têm idênticos valores nulos, segue-se que toda a segunda parcela é nula. Resulta, então:

$$U_{re} = U_e$$

Agora, através da Lei de Hooke generalizada, Equação (4), pode-se estabelecer os componentes de tensões e deformações, dados nas equações (9) e (10):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xi} &= \bar{\varepsilon}_x = \frac{1}{E_{xi}} \left[ (\bar{\sigma}_x + S_{xi}) - \nu_{xyi} (\bar{\sigma}_y + S_{yi}) - \nu_{xzi} \bar{\sigma}_z \right] \\ \varepsilon_{yi} &= \bar{\varepsilon}_y = \frac{1}{E_{yi}} \left( -\nu_{xyi} (\bar{\sigma}_x + S_{xi}) + (\bar{\sigma}_y + S_{yi}) - \nu_{yzi} \bar{\sigma}_z \right) \\ \varepsilon_{zi} &= \bar{\varepsilon}_z + e_{zi} = \frac{1}{E_{zi}} \left( -\nu_{xzi} (\bar{\sigma}_x + S_{xi}) - \nu_{yzi} (\bar{\sigma}_y + S_{yi}) + \bar{\sigma}_z \right) \\ \gamma_{xyi} &= \bar{\gamma}_{xz} = \frac{1}{G_{xyi}} \cdot (\bar{\tau}_{xy} + S_{xyi}) \\ \gamma_{xzi} &= \bar{\gamma}_{xz} + e_{xzi} = \frac{\bar{\tau}_{xz}}{G_{xzi}} \\ \gamma_{yzi} &= \bar{\gamma}_{yz} + e_{yzi} = \frac{\bar{\tau}_{yz}}{G_{yzi}}\end{aligned}\tag{12}$$

A partir deste estágio de procedimento serão consideradas duas hipóteses para determinação das propriedades do material equivalente: (i) isotropia transversal (SALAMON, 1969) e (ii) ortotropia segundo as direções x, y e z (LEE et al,1996).

#### 4.3.2.1 Propriedades do material equivalente considerando isotropia transversal.

Neste caso, considera-se que as propriedades físicas para as direções contidas no plano horizontal são idênticas. Tem-se, assim que  $E_{xi} = E_{yi}$  e  $\nu_{xy} = \nu_{yx}$ .

Os três componentes de tensão e deformação auxiliares podem ser eliminados da equação (12), usando as condições impostas pela equação (11).

Representando por índice 1 as propriedades do plano horizontal e por índice 2 as do plano vertical, as relações entre tensões e deformações médias são escritas por:

$$\bar{\varepsilon}_x = \frac{1}{\sum \frac{p'E_{1i}}{1-\nu_{1i}} \sum \frac{p'E_{1i}}{1+\nu_{1i}}} \left[ \sum \frac{p'E_{1i}}{1-\nu_{1i}^2} \cdot \bar{\sigma}_x - \sum \frac{p'\nu_{1i}E_{1i}}{1-\nu_{1i}^2} \cdot \bar{\sigma}_y \right] - \frac{\sum \frac{p'\nu_{2i}}{1-\nu_{1i}}}{\sum \frac{p'E_{1i}}{1-\nu_{1i}}} \cdot \bar{\sigma}_z \quad (13)$$

$$\bar{\varepsilon}_y = \frac{1}{\sum \frac{p'E_{1i}}{1-\nu_{1i}} \sum \frac{p'E_{1i}}{1+\nu_{1i}}} \left[ \sum \frac{p'\nu_{1i}E_{1i}}{1-\nu_{1i}^2} \cdot \bar{\sigma}_x - \sum \frac{p'E_{1i}}{1-\nu_{1i}^2} \cdot \bar{\sigma}_y \right] - \frac{\sum \frac{p'\nu_{2i}}{1-\nu_{1i}}}{\sum \frac{p'E_{1i}}{1-\nu_{1i}}} \cdot \bar{\sigma}_z$$

$$\bar{\varepsilon}_z = \frac{\sum \frac{p'\nu_{2i}}{1-\nu_{1i}}}{\sum \frac{p'E_{1i}}{1-\nu_{1i}}} \cdot (\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y) + \left\{ \sum p' \left[ \frac{1}{E_{2i}} - \frac{2 \cdot \nu_{2i}^2}{(1-\nu_{1i})E_{2i}} + 2 \cdot \frac{\left( \sum \frac{p'\nu_{2i}}{1-\nu_{1i}} \right)^2}{\sum \frac{p'E_{1i}}{1-\nu_{1i}}} \right] \right\} \cdot \bar{\sigma}_z$$

$$\bar{\gamma}_{xy} = \frac{\bar{\tau}_{xy}}{\sum p' \cdot G_{1i}} \quad \bar{\gamma}_{xz} = \sum \frac{p'}{G_{2i}} \cdot \bar{\tau}_{xz} \quad \bar{\gamma}_{yz} = \sum \frac{p'}{G_{2i}} \cdot \bar{\tau}_{yz}$$

Na equação (13), que representa a Lei de Hooke para o material homogêneo, foi introduzida a seguinte notação:  $E_{1i} = E_{xi} = E_{yi}$ ,  $E_{2i} = E_{zi}$ ,  $\nu_{1i} = \nu_{xyi} = \nu_{yxi}$  e  $\nu_{2i} = \nu_{xz} = \nu_{yz}$ .

$$\nu'_1 = \frac{\sum_i \frac{p'_i \nu_{1i} E_{1i}}{1-\nu_{1i}^2}}{\sum_i \frac{p'_i E_{1i}}{1-\nu_{1i}^2}}; \quad \nu'_2 = (1-\nu'_1) \sum_i \frac{p'_i \nu_{2i}}{1-\nu_{1i}}$$

$$E'_1 = (1 - \nu_1'^2) \sum_i \frac{p'_i E_{1i}}{1 - \nu_{1i}^2} ; \quad E'_2 = \frac{1}{\sum_i \frac{p'_i}{E_{1i}} \left[ \frac{E_{1i}}{E_{2i}} - \frac{2\nu_{2i}^2}{1 - \nu_{2i}} \right] + \frac{2\nu_2'^2}{(1 - \nu_1')E_1}}$$

$$G'_1 = \sum_i p'_i G_{1i} ; \quad G'_2 = \frac{1}{\sum_i \frac{p'_i}{G_{2i}}}$$

Estas equações foram programadas com o uso do software Mathcad e os valores obtidos destas propriedades, para um caso geral, estão apresentadas no Apêndice A.

#### 4.3.2.2 Propriedades do material equivalente considerando ortotropia.

Neste caso, considera-se que as propriedades físicas para as três direções são diferentes entre si. Os procedimentos para obtenção dos parâmetros físicos são análogos aos apresentados na abordagem anterior (GUERRARD, 1982) e (PANDE et al, 1989) e as etapas de cálculo são mostradas no Apêndice B, diretamente na forma de uma planilha Mathcad.

Uma vez implementados os procedimentos de homogeneização resultam as propriedades ortotrópicas do material equivalente que são anotadas por  $\bar{E}_x$ ,  $\bar{E}_y$ ,  $\bar{E}_z$ ,  $\bar{\nu}_{xy}$ ,  $\bar{\nu}_{xz}$ ,  $\bar{\nu}_{yz}$ ,  $\bar{G}_{xy}$ ,  $\bar{G}_{yz}$ ,  $\bar{G}_{xz}$ .

Entretanto, as tensões e deformações locais do painel de alvenaria, ou seja, nas unidades, juntas horizontais e verticais, não correspondem ou não são as mesmas das tensões e deformações médias obtidas para o painel como um todo. Para a definição de valores locais, é necessário relacionar as tensões e deformações de unidades e juntas com as obtidas para o painel de alvenaria, segundo os procedimentos de homogeneização, ou seja: (PANDE et al, 1989).

$$\sigma_b = (S_b) \cdot \sigma'$$

$$\sigma_{bj} = (S_{bj}) \cdot \sigma'$$

$$\sigma_{hj} = (S_{hj}) \cdot \sigma'$$

nas quais os subscritos  $b$ ,  $bj$  e  $hj$  representam, respectivamente, o bloco, junta horizontal (*bed joint*) e junta vertical (*head joint*) e  $\sigma$  corresponde às tensões que são obtidas diretamente da análise de elementos finitos realizada com as propriedades decorrentes da homogeneização.

Esta relação é efetuada através da matriz estrutural  $S$ , onde as expressões para os seus elementos são funções das dimensões das unidades e dos parâmetros elásticos das juntas de argamassa e dos blocos ou tijolos.

Estas expressões, estudadas por (GUERRARD, 1982) e (PANDE et al, 1989), encontram-se apresentadas no Apêndice B.

Pode-se mostrar, Figura 4.12, que, sob uma carga compressiva uniformemente distribuída, os constituintes da alvenaria ficam submetidos ao seguinte estado de tensões:

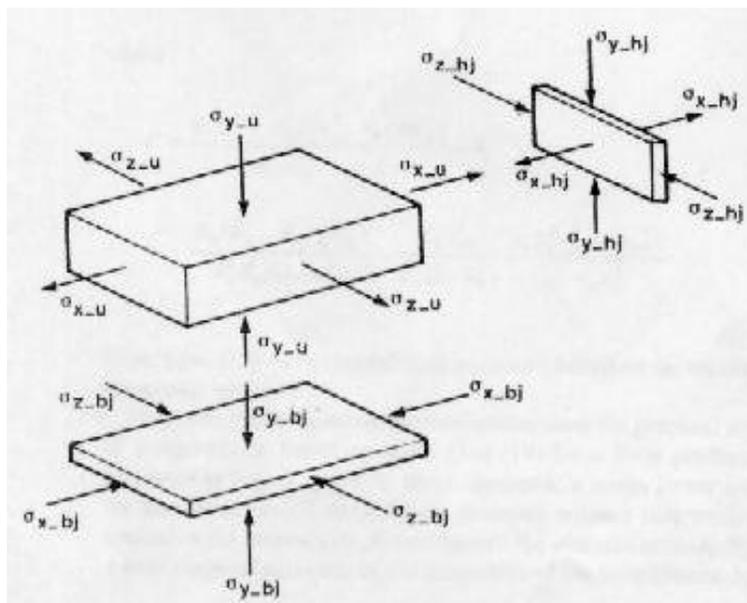


Figura 4.12 – Estado de tensões nos constituintes da alvenaria devido a um carregamento vertical uniformemente distribuído. (PANDE, et al – 1994)

# 5

## *EXEMPLOS DE APLICAÇÃO*

---

---

### **5.1 EXEMPLO 1**

O objetivo deste exemplo é o de aferir o processo de Homogeneização. Considerou-se que a micromodelagem representa, a princípio, a solução mais precisa, supondo-se que as propriedades físicas e mecânicas dos materiais constituintes foram calibradas em laboratório.

OLIVEIRA & SILVA (2001a) apresentaram as análises realizadas em um painel típico de alvenaria estrutural dotado de abertura, segundo a técnica da micromodelagem, continuamente apoiado sobre uma viga de concreto com seção transversal 14 cm x 40 cm. A Figura 5.1 mostra a geometria da parede estudada.

O painel, de blocos maciços com dimensões 14x19x39cm, conta com uma abertura de janela com dimensão 1,60 m de comprimento e 1,0 m de altura. O carregamento atuante consiste numa carga compressiva aplicada no topo da parede num valor de 0.32 MPa. Este carregamento, calculado conforme indicado pela Norma Brasileira NB 1228 (Cálculo de Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados de Concreto),

corresponde a 50% da tensão de ruptura do painel, situação que assegura um comportamento elástico linear da parede.

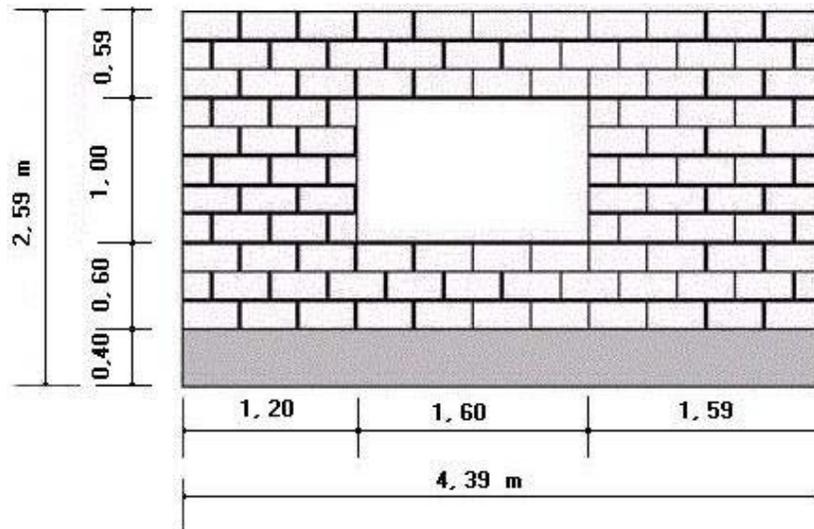


Figura 5.1 – Geometria da parede

As propriedades elásticas dos materiais utilizados na micromodelagem acham-se indicadas na Tabela 5.1, a seguir.

Material	Módulo de Young MPa	Coefficiente de Poisson
Argamassa	1 300	0,20
Blocos	18 000	0,10
Concreto	21 000	0,20

Tabela 5.1 – Propriedades Elásticas dos Componentes

As propriedades elásticas do material equivalente, calculadas conforme técnicas da homogeneização no capítulo 4 desta dissertação, acham-se indicadas nas Tabelas 5.2 e 5.3, a seguir e os procedimentos de cálculo estão nos apêndice A e B.

Módulo de Young (MPa)	Módulo de Elasticidade Transversal (MPa)	Coefficiente de Poisson
$E_x = 13\,480$	$G_{xy} = 4\,021$	$\nu_{xy} = 0,074$
$E_y = 11\,090$	$G_{yz} = 4\,692$	$\nu_{yz} = 0,106$
$E_z = 16\,670$	$G_{xz} = 5\,836$	$\nu_{zx} = 0,099$

Tabela 5.2 – Propriedades elásticas segundo a ortotropia

Módulo de Young (MPa)	Módulo de Elasticidade Transversal (MPa )	Coefficiente de Poisson
$E_x = 17\,170$	$G_{xy} = 5\,160$	$\nu_{xy} = 0,106$
$E_y = 11\,400$	$G_{yz} = 7\,790$	$\nu_{yz} = 0,106$
$E_z = 17\,170$	$G_{xz} = 7\,790$	$\nu_{zx} = 0,1004$

Tabela 5.3 – Propriedades elásticas segundo a isotropia transversal

Para a análise do painel homogeneizado foram estudadas malhas de 12, 20, 30 e 40cm, sendo observado a convergência dos resultados. O exemplo analisado apresenta malha de 20cm. Utilizou-se o elemento Plane 42 (ANSYS 6.0, Element Library) usado para modelagem bidimensional de estruturas sólidas. É definido por quatro nós, tendo dois graus de liberdade por nó, ou seja, translação nas direções x e y. A geometria para este elemento está mostrada na Figura 5.2.

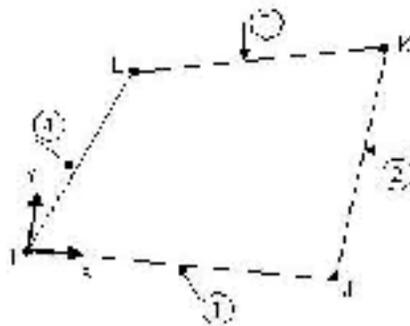


Figura 5.2 – Elemento Plane 42

Foram obtidos os valores das tensões normais  $\sigma_x$  ao longo da parede, através das técnicas de micromodelagem e homogeneização, sendo esta última por intermédio da isotropia transversal e ortotropia (BARRETO a e c), conforme capítulo 4 desta dissertação:

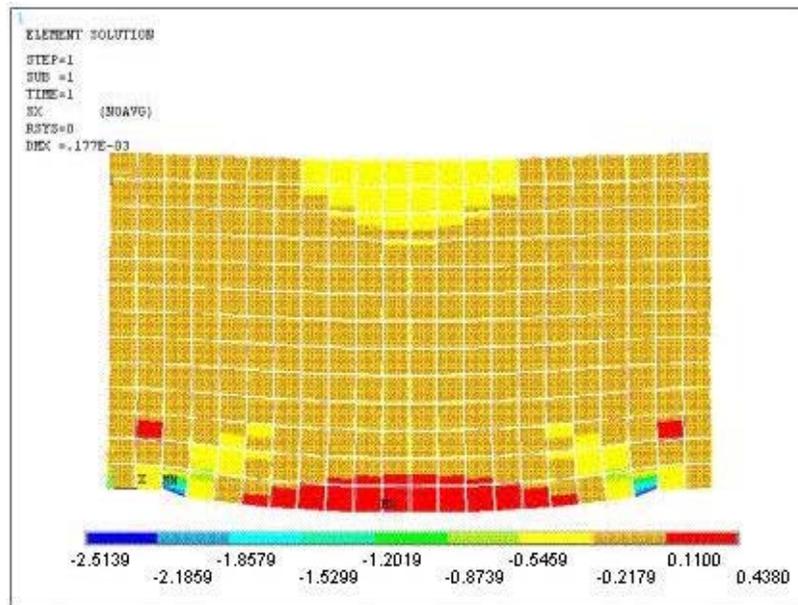


Figura 5.3 – Tensões Normais  $\sigma_x$  via técnica de micromodelagem – sem abertura (MPa).

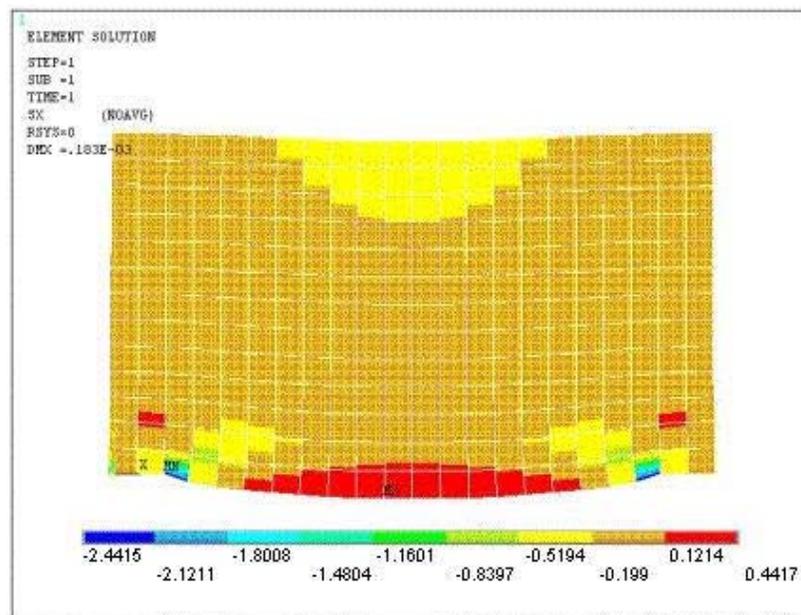


Figura 5.4 – Tensões Normais  $\sigma_x$  , via técnica de homogeneização(ortotropia) – sem abertura (MPa).

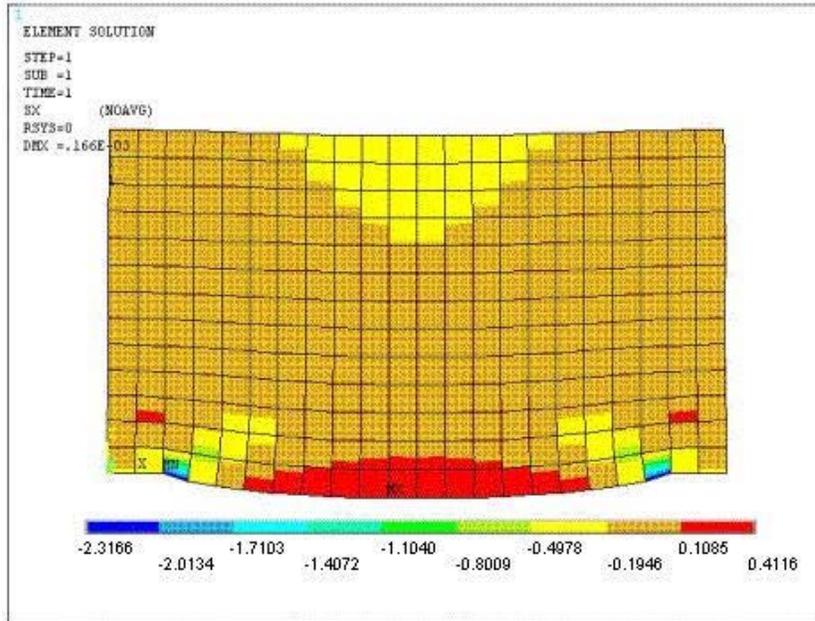


Figura 5.5 – Tensões Normais  $\sigma_x$  , via técnica de homogeneização(isotropia transversal) – sem abertura (MPa).

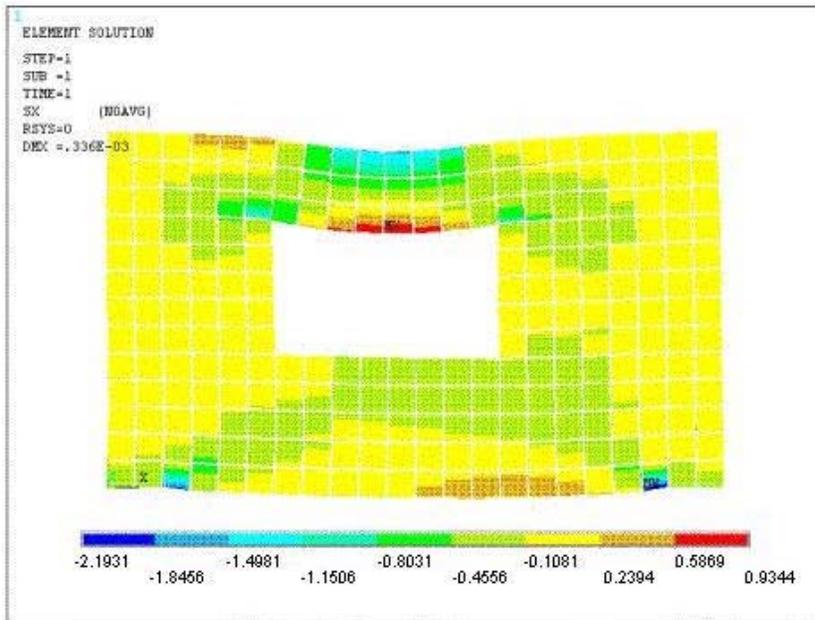


Figura 5.6 – Tensões Normais  $\sigma_x$  , via técnica de micromodelagem – com abertura (MPa).

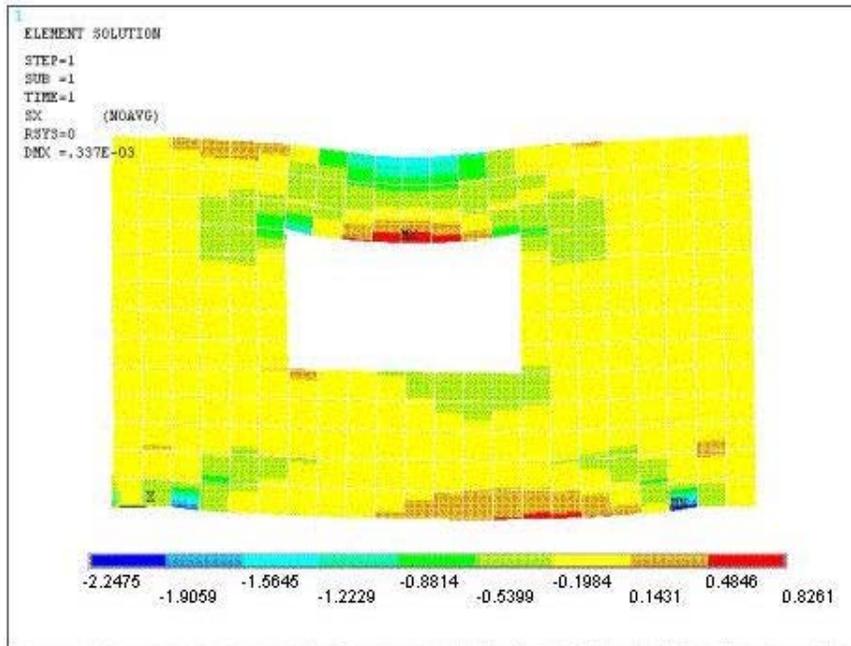


Figura 5.7 – Tensões Normais  $\sigma_x$  , via técnica de homogeneização(ortotropia)  
 – com abertura (MPa).

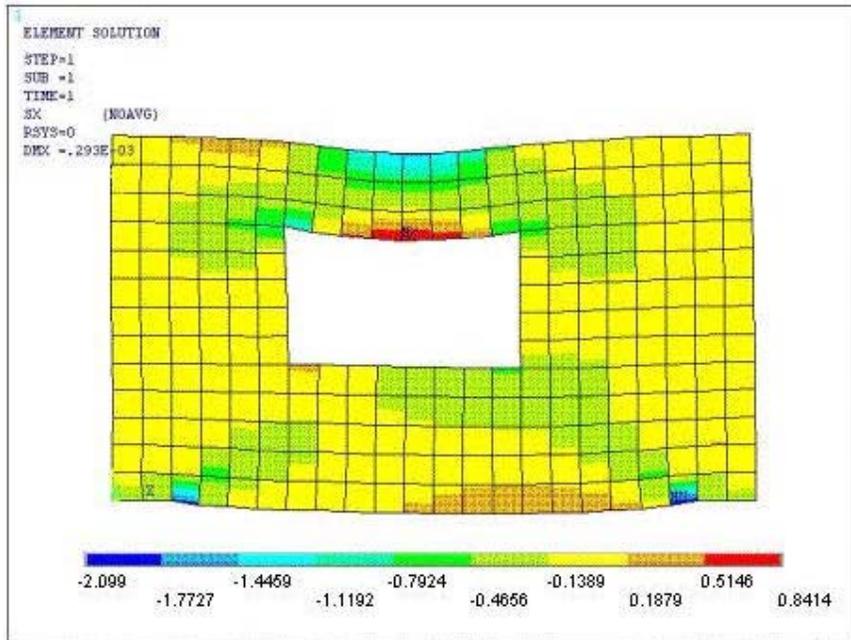


Figura 5.8 – Tensões Normais  $\sigma_x$  , via técnica de homogeneização(isotropia transversal)  
 – com abertura (MPa).

### 5.1.1 Resultados e Discussões

Nas análises, considerou-se X o eixo horizontal (ao longo do comprimento da parede), Y o eixo vertical (ao longo da altura da parede), adotando-se a origem no vértice inferior esquerdo. Foram restringidos os nós da base dos dois elementos mais extremos em todas as direções, deixando-se os demais livres.

A análise dos perfis de distribuição de tensões sem a presença de abertura, para as duas abordagens, permite concluir que o conjunto parede-viga funciona de forma semelhante a um arco atirantado com a parede quase que integralmente comprimida e a viga de apoio tracionada em sua maior parte (Figuras 5.3 e 5.4 e 5.5). Este fato é visível em todas as abordagens utilizadas.

Pode-se ainda observar uma expressiva concentração de tensões nas proximidades dos apoios, fato que concorre para a redução dos momentos fletores na viga quando comparados com os procedimentos usuais de dimensionamento.

A análise dos perfis de distribuição de tensões com a presença da abertura, para as abordagens descritas, permite concluir que a existência da abertura no painel não interfere na formação do arco e, a exemplo da análise sem abertura, parcela importante da parede encontra-se comprimida enquanto a viga de apoio apresenta-se tracionada (Figuras 5.6 e 5.7 e 5.8). Esta situação foi observada em todas as modelagens. Por outro lado, é visível a perturbação que a existência da abertura provoca no perfil de distribuição de tensões do painel. O lintel na parte superior da abertura, por exemplo, se comporta de maneira semelhante a uma viga, desenvolvendo elevadas tensões de tração nos blocos. Idêntico comportamento foi observado, com menor importância, na parte inferior da abertura. Estas ocorrências apontam a necessidade de disposição de vergas e contra-vergas nas aberturas para resistir aos esforços de tração ali gerados. Observou-se que a existência da janela concorreu para o aumento da tensão de tração horizontal na viga. Outro aspecto a ser considerado é que a existência da abertura da janela contribuiu para a redução da rigidez da estrutura, ocasionado um acréscimo do deslocamento do centro da viga.

Na Tabela 5.4 é apresentada uma comparação de resultados entre a hipótese da micro-modelagem detalhada e da homogeneização.

<b>Valores Máximos de Tensão</b>	<b>Painel sem abertura (MPa)</b>	<b>Diferença Percentual %</b>	<b>Painel com abertura (MPa)</b>	<b>Diferença Percentual %</b>
<b>Homogeneização (ortotropia)</b>				
Compressão	-2.4415	<b>2.9</b>	-2.2475	<b>2.4</b>
Tração	0.4417	<b>1.0</b>	0.8261	<b>11.6</b>
<b>Homogeneização (isotropia transversal)</b>				
Compressão	-2.3166	<b>7.9</b>	-2.099	<b>4.3</b>
Tração	0.4116	<b>6.0</b>	0.8414	<b>10</b>
<b>Micromodelagem</b>				
Compressão	-2.5139	-	-2.1931	-
Tração	0.4380	-	+0.9344	-

Tabela 5.4 – Comparação entre resultados das técnicas de homogeneização e micromodelagem.

Os valores apresentados apontam para um bom desempenho da análise com a técnica da homogeneização. A diferença máxima observada não ultrapassou 11.6%, sendo que a variação média observada foi de 5.8%.

Verificou-se, através da análise comparativa, que a técnica da homogeneização e a micromodelagem detalhada conduzem a resultados convergentes sobre o comportamento global de paredes de alvenaria estrutural, aspecto que torna conveniente o recurso à técnica da homogeneização quando da análise de grandes estruturas de alvenaria.

A técnica de homogeneização permite-nos determinar as tensões para cada constituinte da alvenaria, conforme apresentado no Capítulo 4. As tabelas a seguir apresentam os valores das tensões nos blocos e nas juntas horizontais para os três elementos indicados na Figura 5.9. Os procedimentos de cálculo encontram-se no Apêndice B. Para cada ponto, nas tabelas a seguir, tem-se duas linhas com valores das tensões que correspondem, respectivamente, à micromodelagem e à homogeneização segundo a ortotropia.

Elemento	Sx MPa	Sy MPa
1	-0.3704	-0.1472
	-0.3895	-0.1564
2	-0.5317	-0.9409
	-0.5593	-0.8953
3	-0.4087	-0.8098
	-0.4133	-0.7667

(a)

Elemento	Sx MPa	Sy MPa
1	-0.0615	-0.1465
	-0.0663	-0.1563
2	-0.2878	-0.9953
	-0.2565	-0.8953
3	-0.2572	-0.8479
	-0.2148	-0.7667

(b)

Tabela 5.5 – Valores das tensões obtidas no bloco (a) e nas juntas horizontais (b)

Os valores apresentados apontam para um bom desempenho da análise com a técnica da homogeneização. Com efeito, a diferença máxima observada não ultrapassou 16%, sendo que a variação média observada foi de 7,7%.

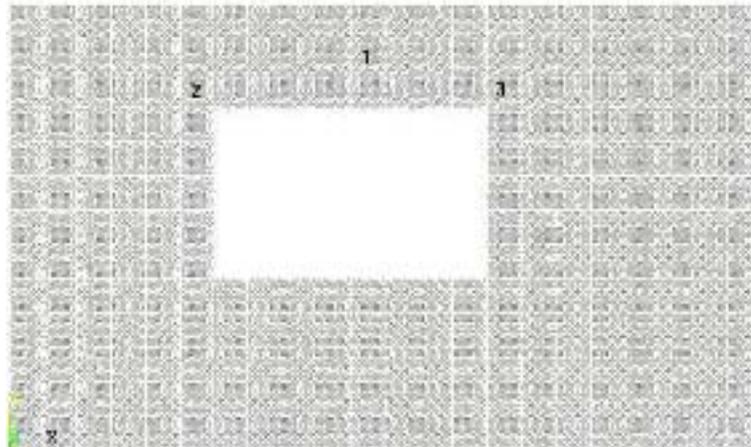


Figura 5.9 – Detalhe dos elementos analisados

## 5.2 EXEMPLO 2

Semelhantemente ao exemplo 2, Oliveira & Nogueira (2001b) apresentaram as análises realizadas, em regime elástico linear, em uma parede de alvenaria estrutural não armada, com e sem abertura, para ação de carregamento estático compressivo situado no seu próprio plano. Foi utilizada a micro modelagem detalhada com representação individualizada de cada um dos componentes do painel, a saber: blocos e juntas de argamassa (vertical e horizontal).

A Figura 5.10 mostra a geometria da parede estudada.. A relação entre a altura e espessura da parede é de 18,6 e o carregamento aplicado no topo vale 0.32 MPa. A parede acha-se continuamente apoiada em sua base.

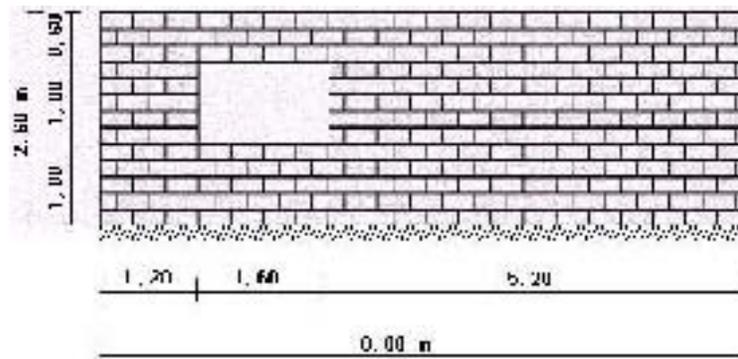


Figura 5.10 – Geometria da Parede

A Tabela 5.6 aponta os valores utilizados das propriedades elásticas dos constituintes da parede analisada.

Material	Módulo de Young MPa	Coefficiente de Poisson
Argamassa	1 300	0.20
Blocos	18 000	0.10

Tabela 5.6 – Propriedades Elásticas

As propriedades elásticas ortotrópicas do material equivalente, bem como o elemento utilizado, são os mesmos descritos no exemplo 1 deste capítulo.

### 5.2.1 Resultados e Discussões

Nas análises, considerou-se X o eixo horizontal, ao longo do comprimento da parede, Y o eixo vertical, ao longo da altura da parede, adotando-se a origem no vértice inferior esquerdo. Foram restringidos todos os nós da base em todas as direções, deixando-se os demais livres. A malha adotada encontra-se indicada nas figuras seguintes.

Inicialmente, foram analisadas as tensões normais  $\sigma_x$  ao longo da parede sem a abertura e a seguir, foi analisado o mesmo perfil de distribuição das tensões normais  $\sigma_x$  na parede, considerando uma abertura.

Foram obtidos os valores das tensões normais  $\sigma_x$  ao longo da parede, através das técnicas de micromodelagem e homogeneização, considerando apenas a ortotropia, por conduzir a melhores resultados. As malhas são análogas nos dois casos.

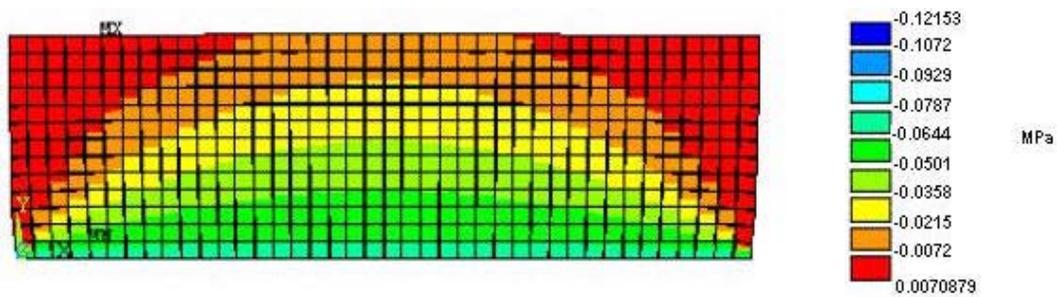


Figura 5.11 – Tensões Normais  $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem– sem abertura

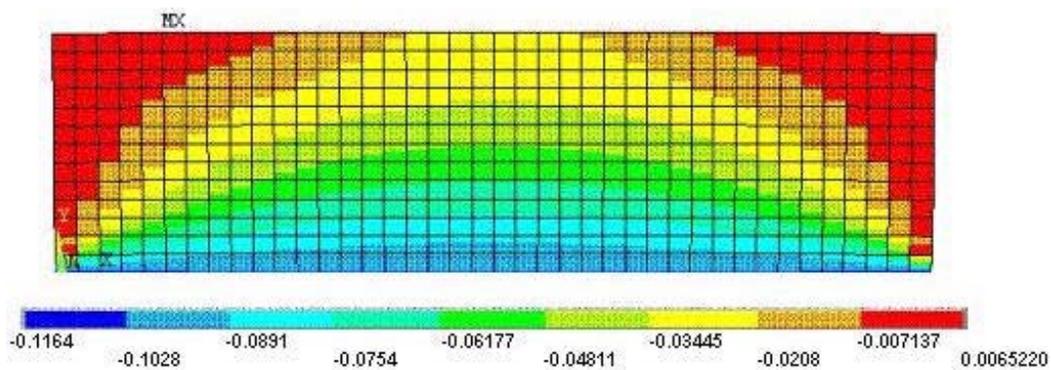


Figura 5.12 – Tensões Normais  $\sigma_x$ , via técnica de homogeneização – sem abertura (MPa).

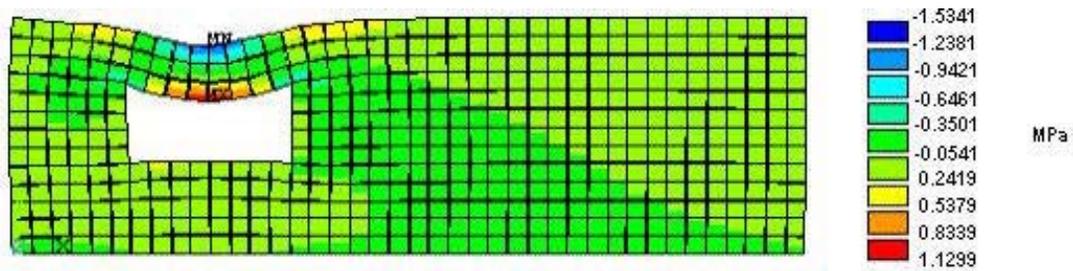


Figura 5.13 – Tensões Normais  $\sigma_x$ , via técnica de micromodelagem – com abertura

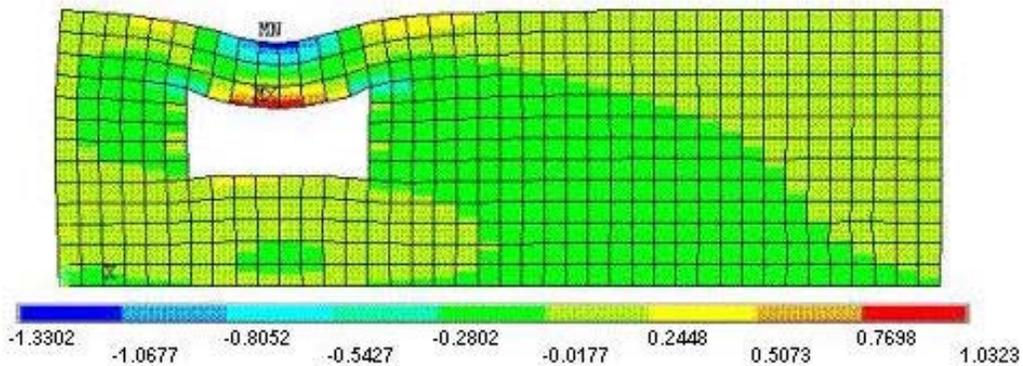


Figura 5.14 – Tensões Normais  $\sigma_x$ , via técnica de homogeneização – com abertura (MPa).

Na análise da distribuição das tensões do painel sem abertura, Figuras 5.11 e 5.12, pode ser visto, claramente, o comportamento freqüentemente referido como efeito de arco, ou seja, a maior parte da parede acha-se comprimida e uma pequena parcela próxima do topo da mesma encontra-se tracionada.

A distribuição das tensões no painel dotado de abertura, Figuras 5.13 e 5.14, o mostra efeito local da abertura no comportamento global da parede. Observa-se o comportamento de flecha das vergas e contra vergas nas regiões superior e inferior da abertura.

O resumo dos resultados obtidos, comparando-se as duas abordagens, bem como a variação percentual entre estas duas técnicas, encontra-se na Tabela 5.7 a seguir:

<b>Valores Máximos de Tensão</b>	<b>Painel sem abertura (MPa)</b>	<b>Painel com abertura (MPa)</b>
<b>Homogeneização</b>		
Compressão	-0.1164	-1.3302
Tração	0.006522	1.0323
<b>Micromodelagem</b>		
Compressão	-0.12153	-1.5341
Tração	+0.0070879	+1.1299
<b>Diferença Percentual</b>		
Compressão (%)	<b>4.2</b>	<b>13.3</b>
Tração (%)	<b>8.0</b>	<b>8.6</b>

Tabela 5.7 – Comparação entre resultados das técnicas de micromodelagem e homogeneização.

Com base nos resultados, verifica-se, claramente, além da semelhança visual no perfil de distribuição de tensões utilizando-se estas duas abordagens, que a técnica de homogeneização conduz a bons resultados, uma vez que a maior variação percentual obtida entre as duas técnicas foi de 13.3 %, sendo de apenas 8,5% a média desta variação, fato que atesta o seu satisfatório desempenho.

### 5.3 EXEMPLO 3

O objetivo deste exemplo é o de mostrar que o processo de Homogeneização se constitui em uma ferramenta de projeto eficiente e substitui com vantagens o cálculo manual, sem dificuldades adicionais.

Acceti, (1998), obteve a distribuição de tensões em painéis de alvenaria estrutural de um edifício de 08 pavimentos, através do procedimento de paredes isoladas. Na aplicação deste, pode haver a consideração ou não das abas. Os resultados obtidos encontram-se apresentados nas Tabelas 5.8 e 5.9.

<b>Painel 1</b>	<b>Painel 2</b>	<b>Painel 3</b>	<b>Painel 4</b>	<b>Painel 5</b>
<b>Tensão (MPa)</b>				
± 0.2840	± 0.3090	± 0.2870	± 0.2810	± 0.2060

Tabela 5.8 – Valores de tensão nas fibras extremas do 1<sup>o</sup> pavimento, com as abas.

<b>Painel 1</b>	<b>Painel 2</b>	<b>Painel 3</b>	<b>Painel 4</b>	<b>Painel 5</b>
<b>Tensão (MPa)</b>				
± 0.5450	± 0.5450	± 0.5450	± 0.5450	± 0.3780

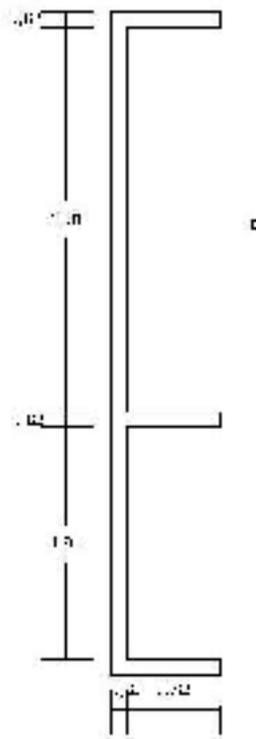
Tabela 5.9 – Valores de tensão nas fibras extremas do 1<sup>o</sup> pavimento, sem as abas.

A geometria dos painéis utilizados encontra-se indicada na Figura 5.15. Tratam-se de paredes estruturais típicas encontradas na maioria das construções que utilizam esta tecnologia construtiva. O carregamento atuante consiste numa carga advinda de esforços horizontais de vento e desaprumo, conforme valores indicados na Tabela 5.10.

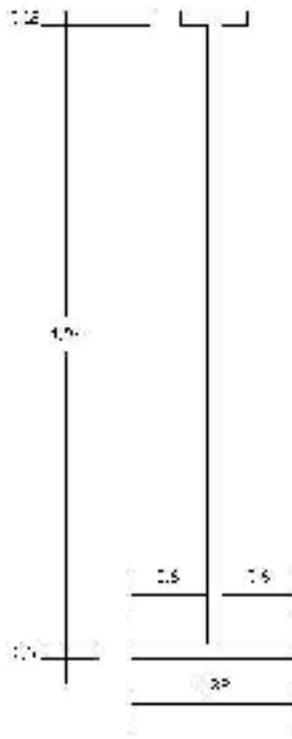
Andar	Painel 1 Força (KN)	Painel 2 Força (KN)	Painel 3 Força (KN)	Painel 4 Força (KN)	Painel 5 Força (KN)
8	1.91	1.92	2.76	2.08	0.58
7	3.39	3.42	4.91	3.69	1.02
6	3.32	3.35	4.81	3.62	1.00
5	3.12	3.15	4.52	3.41	0.94
4	2.93	2.95	4.24	3.20	0.88
3	2.74	2.76	3.97	2.99	0.83
2	2.50	2.52	3.62	2.73	0.75
1	2.50	2.52	3.62	2.73	0.75

Tabela 5.10 – Forças horizontais atuantes

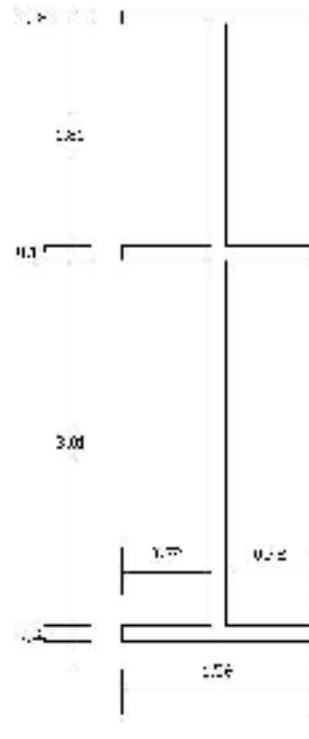
Painel 1



Painel 2



Painel 3



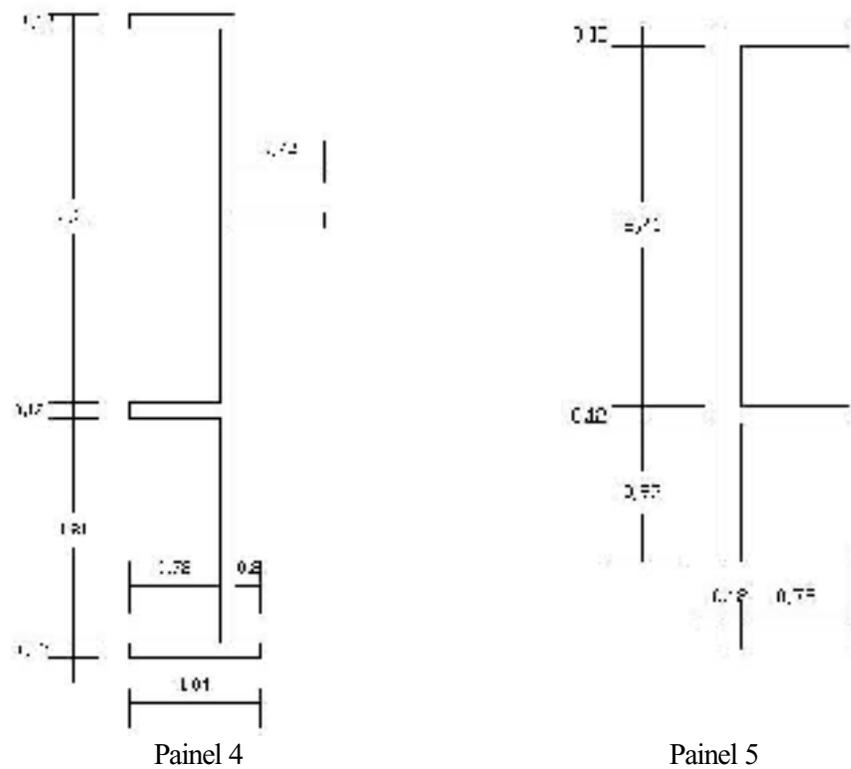


Figura 5.15 – Detalhes geométricos dos painéis estudados

No edifício, de planta simétrica, cuja modulação encontra-se na Figura 5.16 e perspectiva na Figura 5.17, foram utilizados blocos estruturais de dimensões 12x19x39 e pé-direito de 2.60m.

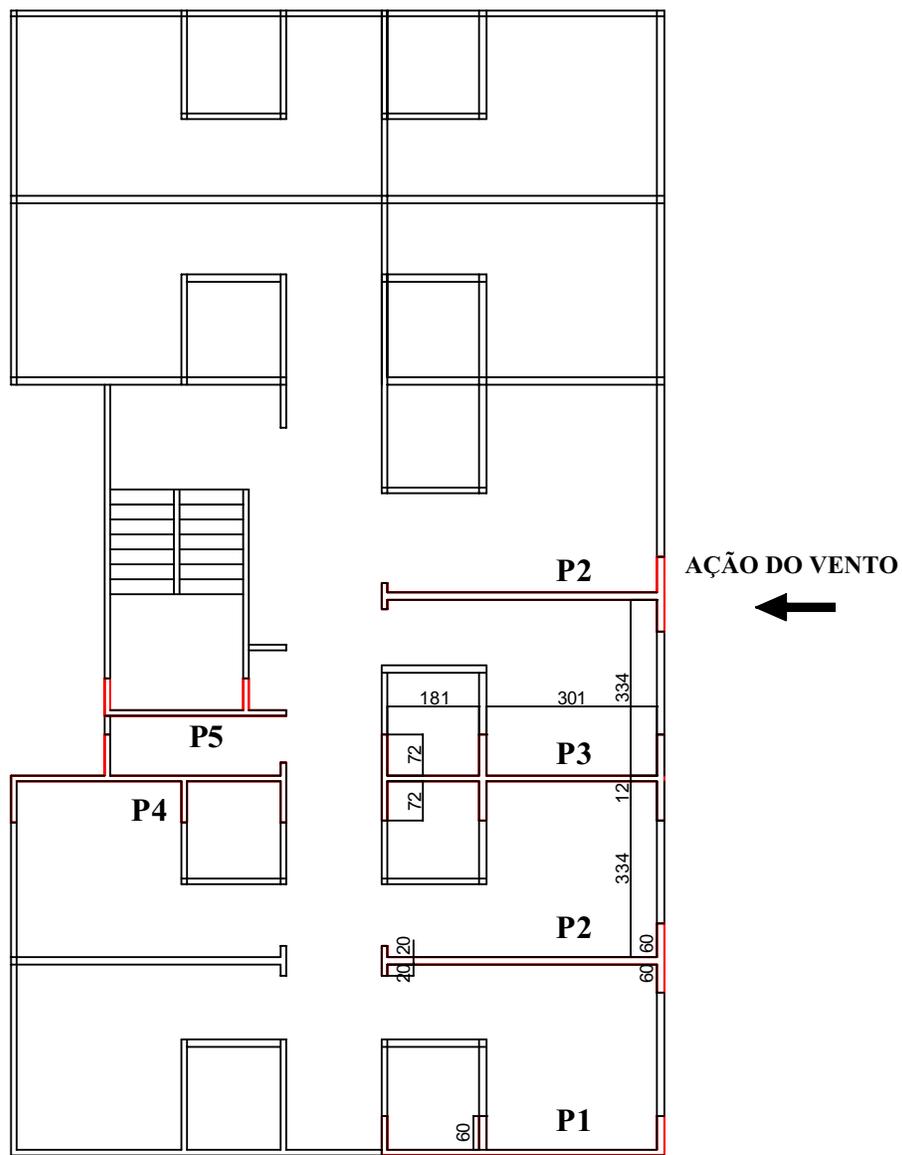


Figura 5.16 – Planta do pavimento tipo, destacando os painéis analisados.

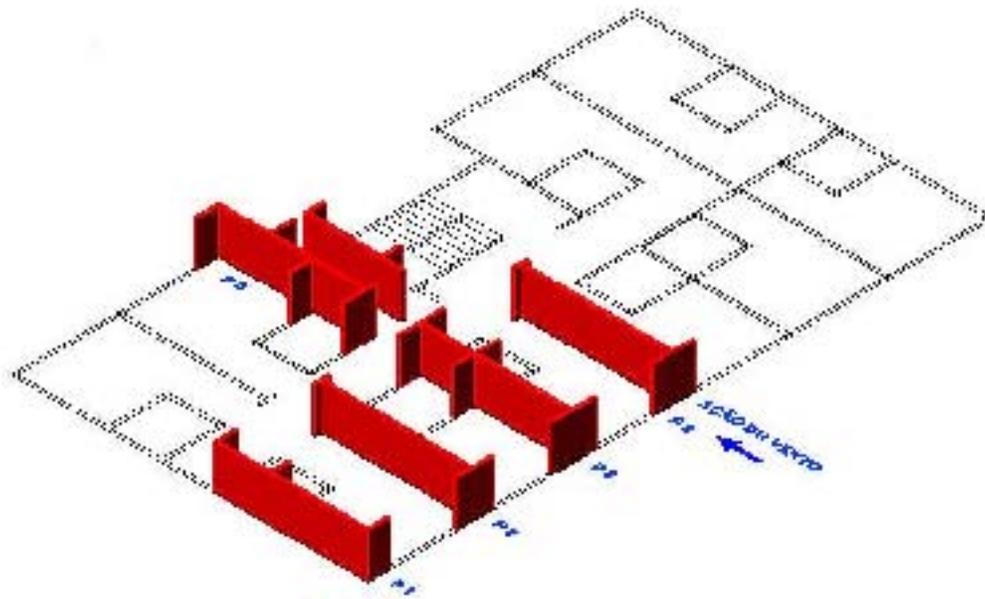


Figura 5.17 – Planta do pavimento tipo, contemplando os painéis analisados em 3D.

### 5.3.1 Resolução numérica considerando-se a técnica de Homogeneização

#### 5.3.1.1 Características dos materiais empregados

As propriedades elásticas dos materiais utilizados acham-se indicadas na Tabela 5.11, a seguir.

Material	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Argamassa (Tipo N)	1 300	0,20
Blocos	1 8000	0,10

Tabela 5.11 – Propriedades Elásticas dos Componentes

As propriedades elásticas ortotrópicas do material equivalente, calculadas conforme conceitos da homogeneização, acham-se indicadas na Tabela 5.12 e os cálculos para obtenção dos referidos valores se encontram no Apêndice B.

Módulo de Elasticidade Transversal (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
$G_{xy} = 4\ 021$	$E_x = 13\ 480$	$\nu_{xy} = 0,074$
$G_{yz} = 4\ 692$	$E_y = 11\ 090$	$\nu_{yz} = 0,106$
$G_{xz} = 5\ 836$	$E_z = 16\ 670$	$\nu_{zx} = 0,099$

Tabela 5.12 – Propriedades Elásticas Ortorrópticas

Para a análise do painel pela técnica da homogeneização em 3D, o programa utilizado (ANSYS 6.0 – Element Library), fornece alguns elementos, dentre os quais o mais indicado para esta situação é o Solid 45, por ser usado na modelagem tridimensional de estruturas sólidas, permitir a utilização de propriedades ortorrópticas, ser um romboide de arestas não lineares, o que permite sua boa adaptação as formas das paredes e por possuir o conveniente de não trazer muitos graus de liberdade. É definido por oito nós, tendo três graus de liberdade de translação por nó nas direções x, y e z. A geometria, posição dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostradas na Figura 5.18:

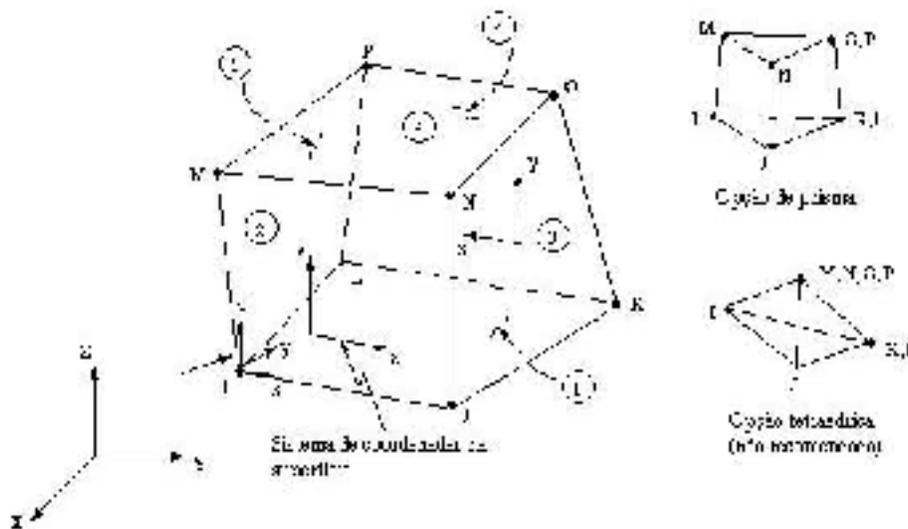


Figura 5.18 – Elemento Solid 45

Foram testados os resultados considerando malhas de 12 e 30cm, sendo observada a consistência dos mesmos. A malha foi gerada automaticamente.

### 5.3.2 Resultados e Discussões

Encontram-se, a seguir, análises e discussões para os sete painéis estudados, sendo cinco com a consideração dos flanges e dois sem tal consideração. Por serem os mais representativos, já que neles atuam, simultaneamente, a ação do vento e desaprumo, foram detalhados os painéis 1, 2 e 3, incluindo caracterização da geometria, elemento utilizado e ações atuantes, distribuição das tensões ao longo do painel, gráfico tensão x comprimento e resultados, dando-se ênfase à convergência dos mesmos (BARRETO-b).

Nas análises, considerou-se  $X$  o eixo horizontal (ao longo do comprimento da parede),  $Y$  o eixo vertical (ao longo da altura da parede),  $Z$  saindo do plano (correspondendo a espessura ou profundidade das paredes), adotando-se a origem no vértice inferior esquerdo. Foram restringidos todos os nós da base em todas as direções, deixando-se os demais livres.

Painel 1:

Neste modelo, foram gerados 28280 elementos, 10184 nós e 28416 equações resultantes. O tempo de processamento foi de aproximadamente 5 minutos e 20 segundos em uma máquina Pentium III, com 128Mb de RAM e 500 MHz.

As figuras e tabela a seguir mostram a geometria, malha, distribuição das tensões e análise comparativa dos resultados obtidos para este painel.

a) Modelagem da geometria contemplando os oito pavimentos



Figura 5.19 – Geometria tridimensional do painel 1

b) Malha utilizada e ações atuantes (Detalhe)

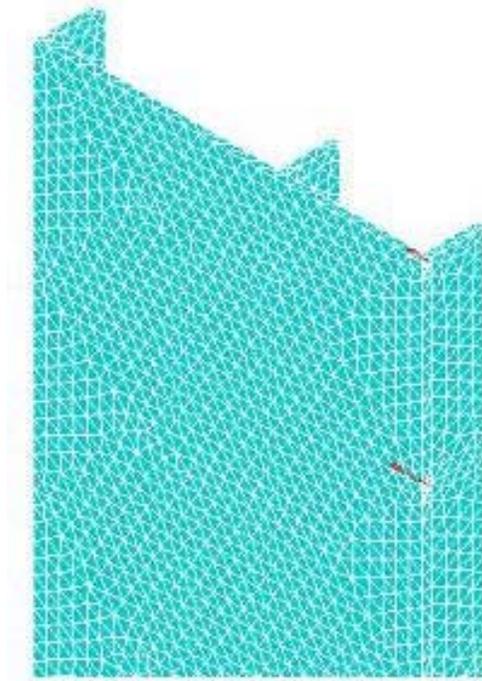


Figura 5.20 – Detalhe da malha utilizada e ações horizontais atuantes.

c) Distribuição das tensões verticais ao longo do painel

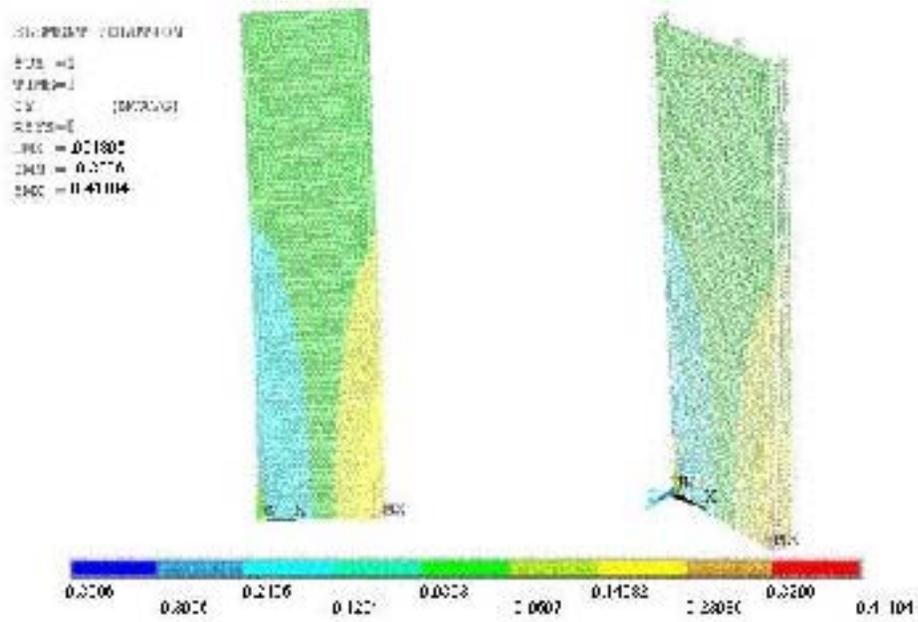


Figura 5.21 – Distribuição das tensões na direção  $S_y$  (MPa)

d) Detalhe de elementos utilizados na análise, próximo da origem do sistema de coordenadas.

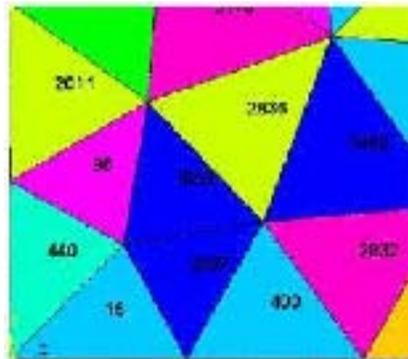


Figura 5.22 – Detalhe de elementos utilizados da zona de compressão

e) Resultados

<b>Elemento (número)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
15	-0.3403
96	-0.3240
400	-0.2963
440	-0.3996
3222	-0.3128
2837	-0.3132
2011	-0.3372
2836	-0.2834
2832	-0.2688
1462	-0.2698
<b>Valor médio de tensão</b>	<b>-0.315</b>
<b>Valor obtido pelo cálculo manual</b>	<b>-0.284</b>
<b>Diferença percentual (%)</b>	<b>9.8</b>

(a)

<b>Elemento (número)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
99	0.3452
904	0.2679
1018	0.3166
1382	0.4110
1869	0.3165
1879	0.3289
1880	0.2699
1884	0.2997
1886	0.2844
3235	0.3420
<b>Valor médio de tensão</b>	<b>+0.3182</b>
<b>Valor obtido pelo cálculo manual</b>	<b>+0.2840</b>
<b>Diferença percentual (%)</b>	<b>10.7</b>

Tabela 5.13 – Resultados obtidos via análise numérica para o painel 1. (a) compressão e (b)

tração

f) Gráfico de tensão ao longo da base do painel.

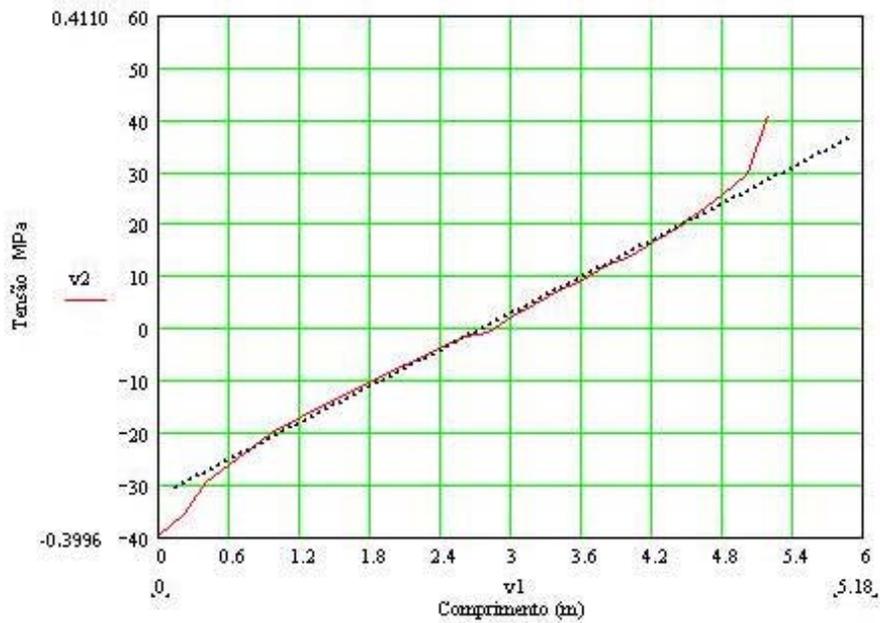


Figura 5.23 – Gráfico de tensão ao longo da base do painel

### Painel 2:

Neste modelo, foram gerados 24995 elementos, 8571 nós e 25479 equações resultantes. O tempo de processamento foi de aproximadamente 4 minutos e 50 segundos em uma máquina Pentium III, com 128Mb de RAM e 500 MHz..

As figuras e tabela a seguir mostram a geometria, malha, distribuição das tensões e análise comparativa dos resultados obtidos para este painel.

a) Geometria contemplando os oito pavimentos



Figura 5.24 – Geometria tridimensional do painel 2

b) Malha utilizada e ações atuantes (Detalhe)

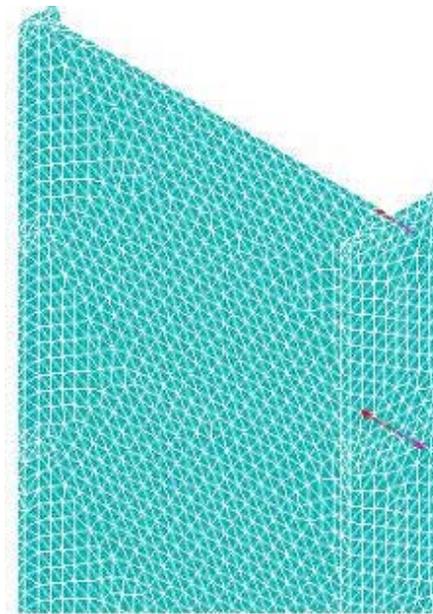


Figura 5.25 – Detalhe da malha utilizada e ações horizontais atuantes.

c) Distribuição das tensões verticais ao longo do painel

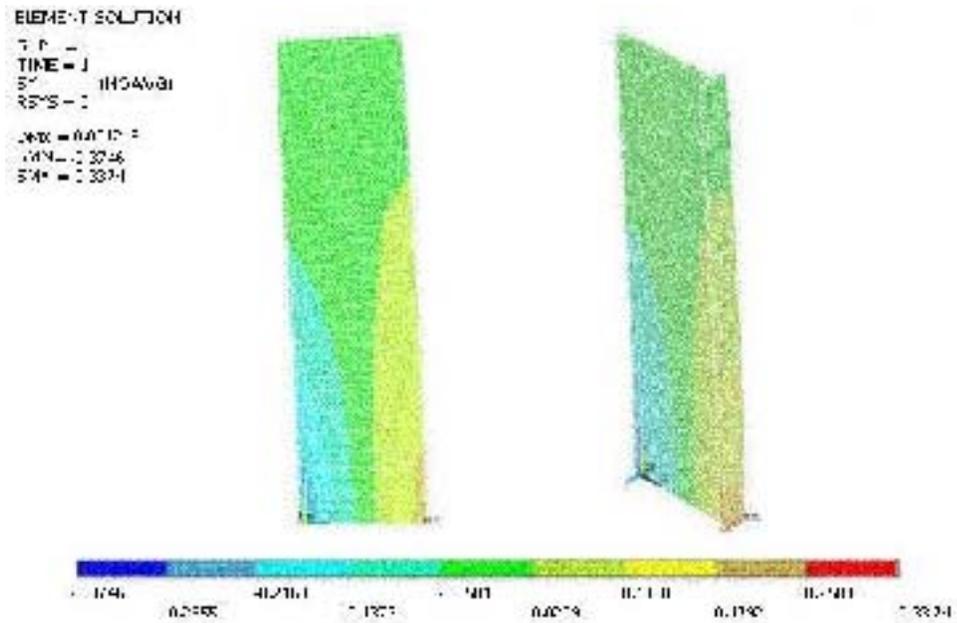


Figura 5.26 – Distribuição das tensões na direção  $S_y$  ( $t/m^2$ )

d) Detalhe de elementos utilizados na análise, próximo da origem do sistema de coordenadas.

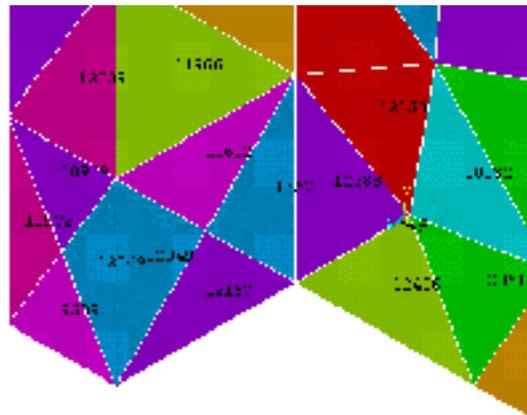


Figura 5.27– Detalhe dos elementos analisados na zona de compressão

e) Resultados

<b>Elemento (número)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
10132	-0.2729
11257	-0.2999
12049	-0.2852
12051	-0.2657
12157	-0.2795
12388	-0.3008
12406	-0.2811
10276	-0.3746
10277	-0.3443
12158	-0.2755
12159	-0.3109
<b>Valor médio de tensão</b>	<b>-0.2991</b>
<b>Valor obtido pelo cálculo manual</b>	<b>-0.3090</b>
<b>Diferença percentual (%)</b>	<b>3.2</b>

(a)

<b>Elemento (número)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
10430	0.2690
10443	0.2663
11578	0.2731
10441	0.2653
11539	0.2614
10789	0.2977
10430	0.2690
10078	0.2657
10683	0.2798
10881	0.3374
10870	0.3155
<b>Valor médio de tensão</b>	<b>+0.2818</b>
<b>Valor obtido pelo cálculo manual</b>	<b>+0.3090</b>
<b>Diferença percentual (%)</b>	<b>8.8</b>

(b)Tabela 5.14 – Resultados obtidos via análise numérica para painel 2. (a) compressão e (b) tração

f) Gráfico de tensão ao longo da base do painel

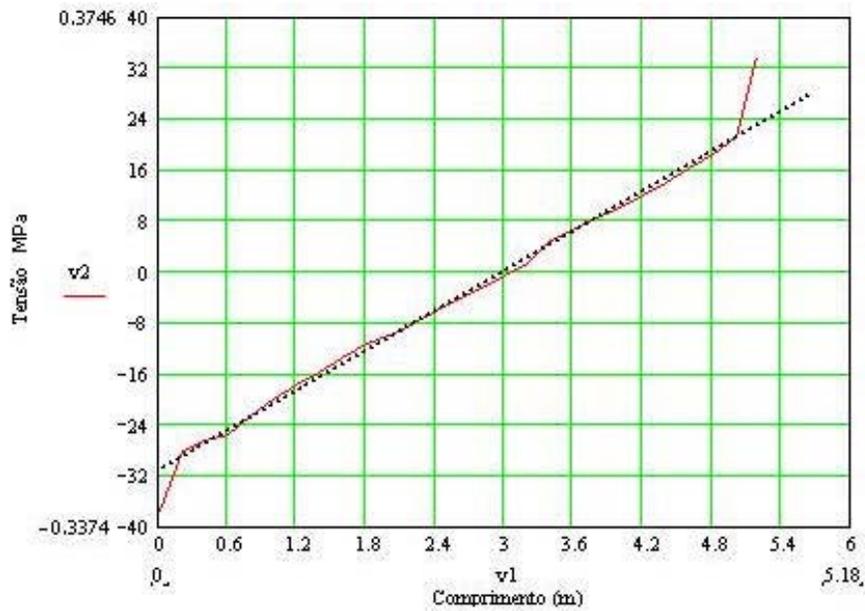


Figura 5.28 – Gráfico de tensão ao longo da base do painel

### Painel 3:

Neste modelo, foram gerados 18754 elementos, 6151 nós e 19574 equações resultantes. O tempo de processamento foi de aproximadamente 4 minutos e 10 segundos em uma máquina Pentium III, com 128Mb de RAM e 500 MHz.

As figuras e tabela a seguir mostram a geometria, malha, distribuição das tensões e análise comparativa dos resultados obtidos para este painel.

a) Geometria contemplando os oito pavimentos



Figura 5.29 – Geometria tridimensional do painel 3

b) Malha utilizada e ações atuantes (Detalhe)

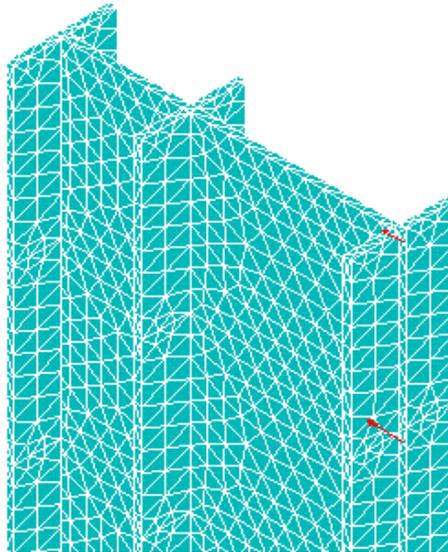


Figura 5.30 – Detalhe da malha utilizada e ações horizontais atuantes.

c) Distribuição das tensões verticais ao longo do painel

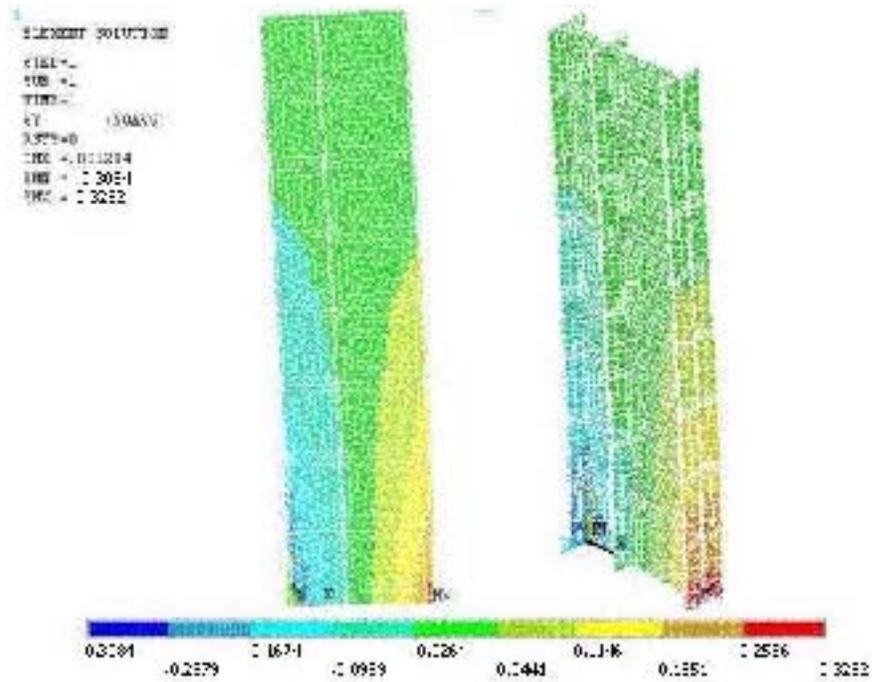


Figura 5.31 – Distribuição das tensões na direção  $S_y$  ( $t/m^2$ )

d) Detalhe de elementos utilizados na análise, próximo da origem do sistema de coordenadas.

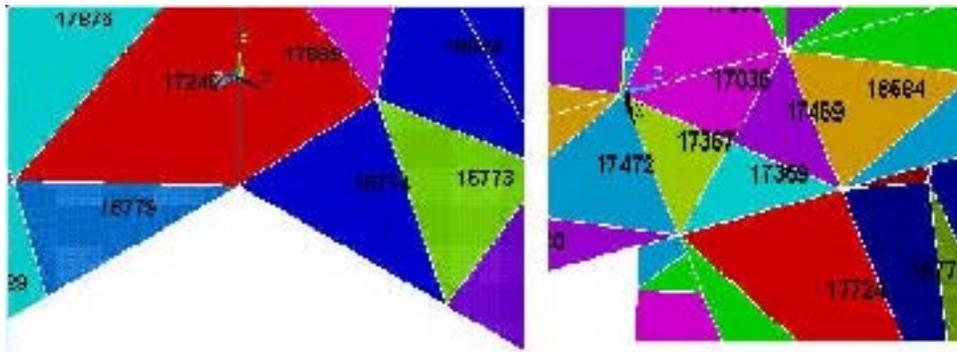


Figura 5.32 – Detalhe de elementos utilizados da zona de compressão

c) Resultados

<b>Elemento (número)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
17889	-0.2426
16774	-0.2233
17240	-0.2448
16849	-0.2176
17036	-0.3078
17359	-0.3078
17367	-0.3078
17459	-0.3078
<b>Valor médio de tensão</b>	<b>-0.2699</b>
<b>Valor obtido pelo cálculo manual</b>	<b>-0.2870</b>
<b>Diferença percentual (%)</b>	<b>6.0</b>

(a)

<b>Elemento (número)</b>	<b>Tensão (Mpa)</b>
18113	0.3262
16964	0.3159
17929	0.3093
16667	0.2380
17926	0.2593
16983	0.2242
17578	0.2402
17409	0.2601
<b>Valor médio de tensão</b>	<b>+0.2717</b>
<b>Valor obtido pelo cálculo manual</b>	<b>+0.2870</b>
<b>Diferença percentual (%)</b>	<b>5.3</b>

(b)

Tabela 5.15 – Resultados obtidos via análise numérica para painel 3. (a) compressão e (b) tração

d) Gráfico de tensão ao longo da base do painel

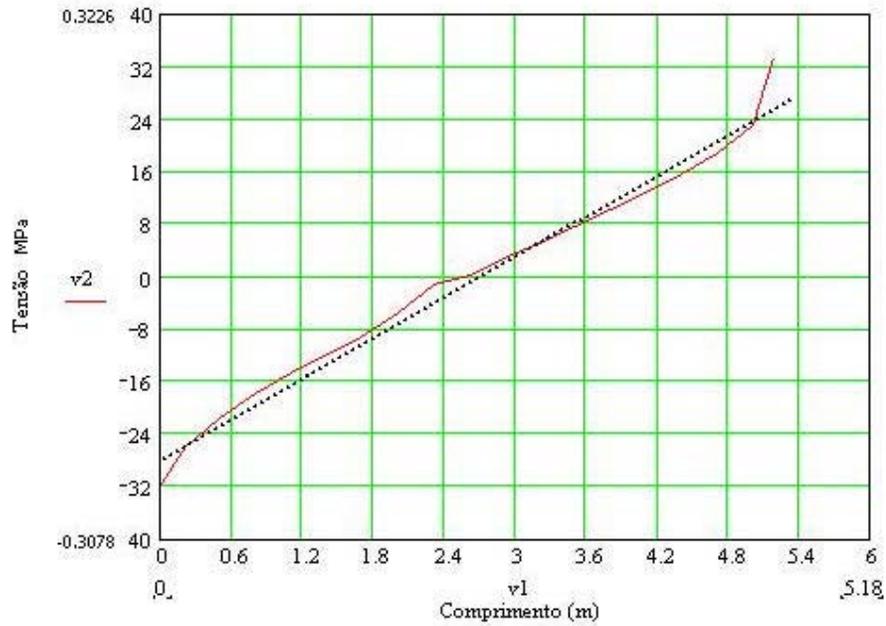


Figura 5.33 – Gráfico de tensão ao longo da base do painel

Os resultados obtidos nos painéis 4 e 5, com a consideração das abas, encontram-se indicados na Tabela 5.16.

<b>Painel</b>	<b>Tensão Compressão (MPa)</b>	<b>Tensão Tração (MPa)</b>	<b>Cálculo Manual Acceti</b>	<b>Diferença (%) Compressão</b>	<b>Diferença (%) Tração</b>
4	0.2940	0.2840	0.2810	4.3	1.1
5	0.2160	0.2100	0.2060	4.8	2.0

Tabela 5.16 – Resultados obtidos via análise numérica para painel 4 e 5

Os resultados obtidos nos painéis sem a consideração das abas, encontram-se indicados na Tabela 5.17.

<b>Painel</b>	<b>Tensão Compressão (MPa)</b>	<b>Tensão Tração (MPa)</b>	<b>Cálculo Manual Acceti</b>	<b>Diferença (%) Compressão</b>	<b>Diferença (%) Tração</b>
1,2,3,4	0.5640	0.5590	0.5450	3.50	2.50
5	0.3980	0.3950	0.3780	5.20	4.20

Tabela 5.17 – Resultados obtidos via análise numérica sem a consideração das abas.

Convém salientar que as análises efetuadas com malhas menores, 12 cm, por exemplo, conduzem à mesma ordem de grandeza dos resultados com um limitador potencial que é o tempo requerido de processamento. Verificou-se, no painel 3, utilizando-se esta malha menor, 108248 elementos, 103770 nós e um tempo de 30 minutos processamento.

Considerando-se que a diferença média percentual foi inferior a 5.6%, e a maior de 10,7%, pode-se concluir sobre a técnica de homogeneização:

- Permite análise de comportamento em situação em que o cálculo manual fica impossibilitado;
- Permite o refinamento para obtenção de tensões localizadas;
- Permite o uso de maneira simplificada da análise numérica com boa aproximação de resultados;
- O cálculo manual passa a servir de modelo simplificado para verificação dos resultados obtidos pela análise numérica;
- A técnica de homogeneização se constitui em uma eficiente ferramenta de projeto;

# 6

## *CONCLUSÕES E SUGESTÕES*

---

---

Como resultado desta pesquisa, apresentamos as conclusões julgadas de maior importância nos itens a seguir:

- A micromodelagem, onde se efetua a discretização dos blocos e juntas de argamassa, torna-se inviável computacionalmente para a análise completa de estruturas de grandes dimensões. A técnica de homogeneização poderá viabilizar as análises de tais estruturas por permitir a redução do número de graus de liberdade necessários para a solução do problema;
- A análise em regime elástico linear, como a que foi considerada neste trabalho, representa com boa aproximação o comportamento da estrutura em serviço, em virtude do digrama tensão-deformação da alvenaria ser linear até valores de tensões próximos da ruptura;

- As referências da literatura relatam a convergência dos resultados obtidos através da homogeneização com resultados experimentais, desde que se tenha aferição dos parâmetros físicos;
- As conclusões anteriores indicam ser a homogeneização uma adequada ferramenta de projeto, por permitir uma boa aproximação do comportamento real das estruturas de alvenaria;
- Tanto a consideração de isotropia transversal quanto à de ortotropia, para os casos analisados, conduziram a boas aproximações no cálculo das tensões atuantes dos painéis. A hipótese da ortotropia conduziu a resultados mais próximos da solução exata;
- A técnica de homogeneização permite obter, se desejado, tensões nas juntas horizontais, verticais e nos blocos, separadamente. Os resultados obtidos neste trabalho forneceram boa aproximação;
- As técnicas de homogeneização trazem as vantagens do refinamento das malhas de elementos finitos e representam de maneira satisfatória o comportamento global do perfil de distribuição de tensões ao longo de um painel submetido a diversos tipos de solicitações;
- As técnicas de homogeneização são de grande utilidade na análise global de estruturas de alvenaria, fornecendo resultados satisfatórios quando comparada com procedimentos manuais e numéricos existentes se constituindo em importante ferramenta na obtenção de valores de projeto
- Desde que se conheçam as propriedades físicas e mecânicas dos materiais, obtidas a partir de dados laboratoriais, com o emprego da técnica de homogeneização, pode-se efetuar verdadeiros experimentos numéricos que

conduzem a resultados que anteriormente só seriam possíveis por via experimental;

- Os valores de tensões no material equivalente, em qualquer ponto, podem ser convertidos para os valores de tensão nos blocos, juntas horizontais e verticais. Desta informação, é possível avaliar a tendência de falha de cada um destes componentes.

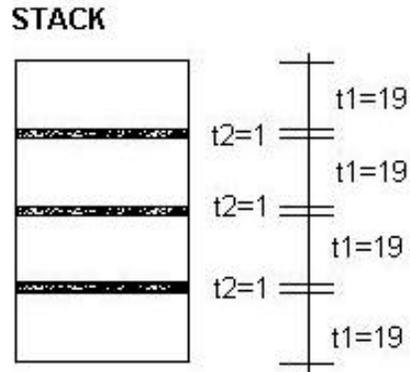
### **6.1 Sugestões para pesquisas futuras**

- Utilizar conceitos de homogeneização tais como os apresentados para analisar o comportamento de edifícios apertados de concreto armado preenchidos com alvenaria;
- Aplicação dos conceitos de homogeneização a materiais compósitos;
- Uso de outras técnicas de homogeneização com aplicações a problemas estruturais;

# APÊNDICE A

## Constantes físicas do material homogeneizado

Considerando o material transversalmente isotrópico (Salamon, 1968)



**Dados de entrada referentes às características dos materiais:**

$n := 10$  Número de conjuntos bloco/argamassa

$i := 1..n$

$t_{2 \cdot i-1} := 19$  Altura dos blocos, cm

$t_{2 \cdot i} := 1$  Espessura das juntas de argamassa, cm

$\phi_{2 \cdot i-1} := \frac{t_1}{\sum_{i=1}^{2n} t_i}$  Altura relativa dos blocos

$\phi_{2 \cdot i} := \frac{t_2}{\sum_{i=1}^{2 \cdot n} t_i}$  Altura relativa das juntas

$\nu_{1 \cdot i-1} := 0.10$  Coeficiente de Poisson dos blocos no plano xy

$\nu_{1 \cdot i} := 0.20$  Coeficiente de Poisson das juntas no plano xy

$\nu_{2 \cdot i-1} := 0.10$  Coeficiente de Poisson dos blocos em planos verticais

$\nu_{2 \cdot i} := 0.20$  Coeficiente de Poisson das juntas em planos verticais

$E_{1_{2 \cdot i-1}} := 1800000$  Módulo de elasticidade dos blocos segundo x e y, tf/m2

$E_{1_{2 \cdot i}} := 130000$  Módulo de elasticidade das juntas segundo x e y, tf/m2

$E_{2_{2 \cdot i-1}} := 1800000$  Módulo de elasticidade dos blocos segundo z, tf/m2

$E_{2_{2 \cdot i}} := 130000$  Módulo de elasticidade das juntas segundo z, tf/m2

### Propriedades físicas do material homogeneizado

$$v_I := \frac{\sum_{i=1}^{2n} \frac{\phi_i \cdot v_{1i} \cdot E_{1i}}{1 - (v_{1i})^2}}{\sum_{i=1}^{2 \cdot n} \frac{\phi_i \cdot E_{1i}}{1 - (v_{1i})^2}}$$

$v_I = 0.10039$  Coeficiente de Poisson no plano xy

$$v_{II} := (1 - v_I) \cdot \sum_{i=1}^{2 \cdot n} \frac{\phi_i \cdot v_{1i}}{1 - v_{1i}}$$

$v_{II} = 0.106204$  Coeficiente de Poisson nos planos xz e yz

$$E_I := (1 - v_I^2) \cdot \sum_{i=1}^{2 \cdot n} \frac{\phi_i \cdot E_{1i}}{1 - (v_{1i})^2}$$

$E_I = 1.716567 \times 10^6$  Módulo de elasticidade nas direções x e y, tf/m2

$$E_{II} := \frac{1}{\sum_{i=1}^{2 \cdot n} \frac{\phi_i}{E_{1i}} \left[ \frac{E_{1i}}{E_{2i}} - \frac{2 \cdot (v_{2i})^2}{1 - v_{1i}} \right] + \frac{2 \cdot v_{II}^2}{(1 - v_I) \cdot E_I}}$$

$E_{II} = 1.140496 \times 10^6$  Módulo de elasticidade na direção z, tf/m2

$$GI := \frac{EI}{2 \cdot (1 + \nu I)}$$

$GI = 7.799811 \times 10^5$  Módulo de elasticidade transversal segundo  $G_{xy}$ , tf/m<sup>2</sup>

$$GII := \frac{EII}{2 \cdot (1 + \nu II)}$$

$GII = 5.154999 \times 10^5$  Módulo de elasticidade transversal  $G_{xz}$  ou  $G_{yz}$ , tf/m<sup>2</sup>

Para a utilização do programa de análise numérica (ANSYS), que considera o plano xz como sendo horizontal, algumas considerações devem ser realizadas com respeito aos valores obtidos.

$E_x := EI$        $E_x = 1.716567 \times 10^6$       Módulo de elasticidade na direção x, tf/m<sup>2</sup>

$E_y := EII$        $E_y = 1.140496 \times 10^6$       Módulo de elasticidade na direção y, tf/m<sup>2</sup>

$E_z := E_x$        $E_z = 1.716567 \times 10^6$       Módulo de elasticidade na direção z, tf/m<sup>2</sup>

$\nu_{xy} := \nu II$        $\nu_{xy} = 0.106204$       Coeficiente de Poisson no plano xy

$\nu_{xz} := \nu I$        $\nu_{xz} = 0.10039$       Coeficiente de Poisson no planos xz

$\nu_{yz} := \nu_{xy}$        $\nu_{yz} = 0.106204$       Coeficiente de Poisson nos planos yz

# APÊNDICE B

## Propriedades Ortotrópicas da Alvenaria na Homogeneização :

Dados de entrada referentes às características dos materiais :

**Do bloco :**

$h := 0.19$  Altura, m

$l := 0.39$  Largura, m

$t_b := 0.14$  Espessura, m

$E_b := 1800000$  Módulo de Young, tf/m<sup>2</sup>

$\nu_b := 0.10$  Coeficiente de Poisson

$$G_b := \frac{E_b}{2 \cdot (1 + \nu_b)}$$

$G_b = 8.1818 \times 10^5$  Módulo de Elast. Transversal, tf/m<sup>2</sup>

**Da Argamassa :**

$t_{bj} := 0.01$  Espessura da junta horizontal, m

$t_{hj} := 0.01$  Espessura da junta vertical, m

$E_{bj} := 130000$  Módulo de Young na junta horizontal, tf/m<sup>2</sup>

$E_{hj} := 130000$  Módulo de Young na junta vertical, tf/m<sup>2</sup>

$\nu_{bj} := 0.2$   
Coeficiente de Poisson

$\nu_{hj} := 0.2$

$$G_{bj} := \frac{E_{bj}}{2 \cdot (1 + \nu_{bj})}$$

$G_{bj} = 5.4167 \times 10^4$  Módulo de Elast. Transversal Horizontal, tf/m<sup>2</sup>

$$G_{hj} := \frac{E_{hj}}{2 \cdot (1 + \nu_{hj})}$$

$$G_{hj} = 5.4167 \times 10^4$$

Módulo de Elast. Transversal Vertical, tf/m<sup>2</sup>

A fração de volume de tijolo e junta horizontal pode ser descrito por :

$$\mu_b := \frac{h}{h + t_{bj}} \quad e \quad \mu_{bj} := \frac{t_{bj}}{h + t_{bj}}$$

$$\mu_b = 0.95$$

$$\mu_{bj} = 0.05$$

Onde b e b<sub>j</sub> representam o tijolo e junta horizontal, respectivamente.

Adotando-se os seguintes coeficientes :

$$\alpha := \frac{\mu_b \cdot E_b \cdot (1 - \nu_{bj}^2) + \mu_{bj} \cdot E_{bj} \cdot (1 - \nu_b^2)}{(1 - \nu_b^2) \cdot (1 - \nu_{bj}^2)}$$

$$\alpha = 1.734 \times 10^6$$

$$\zeta := \frac{\mu_b \cdot \nu_b \cdot E_b \cdot (1 - \nu_{bj}^2) + \mu_{bj} \cdot \nu_{bj} \cdot E_{bj} \cdot (1 - \nu_b^2)}{(1 - \nu_b^2) \cdot (1 - \nu_{bj}^2)}$$

$$\zeta = 1.7408 \times 10^5$$

$$\chi_b := \frac{\mu_b \cdot \nu_b}{1 - \nu_b}$$

$$\chi_{bj} := \frac{\mu_{bj} \cdot \nu_{bj}}{1 - \nu_{bj}}$$

$$\chi := \chi_b + \chi_{bj}$$

$$\chi_b = 0.1056$$

$$\chi_{bj} = 0.0125$$

$$\chi = 0.1181$$

As seguintes propriedades ortotrópicas do material para a camada homogeneizada são obtidas :

$$v'_{xz} := \frac{\zeta}{\alpha} \quad v'_{xy} := \chi \cdot (1 - v'_{xz}) \quad v'_{zx} := v'_{xz}$$

$$v'_{xz} = \mathbf{0.1004} \quad v'_{xy} = \mathbf{0.1062} \quad v'_{zx} = \mathbf{0.1004}$$

$$v'_{zy} := \chi \cdot (1 - v'_{zx}) \quad v'_{yz} := v'_{zy}$$

$$v'_{zy} = \mathbf{0.1062} \quad v'_{yz} = \mathbf{0.1062}$$

$$E'_x := \alpha - \zeta \cdot v'_{xz} \quad E'_z := E'_x$$

$$E'_x = \mathbf{1.7166 \times 10^6} \quad E'_z = \mathbf{1.7166 \times 10^6}$$

$$E'_y := \mathbf{30}$$

Given

$$\frac{1}{E'_y} = \left[ \frac{\mu_b}{E_b} + \frac{\mu_{bj}}{E_{bj}} + 2 \cdot \chi_b \cdot \left( \frac{v'_{zy}}{E'_z} - \frac{v_b}{E_b} \right) + 2 \cdot \chi_{bj} \cdot \left( \frac{v'_{zy}}{E'_z} - \frac{v_{bj}}{E_{bj}} \right) \right]$$

$$E'_y := \text{Find}(E'_y)$$

$$E'_y = \mathbf{1.1405 \times 10^6}$$

$$G'_{yz} := \mathbf{54}$$

Given

$$\frac{1}{G'_{yz}} = \frac{\mu_b}{G_b} + \frac{\mu_{bj}}{G_{bj}}$$

$$G'_{yz} := \text{Find}(G'_{yz}) \quad G'_{yz} = \mathbf{4.798 \times 10^5}$$

$$G'_{xy} := G'_{yz} \quad G'_{xy} = \mathbf{4.798 \times 10^5}$$

$$G'_{xz} := \mu_b \cdot G_b + \mu_{bj} \cdot G_{bj} \quad G'_{xz} = \mathbf{7.7998 \times 10^5}$$

A relação abaixo também é estabelecida :

$$v'_{yx} := v'_{xy} \cdot \frac{E'y}{E'x} \quad v'_{yx} = \mathbf{0.0706}$$

Para o sistema de painel de alvenaria, a homogeneização é aplicada para a camada de material e junta perpendicular baseada na hipótese de juntas perpendiculares contínuas. Agora a fração de volume de materiais constituintes são :

$$\mu_{eq} := \frac{1}{1 + t_{hj}} \quad e \quad \mu_{hj} := \frac{t_{hj}}{1 + t_{hj}}$$

$$\mu_{eq} = \mathbf{0.975} \quad \mu_{hj} = \mathbf{0.025}$$

Onde, eq e hj representam camada do material e junta perpendicular, respectivamente.

Definindo os seguintes coeficientes :

$$\alpha_1 := \frac{\mu_{eq} \cdot E'y}{1 - v'_{yz} \cdot v'_{zy}} + \frac{\mu_{hj} \cdot E_{hj}}{1 - v_{hj}^2} \quad \beta_1 := \frac{\mu_{eq} \cdot E'z}{1 - v'_{yz} \cdot v'_{zy}} + \frac{\mu_{hj} \cdot E_{hj}}{1 - v_{hj}^2}$$

$$\alpha_1 = \mathbf{1.1281 \times 10^6} \quad \beta_1 = \mathbf{1.6961 \times 10^6}$$

$$\zeta_1 := \frac{\mu_{eq} \cdot v'_{yz} \cdot E'z}{1 - v'_{yz} \cdot v'_{zy}} + \frac{\mu_{hj} \cdot E_{hj} \cdot v_{hj}}{1 - v_{hj}^2}$$

$$\zeta_1 = \mathbf{1.8045 \times 10^5}$$

$$\chi_{eq} := \frac{\mu_{eq} \cdot (v'_{zx} + v'_{yx} \cdot v'_{zy})}{1 - v'_{yz} \cdot v'_{zy}} \quad \chi_{hj} := \frac{\mu_{hj} \cdot v_{hj}}{1 - v_{hj}} \quad \chi_1 := \chi_{eq} + \chi_{hj}$$

$$\chi_{eq} = \mathbf{0.1064} \quad \chi_{hj} = \mathbf{6.25 \times 10^{-3}} \quad \chi_1 = \mathbf{0.1126}$$

$$\lambda_{eq} := \frac{\mu_{eq} \cdot (v'_{yx} + v'_{yz} \cdot v'_{zx})}{1 - v'_{yz} \cdot v'_{zy}} \quad \lambda_{hj} := \frac{\mu_{hj} \cdot v_{hj}}{1 - v_{hj}} \quad \lambda := \lambda_{eq} + \lambda_{hj}$$

as propriedades ortotrópicas do material do painel de alvenaria são :

$$v_{yx} := \lambda - \zeta_1 \cdot \frac{\chi_1}{\beta_1} \quad v_{yx} = 0.0744$$

$$v_{yz} := \frac{\zeta_1}{\beta_1} \quad v_{yz} = 0.1064$$

$$v_{zx} := \chi_1 - \frac{\zeta_1 \cdot \lambda}{\alpha_1} \quad v_{zx} = 0.0988$$

$$v_{zy} := \frac{\zeta_1}{\alpha_1} \quad v_{zy} = 0.16$$

$$E_y := \frac{\alpha_1 \cdot \beta_1 - \zeta_1^2}{\beta_1} \quad E_y = 1.1089 \times 10^6$$

$$E_z := \frac{\alpha_1 \cdot \beta_1 - \zeta_1^2}{\alpha_1} \quad E_z = 1.6673 \times 10^6$$

$$E_x := 1000$$

Given

$$\frac{1}{E_x} = \left[ \frac{\mu_{eq}}{E'_x} + \frac{\mu_{hj}}{E_{hj}} + \lambda_{eq} \cdot \left( \frac{v_{yx}}{E_y} - \frac{v'_{xy}}{E'_x} \right) + \lambda_{hj} \cdot \left( \frac{v_{yx}}{E_y} - \frac{v_{hj}}{E_{hj}} \right) \right] \dots$$

$$+ \chi_1 \cdot \left( \frac{v_{zx}}{E_z} - \frac{v'_{xz}}{E'_x} \right) + \chi_{hj} \cdot \left( \frac{v_{zx}}{E_z} - \frac{v_{hj}}{E_{hj}} \right)$$

$$E_x := \text{Find}(E_x)$$

$$E_x = 1.3482 \times 10^6$$

$$G_{xy} := 100$$

Given

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{\mu_{eq}}{G'_{xy}} + \frac{\mu_{hj}}{G_{hj}}$$

$$G_{xy} := \text{Find}(G_{xy})$$

$$G_{xy} = 4.0205 \times 10^5$$

$$G_{yz} := \mu_{eq} \cdot G'_{yz} + \mu_{hj} \cdot G_{hj}$$

$$G_{yz} = 4.6916 \times 10^5$$

$$G_{xz} := 100$$

Given

$$\frac{1}{G_{xz}} = \frac{\mu_{eq}}{G'_{xz}} + \frac{\mu_{hj}}{G_{hj}}$$

$$G_{xz} := \text{Find}(G_{xz})$$

$$G_{xz} = 5.8362 \times 10^5$$

### Determinação da matriz estrutural S

É estabelecido inicialmente uma matriz  $Sh_j$  entre junta perpendicular e material equivalente

$$Ch_j := \frac{E_{hj}}{1 - \nu_{hj}^2}$$

$$Sh_{1,1} := 1.0$$

$$Sh_{4,4} := 1.0$$

$$Sh_{6,6} := 1.0$$

$$Sh_{2,1} := \frac{\nu_{hj}}{1 - \nu_{hj}} - Ch_j \cdot \left( \frac{\nu_{yx}}{E_y} + \frac{\nu_{zx} \cdot \nu_{hj}}{E_z} \right) \quad Sh_{2,2} := Ch_j \cdot \left( \frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{zy} \cdot \nu_{hj}}{E_z} \right)$$

$$Sh_{2,3} := Ch_j \cdot \left( \frac{\nu_{hj}}{E_z} - \frac{\nu_{yz}}{E_y} \right) \quad Sh_{3,1} := \frac{\nu_{hj}}{1 - \nu_{hj}} - Ch_j \cdot \left( \frac{\nu_{zx}}{E_z} + \frac{\nu_{yx} \cdot \nu_{hj}}{E_y} \right)$$

$$Sh_{j3,2} := Ch_j \cdot \left( \frac{v_{hj}}{E_y} - \frac{v_{zy}}{E_z} \right)$$

$$Sh_{j3,3} := Ch_j \cdot \left( \frac{1}{E_z} - \frac{v_{yz} \cdot v_{hj}}{E_y} \right)$$

$$Sh_{j5,5} := \frac{G_{hj}}{G_{yz}}$$

$$Sh_j := \begin{pmatrix} Sh_{j1,1} & Sh_{j1,2} & Sh_{j1,3} & 0 & 0 & 0 \\ Sh_{j2,1} & Sh_{j2,2} & Sh_{j2,3} & 0 & 0 & 0 \\ Sh_{j3,1} & Sh_{j3,2} & Sh_{j3,3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Sh_{j4,4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Sh_{j5,5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Sh_{j6,6} \end{pmatrix}$$

$$Sh_j = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2393 & 0.1195 & 3.2514 \times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0.2402 & 0.0114 & 0.0786 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1155 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Para determinar as matrizes estruturais de tijolos e juntas horizontais, são estabelecidas inicialmente as seguintes relações:

$$C' := \frac{1}{1 - v'_{yz} \cdot v'_{zy}}$$

$$S'_{1,1} := 1.0$$

$$S'_{4,4} := 1.0$$

$$S'_{6,6} := 1.0$$

$$S'_{2,1} := C' \cdot \left[ (v'_{yx} + v'_{yz} \cdot v'_{zx}) - \frac{v_{yx} \cdot E'y}{E_y} - \frac{v_{zx} \cdot v'_{yz} \cdot E'z}{E_z} \right]$$

$$S'_{2,2} := C' \cdot \left( \frac{E'y}{E_y} - \frac{v_{zy} \cdot v'_{yz} \cdot E'z}{E_z} \right)$$

$$S'_{2,3} := C' \cdot \left( \frac{v'_{yz} \cdot E'z}{Ez} - \frac{v_{yz} \cdot E'y}{Ey} \right)$$

$$S'_{3,1} := C' \cdot \left[ (v'_{zx} + v'_{zy} \cdot v'_{yx}) - \frac{v_{zx} \cdot E'z}{Ez} - \frac{v_{yx} \cdot v'_{zy} \cdot E'y}{Ey} \right]$$

$$S'_{3,2} := C' \cdot \left( \frac{v'_{zy} \cdot E'y}{Ey} - \frac{v_{zy} \cdot E'z}{Ez} \right)$$

$$S'_{3,3} := C' \cdot \left( \frac{E'z}{Ez} - \frac{v_{yz} \cdot v'_{zy} \cdot E'y}{Ey} \right) \quad S'_{5,5} := \frac{G'_{yz}}{G_{yz}}$$

$$S' := \begin{pmatrix} S'_{1,1} & S'_{1,2} & S'_{1,3} & 0 & 0 & 0 \\ S'_{2,1} & S'_{2,2} & S'_{2,3} & 0 & 0 & 0 \\ S'_{3,1} & S'_{3,2} & S'_{3,3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S'_{4,4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S'_{5,5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S'_{6,6} \end{pmatrix}$$

$$S' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6.1362 \times 10^{-3} & 1.0226 & -8.3369 \times 10^{-5} & 0 & 0 & 0 \\ -2.0081 \times 10^{-3} & -0.0561 & 1.0296 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0227 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Finalmente, as matrizes estruturais dos blocos  $S_b$  e juntas horizontais  $S_{bj}$ , são estabelecidas:

Dos bloeos:

$$C_b := \frac{1}{1 - v_b^2}$$

$$P_{b_{2,2}} := \mathbf{1.0} \quad P_{b_{4,4}} := \mathbf{1.0} \quad P_{b_{5,5}} := \mathbf{1.0}$$

$$P_{b_{1,1}} := C_b \cdot \left( \frac{E_b}{E'_x} - \frac{v'_{zx} \cdot v_b \cdot E_b}{E'_z} \right)$$

$$P_{b_{1,2}} := C_b \cdot \left[ v_b \cdot (1 + v_b) - \left( \frac{v'_{xy} \cdot E_b}{E'_x} + \frac{v'_{zy} \cdot v_b \cdot E_b}{E'_z} \right) \right]$$

$$P_{b_{1,3}} := C_b \cdot \left( \frac{v_b \cdot E_b}{E'_z} - \frac{v'_{xz} \cdot E_b}{E'_x} \right) \quad P_{b_{3,1}} := C_b \cdot \left( \frac{v_b \cdot E_b}{E'_x} - \frac{v'_{zx} \cdot E_b}{E'_z} \right)$$

$$P_{b_{3,2}} := C_b \cdot \left[ v_b \cdot (1 + v_b) - \left( \frac{v'_{xy} \cdot E_b}{E'_z} + \frac{v'_{zy} \cdot v_b \cdot E_b}{E'_x} \right) \right]$$

$$P_{b_{3,3}} := C_b \cdot \left( \frac{E_b}{E'_z} - \frac{v'_{zx} \cdot v_b \cdot E_b}{E'_x} \right) \quad P_{b_{6,6}} := \frac{G_b}{G'_xz}$$

$$P_b := \begin{pmatrix} P_{b_{1,1}} & P_{b_{1,2}} & P_{b_{1,3}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ P_{b_{2,1}} & P_{b_{2,2}} & P_{b_{2,3}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ P_{b_{3,1}} & P_{b_{3,2}} & P_{b_{3,3}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & P_{b_{4,4}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & P_{b_{5,5}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & P_{b_{6,6}} \end{pmatrix}$$

$$P_b = \begin{pmatrix} 1.0486 & -0.0126 & -4.1358 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4.1358 \times 10^{-4} & -0.0126 & 1.0486 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.049 \end{pmatrix}$$

Analogamente para as juntas horizontais:

$$C_{bj} := \frac{1}{1 - \nu_{bj}^2}$$

$$P_{bj2,2} := 1.0 \quad P_{bj4,4} := 1.0 \quad P_{bj5,5} := 1.0$$

$$P_{bj1,1} := C_{bj} \cdot \left( \frac{E_{bj}}{E'x} - \frac{\nu'_{zx} \cdot \nu_{bj} \cdot E_{bj}}{E'z} \right)$$

$$P_{bj1,2} := C_{bj} \cdot \left[ \nu_{bj} \cdot (1 + \nu_{bj}) - \left( \frac{\nu'_{xy} \cdot E_{bj}}{E'x} + \frac{\nu'_{zy} \cdot \nu_{bj} \cdot E_{bj}}{E'z} \right) \right]$$

$$P_{bj1,3} := C_{bj} \cdot \left( \frac{\nu_{bj} \cdot E_{bj}}{E'z} - \frac{\nu'_{xz} \cdot E_{bj}}{E'x} \right) \quad P_{bj3,1} := C_{bj} \cdot \left( \frac{\nu_{bj} \cdot E_{bj}}{E'x} - \frac{\nu'_{zx} \cdot E_{bj}}{E'z} \right)$$

$$P_{bj3,2} := C_{bj} \cdot \left[ \nu_{bj} \cdot (1 + \nu_{bj}) - \left( \frac{\nu'_{xy} \cdot E_{bj}}{E'z} + \frac{\nu'_{zy} \cdot \nu_{bj} \cdot E_{bj}}{E'x} \right) \right]$$

$$P_{bj3,3} := C_{bj} \cdot \left( \frac{E_{bj}}{E'z} - \frac{\nu'_{zx} \cdot \nu_{bj} \cdot E_{bj}}{E'x} \right) \quad P_{bj6,6} := \frac{G_{bj}}{G'xz}$$

$$P_{bj} := \begin{pmatrix} P_{bj1,1} & P_{bj1,2} & P_{bj1,3} & 0 & 0 & 0 \\ P_{bj2,1} & P_{bj2,2} & P_{bj2,3} & 0 & 0 & 0 \\ P_{bj3,1} & P_{bj3,2} & P_{bj3,3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{bj4,4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{bj5,5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{bj6,6} \end{pmatrix}$$

$$P_{bj} = \begin{pmatrix} 0.0773 & 0.2399 & 7.858 \times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7.858 \times 10^{-3} & 0.2399 & 0.0773 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0694 \end{pmatrix}$$

Logo , tem-se:

**Matriz S para os blocos:**

$$S_b := P_b \cdot S'$$

$$S_b = \begin{pmatrix} 1.0486 & -0.0129 & -4.2475 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ -6.1362 \times 10^{-3} & 1.0226 & -8.3369 \times 10^{-5} & 0 & 0 & 0 \\ -2.4417 \times 10^{-3} & -0.0717 & 1.0796 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0227 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.049 \end{pmatrix}$$

**Matriz S para os as juntas horizontais:**

$$S_{bj} := P_{bj} \cdot S'$$

$$S_{bj} = \begin{pmatrix} 0.0758 & 0.2449 & 8.0703 \times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ -6.1362 \times 10^{-3} & 1.0226 & -8.3369 \times 10^{-5} & 0 & 0 & 0 \\ 6.2304 \times 10^{-3} & 0.241 & 0.0796 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0227 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0694 \end{pmatrix}$$

**Determinação das tensões atuantes nos materiais constituintes da alvenaria, segundo PANDE et al, 1994**

**Referente ao exemplo 1 do Capítulo 5**

$$\text{Elemento1} := \begin{pmatrix} -37.3384 \\ -15.515 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Tensões obtidas diretamente da análise por elementos} \\ \text{finitos} \end{array}$$

$$\sigma_b := S_b \cdot \text{Elemento1}$$

$$\sigma_b = \begin{pmatrix} -38.9546 \\ -15.6362 \\ 1.2041 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{bj} := S_{bj} \cdot \text{Elemento1}$$

$$\sigma_{bj} = \begin{pmatrix} -6.6308 \\ -15.6362 \\ -3.9722 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{hj} := S_{hj} \cdot \text{Elemento1}$$

$$\sigma_{hj} = \begin{pmatrix} -37.3384 \\ -10.79 \\ -9.1444 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Elemento2} := \begin{pmatrix} -54.4175 \\ -87.877 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{Tensões obtidas diretamente da análise por elementos finitos}$$

$$\sigma_b := S_b \cdot \text{Elemento2}$$

$$\sigma_b = \begin{pmatrix} -55.9316 \\ -89.527 \\ 6.4368 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{bj} := S_{bj} \cdot \text{Elemento2}$$

$$\sigma_{bj} = \begin{pmatrix} -25.6488 \\ -89.527 \\ -21.5197 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{hj} := S_{hj} \cdot \text{Elemento2}$$

$$\sigma_{hj} = \begin{pmatrix} -54.4175 \\ -23.5263 \\ -14.0733 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Elemento3} := \begin{pmatrix} -40.3415 \\ -75.2225 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{Tensões obtidas diretamente da análise por elementos finitos}$$

$$\sigma_b := S_b \cdot \text{Elemento3}$$

$$\sigma_b = \begin{pmatrix} -41.3341 \\ -76.6732 \\ 5.4946 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{bj} := S_{bj} \cdot \text{Elemento3}$$

$$\sigma_{bj} = \begin{pmatrix} -21.4822 \\ -76.6732 \\ -18.382 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{hj} := S_{hj} \cdot \text{Elemento3}$$

$$\sigma_{hj} = \begin{pmatrix} -40.3415 \\ -18.6452 \\ -10.5482 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCETI, M.K., “Contribuições ao Projeto Estrutural de Edifícios em Alvenaria Estrutural”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - São Carlos, 1998;

ANSYS VERSÃO 6.0 - Theory Manual, Elements Library;

ARAÚJO, E. R, HOROWITZ, B., OLIVEIRA, R. A, Alvenaria Estrutural, Aplicação para Habitação Popular do Tipo Multifamiliar, Recife, 1981

BARRETO, A. S. P., OLIVEIRA, R. A., “Análise de Tensões em um Painel de Alvenaria Estrutural Utilizando Técnica de Homogeneização”, 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002, Belo Horizonte - MG , Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002, v. 01, n. , pp. 1-14;

BARRETO, A. S. P., OLIVEIRA, R. A.; SILVA, F. A. N., ‘Modelagem de Painéis de Alvenaria Estrutural Utilizando Técnicas de Homogeneização’, II Seminário Brasileiro de Simulação Computacional na Engenharia com o Programa Ansys, 2001, Rio de Janeiro, Anais do II Seminário Brasileiro de Simulação Computacional na Engenharia com o Programa Ansys, 2001, v. 01, n. , pp. 1-11;

BARRETO, A. S. P., OLIVEIRA, R. A., “Modelagem Estrutural Utilizando Técnicas de Micromodelagem e de Homogeneização”, Anais do XXII CILAMCE, Campinas – SP, 2001, v. 01, pp. 1-12;

GERRARD, C. M., “Equivalent Elastic Moduli of a Rock Mass Consisting of Orthorhombic Layers”, J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abst., Vol 19., Pp. 9-14, 1982;

GOMES, N. S., “Aspectos da Evolução da Alvenaria Estrutural no Brasil”, IPT/PINI, 1992;

GOMES, N. S., “Funcionamento das Alvenarias Estruturais de Blocos Cerâmicos” IPT São Paulo, 1988;

LA ROVERE, H. L., "Comparação entre Métodos de Análise de Paredes Estruturais com Aberturas", 5<sup>th</sup> International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries- pp. 346-358, 1994;

LEE, J. S., PANDE, G. N., MIDDLETON, J., AND KRALJ, B., "Numerical Modelling of Brick Masonry Panels Subject to Lateral Loadings" , Computer and Structures, V. 61, No. 4, pp. 735-745, 1996;

LOURENÇO, P. B., ROTS, JAN G., AND BLAAUWENDRAAD, J., "Two Approaches for the Analysis of Masonry Structures: Micro and Macro-Modeling", Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 1995;

MOLITERNO, A., "Caderno de Estruturas em Alvenaria e Concreto Simples", Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 1995;

NB 1228, "Cálculo de Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados de Concreto", ABNT ,1989;

NBR 6120, "Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações", ABNT, 1980;

NBR 7170, "Tijolo Maciço Cerâmico para Alvenaria", ABNT ,1983;

NBR 7171, "Bloco Cerâmico para Alvenaria", ABNT, 1992;

NBR 8042, "Bloco Cerâmico para Alvenaria – Formas e Dimensões", ABNT, 1992;

OLIVEIRA, R.A. e SILVA, F.A.N., "Influência de Vigas de Apoio sobre os Efeitos das Aberturas em Painéis de Alvenaria Estrutural", 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 2001, Anais do 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002, v. 01, n. ,pp. 1-8; IBRACON (2001);

OLIVEIRA, R.A. e SILVA, F.A.N , “Análise Numérica de um Painel de Alvenaria Estrutural”, II Seminário Brasileiro de Simulação Computacional na Engenharia com o Programa Ansys, 2001, Rio de Janeiro, Anais do II Seminário Brasileiro de Simulação Computacional na Engenharia com o Programa Ansys, 2001, V. 01, n. , pp. 1-8

OLIVEIRA JÚNIOR, V., ”Recomendações para Projetos de Edifícios em Alvenaria Estrutural”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 1992;

PANDE,G. N, MIDDLETON, J., AND LIANG, J. X., "Equivalent Elastic Moduli for Brick Masonry", Computers and Geotechnics 8, pp. 243-265, 1989;

RAMALHO, M. A., CORRÊA, M.R.S., “Procedimento para Análise de Edifícios de Alvenaria Estrutural Submetidos a Ações Verticais”, 5<sup>th</sup> International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, pp. 305-314, (1994);

RAMALHO, M. A., e CORRÊA, M.R.S., “SET-606-Alvenaria Estrutural (Notas de Aula)”, Universidade de São Carlos, 1999;

ROMAN, H.R., “Alvenaria Estrutural”, Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, 1995;

SABBATINI, F.H., “Argamassas de Assentamento para Paredes de Alvenaria Resistente” Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1986;

SALAMON, M.D.G., “Elastic Moduli of a Stratified Rock Mass”, Int. J. Rock Mech. Sci. Vol. 5, pp. 519-527, 1968;

SÁNCHEZ, E., “Histórico sobre Pesquisas e Elaboração de Novas Normas no Brasil sobre Alvenaria Estrutural”, 5<sup>th</sup> International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, pp 368-374, 1994;

SILVA, I.M., “Análises de Edifícios de Alvenaria Estrutural Sujeitos às Ações do Vento” Universidade de São Carlos, 1996;

SOLÓRZONO, M.G.P. e SABBATINI, F.H., “Características e Desempenho de Juntas de Argamassa na Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto”, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1995;

WISSEMBACH, Associação Brasileira da Construção Industrializada, ABCI, Manual técnico de alvenaria, São Paulo, 1990.