

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

WILSON JOSÉ DA SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DAS AÇÕES VERTICAIS
ENTRE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM A UTILIZAÇÃO DE MODELO
FÍSICO REDUZIDO NA ESCALA 1:5.**

São Carlos
2014

WILSON JOSÉ DA SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DAS AÇÕES VERTICAIS
ENTRE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM A UTILIZAÇÃO DE MODELO
FÍSICO REDUZIDO NA ESCALA 1:5.**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos.

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Roberto Silva Corrêa.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **WILSON JOSÉ DA SILVA**.

Título da tese: "Análise experimental e numérica da distribuição das ações verticais entre paredes de alvenaria estrutural com a utilização de modelo físico reduzido na escala 1:5".

Data da defesa: 02/04/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Márcio Roberto Silva Corrêa (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Vladimir Guilherme Haach**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Humberto Ramos Roman**
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

Aprovado

Prof. Dr. **Ercio Thomaz**
(Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo/IPT)

Aprovado

Prof. Dr. **Guilherme Aris Parsekian**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Profa. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Dedico aos meus Pais Cícero Alves da
Silva e Helena Bôffo da Silva.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar ao meu orientador, Prof. Dr. **Márcio Roberto Silva Corrêa**, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), que foi o responsável direto pela realização e concretização deste trabalho, sempre me orientando e apoiando com muita dedicação, paciência, amizade, e conhecimento.

Ao Prof. Dr. **Jefferson Sidney Camacho**, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FEIS), que cedeu o laboratório do Núcleo de Estudos e Pesquisas da Alvenaria Estrutural (NEPAE), pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), para a realização dos ensaios experimentais.

À minha eterna namorada, Prof^a Me. **Márcia Cristina Nobukuni**, com muito amor, admiração, e gratidão; por estar sempre ao meu lado apoiando e incentivando, com imensurável afeto, carinho e paciência durante todos estes anos.

À Cerâmica Gresca, em especial ao Engenheiro **Marcelo Scarazzatto**, que foi imprescindível para a realização deste trabalho com o fornecimento dos blocos cerâmicos na escala reduzida.

Ao amigo **Jair Ramos**, por toda a sua dedicação e companheirismo durante a jornada diária de oito meses na execução do modelo físico reduzido.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil da UNESP/FEIS: **Gilberto Antônio de Brito, Gilson Campos Correa, José Cavassano Ribeiro, Mário Roberto Correa Ferreira, Ronaldo Mendes do Amaral**; e em memória de **Silvio Rogério Sanitá Moreira**, que será inesquecível para todos que tiveram a felicidade de conhecê-lo.

Aos Engenheiros Prof. Me. **Domício Moreira da Silva Junior**, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSP-Votuporanga), e Me. **Maicon Albertini**, pela colaboração na realização da Modelagem do modelo físico reduzido por Elementos Finitos.

Ao laboratório de Engenharia Civil da Companhia Energética do Estado de São Paulo (CESP), em especial ao Engenheiro **Flávio Moreira Sales**, o qual sempre esteve disponível e de “portas abertas” para a evolução da ciência.

À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), em especial, a todos os professores do departamento de estruturas e a Secretária **Rosi Aparecida Jordão Rodriguês**, profissional de extrema competência, gentileza, simplicidade e educação.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio concedido para a realização do trabalho experimental.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela bolsa concedida durante parte do período de realização desta pesquisa.

A todos os meus familiares; ao meu irmão, batalhador e companheiro **Washington Luís da Silva**, à minha irmã **Waldecy Bôffo da Silva**, ao meu cunhado **Roberto Antônio Altafim**, à minha cunhada **Maria Inêz Nobukuni**, e às minhas queridas sobrinhas **Gabriella Silva Altafim** e **Thais Cristina Gomes da Silva**; por fazerem parte da minha vida.

RESUMO

SILVA, Wilson José da. **Análise experimental e numérica da distribuição das ações verticais entre paredes de alvenaria estrutural com a utilização de modelo físico reduzido na escala 1:5.** 2014. 331 p. Tese de Doutorado – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2014.

O presente trabalho teve como objetivo principal a análise experimental da distribuição das ações verticais entre paredes de alvenaria estrutural com a utilização de modelo físico reduzido na escala 1:5. Precedendo a construção do modelo físico reduzido foram realizados ensaios de caracterização dos componentes e da alvenaria na escala reduzida 1:5. Os ensaios no modelo físico reduzido consistiram na inserção de carregamentos uniformemente distribuídos e aplicados em diferentes ambientes e níveis. A análise da distribuição das ações verticais foi possível devido à instrumentação realizada na base do modelo físico reduzido através de células de carga. Os resultados foram analisados comparando-se os resultados experimentais com os usuais procedimentos teóricos de distribuição das ações verticais e também com a modelagem por elementos finitos; visando, desta forma, identificar qual o procedimento que mais se aproxima dos resultados experimentais. Foi possível concluir que a modelagem por elementos finitos e o procedimento de Grupos de Paredes apresentaram resultados mais próximos dos experimentais na análise da distribuição das ações verticais.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Ações verticais. Modelo físico reduzido.

ABSTRACT

SILVA, Wilson José da. **Experimental and numerical analysis of the vertical loads distribution between structural masonry walls using a reduced physical model in a 1:5 scale.** 2014. 331 p. Thesis (Doctorate). Department of Structural Engineering, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos-SP, 2014.

This study had as a main aim the experimental analysis of vertical loads distribution between structural masonry walls using a reduced physical model in a 1:5 scale. Preceding the building of the physical model were performed tests in order to obtain characterization of the components and of the masonry in a 1:5 reduced scale. The tests in the reduced physical model consisted in the insertion of loads uniformly distributed and applied in different environments and levels. The analysis of the vertical loads distribution was possible due to instrumentation performed on the basis of the physical model by load cells. The results were analyzed by comparing the experimental results with the usual theoretical procedures of vertical loads distribution and also with the modeling by finite elements; aiming, this way, to identify which procedure is closer to the experimental results. It was concluded that modeling by finite elements and Walls Groups procedure showed results closer to the experimental analysis of vertical loads distribution.

Keywords: Structural masonry. Vertical loads. Reduced physical model.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2. 1 – Amarração indireta entre paredes com a utilização de grampos metálicos. | 43 |
| Figura 2. 2 – Detalhe genérico de amarrações entre paredes de alvenaria estrutural. | 44 |
| Figura 2. 3 – Formas de dispersão das ações verticais segundo a ABNT NBR 15812-1:2010. | 45 |
| Figura 2. 4 – Interação entre paredes de canto, adaptado de Ramalho e Corrêa (2003). | 46 |
| Figura 2. 5 – “Espalhamento” de carregamentos em paredes adjacentes, adaptado de Ramalho e Corrêa (2003). | 47 |
| Figura 2. 6 – Transferência de cargas verticais para o procedimento de Paredes Isoladas, adaptado de HENDRY et al. (1981). | 50 |
| Figura 2. 7 – Transferência de cargas verticais para o procedimento de Grupos de Paredes, adaptado de HENDRY et al. (1981). | 51 |
| Figura 2. 8 – Discretização do modelo físico reduzido. | 55 |
| Figura 3. 1 – Corpos-de-prova (“pequenas paredes”) de blocos cerâmicos ensaiados por Camacho (1995). | 61 |
| Figura 3. 2 – Corpos-de-prova (“Torres”) nas escalas 1:3 e 1:5 executadas e ensaiados por Camacho (1995). | 62 |
| Figura 3. 3 – Dimensões dos blocos cerâmicos (mm) produzidos por Signor (2000) na escala reduzida 1:3,33. | 64 |
| Figura 3. 4 – Modulação e elevação dos corpos-de-prova em formato de “H” (SIGNOR, 2000). | 65 |
| Figura 3. 5 – Corpos-de-prova em formato “H”, construídos com blocos cerâmicos na escala reduzida (SIGNOR, 2000). | 65 |
| Figura 3. 6 – Corpos-de-prova na escala 1:3 (LIDNER, 2001). | 66 |
| Figura 3. 7 – Dimensões dos blocos cerâmicos (cm) na escala reduzida 1:3 (SANTOS, 2001). | 67 |
| Figura 3. 8 – Blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (SANTOS, 2001). | 68 |
| Figura 3. 9 – Corpos-de-prova utilizados por Santos (2001) para a determinação dos módulos de deformação. | 69 |
| Figura 3. 10 – Blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (HOLANDA JR., 2002). | 70 |
| Figura 3. 11 – Painéis na escala reduzida 1:3 (HOLANDA JR., 2002). | 71 |
| Figura 3. 12 – Painéis na escala reduzida 1:3 (HOLANDA JR., 2002). | 71 |
| Figura 3. 13 – Blocos de concreto e prismas de três blocos na escala reduzida 1:4 (ANDOLFATO, 2002). | 74 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3. 14 – Corpos-de-prova e blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (NASCIMENTO NETO, 2003). | 75 |
| Figura 3. 15 – Corpos-de-prova na escala reduzida 1:3 (NASCIMENTO NETO, 2003). | 75 |
| Figura 3. 16 – Blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (CAPUZZO NETO, 2005). | 76 |
| Figura 3. 17 – Corpos-de-prova com blocos de concreto na escala reduzida 1:4 (MAURÍCIO, 2005). | 78 |
| Figura 3. 18 – Corpos-de-prova com blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (MOREIRA, 2007). | 80 |
| Figura 4.1 – Organograma dos ensaios realizados para a caracterização dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5. | 83 |
| Figura 4. 2 – Representação das dimensões e da geometria dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5 (mm). | 84 |
| Figura 4. 3 – Blocos cerâmicos na escala reduzida (1:5) e natural (1:1). | 85 |
| Figura 4. 4 – Representação esquemática dos locais pré-estabelecidos para a obtenção das dimensões efetivas dos blocos (ABNT NBR 15270-3:2005). | 86 |
| Figura 4. 5 – Detalhes da análise dimensional dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5. | 88 |
| Figura 4. 6 – Representação esquemática para a determinação do desvio em relação ao esquadro (ABNT NBR 15270-3:2005). | 89 |
| Figura 4. 7 – Representação esquemática para a determinação da planeza das faces (ABNT NBR 15270-3:2005). | 89 |
| Figura 4. 8 – Detalhes da determinação da área líquida dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5. | 91 |
| Figura 4. 9 – Detalhe dos ensaios à compressão axial em unidades na escala reduzida 1:5. | 97 |
| Figura 4. 10 – Gráfico tensão x deformação para os blocos na escala reduzida 1:5. | 98 |
| Figura 4. 11 – Representação dos resultados de resistência média (fbm) e característica (fbk) para os blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5. | 101 |
| Figura 4. 12 – Forma de ruptura dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5. | 101 |
| Figura 4. 13 – Detalhes do moinho de agregados miúdos para redução granulométrica da areia. | 104 |
| Figura 4. 14 – Curva granulométrica da composição granulométrica da areia para a confecção da argamassa de assentamento. | 105 |
| Figura 4. 15 – Preparação e pesagem dos componentes do graute. | 108 |
| Figura 4. 16 – Composição granulométrica da areia utilizada para confecção do graute. ... | 109 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5. 1 – Gabarito utilizado para a confecção dos prismas PR2B e PR3B na escala reduzida 1:5. | 115 |
| Figura 5. 2 – Detalhe esquemático da instrumentação dos prismas PR3B na escala reduzida 1:5. | 117 |
| Figura 5. 3 – Detalhes da instrumentação e dos ensaios em prismas PR3B na escala reduzida 1:5. | 118 |
| Figura 5. 4 – Gráfico tensão x deformação para os prismas PR3B na escala reduzida 1:5. | 120 |
| Figura 5. 5 – Forma de ruptura para os prismas PR2B na escala reduzida 1:5..... | 121 |
| Figura 5. 6 – Forma de ruptura para os prismas PR3B na escala reduzida 1:5..... | 121 |
| Figura 5. 7 – Modulação dos prismas PRM3F na escala reduzida 1:5. | 123 |
| Figura 5. 8 – Blocos e corpos-de-prova utilizados por Villar (2005)..... | 124 |
| Figura 5. 9 – Modelo de prisma contrafiado PRM3F utilizado por Grohmann (2006). | 124 |
| Figura 5. 10 – Execução dos prismas PRM3F na escala reduzida 1:5..... | 125 |
| Figura 5. 11 – Detalhe da instrumentação dos prismas PRM3F na escala reduzida 1:5. | 126 |
| Figura 5. 12 – Forma de ruptura dos prismas contrafiados PRM3F na escala reduzida 1:5. | 128 |
| Figura 5. 13 – Modulação dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5..... | 129 |
| Figura 5. 14 – Detalhes da execução dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5. | 130 |
| Figura 5. 15 – Detalhes da instrumentação dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5. | 131 |
| Figura 5. 16 – Painel PAI3B5F na escala natural (1:1) e reduzida (1:5)..... | 132 |
| Figura 5. 17 – Gráfico Tensão x Deformação para os painéis (PAI3B5F). | 133 |
| Figura 5. 18 – Forma de ruptura dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5..... | 134 |
| Figura 5. 19 – Detalhes da ruptura dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5. | 134 |
| Figura 5. 20 – Modulação das fiadas das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5..... | 135 |
| Figura 5. 21 – Detalhes da execução das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5. | 136 |
| Figura 5. 22 – Detalhes da instrumentação das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5..... | 137 |
| Figura 5. 23 – Gráfico tensão x deformação das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5..... | 138 |
| Figura 5. 24 – Forma de ruptura das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5..... | 138 |
| Figura 6. 1 – Forma de aplicação de carregamento uniformemente distribuído utilizado por Andolfato (2006)..... | 140 |
| Figura 6. 2 – Planta de 1ª fiada da edificação analisada por Andolfato (2006)..... | 141 |
| Figura 6. 3 – Planta baixa arquitetônica e dimensões (m) do modelo físico reduzido na escala 1:5..... | 143 |
| Figura 6. 4 – Vistas A, B e C do modelo físico reduzido..... | 144 |
| Figura 6. 5 – Vista “D” do modelo físico reduzido..... | 144 |
| Figura 6. 6 – Vistas “C” e “D” do modelo físico reduzido. | 145 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6. 7 – Modelo físico reduzido após a conclusão (Vistas “A” e “D”)..... | 146 |
| Figura 6. 8 – Representação esquemática dos componentes da base de sustentação do modelo físico reduzido..... | 147 |
| Figura 6. 9 – Detalhe genérico da base de sustentação do modelo físico reduzido. | 147 |
| Figura 6. 10 – Detalhes da estrutura metálica de sustentação do modelo físico reduzido.. | 148 |
| Figura 6. 11 – Detalhes do radier do modelo físico reduzido..... | 150 |
| Figura 6. 12 – Detalhes do radier do modelo físico reduzido e da cobertura provisória em madeira e telhas metálicas. | 150 |
| Figura 6. 13 – Detalhes da elaboração das primeiras células de carga para a base do modelo físico reduzido..... | 151 |
| Figura 6. 14 – Detalhes da confecção das células de carga para a instrumentação da base do modelo físico reduzido. | 152 |
| Figura 6. 15 – Detalhes da execução das células de carga. | 153 |
| Figura 6. 16 – Detalhes do isolamento dos extensômetros das células de carga..... | 154 |
| Figura 6. 17 – Detalhes da calibração das células de carga. | 155 |
| Figura 6. 18 – Detalhes da caixa seletora e do indicador de deformação. | 156 |
| Figura 6. 19 – Detalhes da instrumentação da base no modelo físico reduzido. | 157 |
| Figura 6. 20 – Detalhes da base de sustentação do modelo físico reduzido | 158 |
| Figura 6. 21 – Detalhes do controle da verticalidade na construção do modelo físico reduzido. | 159 |
| Figura 6. 22 – Detalhes da demarcação da primeira fiada do modelo físico reduzido. | 160 |
| Figura 6. 23 – Detalhes da execução de contravergas no primeiro pavimento do modelo físico reduzido. | 161 |
| Figura 6. 24 – Detalhes das contravergas grauteadas no primeiro pavimento do modelo físico reduzido. | 162 |
| Figura 6. 25 – Detalhes da execução de vergas no primeiro pavimento do modelo físico.. | 162 |
| Figura 6. 26 – Detalhes da execução de vergas e contravergas, para os vão de janelas e portas do modelo físico reduzido. | 163 |
| Figura 6. 27 – Detalhes do ajuste da altura dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5. | 164 |
| Figura 6. 28 – Detalhes dos escoramentos para a confecção da laje do modelo físico reduzido. | 165 |
| Figura 6. 29 – Detalhes dos recipientes para a aplicação de carregamentos uniformemente distribuídos no modelo físico reduzido. | 166 |
| Figura 6. 30 – Detalhes da fôrma para as lajes do modelo físico reduzido..... | 167 |
| Figura 6. 31 – Detalhes da armadura positiva para as lajes do modelo físico reduzido..... | 168 |
| Figura 6. 32 – Detalhes da armadura negativa para as lajes do modelo físico reduzido. ... | 168 |
| Figura 6. 33 – Detalhes da construção do quarto pavimento do modelo físico reduzido. ... | 169 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6. 34 – Detalhes das cantoneiras metálicas na base do modelo físico reduzido. | 170 |
| Figura 6. 35 – Instrumentação para verificação do possível surgimento de flechas na grelha de sustentação do modelo físico reduzido. | 170 |
| Figura 7. 1 – Detalhes da inserção de carregamentos no modelo físico reduzido. | 172 |
| Figura 7. 2 – Planta baixa dos pavimentos e da cobertura do modelo físico reduzido com a identificação dos respectivos pontos de apoio e ambientes. | 173 |
| Figura 7. 3 – Detalhe da sequência de carregamentos na 1ª etapa de ensaios: Ambiente 1. | 175 |
| Figura 7. 4 – Detalhes do modelo físico reduzido com a demarcação dos níveis, das vergas e das contravergas. | 176 |
| Figura 7. 5 – Reações percentuais para o carregamento da primeira etapa: A1N1. | 178 |
| Figura 7. 6 – Reações percentuais para o carregamento da primeira etapa: A1N2. | 178 |
| Figura 7. 7 – Reações percentuais para o carregamento da primeira etapa: A1N3. | 178 |
| Figura 7. 8 – Reações percentuais médias para o carregamento da 1ª etapa: Ambiente 1. | 179 |
| Figura 7. 9 – Comportamento dos pontos de apoio: Carregamento A1. | 181 |
| Figura 7. 10 – Detalhe da sequência de carregamentos na 2ª etapa de ensaios: Ambiente 2. | 182 |
| Figura 7. 11 – Reações percentuais para o carregamento da segunda etapa: A2N1. | 183 |
| Figura 7. 12 – Reações percentuais para o carregamento da segunda etapa: A2N2. | 184 |
| Figura 7. 13 – Reações percentuais para o carregamento da segunda etapa: A2N3. | 184 |
| Figura 7. 14 – Reações percentuais médias para o carregamento da 2ª etapa: Ambiente 2. | 184 |
| Figura 7. 15 – Comportamento dos pontos de apoio: Carregamento A2. | 186 |
| Figura 7. 16 – Detalhe da sequência de carregamentos na 3ª etapa de ensaios: Ambiente 3. | 187 |
| Figura 7. 17 – Reações percentuais para o carregamento da terceira etapa: A3N1. | 188 |
| Figura 7. 18 – Reações percentuais para o carregamento da terceira etapa: A3N2. | 189 |
| Figura 7. 19 – Reações percentuais para o carregamento da terceira etapa: A3N3. | 189 |
| Figura 7. 20 – Reações percentuais médias para o carregamento da 3ª etapa: Ambiente 3. | 189 |
| Figura 7. 21 – Comportamento dos pontos de apoio: Carregamento A3. | 191 |
| Figura 7. 22 – Quarta etapa de carregamentos: sequência de ambientes carregados nos níveis. | 192 |
| Figura 7. 23 – Percentual das reações: Carregamento do primeiro nível. | 193 |
| Figura 7. 24 – Percentual das reações: Carregamento do segundo nível. | 194 |
| Figura 7. 25 – Percentual das reações: Carregamento do terceiro nível. | 195 |

| | |
|---|-----|
| Figura 7. 26 – Percentual das reações de carregamento para a quarta etapa de ensaios: Carregamento dos níveis..... | 196 |
| Figura 7. 28 – Reações percentuais médias para o carregamento da laje da cobertura. ... | 199 |
| Figura 8. 1 – Representação gráfica das paredes do modelo físico reduzido para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas (dimensões em m). | 202 |
| Figura 8. 2 – Representação gráfica das áreas de influência para aplicação do procedimento de Paredes Isoladas. | 203 |
| Figura 8. 3 – Representação gráfica das áreas de influência e dos grupos de paredes para a aplicação do Procedimento dos Grupos de Paredes. | 206 |
| Figura 8. 4 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes: Ambiente 1. | 209 |
| Figura 8. 5 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Ambiente 1..... | 210 |
| Figura 8. 6 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Grupos de Paredes: Ambiente 1. | 211 |
| Figura 8. 7 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes: Ambiente 2. | 213 |
| Figura 8. 8 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Ambiente 2..... | 214 |
| Figura 8. 9 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento dos Grupos de Paredes: Ambiente 2..... | 215 |
| Figura 8. 10 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes: Ambiente 3. | 217 |
| Figura 8. 11 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Ambiente 3..... | 219 |
| Figura 8. 12 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento dos Grupos de Paredes: Ambiente 3..... | 220 |
| Figura 8. 13 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes: Carregamento dos níveis..... | 222 |
| Figura 8. 14 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Níveis..... | 224 |
| Figura 8. 15 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento dos Grupos de Paredes: Níveis..... | 225 |
| Figura 8. 16 – Área de influência da laje de cobertura: Paredes Isoladas. | 226 |
| Figura 8. 17 – Área de influência da laje de cobertura: Grupos de Paredes..... | 227 |

| | |
|---|-----|
| Figura 8. 18 – Resultado gráfico das reações de apoio para o procedimento de Paredes isoladas e Grupos de Paredes: Carregamento da cobertura. | 229 |
| Figura 8. 19 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Laje de cobertura. | 230 |
| Figura 8. 20 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento dos Grupos de Paredes: Laje de cobertura. | 231 |
| Figura 8. 21 – Grupos de Paredes para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes. | 233 |
| Figura 8. 22 – Dimensões lineares das paredes (m) para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes. | 234 |
| Figura 8. 23 – Representação da localização dos Centros de Cargas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes. | 235 |
| Figura 8. 24 – Grupos de paredes definidos para a análise da distribuição das ações verticais utilizando o procedimento de Novos Grupos de Paredes. | 237 |
| Figura 8. 25 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Novo Grupo de Paredes: Ambiente 1. | 239 |
| Figura 8. 26 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Ambiente 1. | 241 |
| Figura 8. 27 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Ambiente 2. | 242 |
| Figura 8. 28 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Ambiente 3. | 243 |
| Figura 8. 29 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Novos Grupos de Paredes: Carregamento dos níveis. | 245 |
| Figura 8. 30 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Níveis. | 247 |
| Figura 8. 31 – Áreas de influência da laje de cobertura: Novos Grupos de Paredes. | 248 |
| Figura 8. 32 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Grupos de Paredes e Novos Grupos de Paredes: Carregamento da cobertura. | 250 |
| Figura 8. 33 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Laje de cobertura. | 251 |
| Figura 9. 1 – Ilustração da seção da grelha de sustentação. | 253 |
| Figura 9. 2 – Discretização do modelo físico reduzido. | 254 |
| Figura 9. 3 – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento nos Ambientes 1. | 256 |

| | |
|---|-----|
| Figura 9. 4 – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento nos Ambientes 2. | 258 |
| Figura 9. 5 – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento nos Ambientes 3. | 260 |
| Figura 9. 6 – Reações de apoio para a quarta etapa de carregamentos (MEF). | 261 |
| Figura 9. 7 – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento nos níveis. | 262 |
| Figura 9. 8 – Representação gráfica dos resultados: Carregamento na cobertura. | 264 |
| Figura 9. 9 – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento na cobertura. | 264 |
| Figura 10. 1 – Resultados da 1ª etapa de carregamentos: Ambiente 1. | 266 |
| Figura 10. 2 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Ambiente 1. | 267 |
| Figura 10. 3 – Resultados da 2ª etapa de carregamentos: Ambiente 2. | 272 |
| Figura 10. 4 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Ambiente 2. | 274 |
| Figura 10. 5 – Resultados da 3ª etapa de carregamentos: Ambiente 3. | 277 |
| Figura 10. 6 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Ambiente 3. | 279 |
| Figura 10. 7 – Resultados da 4ª etapa de carregamentos: Níveis. | 282 |
| Figura 10. 8 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Carregamento dos níveis. | 283 |
| Figura 10. 9 – Resultados da 5ª etapa de carregamentos: Cobertura. | 285 |
| Figura 10. 10 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Carregamento da cobertura. | 286 |
| Figura 10. 11 – Resultados da 5ª etapa de carregamentos: Cobertura. | 287 |
| Figura 10. 12 – Representação das tensões máximas, no primeiro pavimento, com o carregamento total no modelo. | 289 |
| Figura 10. 13 – Representação das tensões obtidas no procedimento MEF com o carregamento total. | 290 |
| Figura 12. 1 – Modulação da 1ª fiada: Modelo físico reduzido. | 305 |
| Figura 12. 2 – Legenda dos blocos utilizados na modulação do modelo físico reduzido | 305 |
| Figura 12. 3 – Modulação da 2ª fiada: Modelo físico reduzido. | 306 |
| Figura 12. 4 – Modulação da 3ª fiada: Modelo físico reduzido. | 307 |
| Figura 12. 5 – Modulação da 4ª fiada: Modelo físico reduzido. | 308 |
| Figura 12. 6 – Modulação da 5ª fiada: Modelo físico reduzido. | 309 |
| Figura 12. 7 – Modulação da 6ª fiada: Modelo físico reduzido. | 310 |

| | |
|---|-----|
| Figura 12. 8 – Modulação de 7ª e 9ª fiadas: Modelo físico reduzido. | 311 |
| Figura 12. 9 – Modulação da 8ª fiada: Modelo físico reduzido. | 312 |
| Figura 12. 10 – Modulação da 10ª fiada: Modelo físico reduzido. | 313 |
| Figura 12. 11 – Modulação da 11ª fiada: Modelo físico reduzido. | 314 |
| Figura 12. 12 – Modulação da 12ª fiada: Modelo físico reduzido. | 315 |
| Figura 12. 13 – Modulação da 13ª fiada: Modelo físico reduzido. | 316 |
| Figura 12. 14 – Modulação da 14ª fiada: Modelo físico reduzido. | 317 |
| Figura 12. 15 – Modulação da 1ª, 3ª, e 5ª fiadas da platibanda: Modelo físico reduzido. ... | 318 |
| Figura 12. 16 – Modulação da 2ª e 6ª fiadas da platibanda: Modelo físico reduzido. | 319 |
| Figura 12. 17 – Modulação da 4ª fiada da platibanda: Modelo físico reduzido. | 320 |
| Figura 12. 18 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 1. | 321 |
| Figura 12. 19 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 2. | 322 |
| Figura 12. 20 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 3. | 323 |
| Figura 12. 21 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 4. | 324 |
| Figura 12. 22 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 5. | 325 |
| Figura 12. 23 – Representação da discretização do primeiro pavimento. | 326 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 3. 1 – Resistência e eficiência dos corpos-de-prova executados e ensaiados por Camacho (1995)..... | 61 |
| Tabela 3. 2 – Resultados dos ensaios à compressão dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (SANTOS, 2001)..... | 68 |
| Tabela 3. 3 – Resistência e módulo de deformação (SANTOS, 2001)..... | 69 |
| Tabela 3. 4 – Resistência e módulo de deformação dos blocos cerâmicos na escala 1:3 (HOLANDA JR., 2002). | 71 |
| Tabela 3. 5 – Resultados dos ensaios em painéis na escala reduzida 1:3 com carregamento perpendicular às juntas de assentamento (HOLANDA JR., 2002)..... | 72 |
| Tabela 3. 6 – Resultados dos ensaios em painéis na escala reduzida 1:3 com carregamento diagonal às juntas de assentamento (HOLANDA JR., 2002). ... | 72 |
| Tabela 4. 1 – Dimensões efetivas médias dos blocos cerâmicos para a escala reduzida 1:5..... | 86 |
| Tabela 4. 2 – Dimensões médias individuais dos blocos cerâmicos para a escala reduzida 1:5..... | 87 |
| Tabela 4. 3 – Dimensões médias efetivas dos blocos cerâmicos tipo canaleta na escala reduzida 1:5..... | 88 |
| Tabela 4. 4 – Área bruta efetiva dos blocos cerâmicos para a escala reduzida 1:5..... | 90 |
| Tabela 4.5 – Resultado da determinação da área líquida dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5..... | 92 |
| Tabela 4. 6 – Resultado da determinação do índice de absorção dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5. | 93 |
| Tabela 4. 7 – Resultado do índice de absorção inicial (AAI) para os blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5. | 95 |
| Tabela 4. 8 – Resultado da resistência média à compressão axial dos blocos cerâmicos na escala reduzida: condição ambiente..... | 96 |
| Tabela 4. 9 – Resultado do módulo de deformação para os blocos cerâmicos na escala reduzida: condição ambiente..... | 98 |
| Tabela 4. 10 – Resultado da resistência média à compressão axial dos blocos cerâmicos na escala reduzida: condição saturada..... | 99 |
| Tabela 4. 11 – Valores de ϕ em função da quantidade de blocos (ABNT NBR 15270-2:2005)..... | 100 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4. 12 – Resumo da resistência característica (fbk) para os blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5. | 100 |
| Tabela 4. 13 – Caracterização granulométrica da areia da argamassa de assentamento na escala reduzida 1:5. | 104 |
| Tabela 4. 14 – Resultado dos ensaios à compressão axial da argamassa de assentamento..... | 106 |
| Tabela 4. 15 – Composição granulométrica da areia utilizada para confecção do graute das vergas, contravergas e laje do modelo físico reduzido..... | 108 |
| Tabela 4. 16 – Resultado dos ensaios à compressão axial do graute. | 110 |
| Tabela 4. 17 – Resumo dos resultados obtidos na caracterização dos componentes na escala reduzida 1:5. | 111 |
| Tabela 5. 1 – Quantidade de corpos-de-prova ensaiados para caracterização da alvenaria na escala reduzida 1:5. | 112 |
| Tabela 5. 2 – Valores de % (t0,05(n-1)) em função do tamanho da amostra (PRUDÊNCIO JR. et al., 2002). | 115 |
| Tabela 5. 3 – Resultado dos ensaios em prismas PR2B e PR3B na escala reduzida 1:5. . | 119 |
| Tabela 5. 4 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios em prismas PR2B e PR3B na escala reduzida 1:5. | 122 |
| Tabela 5. 5 – Resultados em prismas contrafiados (VILLAR, 2005). | 123 |
| Tabela 5. 6 – Resultados em prismas contrafiados (GROHMAN, 2006). | 125 |
| Tabela 5. 7 – Resultado dos ensaios em prismas contrafiados na escala reduzida 1:5. | 127 |
| Tabela 5. 8 – Resultado dos ensaios em painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5. | 133 |
| Tabela 5. 9 – Resultado dos ensaios em paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5. | 137 |
| Tabela 5. 10 – Resumo dos resultados obtidos na caracterização da alvenaria na escala reduzida 1:5. | 139 |
| Tabela 6. 1 – Quadro de áreas das lajes do modelo físico reduzido. | 142 |
| Tabela 6. 2 – Constante das células de carga. | 155 |
| Tabela 7. 1 – Resumo dos carregamentos uniformemente distribuídos aplicados nas lajes do modelo físico reduzido..... | 173 |
| Tabela 7. 2 – Resultado percentual das reações de apoio: Carregamento no Ambiente 1. | 177 |
| Tabela 7. 3 – Percentual de reação de apoio para os pontos que delimitam o ambiente 1. | 179 |
| Tabela 7. 4 – Resultado percentual das reações de apoio: Carregamento no Ambiente 2. | 183 |
| Tabela 7. 5 – Percentual de reação de apoio para os pontos que delimitam o Ambiente 2. | 185 |
| Tabela 7. 6 – Resultado percentual das reações de apoio: Carregamento no Ambiente 3. | 188 |
| Tabela 7. 7 – Percentual de reação de apoio para os pontos que delimitam o Ambiente 3. | 190 |
| Tabela 7. 8 – Resultado percentual das reações de apoio: Carregamento dos níveis. | 196 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 7. 9 – Percentual dos apoios que circundam os ambientes: Carregamento dos níveis..... | 198 |
| Tabela 7. 10 – Resultados numéricos das reações percentuais para o carregamento da laje da cobertura..... | 199 |
| Tabela 8. 1 – Comprimento das paredes e áreas de influência para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas. | 204 |
| Tabela 8. 2 – Relação de paredes isoladas que recebem a influência do carregamento de acordo com o ambiente carregado. | 204 |
| Tabela 8. 3 – Relação de Grupos e Paredes que recebem a influência do carregamento de acordo com o ambiente carregado. | 205 |
| Tabela 8. 4 – Quadro de cargas para o procedimento de Paredes Isoladas com carregamento no Ambiente 1. | 207 |
| Tabela 8. 5 – Quadro de cargas para o procedimento dos Grupos de Paredes com carregamento no Ambiente 1. | 207 |
| Tabela 8. 6 – Resultados percentuais teóricos das reações apoio: Ambiente 1. | 208 |
| Tabela 8. 7 – Quadro de cargas para o procedimento de Paredes Isoladas com carregamento no Ambiente 2. | 212 |
| Tabela 8. 8 – Quadro de cargas para o procedimento dos Grupos de Paredes com carregamento no Ambiente 2. | 212 |
| Tabela 8. 9 – Resultados percentuais das reações apoio para o carregamento de todos os Ambientes 2..... | 212 |
| Tabela 8. 10 – Quadro de cargas para o procedimento de Paredes Isoladas com carregamento no Ambiente 3. | 216 |
| Tabela 8. 11 – Quadro de cargas para o procedimento dos Grupos de Paredes com carregamento no Ambiente 3. | 216 |
| Tabela 8. 12 – Resultados percentuais das reações de apoio para o carregamento de todos os Ambientes 3. | 217 |
| Tabela 8. 13 – Resumo dos valores percentuais para os pontos que delimitam os ambientes..... | 218 |
| Tabela 8. 14 – Quadro de cargas para o procedimento dos Grupos de Paredes: Carregamento em todos os níveis. | 221 |
| Tabela 8. 15 – Resultados percentuais das reações apoio: Carregamento de todos os níveis..... | 222 |
| Tabela 8. 16 – Percentual da reações que delimitam o ambiente: Carregamento dos níveis pelo procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes. | 223 |
| Tabela 8. 17 – Quadro comparativo entre o carregamento dos ambientes e o carregamento dos níveis para o procedimento de Paredes Isoladas. | 223 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 8. 18 – Quadro de cargas e área de influência da laje de cobertura: procedimento de Paredes Isoladas..... | 228 |
| Tabela 8. 19 – Quadro de cargas e área de influência da laje de cobertura: procedimento dos Grupos de Paredes..... | 228 |
| Tabela 8. 20 – Resultados percentuais das reações de apoio: Carregamento da cobertura..... | 229 |
| Tabela 8. 21 – Quadro de cargas para o procedimento do Novo Grupo de Paredes com carregamento no Ambiente 1. | 238 |
| Tabela 8. 22 – Resultado das reações apoio com a utilização do procedimento de Novos Grupos de Paredes para os ambientes 1, 2, e 3..... | 239 |
| Tabela 8. 23 – Resumo dos valores percentuais para os pontos de apoio que delimitam os ambientes: Procedimento de Novos Grupos de Paredes..... | 240 |
| Tabela 8. 24 – Quadro de cargas para o procedimento de Novos Grupos Paredes: Carregamento de todos os níveis..... | 244 |
| Tabela 8. 25 – Resultados percentuais das reações apoio: Carregamento dos níveis – NGP. | 245 |
| Tabela 8. 26 – Percentual da reações que delimitam o ambiente para o carregamento dos níveis pelo procedimento de Novos Grupos de Paredes. | 246 |
| Tabela 8. 27 – Quadro comparativo entre o carregamento dos ambientes e carregamento dos níveis para o procedimento de Novos Grupos de Paredes. | 246 |
| Tabela 8. 28 – Quadro de cargas e área de influência da laje de cobertura: procedimento de Novos Grupos de Paredes. | 249 |
| Tabela 8. 29 – Resultados percentuais das reações de apoio: Carregamento da cobertura..... | 249 |
| Tabela 9. 1 – Propriedade dos materiais utilizados na modelagem em MEF. | 253 |
| Tabela 9. 2 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 1ª etapa de ensaios: Carregamento no Ambiente 1..... | 255 |
| Tabela 9. 3 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 2ª etapa de ensaios: Carregamento no Ambiente 2..... | 257 |
| Tabela 9. 4 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 3ª etapa de ensaios: Carregamento no Ambiente 3..... | 259 |
| Tabela 9. 5 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 4ª etapa de ensaios: Carregamento dos níveis. | 261 |
| Tabela 9. 6 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 5ª etapa de ensaios: Carregamento na cobertura. | 263 |
| Tabela 10. 1 – Resultados e razões para a 1ª etapa de ensaios: Ambiente 1..... | 265 |
| Tabela 10. 2 – Resultados e razões teóricas para a 1ª etapa de ensaios: Ambiente 1. | 270 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 10. 3 – Percentual do entorno à área carregada: Ambiente 1..... | 270 |
| Tabela 10. 4 – Resultados e razões para a 2ª etapa de ensaios: Ambiente 2..... | 271 |
| Tabela 10. 5 – Resultados e razões teóricas para a 2ª etapa de ensaios: Ambiente 2..... | 275 |
| Tabela 10. 6 – Percentual do entorno à área carregada: Ambiente 2..... | 275 |
| Tabela 10. 7 – Resultados e razões para a 3ª etapa de ensaios: Ambiente 3..... | 276 |
| Tabela 10. 8 – Resultados e razões teóricas para a 3ª etapa de ensaios: Ambiente 3..... | 278 |
| Tabela 10. 9 – Percentual do entorno à área carregada: Ambiente 3..... | 280 |
| Tabela 10. 10 – Resumo dos percentuais de reação de apoio no entorno das áreas carregadas. | 280 |
| Tabela 10. 11 – Resultados e razões para a 4ª etapa de ensaios: Carregamento dos níveis..... | 281 |
| Tabela 10. 12 – Resultados e razões teóricas para a 4ª etapa de ensaios: Carregamento dos níveis. | 283 |
| Tabela 10. 13 – Percentual do entorno à área carregada: Níveis..... | 284 |
| Tabela 10. 14 – Resultados e razões para a 5ª etapa de ensaios: Carregamento da cobertura. | 285 |
| Tabela 10. 15 – Resultados e razões teóricas para a 5ª etapa de ensaios: Carregamento da cobertura. | 287 |
| Tabela 10. 16 – Tensões obtidas nos ensaios experimentais e no procedimento MEF..... | 288 |
| Tabela 12. 1 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 1 (Razões experimentais)..... | 327 |
| Tabela 12. 2 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 1 (Razões teóricas). | 327 |
| Tabela 12. 3 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 2 (Razões experimentais)..... | 328 |
| Tabela 12. 4 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 2 (Razões teóricas). | 328 |
| Tabela 12. 5 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 3 (Razões experimentais)..... | 329 |
| Tabela 12. 6 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 3 (Razões teóricas). | 329 |
| Tabela 12. 7 – Carregamento no primeiro pavimento: Níveis (Razões experimentais)..... | 330 |
| Tabela 12. 8 – Carregamento no primeiro pavimento: Níveis (Razões Teóricas). | 330 |
| Tabela 12. 9 – Carregamento no primeiro pavimento: Cobertura (Razões experimentais). | 331 |
| Tabela 12. 10 – Carregamento no primeiro pavimento: Cobertura (Razões Teóricas). | 331 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|---|-----|
| Equação 1 – Carga média dos grupos em interação..... | 54 |
| Equação 2 – Diferença de carga do grupo em relação à média..... | 54 |
| Equação 3 – Carga do grupo..... | 54 |
| Equação 4 – Área líquida de corpos-de-prova..... | 91 |
| Equação 5 – Índice de absorção..... | 93 |
| Equação 6 – Índice de Absorção inicial..... | 94 |
| Equação 7 – Resistência característica estimada..... | 99 |
| Equação 8 – Eficiência..... | 113 |
| Equação 9 – Resistência média característica do lote..... | 114 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACI | <i>American Concrete Institute</i> |
| CC | Centro de Carga |
| CESP | Companhia Energética do Estado de São Paulo |
| CNPq | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico |
| CP | Corpo-de-prova |
| EESC | Escola de Engenharia de São Carlos |
| FAPESP | Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo |
| FEIS | Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IRA | <i>Inicial Rate of Absorption</i> |
| LVDT | <i>Linear Variable Displacement Transducers</i> |
| MEF | Modelagem por Elementos Finitos |
| NBR | Norma Brasileira |
| NEPAE | Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural |
| PAI3B5F | Painel com o comprimento de três blocos e altura de cinco fiadas |
| PAR3B12F | Parede com o comprimento de três blocos e altura de doze fiadas |
| PR2B | Prisma de dois blocos |
| PR3B | Prismas de três blocos |
| PRM3F | Prismas contrafiados com um bloco e meio de comprimento e três fiadas de altura |
| PVC | Cloreto de Polivinil |
| SINDUSCON | Sindicato da Construção Civil |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina |
| UNESP | Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” |
| USP | Universidade de São Paulo |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------|--|
| Δp | Variação de massa |
| η | Eficiência |
| γ | Massa específica |
| $\sigma_{adm,PA}$ | Tensão admissível da alvenaria |
| a/c | Relação água/cimento em massa |
| AA | Índice de absorção de água |
| AAI | Índice de absorção inicial |
| A_b | Área bruta |
| A_{liq} | Área líquida |
| D | Desvio em relação ao esquadro |
| E | Módulo de deformação |
| E_b | Módulo de deformação longitudinal do bloco |
| E_{bm} | Módulo de deformação média do bloco intermediário do prisma |
| E_{pm} | Módulo de deformação média do prisma |
| F | Planeza das faces dos blocos |
| f_{am} | Resistência média da argamassa de assentamento |
| f_{bi} | Resistência à compressão axial do bloco |
| f_{bk} | Resistência característica à compressão axial do bloco |
| $f_{bk,est}$ | Resistência característica estimada da amostra |
| f_{bm} | Resistência média à compressão axial do bloco |
| f_{bma} | Resistência média à compressão axial do bloco na condição |
| f_{bms} | Resistência média à compressão axial do bloco na condição |
| f_{gm} | Resistência média do graute |
| f_k | Resistência característica à compressão simples da alvenaria |
| f_{pk} | Resistência característica à compressão simples do prisma |
| f_{ppk} | Resistência característica à compressão simples de pequena |
| f_{pm} | Resistência média de prismas |
| f_{pmk} | Resistência média característica do lote |
| H | Altura |
| m_a | Massa aparente |
| m_u | Massa saturada |
| m_s | Massa seca |
| n | Número de amostras |
| S | Desvio padrão da amostra |
| T | Espessura do prisma |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 Introdução | 37 |
| 1.1 Considerações iniciais | 37 |
| 1.2 Objetivo | 38 |
| 1.3 Justificativas | 38 |
| 1.4 Metodologia | 39 |
| 1.5 Estrutura do Texto | 40 |
| 2 Interação entre Paredes e Distribuição das Ações Verticais | 42 |
| 2.1 Interações entre Paredes | 42 |
| 2.2 Distribuição das Ações Verticais..... | 48 |
| 2.2.1 Paredes Isoladas | 49 |
| 2.2.2 Grupos de paredes | 51 |
| 2.2.3 Grupos de paredes com interação | 53 |
| 2.2.4 Grupo total de paredes | 54 |
| 2.2.5 Modelagem por Elementos Finitos..... | 55 |
| 3 Modelo Físico | 57 |
| 3.1 Modelo Físico Reduzido | 57 |
| 3.1.1 Semelhança Física e Modelos | 58 |
| 3.2 Estudos de Modelos Reduzidos em Alvenaria Estrutural no Brasil | 60 |
| 3.2.1 Pesquisa realizada por Camacho (1995) | 60 |
| 3.2.2 Pesquisa realizada por Signor (2000) | 64 |
| 3.2.3 Pesquisa realizada por Lindner (2001) | 66 |
| 3.2.4 Pesquisa realizada por Santos (2001) | 67 |
| 3.2.5 Pesquisa realizado por Holanda Júnior (2002) | 70 |
| 3.2.6 Pesquisa realizada por Andolfato (2002) | 73 |
| 3.2.7 Pesquisa realizada por Nascimento Neto (2003)..... | 74 |
| 3.2.8 Pesquisa realizada por Capuzzo Neto (2005)..... | 76 |
| 3.2.9 Pesquisa realizada por Maurício (2005)..... | 77 |
| 3.2.10 Pesquisa realizada por Moreira (2007) | 78 |

| | |
|---|-----|
| 4 Trabalho experimental: Caracterização dos Componentes | 82 |
| 4.1 Generalidades | 82 |
| 4.2 Caracterização geométrica dos blocos cerâmicos | 84 |
| 4.2.1 Determinação das dimensões efetivas: Análise dimensional | 85 |
| 4.2.2 Determinação do desvio em relação ao esquadro e da planeza das faces (F) | 88 |
| 4.2.3 Determinação da área bruta (A_b) e da área líquida (A_{liq}) | 90 |
| 4.3 Caracterização Física dos Blocos Cerâmicos | 92 |
| 4.3.1 Determinação da massa seca e do índice de absorção | 93 |
| 4.3.2 Índice de absorção inicial (AAI) | 94 |
| 4.4 Caracterização Mecânica | 95 |
| 4.4.1 Determinação da resistência média dos blocos em condição ambiente | 96 |
| 4.4.2 Determinação da resistência média dos blocos na condição saturada | 98 |
| 4.4.3 Determinação da resistência característica à compressão (f_{bk}) | 99 |
| 4.5 Caracterização da argamassa de assentamento | 102 |
| 4.5.1 Generalidades | 102 |
| 4.5.2 Preparo da argamassa de assentamento | 103 |
| 4.5.3 Ensaio da argamassa de assentamento à compressão axial | 105 |
| 4.5.4 Resultado dos ensaios à compressão axial da argamassa de assentamento | 106 |
| 4.6 Caracterização do graute | 107 |
| 4.6.1 Generalidades | 107 |
| 4.6.2 Preparo e manuseio do graute | 107 |
| 4.6.3 Ensaio do graute à compressão axial | 109 |
| 4.6.4 Resultado dos ensaios à compressão axial no graute | 110 |
| 4.7 Resumo dos resultados obtidos na caracterização dos componentes | 111 |
| | |
| 5 Trabalho experimental: Caracterização da alvenaria | 112 |
| 5.1 Ensaio em prismas PR2B e PR3B na escala reduzida | 112 |
| 5.1.1 Generalidades | 112 |
| 5.1.2 Procedimentos de execução dos prismas PR2B e PR3B | 115 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1.3 | Resumo dos resultados para os ensaios em Prismas PR2B e PR3B | 122 |
| 5.2 | Ensaio em Prismas Contrafiados (PRM3F) | 123 |
| 5.2.1 | Instrumentação e ensaios nos prismas contrafiados | 126 |
| 5.2.2 | Resultados obtidos nos ensaios em prismas contrafiados..... | 127 |
| 5.2.3 | Forma de ruptura dos prismas contrafiados..... | 128 |
| 5.3 | Ensaio em painéis na escala reduzida..... | 128 |
| 5.3.1 | Generalidades..... | 128 |
| 5.3.2 | Procedimentos de execução dos painéis na escala reduzida (1:5). | 129 |
| 5.4 | Ensaio em paredes na escala reduzida (PAR3B12F)..... | 135 |
| 5.4.1 | Generalidades..... | 135 |
| 5.4.2 | Procedimentos de execução das paredes PAR3B12F | 135 |
| 5.4.2 | Instrumentação e ensaio das paredes PAR3B12F | 136 |
| 5.4.3 | Resultados obtidos para as paredes PR3B12F | 137 |
| 5.4.4 | Forma de ruptura das paredes PAR3B12F | 138 |
| 5.5 | Análise geral dos resultados de caracterização da Alvenaria..... | 139 |
| 6 | Trabalho experimental: Modelo Físico Reduzido | 140 |
| 6.1 | Arquitetura do Modelo Físico Reduzido | 142 |
| 6.2 | Execução do Modelo Físico Reduzido..... | 147 |
| 6.2.1 | Preparação do Terreno, Fundação e Base | 147 |
| 6.2.2 | Instrumentação da Base do Modelo Físico Reduzido | 151 |
| 6.2.3 | Execução do Modelo Físico Reduzido - Assentamento | 158 |
| 6.2.4 | Execução da Laje do Modelo Físico Reduzido | 164 |
| 7 | Ensaio e Resultados Experimentais: Modelo Físico Reduzido..... | 171 |
| 7.1 | Procedimentos Gerais de Ensaio..... | 171 |
| 7.2 | Primeira Etapa de Ensaio: Carregamento do Ambiente 1 | 174 |
| 7.3 | Segunda Etapa de Ensaio: Carregamento do Ambiente 2 | 182 |
| 7.4 | Terceira Etapa de Ensaio: Carregamento do Ambiente 3..... | 187 |
| 7.5 | Quarta Etapa de Ensaio: Carregamento dos Níveis | 192 |
| 7.5.1 | Carregamento do Nível 1 | 192 |
| 7.5.2 | Carregamento do Nível 2. | 193 |

| | |
|--|------------|
| 7.5.3 Carregamento no Nível 3..... | 194 |
| 7.5.4 Comentários e análises da Quarta Etapa de Ensaios | 196 |
| 7.6 Quinta Etapa de Ensaios: Carregamento da Cobertura | 198 |
| 7.6.1 Efeito do Carregamento Isolado na Cobertura | 198 |
| 8 Análise Teórica dos Procedimentos de Distribuição de Ações Verticais | 201 |
| 8.1 Considerações Gerais para Análise | 201 |
| 8.2 Procedimento de Paredes Isoladas..... | 202 |
| 8.3 Procedimento dos Grupos de Paredes | 205 |
| 8.4 Determinação das Reações de Apoio para a 1ª Etapa de Ensaios..... | 207 |
| 8.5 Determinação das Reações de Apoio para a 2ª Etapa de Ensaios..... | 211 |
| 8.6 Determinação das Reações de Apoio para a 3ª Etapa de Ensaios..... | 216 |
| 8.7 Determinação das Reações de Apoio para a 4ª Etapa de Ensaios..... | 221 |
| 8.8 Determinação das reações para o carregamento da Cobertura | 226 |
| 8.9 Proposta de Procedimento de Distribuição das Ações Verticais | 232 |
| 8.9.1 Determinação das Reações de Apoio para o carregamento isolado nos Ambientes – NGP | 238 |
| 8.9.2 Determinação das Reações de Apoio para a 4ª Etapa de Ensaios. | 244 |
| 8.9.3 Determinação das reações para o carregamento da Cobertura..... | 248 |
| 9 Modelagem por Elementos Finitos (MEF)..... | 252 |
| 9.1 Características do modelo | 252 |
| 9.2 Modelagem para a 1ª Etapa de Carregamentos | 255 |
| 9.3 Modelagem para a 2ª Etapa de Carregamentos | 257 |
| 9.4 Modelagem para a 3ª Etapa de Carregamentos | 259 |
| 9.5 Modelagem para a 4ª Etapa de Ensaios: Carregamento dos Níveis... | 261 |
| 9.6 Modelagem para a 5ª Etapa de Ensaios: Carregamento na Cobertura | 263 |
| 10 Análises dos Resultados..... | 265 |
| 10.1 Resultados da 1ª Etapa de Ensaios: Carregamento no Ambiente 1 . | 265 |
| 10.2 Resultados da 2ª Etapa de Ensaios: Carregamento no Ambiente 2 . | 271 |
| 10.3 Resultados da 3ª Etapa de Ensaios: Carregamento do Ambiente 3 . | 276 |
| 10.4 Análise da 1ª, 2ª, e 3ª etapa de ensaios | 280 |
| 10.5 Resultados da 4ª Etapa de Ensaios: Carregamento dos Níveis..... | 281 |

| | |
|---|-----|
| 10.6 Resultados da 5ª Etapa de Ensaios: Carregamento da Cobertura... | 284 |
| 10.7 Validação da Análise Elástico Linear na Modelagem por Elementos Finitos (MEF) | 288 |
| 11 Conclusões..... | 291 |
| 11.1 Procedimentos Adotados | 291 |
| 11.2 Ensaios experimentais | 291 |
| 11.3 Procedimentos Teóricos | 292 |
| 11.4 Sugestões para Futuras Pesquisas | 294 |
| Referências | 295 |
| Referências Complementares | 301 |
| Apêndice | 304 |
| Apêndice A – Determinação de Valores Espúrios | 304 |
| Apêndice B – Caderno de Fiadas | 305 |
| Apêndice C – Aplicação do Procedimento de Novos Grupos de Paredes. | 321 |
| Apêndice D – Resultados das Reações de Apoio com a Aplicação de Carregamento no Topo do Primeiro Pavimento..... | 326 |

1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (BRASIL, 2010) existe no Brasil um déficit habitacional da ordem de 5,5 milhões de moradias. Na última década esse índice teve uma redução, no entanto, ainda há necessidade de políticas habitacionais consistentes que venham a implementar uma solução viável para suprir as demandas do país.

Segundo o Sindicato da Construção Civil do estado de São Paulo (SINDUSCON), para sanar o déficit habitacional e atender às necessidades das novas famílias até 2022, a produtividade média¹ da construção civil deve passar de 1% para 3% ao ano (ZAIDAN, 2011).

Dentre os vários processos construtivos empregados na construção de conjuntos habitacionais, destacam-se o de alvenaria estrutural, não só pelas suas vantagens econômicas, mas sim pela evolução iniciada na década de 1960 no Brasil.

Após a publicação de normas, entre 1985 e 1989, pôde-se perceber a evolução das “estruturas de alvenaria” que anteriormente eram realizadas de forma empírica, passando a ser não só dimensionada, mas também planejada de maneira racional e executada com procedimentos e materiais submetidos a rigorosos controles.

Na década de 1990 percebe-se no Brasil o início de uma ascendente curva de assimilação do sistema construtivo notado pelo crescente número de pesquisas e construções em alvenaria estrutural culminando na sua extensiva adoção atual (PARSEKIAN, 2010).

A utilização do potencial da alvenaria estrutural apenas será possível com o conhecimento real das características dos componentes, e principalmente, da maneira correta de sua aplicação.

¹ Produtividade média: Quociente entre a quantidade produzida e a quantidade utilizada.

Especificamente em edifícios de alvenaria estrutural, atenção especial deve ser dada às ações verticais, pois são as que normalmente apresentam maior magnitude e determinam o seu dimensionamento no Brasil.

Acredita-se assim que a necessidade da realização de estudos específicos sobre os materiais e o comportamento estrutural da distribuição das ações verticais seja primordial, estando inserida neste contexto a presente pesquisa.

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal da presente pesquisa foi realizar uma análise teórico-experimental da distribuição das ações verticais entre paredes de alvenaria estrutural com amarração direta através de ensaios em um modelo físico reduzido de quatro pavimentos construído com blocos cerâmicos na escala 1:5.

1.3 JUSTIFICATIVAS

No processo de análise do comportamento estrutural da alvenaria, e nas etapas subsequentes das verificações, é fundamental que a interação entre paredes estruturais e a devida distribuição das ações verticais seja adequadamente estabelecida.

Com o conhecimento da interação entre as paredes estruturais e da real distribuição das ações verticais podem ser obtidos modelos de cálculos mais próximos do comportamento da estrutura, conduzindo a dimensionamentos mais adequados. Isso propicia maior confiabilidade no sistema construtivo além da eventual redução de custos.

Por outro lado, o desconhecimento da real forma de interação entre as paredes pode fazer com que projetistas tomem decisões equivocadas, visto que a não consideração da interação entre as paredes pode resultar em níveis de carregamento significativamente diferentes. Já a adoção de taxas “exageradas” de transferência pode resultar em uniformizações inatingíveis das ações.

De modo geral, diferenças significativas entre cargas teóricas e reais nas paredes podem conduzir a uma situação antieconômica quando os valores reais são inferiores aos teóricos ou então pecar contra a segurança se a situação for oposta.

O desenvolvimento de estudos que permitam uma melhor compreensão do mecanismo de distribuição das ações verticais entre paredes resistentes é fator de grande importância para a realização do dimensionamento da alvenaria estrutural.

Apesar da importância do assunto, poucos estudos têm sido conduzidos nesta direção. Acredita-se que em outros países esse fato seja justificado pela tradição de construir edifícios de alvenaria de pequena altura, em que a distribuição das ações verticais não seria o fator relevante no projeto ou no custo da edificação. Porém, no Brasil, tem se verificado a construção de edifícios relativamente altos, o que evidencia a necessidade de melhor compreender a distribuição das ações verticais entre as paredes resistentes.

Embasados nestas premissas e no crescimento de investimentos aplicados neste sistema racional é imprescindível o conhecimento da transferência das ações verticais entre as paredes resistentes para diferentes níveis de solicitação presentes na estrutura e a real distribuição das ações verticais.

1.4 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo proposto foram realizados ensaios de caracterização dos componentes da alvenaria estrutural na escala reduzida (1:5) e posteriormente foram realizados ensaios de caracterização da alvenaria fazendo-se uso de prismas de dois e três blocos (PR2B e PR3B), prismas contrafiados (PRM3F²), de painéis (PAI3B5F³), e de paredes (PAR3B12F⁴).

Realizada a caracterização da alvenaria foi construído um modelo físico reduzido de quatro pavimentos na escala 1:5. O modelo físico reduzido foi utilizado para a realização dos ensaios experimentais com a aplicação de carregamentos uniformemente distribuídos em diferentes regiões e em variados níveis; de forma a propiciar a análise da distribuição das ações verticais ao longo da altura do modelo.

² PRM3F: Corpos-de-prova com o comprimento de um bloco e meio e na altura de três fiadas.

³ PAI3B5F: Corpos-de-prova com o comprimento de três blocos e na altura de cinco fiadas.

⁴ PAR3B12F: Corpos-de-prova com o comprimento de três blocos e na altura de doze fiadas.

Para a devida análise, foram realizadas instrumentações na base do modelo, através de células de carga para a obtenção dos carregamentos ao nível da fundação.

Posteriormente procurou-se comparar os resultados experimentais obtidos no modelo físico com as usuais considerações de distribuição de ações verticais utilizadas no meio técnico e com a Modelagem por Elementos Finitos (MEF).

1.5 ESTRUTURA DO TEXTO

Neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais, o objetivo da presente pesquisa, as justificativas, e a metodologia para a realização dos estudos. No capítulo 2 discorre-se sobre a interação entre paredes e a distribuição das ações verticais contemplando os usuais procedimentos. Já no capítulo 3 são apresentados conceitos relativos à utilização de modelos físicos reduzidos e apresentado, de forma sucinta, algumas pesquisas realizadas e que ainda estão em desenvolvimento com a utilização de modelos físicos reduzidos em Alvenaria Estrutural.

No capítulo 4 apresenta-se toda a descrição do trabalho experimental desenvolvido para a caracterização dos componentes da alvenaria estrutural utilizados na pesquisa. São descritas as especificações e normas utilizadas, bem como os procedimentos, métodos, e equipamentos adotados.

No capítulo 5 expõe-se o trabalho experimental de caracterização da alvenaria estrutural para a escala reduzida (1:5), fazendo-se uso dos resultados experimentais de caracterização dos componentes apresentados no capítulo 4. Para a devida caracterização foram realizados ensaios à compressão axial em prismas de dois e três blocos (PR2B e PR3B), em prismas contrafiados de um bloco e meio com três fiadas (PRM3F), em painéis de três blocos e cinco fiadas (PAI3B5F), e por último em paredes de três blocos com doze fiadas (PAR3B12F).

No capítulo 6 são apresentadas as etapas e procedimentos adotados para a construção do modelo físico reduzido na escala 1:5, bem como a descrição detalhada dos recursos e cuidados tomados. No capítulo 7 descrevem-se os ensaios realizados no modelo físico reduzido, sendo apresentados todos os detalhes de carregamento e os resultados obtidos para cada etapa de ensaios.

No capítulo 8 foi realizada a análise teórica dos procedimentos usuais de distribuição de ações verticais através do procedimento de Paredes Isoladas e do procedimento de Grupos de Paredes, realizando-se todas as etapas de carregamentos citadas no capítulo 7.

No capítulo 9 foi realizada a análise do modelo físico reduzido através da Modelagem por Elementos Finitos (MEF), no qual foram realizadas as mesmas etapas de carregamentos citados anteriormente.

No capítulo 10 apresenta-se a análise dos resultados experimentais em comparação com os resultados dos procedimentos usuais de distribuição das ações verticais e com a Modelagem por Elementos Finitos. No capítulo 11 são expostas as conclusões da tese e apresentadas as sugestões para futuras pesquisas. Posteriormente são apresentadas as bibliografias utilizadas para a elaboração do presente texto, e por fim, encontram-se os apêndices.

2

INTERAÇÃO ENTRE PAREDES E DISTRIBUIÇÃO DAS AÇÕES VERTICAIS

2 INTERAÇÃO ENTRE PAREDES E DISTRIBUIÇÃO DAS AÇÕES VERTICAIS

No presente capítulo procura-se caracterizar o fenômeno da interação entre paredes interconectadas submetidas a carregamentos verticais e apresentar os usuais procedimentos de distribuição das ações verticais.

2.1 INTERAÇÕES ENTRE PAREDES

Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 15812-1:2010 a união e a solidarização de paredes que se cruzam podem ocorrer por dois métodos: amarração direta ou amarração indireta. A amarração direta, popularmente conhecida no meio técnico como contrafiada, é definida como a intersecção de paredes onde 50% dos blocos penetram alternadamente na parede interceptada. Vale ressaltar que esta definição da norma aplica-se para o caso da utilização de blocos com dimensões modulares, onde o comprimento é o dobro da largura, caso contrário tal definição se torna incoerente.

Para a amarração indireta são utilizados outros meios e artifícios de ligação que possam propiciar e garantir a transmissão de forças entre elas, como exemplo pode-se citar o uso de grampos metálicos e também o uso de telas soldadas, a ABNT NBR 15812-1:2010 a define como:

[...] padrão de ligação de paredes com junta vertical a prumo em que o plano da interface comum é atravessado por armaduras normalmente constituídas por grampos metálicos devidamente ancorados em furos verticais adjacentes grauteados ou por telas metálicas ancoradas em juntas de assentamento. (ABNT: NBR 15812-1:2010, p.4).

Na figura 2.1 ilustram-se detalhes de um corpo-de-prova com ligação indireta e grampos metálicos que foi confeccionado por Silva (2003) em sua pesquisa de mestrado para a realização de estudos experimentais de ligações entre paredes de alvenaria estrutural sujeitas a ações verticais.

Figura 2. 1 – Amarração indireta entre paredes com a utilização de grampos metálicos.

Fonte: Própria (SILVA, 2003).

Embora este tipo de amarração seja citado pela norma, estudos experimentais realizados por Silva (2003) mostraram que a eficiência da amarração direta é no mínimo 50% superior à amarração indireta. Conclusão semelhante foi obtida por Moreira (2007) na análise experimental de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. De acordo com a ABNT NBR 15812-1:2010:

Deve-se considerar que existirá a interação quando se tratar de borda ou canto com amarração direta. Em outras situações de ligação, que não a de amarração direta, a interação somente pode ser considerada se existir comprovação experimental de sua eficiência. (ABNT: NBR 15812-1:2010, p.20).

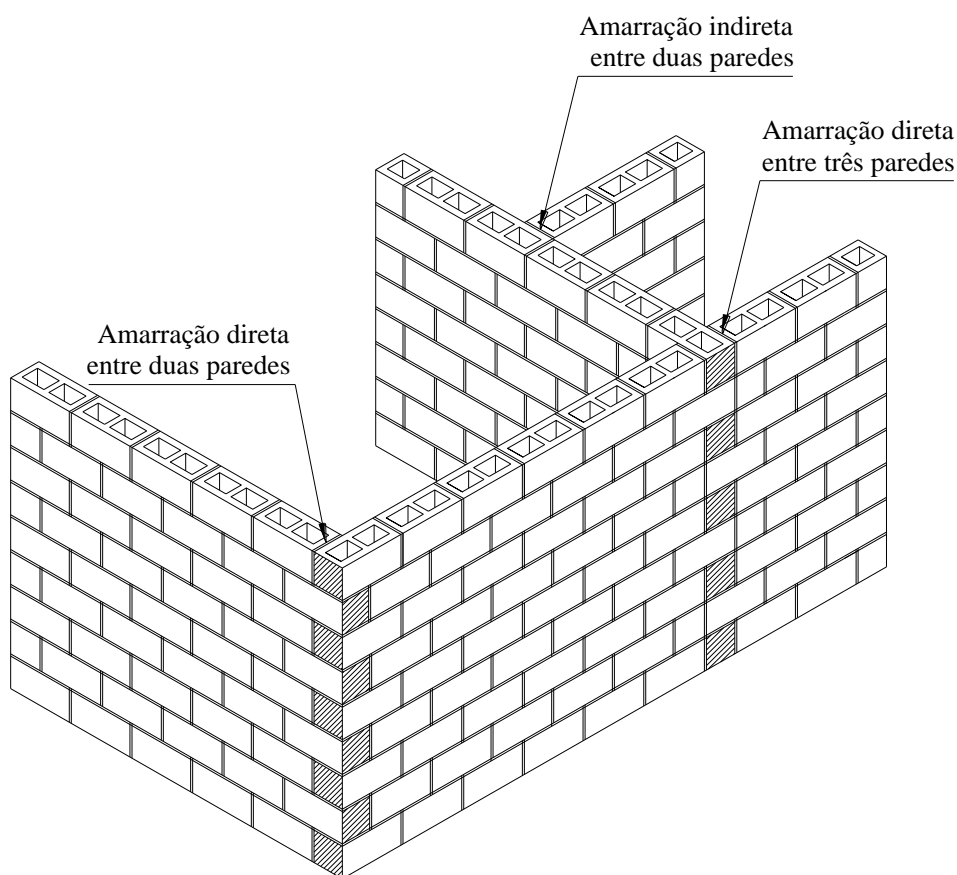
As ligações em amarração direta facilitam a redistribuição de tensões provenientes de cargas verticais e horizontais ou introduzidas por cargas permanentes e acidentais, incluindo deformações estruturais e movimentações higrotérmicas (THOMAZ e HELENE, 2000).

Capuzzo Neto (2000) considera que além das amarrações citadas anteriormente, existe na prática, a presença de cintas, que são fiadas compostas por blocos do tipo “canaleta” preenchidos com graute e armadura, cuja finalidade é a de transmitir esforços uniformes à parede que lhe dá apoio ou servir de travamento e amarração.

A interação ocorre sempre que duas ou mais paredes, que se interceptam, têm alguma tendência de deslocamento relativo na interface, o que pode ser provocado por carregamentos horizontais como a ação do vento, e também no caso em que as paredes que se interceptam são carregadas verticalmente e estão submetidas a tensões de compressão distintas.

A ABNT NBR 15812-1:2010 preconiza que as amarrações diretas devem ser realizadas a uma distância máxima de três fiadas uma da outra, evitando-se desta forma as juntas verticais a prumo. Na figura 2.2 ilustra-se um detalhe genérico com alguns tipos usuais de amarrações entre paredes de alvenaria estrutural.

Figura 2. 2 – Detalhe genérico de amarrações entre paredes de alvenaria estrutural.



Fonte: Própria.

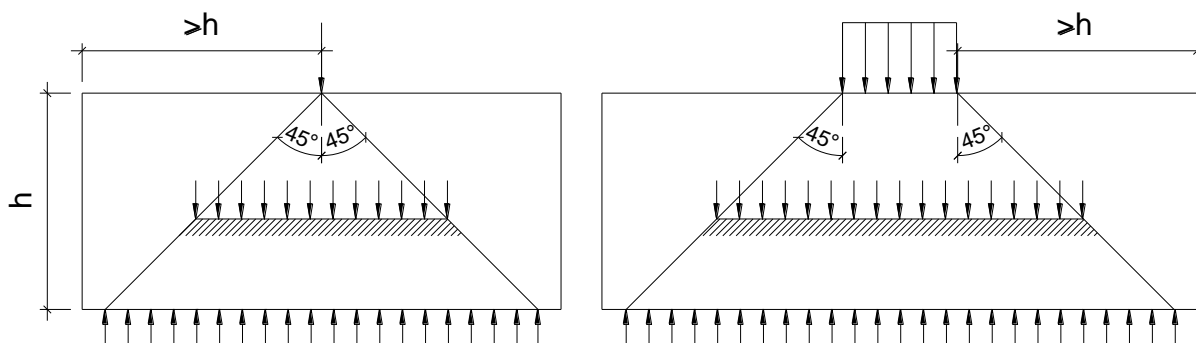
De acordo com Corrêa (2003) a “interação de paredes ocorre pela transferência de forças através de sua interface comum, e quando efetiva pode levar a um substancial aumento na sua capacidade de absorver cargas”.

Corrêa (2003) cita ainda que no caso de carregamentos verticais também existe a tendência de movimentação relativa na interface, provocando o aparecimento de forças cisalhantes que evidenciam a interação. A ABNT NBR 15812-1:2010, na hipótese básica de análise estrutural, cita que:

[...] a dispersão de qualquer ação vertical concentrada ou distribuída sobre um trecho de um elemento se dará segundo uma inclinação de 45° , em relação ao plano horizontal, podendo-se utilizar essa prescrição tanto para a definição da parte de um elemento que efetivamente trabalha para resistir a uma ação quanto para a parte de um carregamento que eventualmente atue sobre um elemento [...]
(ABNT: NBR 15812-1:2010, p.17).

Na figura 2.3 representa-se a dispersão das ações verticais citada na referida norma.

Figura 2.3 – Formas de dispersão das ações verticais segundo a ABNT NBR 15812-1:2010.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15812-1:2010.

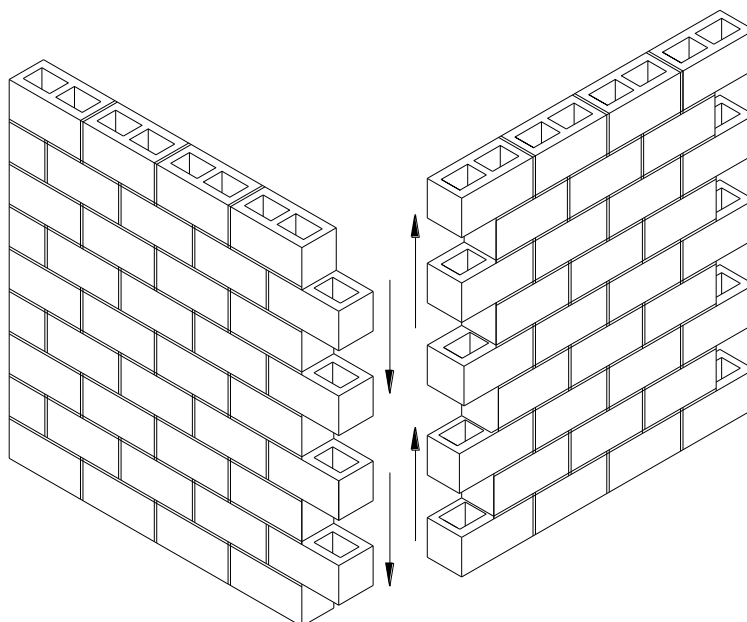
De acordo com Ramalho e Corrêa (2003) se o espalhamento pode ser observado em paredes planas então:

[...] é de supor que também possa ocorrer em cantos e bordas, especialmente quando a amarração é realizada intercalando-se blocos numa outra direção, ou seja, sem a existência de juntas a prumo. Isso se dá porque um canto assim executado guarda muita semelhança com a própria parede plana, devendo ser, portanto, o seu comportamento também semelhante (RAMALHO e CORRÊA, 2003, p.28).

Corrêa e Ramalho (1994) expõem que as considerações da interação de forças podem ser resumidas em dois casos principais: a interação de cantos e extremidade, e a interação por aberturas.

No caso de cantos e extremidades a característica principal a ser analisada, para se verificar a interação entre as paredes, é a avaliação da “engrenagem” entre os componentes estruturais, ou seja, entre as unidades. Para que possam existir essas interações, os deslocamentos relativos entre as paredes devem ser praticamente nulos, caso contrário a homogeneização das cargas estará comprometida (Figura 2.4).

Figura 2. 4 – Interação entre paredes de canto, adaptado de Ramalho e Corrêa (2003).

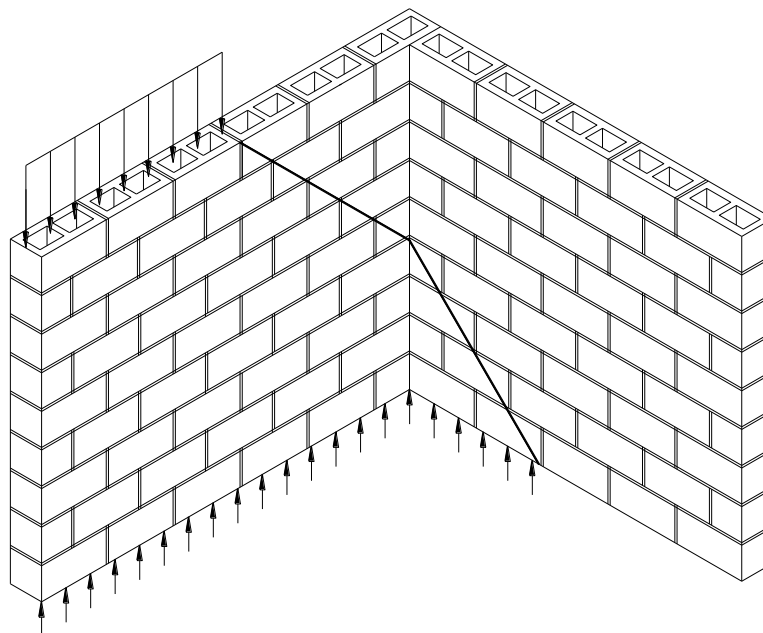


Fonte: Adaptado de Ramalho e Corrêa (2003).

Curtin *et al.* (1984), cita que as paredes construídas com amarração direta permitem a distribuição das ações verticais e laterais ao longo do comprimento e altura dos painéis de alvenaria e, portanto, pode-se admitir que parte da força é transferida para as paredes adjacentes, tendo um espalhamento a 45° da vertical (Figura 2.5).

No caso de aberturas, Corrêa e Ramalho (1994) salientam que, para se considerarem as interações, devem-se projetar outros meios de ligações entre as paredes que possam substituir a engrenagem dos blocos e garantir a homogeneização das cargas pelas mesmas.

Figura 2. 5 – “Espalhamento” de carregamentos em paredes adjacentes, adaptado de Ramalho e Corrêa (2003).



Fonte: Adaptado de Ramalho e Corrêa (2003).

De acordo com a ABNT NBR 15812-1:2010: “As interações de paredes através de aberturas devem ser desconsideradas, a menos que haja comprovação experimental de sua eficiência”.

Segundo Corrêa e Ramalho (1994), através de estudos em Modelagem por Elementos Finitos, a distribuição das tensões entre paredes de alvenaria estrutural está diretamente influenciada pelo tipo de amarração realizada e, além disso, a amarração serve de contraventamento para as paredes, consistindo assim num dos mecanismos essenciais no que diz respeito ao conjunto da edificação.

Desta forma, pode-se afirmar que as paredes resistentes podem apresentar diferentes distribuições de ações verticais, que se tornam delineadas em função da forma de amarração e conseqüentemente da interação entre as mesmas.

Ramalho e Corrêa (2003) ainda discutem a possível existência de forças de interação através das aberturas. “Usualmente, considera-se que a existência de uma abertura também represente um limite entre paredes, ou seja, a abertura caracteriza a interrupção do elemento”. Desta forma, uma parede com aberturas normalmente é considerada como uma seqüência de paredes independentes.

Apesar das considerações usuais os autores citam que comumente há forças de interação entre esses diferentes elementos e, portanto, haverá espalhamento e uniformização de tensões.

Diante do exposto pode-se concluir que a trajetória das tensões ao longo da altura de um edifício é dependente das interseções entre paredes, e a adequada consideração da distribuição das ações verticais se torna fundamental no dimensionamento da alvenaria, tornando necessária uma maior compreensão no que diz respeito à interação entre paredes.

2.2 DISTRIBUIÇÃO DAS AÇÕES VERTICAIS

As ações verticais, permanentes e acidentais, existentes em edifícios de múltiplos pavimentos construídos em alvenaria estrutural, são suportadas pelas paredes resistentes que além da função divisória e de vedação também têm a função de constituir a estrutura dos mesmos.

A forma de se considerar a distribuição de um carregamento aplicado em uma parede de alvenaria estrutural para outra adjacente ainda é uma questão que merece estudos, sendo essa consideração de esforços realizada muitas vezes de forma intuitiva por projetistas.

Corrêa e Ramalho (1994) afirmam que a distribuição das ações verticais entre as paredes é um dos problemas mais importantes a ser enfrentado durante a realização do projeto de um edifício em alvenaria estrutural, pois o projetista deverá ter em mente como tratar a ação das lajes sobre as paredes que lhe servem de apoio e também como simulará a interação entre essas paredes.

Estudos teóricos realizados por Oliveira Jr. e Pinheiro em 1994 mostraram que as paredes de alvenaria estrutural, trabalhando em conjunto com as lajes, conduzem a efeitos favoráveis na redução das resistências necessárias às unidades devido à capacidade de distribuição das ações.

A distribuição de cargas e a uniformização ao longo da altura da edificação levam à redução das resistências dos blocos a serem especificados, proporcionando assim a redução de custos. Entretanto, Accetti (1998) salienta que se a suposta uniformização não ocorrer na prática, corre-se o risco de uma significativa redução da segurança da edificação e, para que esta uniformização ocorra efetivamente, é preciso que as paredes estejam interligadas e interagindo.

Para que se possa analisar a transferência das ações verticais entre os elementos estruturais, ou seja, entre as paredes resistentes, deve-se realizar inicialmente a análise da solidarização entre as paredes interligadas e a sua

interação pertinente. Portanto, a transferência das ações verticais pode ser considerada de formas distintas.

Para auxiliar a definição de distribuição de cargas verticais serão descritas, nos tópicos seguintes, os procedimentos mais indicados e usuais com as suas devidas particularidades.

2.2.1 PAREDES ISOLADAS

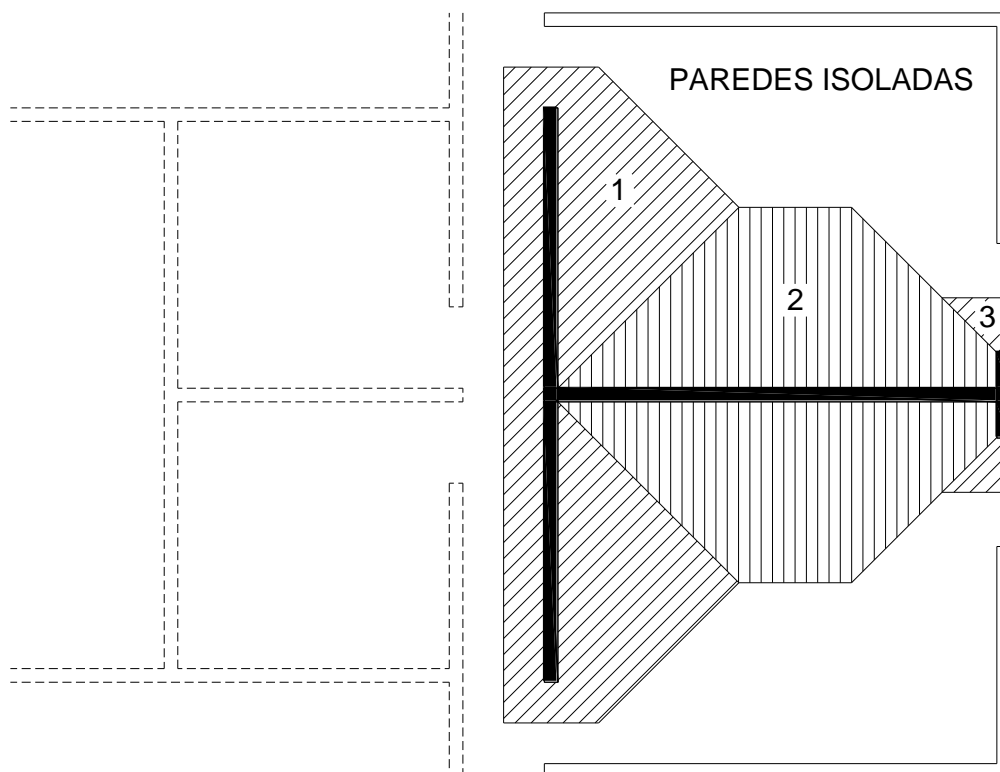
Uma forma de considerar a transferência das ações verticais para as estruturas de apoio é supor que cada parede seja responsável única e exclusivamente pelo seu peso próprio e pelas cargas permanentes e acidentais a ela transmitida pelas lajes que nela se apoiam, ou seja, considera-se que não haja interação entre as paredes e estas são tratadas como elementos independentes. As paredes com seus respectivos comprimentos são limitados pelas aberturas existentes ou por alguma mudança de direção.

Para a determinação das cargas que são aplicadas em cada parede, pode-se fazer uso dos procedimentos convencionais adotados para o cálculo de concreto armado, subdividindo-se as lajes em triângulos e trapézios, em cada pavimento, e cuja área determinada estará relacionada ao quinhão de carga a ser aplicada nas paredes correspondentes, sem considerar as ligações existentes entre as mesmas. Dessa forma, a carga em cada parede se torna o somatório do que ocorre em cada pavimento ao longo da altura do edifício até a fundação (Figura 2.6).

Para lajes retangulares, Hendry *et al.* (1981), salientam que a distribuição das tensões não é uniforme ao longo do comprimento da parede, sendo que na verdade estas se concentram na região central; no entanto, nos pavimentos inferiores de edifícios esta não uniformidade tende a diminuir gradualmente ao longo da altura da parede.

Mesmo que as cargas de lajes não carreguem as paredes de modo uniforme, estudos realizados através de simulações teóricas, com a utilização do método dos elementos finitos, por Corrêa e Ramalho (1990-1992), indicaram que, devido aos vínculos promovidos pelas outras paredes, associadas entre si pelas lajes, as diferenças nas cargas aplicadas tendem a desaparecer à medida que se afastam da região de aplicação.

Figura 2. 6 – Transferência de cargas verticais para o procedimento de Paredes Isoladas, adaptado de HENDRY *et al.* (1981).



Fonte: Adaptado de HENDRY *et al.* (1981).

Ramalho e Corrêa (2003) caracterizam esta forma como um modo “simples e também muito seguro para as paredes, pois na ausência da uniformização das cargas as resistências prescritas para os blocos resultarão sempre mais elevadas que se a uniformização fosse considerada”.

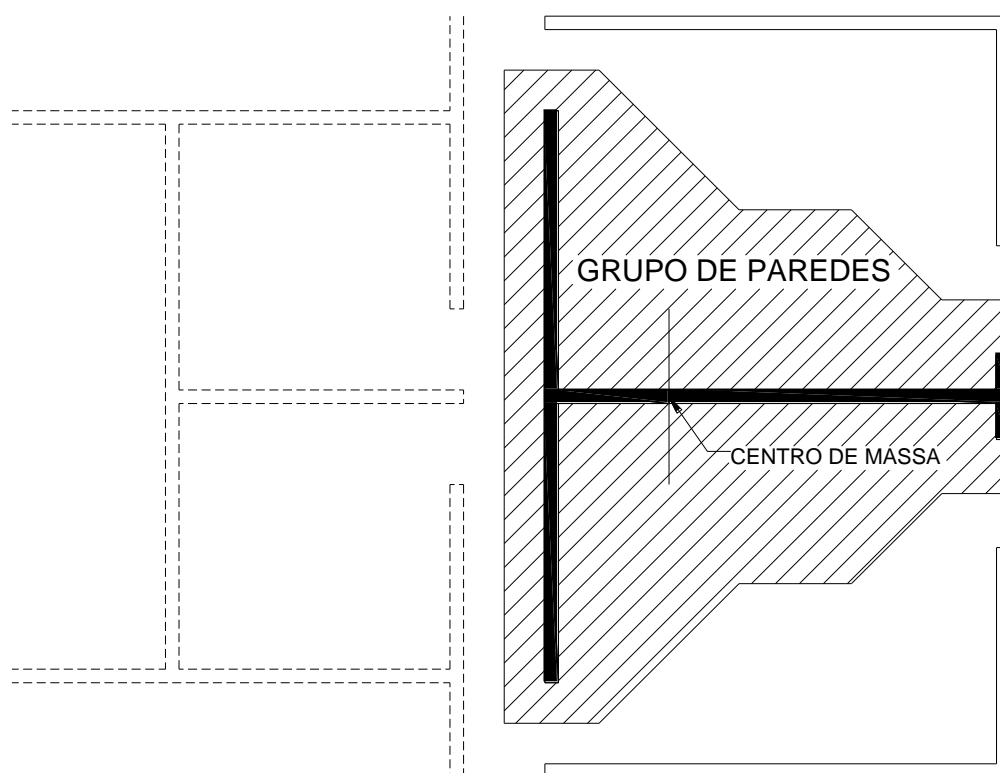
Esse fato gera, via de regra, um dimensionamento não uniforme da estrutura, tendo como resultado a elevação dos custos da obra, além das dificuldades para a avaliação da distribuição das ações verticais sobre estruturas complementares, como pavimentos de pilotis e fundações em concreto armado.

“A recomendação que se pode fazer é que este procedimento de se considerar as paredes isoladas seja utilizado para edificações de altura relativamente pequena, onde seus efeitos negativos são menos perceptíveis” (RAMALHO e CORRÊA, 2003, p.32).

2.2.2 GRUPOS DE PAREDES

No ano de 1969, Sutherland⁵ propôs que as paredes resistentes fossem subdivididas em grupos de paredes tratados como elemento único e com carga correspondente à área de influência do grupo (Figura 2.7), considerando-se também o efeito da excentricidade da resultante em relação ao centróide da área do grupo de paredes (CAMACHO, 1987).

Figura 2. 7 – Transferência de cargas verticais para o procedimento de Grupos de Paredes, adaptado de HENDRY *et al.* (1981).



Fonte: Adaptado de HENDRY *et al.* (1981).

⁵ SUTHERLAND, R.J.M. *Design engineer's approach to masonry construction*. In: JOHNSON, F.B. (Ed.) *Designing, engineering and constructing with masonry products*. Houston: Gulf, 1969. p.375-385.

As mesmas recomendações, e um exemplo semelhante, são dados por Ramalho e Corrêa (2003), que supõem o espraiamento ocorrendo em paredes ortogonais, desde que estas estejam ligadas por um contrafiado perfeito, onde a amarração entre os blocos seria condição necessária e suficiente para que o fenômeno possa ocorrer.

Camacho (1995), através de resultados teóricos, aponta para o fato de que nos pavimentos inferiores dos edifícios de maior altura, as cargas verticais tendem a se uniformizar entre as paredes interligadas pertencentes ao mesmo grupo.

Stockbridge⁶ *apud* Hendry *et al.* (1981), através de ensaios com medidas de deformações em paredes na base de um edifício de cinco pavimentos durante a construção, encontrou evidências de que há uma tendência das tensões se uniformizarem nos pavimentos inferiores, tanto em paredes isoladas, como em grupos de paredes interligadas (RAMALHO e CORRÊA, 2003).

De acordo com Ramalho e Corrêa (2003) este também é um procedimento simples de ser implementado, “usualmente, também é um procedimento seguro, em especial quando as aberturas são consideradas como o limite entre os grupos”.

[...] o procedimento pode apresentar distorções, dependendo de quais paredes serão consideradas como pertencentes a tal ou qual grupo. Considera-se ainda que produza reações adequadas para eventuais estruturas de apoio, o que é um detalhe bastante importante a ser considerado. (RAMALHO e CORRÊA, 2003, p.33).

Quanto à economia, sempre considerando uma escolha técnica correta dos grupos, é um procedimento bastante racional e que normalmente resulta em especificações adequadas de blocos. Entretanto, é fundamental que se avalie corretamente a possibilidade de efetivamente ocorrerem as mencionadas forças de interação em cantos e bordas, condição fundamental para a correta aplicação (RAMALHO e CORRÊA, 2003).

⁶ STOCKBRIDGE, J. G. ***A study of High-Rise load bearing brickwork in Britain.*** Edinburgh, 1967. Thesis (M. Arch.) – University of Edinburgh.

2.2.3 GRUPOS DE PAREDES COM INTERAÇÃO

Este procedimento é análogo ao citado anteriormente. A diferença, explica Accetti (1998), é que os grupos anteriormente definidos agora interagem segundo uma taxa pré-definida, formando os macrogrupos; isto baseado no fato de que há interação de grupos quando houver alvenaria entre a abertura e a laje.

A taxa de interação representa a parcela da diferença de cargas distribuídas que deve ser uniformizada em cada nível entre os grupos que interagem. Por exemplo, uma taxa de 40% indica que este percentual é a diferença entre as ações dos grupos e a ação média do macrogrupo a ser uniformizada, ou seja, 60% da diferença serão mantidos. Portanto, grupos com valores de cargas maiores que a média do macrogrupo transmite parte dessa diferença para os grupos com ações menores que a média.

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), paredes de grupos distintos podem interagir devido à presença de lintéis ou da própria laje, que funciona como diafragmas, a vinculá-las em planos horizontais. Estes grupos reunidos constituem o que se denomina pelo autor em macrogrupos.

Capuzzo Neto (2000) cita que neste procedimento há a liberdade de se utilizar a taxa de interação do macrogrupo de acordo com o tipo de ligação existente entre os grupos. Deste modo, as taxas referentes a diferentes aberturas poderão possuir valores diferentes.

Outra possível utilização citada pelo autor é a consideração de que cada parede seja admitida como um grupo. Assim, ao invés de haver uniformização total, pode-se considerar uma taxa de interação das paredes.

É bem mais trabalhoso que os dois procedimentos anteriormente citados. Assim, a forma de reduzir a possibilidade da ocorrência de erros, recomenda-se que seja automatizado através de computadores, até mesmo com a utilização de um programa de planilhas eletrônicas. (RAMALHO e CORRÊA, 2003, p.34).

Segundo Ramalho e Corrêa (2003) este procedimento exige bastante experiência dos projetistas e resultados experimentais para a sua utilização, pois existem parâmetros a serem definidos que são de grande importância, como: a união dos grupos, a definição de quais grupos interagem entre si, e ainda a taxa de interação. “A economia é seu grande atrativo”.

Uma sugestão interessante, segundo Ramalho e Corrêa (2003), para a consideração da interação através de um algoritmo seguro e relativamente fácil de ser implementado se resume em fazer a distribuição através das seguintes equações:

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

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

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

Em que: n= número de grupos que estão interagindo
 q_i= carga do grupo i
 q_m= carga média dos grupos que estão interagindo
 d_i= diferença de carga do grupo em relação à média
 t= taxa de interação

2.2.4 GRUPO TOTAL DE PAREDES

Outro procedimento, extremo ao citado no item 2.2.1 (Paredes Isoladas) é a distribuição completamente uniforme de cargas verticais que agem em um edifício entre suas várias paredes. Neste caso, é como se não existisse diferenciação entre as paredes resistentes. Ou seja, é como se todas as paredes fossem consideradas sob a mesma tensão, fazendo com que a carga vertical total do edifício pudesse ser dividida uniformemente pela área de todas as paredes em planta.

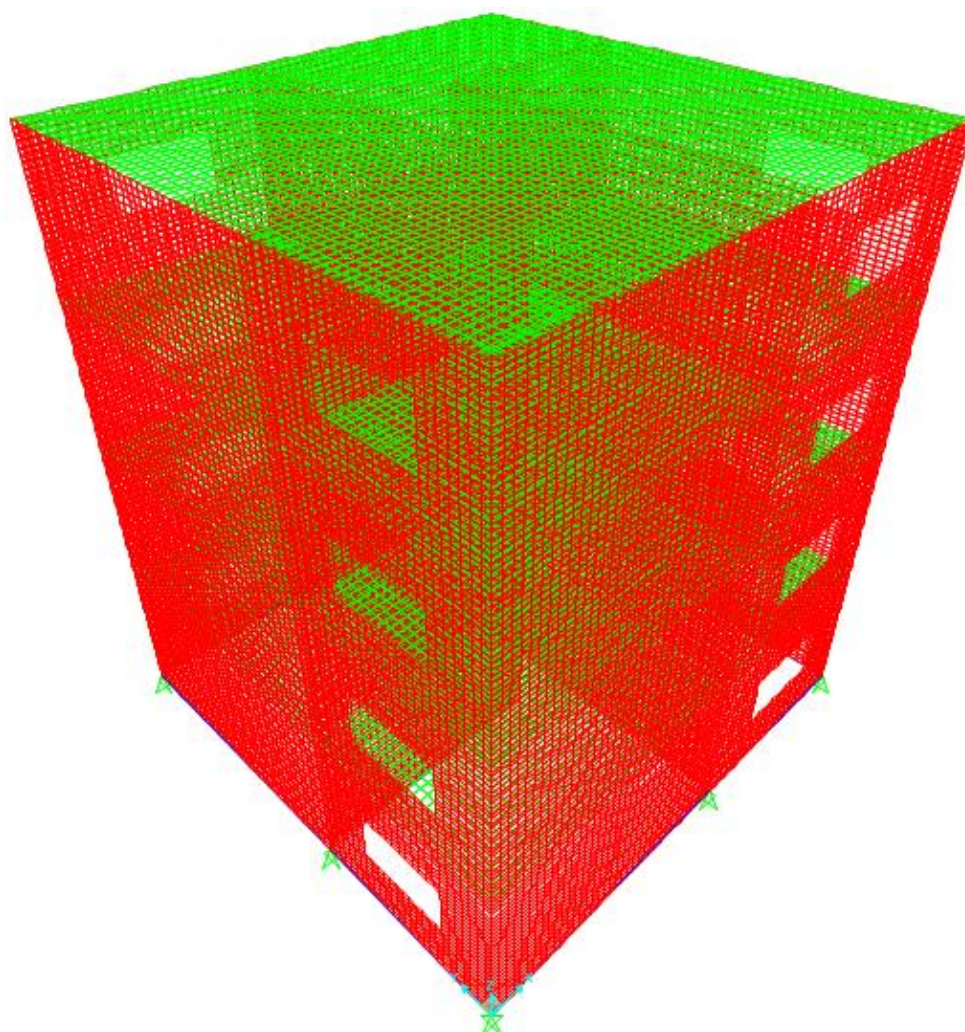
Esse procedimento é de análise muito simples e se torna extremamente econômico, pois tem como resultado uma total uniformização das ações verticais entre as paredes resistentes. Sua grande desvantagem refere-se ao fator segurança, pois, para a ocorrência deste procedimento, as interações entre as paredes devem ser absolutamente perfeitas, ou seja, admite-se que as ligações sejam solidárias, suportando em conjunto as ações verticais e assim realizando a distribuição das mesmas através das ligações existentes em seus encontros. Diante do exposto e da desvantagem apresentada não se recomenda o uso deste procedimento simplista.

2.2.5 MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS

Trata-se de modelar a estrutura discretizada com elementos, usualmente planos, inserindo-se carregamentos ao nível de cada pavimento. Desse modo a uniformização dar-se-á através da compatibilização dos deslocamentos ao nível de cada nó comum (RAMALHO e CORRÊA, 2003).

Para a modelagem em elementos finitos são necessárias algumas características mecânicas do material alvenaria, tais como módulo de deformação e coeficiente de *Poisson* se o tratamento for elástico-linear. Maiores detalhes sobre a modelagem por elementos finitos serão apresentados no capítulo 9 aonde se apresenta a modelagem por elementos finitos do modelo físico reduzido utilizado no presente trabalho (Figura 2.8).

Figura 2. 8 – Discretização do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Segundo Barreto e Oliveira (2002) a modelagem numérica por elementos finitos é um procedimento adequado, pois permite a obtenção de 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.

De acordo com Ramalho e Corrêa (2003) o procedimento apresenta alguns inconvenientes, como a dificuldade na montagem dos dados e na interpretação dos resultados, além da definição do comportamento de elementos que possam representar bem o material alvenaria.

3

MODELO FÍSICO

3 MODELO FÍSICO

De acordo com o ACI C-444:1979, um modelo é uma representação física de uma estrutura ou parte dela. De fato não existe uma linha divisória bem definida entre ensaios de modelos e de outras estruturas. Mesmo o ensaio em uma viga em escala natural sobre carregamento simples pode ser considerado como um ensaio em modelo, já que seus resultados são utilizados para o cálculo de uma viga que faz parte integrante de uma estrutura mais complexa. Entretanto, a ideia de modelo está geralmente associada a estruturas construídas em escala reduzida.

3.1 MODELO FÍSICO REDUZIDO

Em 1988, Klein percebeu a crescente utilização de modelos reduzidos na análise de estruturas e as “grandes vantagens” para o entendimento dos fenômenos que ocorrem nas estruturas e que podem ser utilizados no ensino, pesquisa, e desenvolvimento de projetos.

O ensaio em modelos proporciona ao engenheiro projetista uma valiosa ferramenta de grande rigor científico, que lhe permite em seus projetos estruturais abrir caminhos entre os limitados conhecimentos no campo da mecânica e atuar em uma zona muito mais ampla das estruturas fisicamente possíveis (CALIL JUNIOR e DIAS, 2003, p.1).

Klein (1988) cita que “além de permitir uma melhor visualização do comportamento estrutural, os modelos também servem para verificar experimentalmente procedimentos analíticos adotados na resolução de projetos estruturais”, estando inserida neste contexto a presente pesquisa.

Uma das vantagens da análise por modelos está na consideração de efeitos de 2ª ordem e de efeitos indeterminados, ou então, negligenciados nos procedimentos teóricos. Também se pode evidenciar o modo de ruptura da estrutura

e o comportamento do material até a ruína, muitas vezes difícil de ser tratado matematicamente.

Uma das grandes dificuldades na utilização dos modelos se dá na sua execução e na análise dos resultados experimentais. Segundo Klein (1988), de um modo geral, pode-se ter cinco tipos de modelos abaixo descritos:

- Para demonstração;
- Para analisar o comportamento de certas estruturas;
- Para verificar a validade do procedimento analítico;
- Para orientar na elaboração do projeto e cálculo de estruturas;
- Para esclarecer determinados efeitos em estruturas importantes e valiosas.

Para Carneiro (1996) uma das principais aplicações da análise dimensional é o estabelecimento das condições de semelhança física, que devem relacionar os protótipos com os modelos utilizados nas experiências.

Para que um modelo possa representar o protótipo, isto é, para que os resultados obtidos em ensaios com modelos possam ser estendidos aos protótipos, é preciso que haja semelhança, a começar pela semelhança geométrica [...] (CARNEIRO, 1996, p.4).

Para melhor descrever este tópico será apresentado, de forma simplista, o descrito por Fernando Lobo Carneiro em seu livro intitulado “*Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*” publicado em 1996 em sua 2ª edição.

3.1.1 SEMELHANÇA FÍSICA E MODELOS

Embora a análise dimensional seja incapaz, por si só, de descobrir a formulação completa de uma lei física, ela fornece indicações preciosas sobre combinações dos parâmetros envolvidos, de modo a reduzir o número total de variáveis a incluir nas equações. É assim um valioso guia para elaboração de teorias que se proponham a interpretar resultados experimentais. (CARNEIRO, 1996, p.3).

Além de incluir obrigatoriamente todos os parâmetros que possam ter influência no problema estudado, o que exige pelo menos uma cuidadosa análise qualitativa baseada em observações e pesquisas experimentais, a análise

dimensional incorpora de modo indireto as leis físicas em que se baseiam as fórmulas dimensionais das constantes físicas universais ou específicas que figuram entre esses parâmetros.

Uma das principais aplicações da análise dimensional é o estabelecimento das condições de semelhança física, que devem relacionar os protótipos com os modelos utilizados nas experiências (CARNEIRO, 1996).

É muito difícil reproduzir no modelo todas as condições impostas pela semelhança física. Já Galileu que foi pioneiro na teoria de semelhança física mostrava, em sua teoria de fraqueza dos gigantes, que a simples semelhança geométrica, em problemas de resistência das estruturas, é insuficiente: “se os materiais do protótipo e do modelo forem o mesmo, as forças de gravidade serão reproduzidas em escala diferente da escala das resistências”. Um modelo reduzido em que tais forças são significativas poderá apresentar comportamento satisfatório, e o protótipo não (CARNEIRO, 1996).

A dificuldade mencionada é tanto maior quanto mais complexo o processo físico, e a análise dimensional, além de orientar o modo como devem ser executados os modelos, passa a ter como papel principal o de advertir contra conclusões simplistas, revelando as grandes discrepâncias que podem existir entre o comportamento do modelo e do protótipo. Não significa isso que a análise dimensional, em tais casos, condene a utilização de modelos reduzidos, pois a rigorosa crítica dessas discrepâncias permite a melhoria dos modelos e a avaliação do grau de importância dos erros delas resultantes (CARNEIRO, 1996).

Se dois processos físicos são semelhantes, é possível prever o comportamento de um deles quando é conhecido o comportamento do outro. Na experimentação por meio de modelos, os dois processos físicos semelhantes são o protótipo e seu modelo; neste caso utiliza-se o modelo por ser mais fácil ensaiá-lo em laboratório do que ensaiar diretamente o protótipo.

Em geral os modelos são em escala geométrica reduzidos, mas há casos em que se adotam modelos maiores que os protótipos (CARNEIRO, 1996).

A primeira condição para a semelhança física é a semelhança geométrica, mas esta questão não é suficiente: um modelo não é simplesmente maquete. As dimensões correspondentes relacionam-se pela escala geométrica (CARNEIRO, 1996).

Na experimentação com modelos define-se como fator de escala a relação entre a magnitude da grandeza no modelo e no protótipo; se o modelo é reduzido, a escala geométrica é menor que a unidade. Em geral a escala é representada como fração tendo a unidade como numerador, e designada com símbolo κ ou λ (CARNEIRO, 1996).

3.2 ESTUDOS DE MODELOS REDUZIDOS EM ALVENARIA ESTRUTURAL NO BRASIL

Nos próximos itens procura-se apresentar, sucintamente, e em ordem cronológica, algumas pesquisas em alvenaria estrutural que foram ou estão em desenvolvimento no Brasil com a utilização de modelos físicos reduzidos. Os pormenores dos estudos poderão ser obtidos diretamente nas referidas fontes.

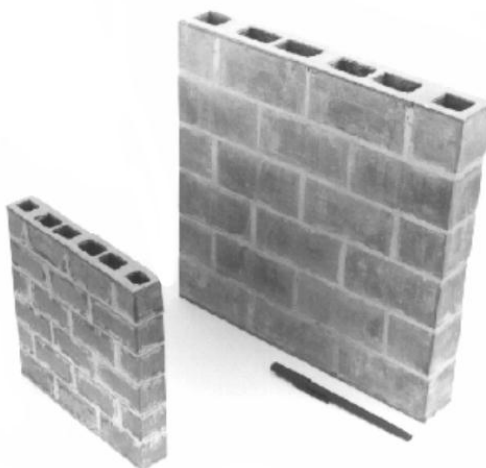
3.2.1 PESQUISA REALIZADA POR CAMACHO (1995)

O trabalho realizado por Camacho em 1995 foi apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de doutor. Este trabalho foi o primeiro no Brasil que se preocupou em realizar comparações diretas do comportamento e da resistência da alvenaria em diferentes escalas, tendo como objetivo o estudo das correlações existentes entre protótipos e modelos físicos reduzidos de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.

Para a consecução do trabalho proposto, o autor desenvolveu ensaios de compressão axial em unidades cerâmicas (blocos), em prismas de dois, três e quatro blocos; e em “pequenas paredes”, fazendo uso da escala natural e das escalas reduzidas 1:3 e 1:5. Posteriormente, o autor construiu e ensaiou “torres” nas escalas 1:3 e 1:5.

Os parâmetros observados, medidos e comparados pelo autor sempre foram as resistências à compressão, as deformações, e os modos de ruptura dos corpos-de-prova. Na figura 3.1 são ilustradas as chamadas “pequenas paredes” que o autor construiu e ensaiou nas duas escalas citadas.

Figura 3. 1 – Corpos-de-prova (“pequenas paredes”) de blocos cerâmicos ensaiados por Camacho (1995).



Fonte: (CAMACHO, 1995).

Camacho construiu “torres” fazendo uso das duas escalas citadas com o objetivo de analisar se o comportamento quando carregadas e levadas à ruptura sofria influência do fator de escala.

Para avaliar a distribuição do carregamento imposto às “torres”, o autor realizou medidas de deformações em pontos variados, e desta forma realizou as comparações das cargas de ruína e das formas de ruptura.

Os valores obtidos por Camacho (1995) para as resistências nos ensaios à compressão axial dos corpos-de-prova, na escala natural e nas escalas reduzidas (1:3 e 1:5) são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3. 1 – Resistência e eficiência dos corpos-de-prova executados e ensaiados por Camacho (1995).

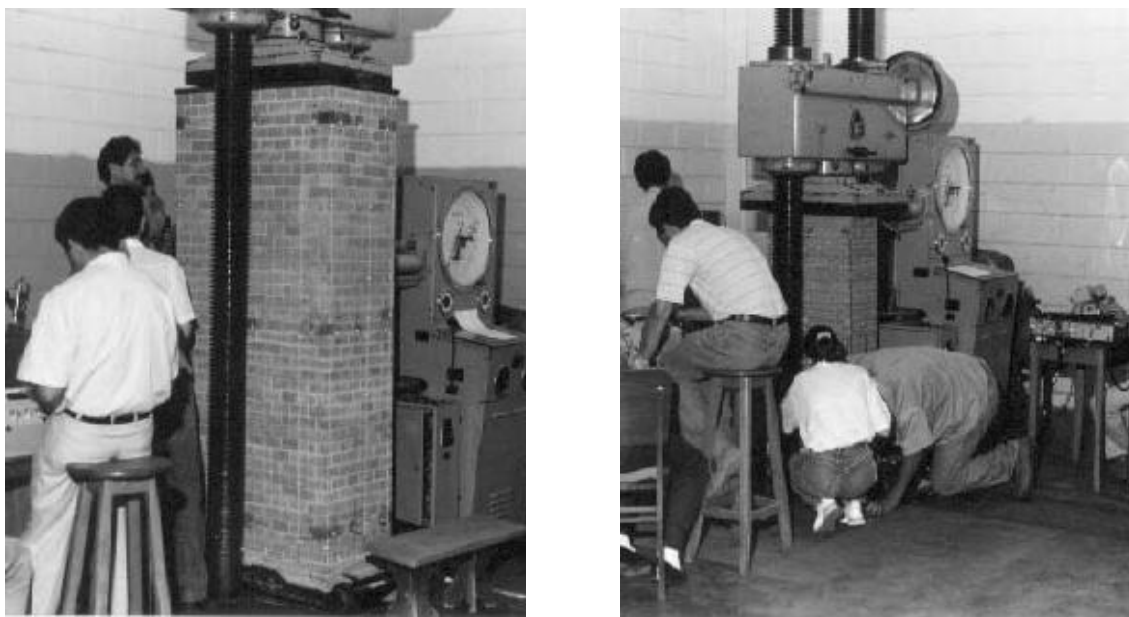
| Corpos-de-prova | Resistência à compressão (MPa) | | | Eficiência em relação ao bloco (%) | | |
|--------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------------------------|--------|--------|
| | (1:1) | (1:3) | (1:5) | (1:1) | (1:3) | (1:5) |
| Bloco | 15,40 | 18,21 | 15,03 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Prismas: 2 blocos | 6,59 | 10,46 | 9,39 | 42,50 | 57,40 | 62,50 |
| Prismas: 3 blocos | 5,95 | 9,36 | 8,49 | 38,40 | 51,40 | 56,50 |
| Prismas: 4 blocos | 5,09 | 6,88 | 7,31 | 32,90 | 37,80 | 48,60 |
| “Pequenas paredes” | 4,45 | 5,22 | 6,10 | 28,70 | 28,70 | 40,50 |

A eficiência indicada corresponde ao valor percentual da resistência do corpo-de-prova, dividida pela resistência do bloco. De acordo com o autor, cada valor apresentado corresponde à média de pelo menos seis corpos-de-prova; com

exceção das “pequenas paredes” que foram ensaiados apenas três corpos-de-prova para cada escala.

Na figura 3.2 ilustram-se ensaios em “torres” na escala 1:3 e 1:5 realizado no laboratório de engenharia civil da CESP localizado no município de Ilha Solteira/SP.

Figura 3. 2 – Corpos-de-prova (“Torres”) nas escalas 1:3 e 1:5 executadas e ensaiados por Camacho (1995).



Fonte: (CAMACHO, 1995).

De acordo com Camacho (1995), a forma de ruptura dos prismas e das “pequenas paredes” foi similar para as três escalas em estudo, sendo caracterizada pelo aparecimento de fissuras verticais, seguidas de estilhaçamentos e posterior ruptura das paredes dos blocos.

Segundo o autor, o comportamento da resistência dos blocos, prismas e “pequenas paredes”, para as três escalas, foram semelhantes, entretanto os modelos nas escalas 1:3 e 1:5 apresentaram eficiências mais elevadas se comparadas à escala natural (1:1). Em relação à deformação ocorrida na ruptura, verificou-se uma “grande” diferença entre os modelos reduzidos e a escala natural.

Os corpos-de-prova na escala reduzida apresentaram deformações superiores às observadas na escala natural. Segundo o autor essa divergência ocorre somente pelas diferenças no processo de fabricação.

Para todos os prismas e para as “pequenas paredes” a relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão (E_p/f_p), diminuiu com a redução da escala.

Com relação aos resultados dos ensaios nas “torres” foi constatado que “o surgimento das fissuras, seu caminhamento, e a forma de ruptura foram iguais para as duas escalas reduzidas”.

As cargas de ruptura, que foram respectivamente de 115,0 kN e 43,5 kN para as escalas 1:3 e 1:5, tiveram a mesma proporção da razão entre as áreas, significando que o estado de tensão no momento da ruptura foi equivalente para as duas “torres”.

Com relação às deformações, o autor concluiu que o comportamento e os valores medidos foram próximos para as duas “torres”, porém, salientou que se faz necessária a realização de outros ensaios com corpos-de-prova de diferentes tipos e dimensões; além de outros corpos-de-prova que possibilitem a realização de ensaios para a análise do efeito de lajes intermediárias que não foram realizadas nos modelos considerados.

Camacho (1995) conclui que, de forma geral, as resistências à compressão axial dos modelos são semelhantes entre si. Porém, para os prismas e para as “pequenas paredes”, os modelos apresentaram valores superiores aos observados no protótipo. As deformações de ruptura medidas nos modelos foram consideravelmente superiores aos valores medidos no protótipo.

Apesar da diferença dos valores numéricos, o comportamento e os modos de ruptura apresentados pelo protótipo e modelos são semelhantes. Salienta-se a necessidade de estudos complementares no sentido de investigar a diferença, entre protótipo e modelo, em relação aos valores do parâmetro deformação (CAMACHO, 1995, p.127).

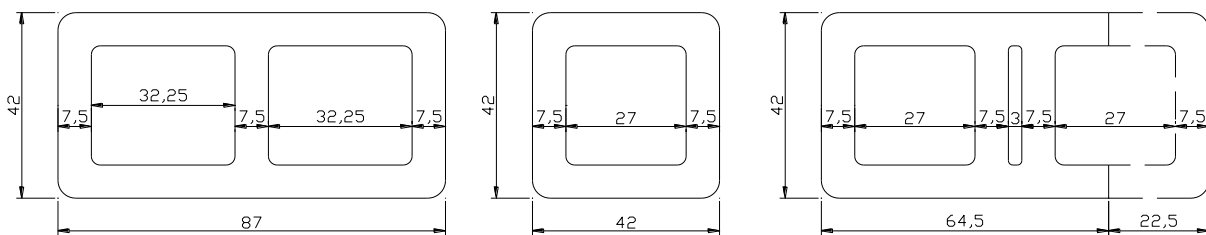
Na pesquisa apresentada o autor não especificou se foi considerada a redução em escala da espessura das paredes da unidade (blocos) e a forma geométrica; fatores estes que influenciam a análise dos resultados em comparação com a escala natural.

3.2.2 PESQUISA REALIZADA POR SIGNOR (2000)

Signor (2000) fez uso dos modelos físicos reduzidos na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para avaliar o cisalhamento direto em paredes de alvenaria estrutural cerâmica e a transferência de cargas verticais entre paredes ortogonais interligadas.

O autor produziu blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3,33 no laboratório de materiais de construção civil da referida universidade e confeccionou dois corpos-de-prova em formato de “H” para analisar a transferência de cargas verticais entre as paredes ortogonais. A geometria e as dimensões dos blocos utilizados são as apresentadas na figura 3.3.

Figura 3. 3 – Dimensões dos blocos cerâmicos (mm) produzidos por Signor (2000) na escala reduzida 1:3,33.



Fonte: Adaptado de Signor (2000).

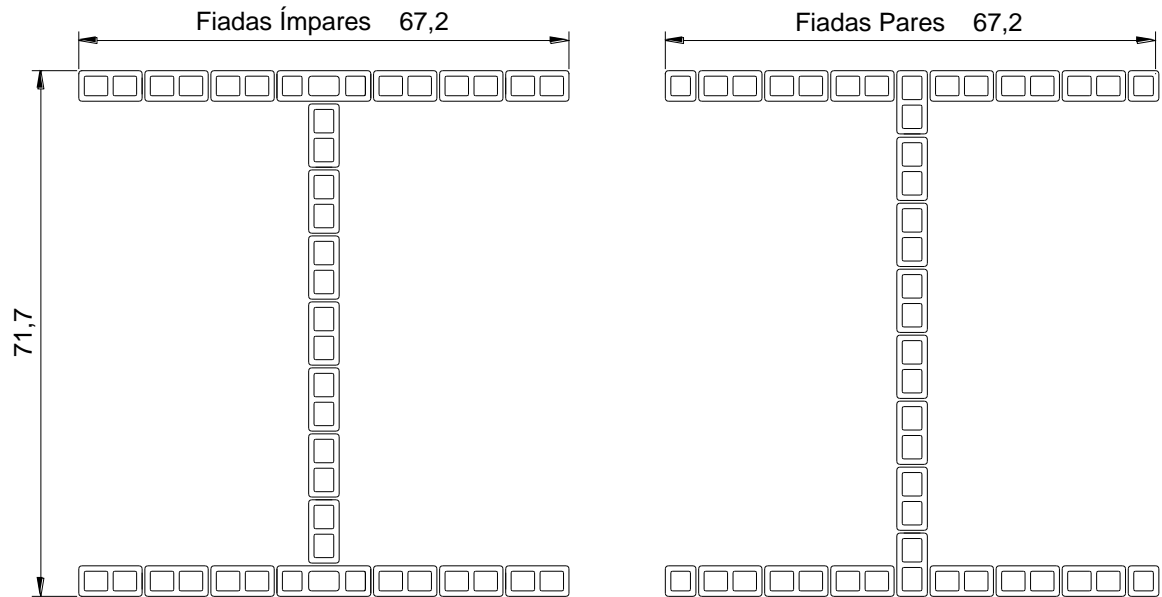
O bloco “Tipo 1” (a), citado pelo autor, representa os blocos de 14 x 19 x 29 cm (Largura x Altura x Comprimento). O “tipo 2” (b) representa o meio bloco que reproduz o bloco de 14 x 19 x 14 cm, e o “tipo 3” (c) representa o bloco especial de 14 x 19 x 44 cm. Segundo Signor (2000), o aspecto geral dos blocos foi satisfatório, porém, apresentaram pequenas variações dimensionais.

Com a utilização dos citados blocos cerâmicos foram confeccionados e ensaiados os dois corpos-de-prova em formato “H”, conforme dimensões (cm) e modulações que são apresentadas na figura 3.4. Na figura 3.5 ilustram-se os corpos-de-prova construídos e ensaiados por Signor (2000).

Signor (2000) pôde verificar que há distribuição de tensões para os flanges dos corpos-de-prova em forma de “H” quando realizado o carregamento da alma, verificando desta forma que ocorre o espraiamento de tensões.

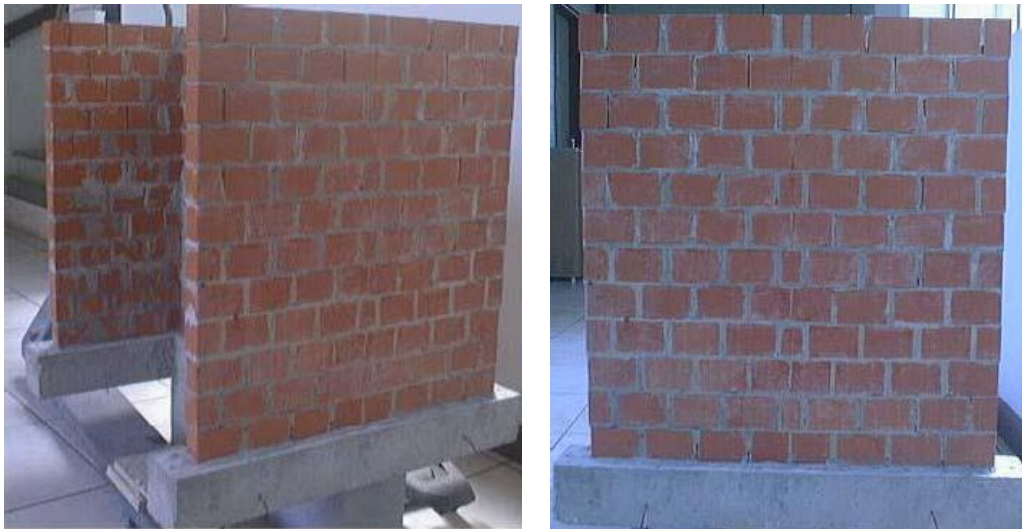
O acréscimo de tensões na base da alma foi relativamente linear demonstrando que a ocorrência de espreiamento é proporcional à carga aplicada, embora a estrutura não seja linear de acordo com as diferentes tensões em determinados pontos de sua seção transversal (SIGNOR, 2000, p.15).

Figura 3. 4 – Modulação e elevação dos corpos-de-prova em formato de “H” (SIGNOR, 2000).



Fonte: Adaptado de Signor (2000).

Figura 3. 5 – Corpos-de-prova em formato “H”, construídos com blocos cerâmicos na escala reduzida (SIGNOR, 2000).



Fonte: (SIGNOR, 2000).

3.2.3 PESQUISA REALIZADA POR LINDNER (2001)

Lindner (2001) fez o uso de modelos físicos reduzidos na escala 1:3 para o desenvolvimento de blocos cerâmicos estruturais. Em sua pesquisa, o objetivo principal foi desenvolver procedimentos de fabricação de blocos cerâmicos estruturais analisando a influência de variáveis como: tempo de queima, temperatura de queima, umidade de extrusão da argila, a influência da geometria das unidades na resistência à compressão de prismas e “pequenas paredes”; e por fim “avaliar a sensibilidade do fator de escala nos resultados dos ensaios à compressão”. Na figura 3.6 são ilustrados alguns corpos-de-prova utilizados pelo autor.

Figura 3. 6 – Corpos-de-prova na escala 1:3 (LIDNER, 2001).



Fonte: (LIDNER, 2001).

Lidner (2001) adotou uma geometria de blocos com dimensões externas de 42 x 57 x 87 mm, sendo analisadas quatro formas diferentes de geometria interna.

No estudo de caso realizado, com quatro geometrias internas diferentes, os resultados dos ensaios de unidades, prismas e “pequenas paredes” mostraram que não há diferença de resistência à compressão na área líquida entre os blocos com furos retangulares e com furos arredondados (LIDNER, 2001).

Nos ensaios em “pequenas paredes”, os blocos com septo central duplo apresentaram eficiência superior às demais geometrias, ficando evidente que a superposição total dos septos em paredes contrafiadas resulta em melhor desempenho à compressão (LIDNER, 2001). Dentre várias conclusões, Lidner (2001) cita que:

Para a determinação da resistência à compressão de unidades, assim como analisar o seu comportamento, a utilização de modelos em escala reduzida mostra-se bastante confiável. A comparação com estudos que utilizaram unidades com as mesmas características geométricas mostrou que os valores obtidos são muito próximos. (LINDNER, 2001, p.76).

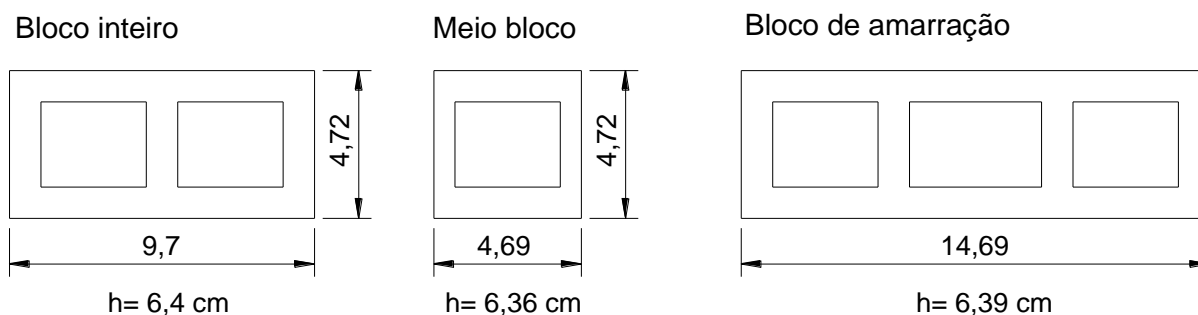
3.2.4 PESQUISA REALIZADA POR SANTOS (2001)

Santos (2001) realizou um estudo teórico e experimental analisando o efeito do não preenchimento de juntas verticais no desempenho da alvenaria estrutural com a utilização de blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3, tendo como objetivo o estudo do comportamento e a resistência de paredes de contraventamento em alvenaria com juntas verticais não preenchidas submetidas à ação combinada de força horizontal e pré-compressão.

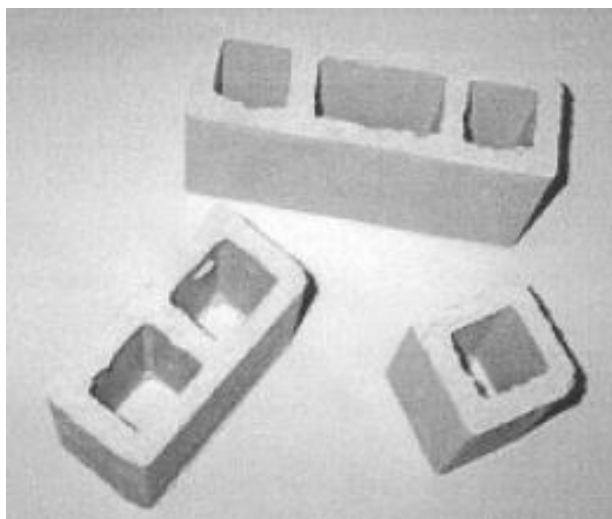
Os blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 corresponderam à família de blocos na escala natural de 14 x 29 x 19 cm (Largura x Comprimento x Altura). O autor utilizou três tipos de blocos: o bloco inteiro, o meio bloco, e o bloco de amarração. Na figura 3.7 apresentam-se as dimensões dos blocos cerâmicos na escala reduzida (cm); já na figura 3.8 ilustram-se os blocos utilizados.

Como o intento do presente trabalho é apresentar dados de pesquisas com a utilização de modelos físicos reduzidos; serão apresentados apenas os resultados obtidos por Santos (2001) nos ensaios em blocos cerâmicos na escala reduzida. Maiores detalhes sobre os ensaios poderão ser obtidos diretamente na referida tese.

Figura 3.7 – Dimensões dos blocos cerâmicos (cm) na escala reduzida 1:3 (SANTOS, 2001).



Fonte: Adaptado de Santos (2001).

Figura 3. 8 – Blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (SANTOS, 2001).

Fonte: (SANTOS, 2001).

Na tabela 3.2 apresentam-se os resultados obtidos pelo autor para a resistência à compressão dos blocos utilizados, bem como a razão entre a área líquida e a área bruta.

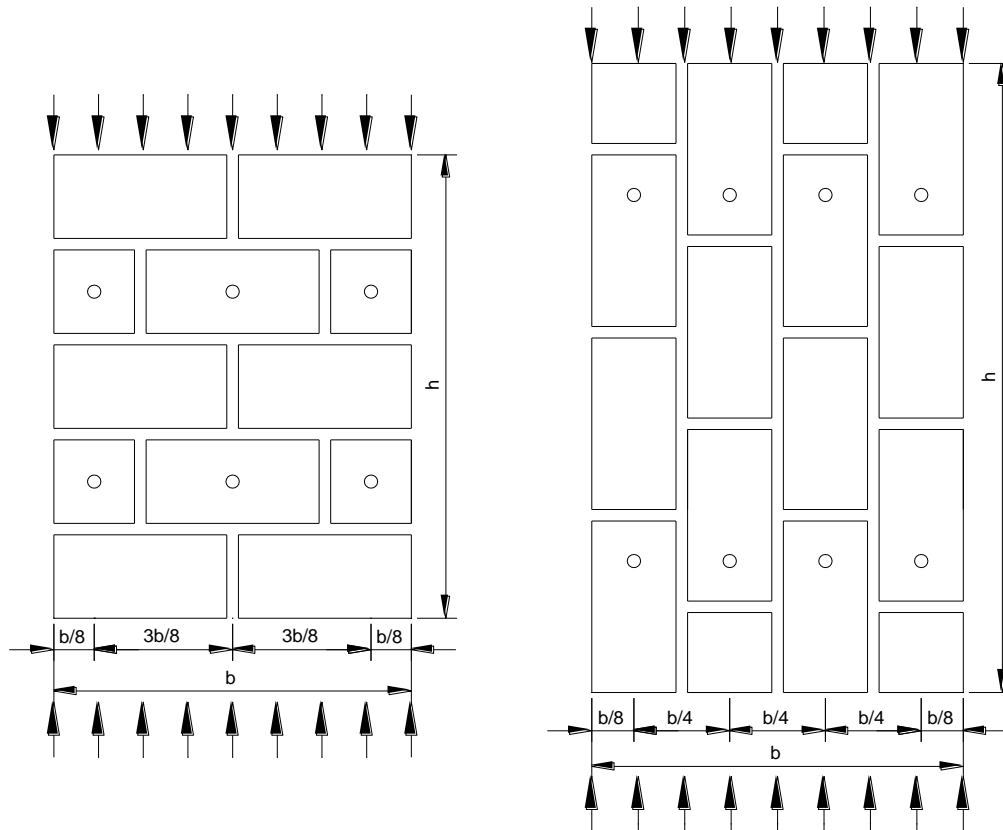
Tabela 3. 2 – Resultados dos ensaios à compressão dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (SANTOS, 2001).

| Tipo de Bloco | Resistência à compressão – A_b | | Razão |
|--------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| | Média (MPa) | Coef. Variação (%) | $A_{Líquida}/A_{bruta}$ |
| Meio-bloco | 24,17 | 12,30 | 0,60 |
| Bloco inteiro | 15,78 | 25,30 | 0,54 |
| Bloco de amarração | 13,19 | 18,30 | 0,53 |

Santos (2001) determinou o módulo de deformação e a resistência perpendicular à junta de assentamento através da utilização de prismas com cinco fiadas e dois blocos de comprimento, instrumentados com extensômetros mecânicos; com juntas verticais preenchidas ou não. Como a alvenaria é um material ortotrópico, Santos (2001) também determinou o módulo de deformação “paralelo” às juntas de assentamento através de ensaios de compressão uniaxial. Na figura 3.9 representam-se os ensaios citados.

De acordo com Santos (2001), para o caso de carregamento perpendicular às juntas (Figura 3.9-a), as relações tensão-deformação são estabelecidas até um limite de aproximadamente 90% da força de ruptura, com perda de linearidade do comportamento próxima à ruptura (75%).

Figura 3. 9 – Corpos-de-prova utilizados por Santos (2001) para a determinação dos módulos de deformação.



Fonte: Adaptado de Santos (2001).

Para os ensaios com carregamento paralelo às juntas (Figura 3.9-b), de acordo com o autor, aplica-se apenas um carregamento de cerca de 30% da força de ruptura esperada, “por isso o comportamento é bem próximo ao linear”.

Na tabela 3.3 apresentam-se as resistências à compressão e os módulos de deformação obtidos pelo autor.

Tabela 3. 3 – Resistência e módulo de deformação (SANTOS, 2001).

| Tipo de corpo-de-prova | Resistência à compressão (MPa) | Módulo Perpendicular (MPa) | Módulo Perpendicular (MPa) |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Juntas preenchidas | 5,03 | 5888,00 | 3508,00 |
| Juntas não preenchidas | 3,99 | 3675,00 | 1995,00 |

Santos (2001), também determinou o coeficiente de *Poisson*, porém salienta em seus resultados que a instrumentação utilizada não foi a mais adequada, apesar dos resultados encontrados terem sido coerentes.

Santos (2001) conclui sua pesquisa apresentando os resultados obtidos em sua pesquisa e fazendo algumas sugestões para trabalhos futuros, no entanto, não aprofunda nas relações obtidas com os modelos na escala reduzida em comparação com a escala natural.

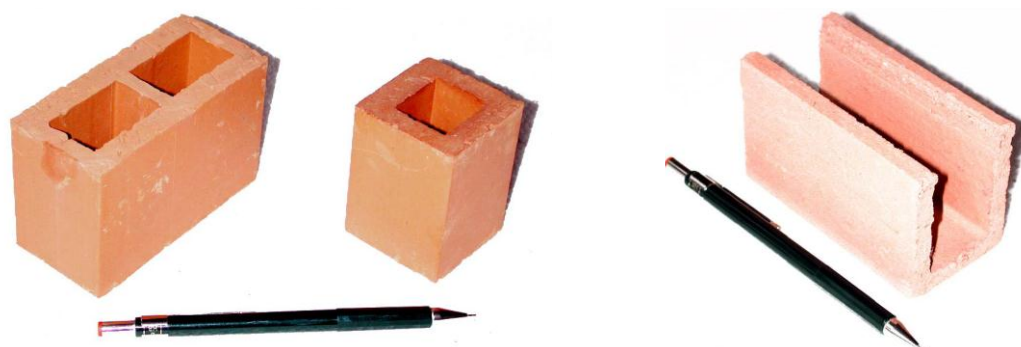
3.2.5 PESQUISA REALIZADO POR HOLANDA JÚNIOR (2002)

Holanda Jr. (2002) estudou a influência de recalques em edifícios de alvenaria estrutural, sendo que todos os ensaios experimentais foram realizados com blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (Figura 3.10) com referência aos blocos da família 14 x 29 x 19 cm (Largura x Comprimento x Altura).

Os principais objetivos almejados no trabalho experimental de Holanda Jr. (2002) foram: verificar experimentalmente o comportamento de painéis de alvenaria estrutural quando submetidos a recalques de apoios, e verificar quais os valores máximos de recalque diferencial provocam início de fissuração na alvenaria.

Holanda Jr. (2002) também realizou ensaios em prismas de três blocos no qual obteve a resistência de 19,2 MPa, em relação à área bruta. Na tabela 3.4 são apresentados os resultados obtidos por Holanda Jr. (2002) nos ensaios em blocos cerâmicos reduzidos (1:3).

Figura 3. 10 – Blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (HOLANDA JR., 2002).



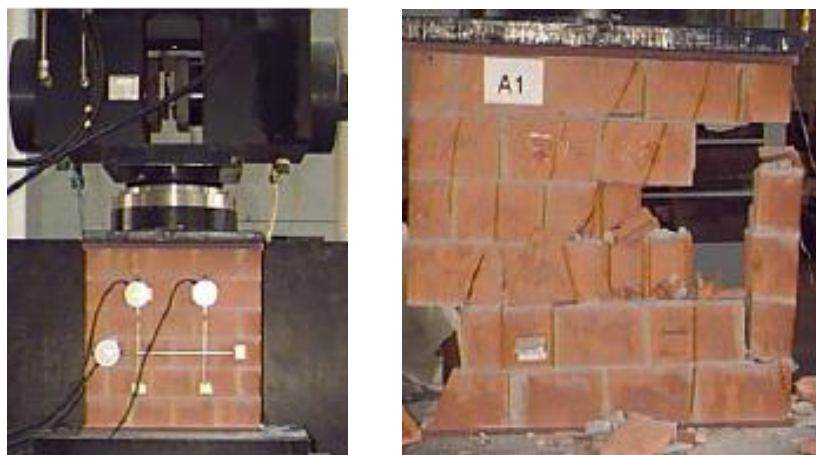
Fonte: (HOLANDA JR., 2002).

Tabela 3. 4 – Resistência e módulo de deformação dos blocos cerâmicos na escala 1:3 (HOLANDA JR., 2002).

| Força de Ruptura (kN) | Tensão de Ruptura (f_b) (MPa) | Módulo de Deformação (E_b) (MPa) | Relação: E_b/f_b |
|--|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 133,00 | 29,30 | 10.554,00 | 360,00 |
| E_b : Módulo de elasticidade do bloco. | | f_b : Tensão de Ruptura do bloco. | |

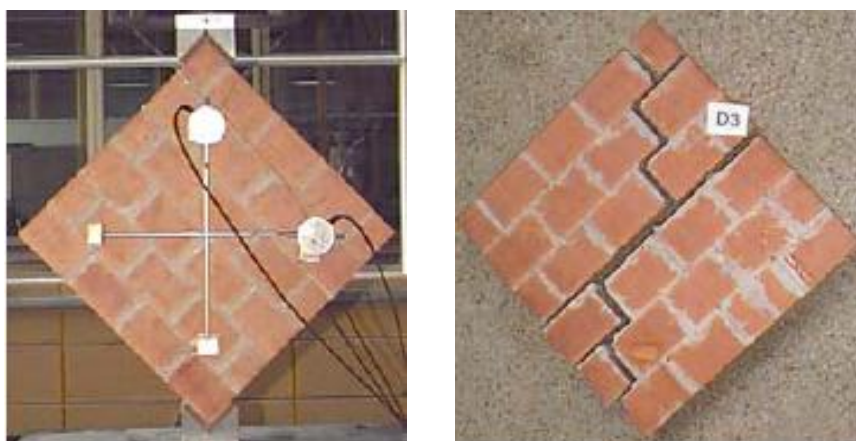
Empregando ensaios de compressão axial e diagonal em painéis que representam na escala natural a dimensão de 120 x 120 cm, Holanda Jr. (2002) obteve a resistência e o módulo de deformação com a utilização de painéis na escala reduzida (1:3) com dimensões de 40 x 40 cm. O objetivo dos ensaios em painéis com compressão diagonal foi determinar a tensão de cisalhamento e o módulo de deformação transversal. Nas figuras 3.11 e 3.12 ilustram-se os ensaios citados.

Figura 3. 11 – Painéis na escala reduzida 1:3 (HOLANDA JR., 2002).



Fonte: (HOLANDA JR., 2002).

Figura 3. 12 – Painéis na escala reduzida 1:3 (HOLANDA JR., 2002).



Fonte: (HOLANDA JR., 2002).

Nas tabelas 3.5 e 3.6 apresentam-se os resultados obtidos por Holanda Jr. (2002).

Tabela 3. 5 – Resultados dos ensaios em painéis na escala reduzida 1:3 com carregamento perpendicular às juntas de assentamento (HOLANDA JR., 2002).

| Painel com carregamento Perpendicular | | Força de Ruptura (kN) | Tensão de Ruptura (kN) | Módulo de deformação (MPa) | Coef. De Poisson |
|---------------------------------------|------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|------------------|
| Perpendicular | Média | 222,30 | 11,95 | 6479,00 | 0,10 |
| | Coef. Var. | 18% | 19% | 5% | 11% |

Tabela 3. 6 – Resultados dos ensaios em painéis na escala reduzida 1:3 com carregamento diagonal às juntas de assentamento (HOLANDA JR., 2002).

| Painel com carregamento Diagonal | | Força de Ruptura (kN) | Módulo de Deformação Transversal (MPa) | Tensão de Cisalhamento Convencional (MPa) |
|----------------------------------|------------|-----------------------|--|---|
| Diagonal | Média | 15,60 | 1883,00 | 0,58 |
| | Coef. Var. | 8% | 5% | 8% |

Holanda Jr. (2002), antes da realização dos ensaios nos modelos, verificou que os corpos-de-prova confeccionados com os mesmos materiais em escala reduzida reproduziram os modos de ruptura observados na escala natural (1:1). “O sucesso obtido com esta avaliação é indicativo de que os resultados dos ensaios em painéis podem ser utilizados como representativos de situações em escala real” (HOLANDA JR., 2002, p.185).

3.2.6 PESQUISA REALIZADA POR ANDOLFATO (2002)

Andolfato (2002) desenvolveu estudos referentes a técnicas de produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural na escala reduzida 1:4.

Os blocos em escala reduzida foram produzidos para apresentarem o mesmo comportamento em termos de resistência à compressão e deformabilidade que os seus pares na escala natural. Para as duas escalas em estudo (1:1 e 1:4) foram produzidos blocos com quatro traços diferentes entre si.

Além dos blocos, também foram construídos e ensaiados à compressão axial, na escala natural e reduzida, prismas de três blocos com a finalidade de determinar as correlações entre as resistências e as deformações.

Os parâmetros observados, medidos e comparados foram as resistências à compressão, os módulos de deformação, as curvas *tensão x deformação*, e as formas de ruptura apresentadas pelos corpos-de-prova.

Como resultado final, chegou-se a uma série de procedimentos que, quando observados, permitem a reprodução de blocos de concreto para alvenaria estrutural na escala 1:4, mantendo-se praticamente as mesmas características de resistência à compressão e deformabilidade, tanto para as unidades quanto para os prismas estudados.

Segundo o autor, os blocos na escala reduzida (1:4) reproduziram fielmente a forma e as dimensões da escala natural. O autor cita ainda que, para o controle de fabricação foi necessária a manutenção das curvas granulométricas entre modelo e protótipo, ou seja, foram mantidas as proporções; a determinação das faixas significativas das curvas granulométricas dos agregados; a manutenção dos graus de compactação entre modelo e protótipo; e a manutenção dos teores de cimento entre modelo e protótipo.

O autor chegou à conclusão de que o nível de significância (Teste de hipótese) para o grau de compactação na fabricação dos blocos deve ser de pelo menos 1%; pois a proximidade das resistências entre o modelo e o protótipo depende da igualdade deste parâmetro. Na figura 3.13 são ilustrados alguns detalhes dos blocos de concreto e de corpos-de-prova na escala reduzida (1:4) utilizados por Andolfato (2002).

Figura 3. 13 – Blocos de concreto e prismas de três blocos na escala reduzida 1:4 (ANDOLFATO, 2002).



Fonte: (ANDOLFATO, 2002).

Com relação aos blocos e suas correlações entre escalas foi verificado pelo autor que o modelo apresentou comportamento similar ao protótipo, tanto com relação à resistência, quanto com relação ao módulo secante. Contudo, mais importante que relacionar estes dois parâmetros foi o comportamento das curvas tensão-deformação dos mesmos, que se apresentaram muito próximas, permitindo assim mostrar que o modelo pode representar o protótipo, fato comprovado pelos testes de hipóteses realizados ao longo do trabalho.

Concluindo, entende-se pela análise dos resultados obtidos nos ensaios dos blocos e dos prismas, que a alvenaria de blocos de concreto pode ser estudada através de modelos reduzidos com resultados confiáveis, uma vez que se observem todos os procedimentos aqui descritos (ANDOLFATO, 2002, p.82)

3.2.7 PESQUISA REALIZADA POR NASCIMENTO NETO (2003)

A pesquisa realizada por Nascimento Neto (2003) teve por objetivo analisar teórica e experimentalmente o comportamento de painéis com aberturas constituídos por alvenaria de blocos cerâmicos.

Como forma de avaliar o comportamento de painéis foram utilizados modelos físicos reduzidos na escala 1:3, sem o objetivo de correlacionar tensões, deformações e deslocamentos do modelo reduzido com o modelo em escala natural.

Dessa forma, o autor avaliou os resultados qualitativamente e não quantitativamente.

Posteriormente, o autor realizou modelagens numéricas de alguns painéis utilizando a modelagem por elementos finitos e comparou com os resultados experimentais. Adicionalmente, foram avaliados alguns modelos simplificados na fase linear do comportamento dos painéis. De acordo com Nascimento Neto (2003):

[...] o trabalho contribuiu com informações a respeito do comportamento de painéis constituídos por alvenaria de blocos vazados, ainda escassos no Brasil, da mesma forma que consolidou a utilização da técnica de modelos reduzidos na avaliação experimental da alvenaria estrutural (NASCIMENTO NETO, 2003, p.292).

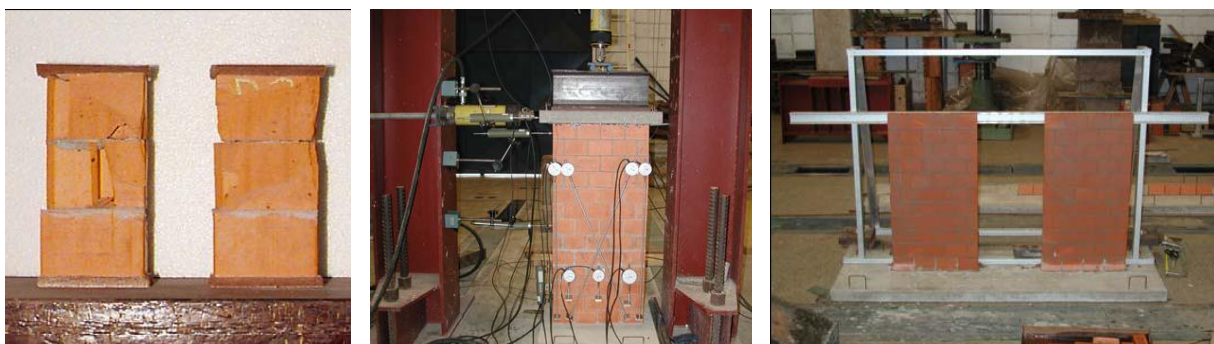
Nas figuras 3.14 e 3.15 são ilustradas algumas imagens dos blocos cerâmicos e corpos-de-prova na escala reduzida (1:3). Maiores informações e detalhes podem ser obtidos diretamente na fonte.

Figura 3. 14 – Corpos-de-prova e blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (NASCIMENTO NETO, 2003).



Fonte: (NASCIMENTO NETO, 2003).

Figura 3. 15 – Corpos-de-prova na escala reduzida 1:3 (NASCIMENTO NETO, 2003).



Fonte: (NASCIMENTO NETO, 2003).

3.2.8 PESQUISA REALIZADA POR CAPUZZO NETO (2005)

O objetivo principal do autor foi realizar o estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com amarração direta submetida a ações verticais por meio de análises experimentais e numéricas. Para permitir a execução de ensaios mais complexos, fez-se uso das técnicas de modelos físicos reduzidos.

Para alcançar o objetivo principal da pesquisa, Capuzzo Neto realizou diversos estudos do comportamento da alvenaria estrutural e da interação de paredes, conforme se descreve abaixo:

- Caracterização da alvenaria na escala reduzida (1:3) e na escala natural (1:1), com o objetivo específico de obter as semelhanças e diferenças de comportamento entre as diferentes escalas;
- Definição de modelos numéricos para a representação do comportamento da alvenaria;
- Proposição de um ensaio “simples” para a verificação da resistência ao cisalhamento vertical da ligação de paredes em planos ortogonais;
- Estudo teórico e experimental da influência das dimensões em planta do painel de alvenaria em formato “H”, do número de pavimentos e da presença de lajes de concreto e cintas na distribuição das ações verticais.

Para a caracterização dos blocos cerâmicos nas diferentes escalas foram determinadas as dimensões reais, o desvio em relação ao esquadro, a planeza das faces, a resistência à compressão, bem como o índice de absorção e a área líquida.

Na figura 3.16 ilustram-se os blocos cerâmicos na escala reduzida (1:3) utilizados por Capuzzo Neto (2005).

Figura 3. 16 – Blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (CAPUZZO NETO, 2005).



Fonte: (CAPUZZO NETO, 2005).

Com relação à utilização de modelo físico reduzido, Capuzzo Neto (2005), levanta os seguintes pontos:

- O modelo físico reduzido ideal para análise estrutural é o que apresenta completa semelhança com o protótipo, sendo de difícil execução;
- O modelo distorcido, utilizado na pesquisa do autor, que permite o relaxamento nas leis de semelhança através de fatores de escala específicos, é uma opção viável, mas que deve ser usada com cautela;
- Ensaios de pesquisadores consagrados comprovam a viabilidade de se utilizarem ensaios de alvenaria em escala reduzida, apesar das dificuldades devidas a alvenaria ser um material composto;
- Deve-se definir cuidadosamente desde os materiais até os processos de fabricação e execução para que os requisitos de semelhança, para alvenaria, sejam atendidos.

3.2.9 PESQUISA REALIZADA POR MAURÍCIO (2005)

O principal objetivo do trabalho de Maurício (2005) foi desenvolver um estudo de ligações diretas entre paredes de blocos de concreto na escala natural (1:1) e reduzida (1:4). O autor realizou ensaios de resistência à compressão axial com a obtenção de medidas de deformações em blocos, prismas e paredes; na escala natural e na escala reduzida. Os blocos de concreto na escala reduzida foram fabricados de acordo com as técnicas desenvolvidas por Andolfato (2002).

Maurício (2005) também confeccionou corpos-de-prova em formato de “H” com o objetivo de observar os efeitos de transferência de carga entre paredes. Para a análise dos resultados e validação das conclusões foram empregados testes estatísticos.

O autor fez o uso da modelagem em elementos finitos para analisar os resultados experimentais, comparando-se os resultados e readequando o modelo numérico.

De acordo com o autor, os resultados obtidos permitiram a avaliação da eficiência dos modelos numéricos empregados e os ajustes necessários; também foi possível o entendimento da forma de transferência das ações verticais entre as paredes interligadas e as correlações entre as escalas estudadas. Na figura 3.17 são ilustrados alguns detalhes dos ensaios realizados por Maurício (2005).

Figura 3.17 – Corpos-de-prova com blocos de concreto na escala reduzida 1:4 (MAURÍCIO, 2005).



Fonte: (MAURÍCIO, 2005).

Maurício (2005) conclui que:

[...] pôde-se observar que a partir dos resultados obtidos é possível manter uma boa correlação no comportamento da alvenaria nas duas escalas, valores estes caracterizados pelos resultados fornecidos pelos blocos, prismas, paredes, e paredes “H”. (MAURÍCIO, 2005, p.182).

3.2.10 PESQUISA REALIZADA POR MOREIRA (2007)

Moreira (2007) realizou uma investigação experimental com a finalidade de analisar diferentes formas de enrijecer as ligações da alvenaria submetidas a ações verticais, com ênfase na amarração indireta com o uso de telas.

Para o objetivo proposto, Moreira (2007) fez uso de um modelo físico reduzido cerâmico na escala 1:3, no qual confeccionou corpos-de-prova no formato “H” com cinco fiadas, anteriormente proposto por Capuzzo Neto (2005). Com relação aos resultados obtidos, o autor cita que:

- De maneira geral, independente da amarração ser direta ou indireta, em todos os modelos analisados foi nítida a ruptura por cisalhamento da interface.
- Os modelos com amarração direta apresentaram ruptura frágil, sendo que ela se dá num nível de carregamento superior aos modelos com amarração indireta, tanto com a utilização de telas quanto com grampos.
- A resistência ao cisalhamento na interface, para os dois casos de amarração indireta, foi de aproximadamente 60% da resistência obtida para a amarração direta.
- A forma de ruptura para os modelos com amarração indireta (grampos e telas) foi dúctil. Porém, o autor ressalta que na utilização de grampos metálicos inseridos nos furos adjacentes e grauteados pode-se obter uma maior plasticidade.
- Com a utilização do teste ANOVA e do Teste-t de *Student*, o autor concluiu que o uso de amarração direta gera diferenças significativas para a ruptura em relação à amarração indireta (com telas ou grampos). Já entre os dois tipos de amarrações indiretas não houve diferença significativa na resistência ao cisalhamento da interface.

Moreira (2007) cita que “o uso de grampos como forma de amarração indireta é uma solução interessante”, contudo não é uma alternativa para ser utilizada de maneira ostensiva, devido aos custos e às dificuldades executivas. Assim, as telas começam a se mostrar como uma solução razoável do ponto de vista econômico, executivo e estrutural.

[...] a utilização de telas nas ligações de paredes gera bons resultados para as condições de serviço, tendo uma resposta na ruptura semelhante à obtida com a utilização de grampos. Além disso, é uma solução que permite um aumento substancial na produtividade da construção em alvenaria [...] (MOREIRA, 2007, p.104).

Na figura 3.18 são ilustrados os corpos-de-prova em formato “H” sugerido por Capuzzo Neto (2005) e desenvolvido por Moreira (2007).

Figura 3. 18 – Corpos-de-prova com blocos cerâmicos na escala reduzida 1:3 (MOREIRA, 2007).



Fonte: (MOREIRA, 2007).

Moreira (2007), referente ao uso de modelo físico reduzido cita que:

O modelo físico reduzido em escala 1:3, proposto por Capuzzo Neto (2005), mais uma vez mostra-se apto a representar o comportamento da alvenaria submetida ao cisalhamento. Esse fato é relevante visto que há um crescente interesse no uso de modelos reduzidos, os quais tornam possível a realização de estruturas mais complexas, reduzindo custos e dando mais agilidade aos programas experimentais. (MOREIRA, 2007, p.103).

3.3 COMENTÁRIOS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE MODELO FÍSICO REDUZIDO

O modelo físico reduzido ideal seria aquele que possui completa semelhança com o protótipo. No entanto, isso levaria a grandes dificuldades, ou mesmo à impossibilidade, para a obtenção de um material para o modelo reduzido que obedecesse a todos os requisitos de análise dimensional para representar o comportamento do material protótipo.

Os modelos de semelhança de primeira ordem e os distorcidos fornecem uma opção para a utilização de modelos na escala reduzida, pois permitem um abrandamento em relação às leis de semelhança, ampliando a possibilidade de serem utilizados diferentes materiais.

No caso da alvenaria estrutural, uma das dificuldades em se manter a semelhança geométrica está na proporção de escala para as paredes dos blocos (unidades). Portanto, salienta-se que ao utilizar os modelos distorcidos, os mesmos devem ser empregados com cautela, visto que a negligência de algum parâmetro importante para a análise do fenômeno pode gerar grandes distorções dos resultados entre os modelos reduzidos e os naturais.

Apesar de todas as dificuldades em se reproduzir na escala reduzida a alvenaria, que é um material composto, diversos pesquisadores comprovaram a viabilidade de seu uso.

Desta forma, pode-se concluir que para o uso da escala reduzida em alvenaria estrutural deve-se ter atenção desde a escolha dos materiais até o processo de fabricação das unidades.



TRABALHO EXPERIMENTAL CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

4 TRABALHO EXPERIMENTAL: CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

4.1 GENERALIDADES

Com a finalidade de se obterem as características geométricas e as propriedades físicas e mecânicas dos componentes envolvidos na alvenaria estrutural, foram realizados ensaios de caracterização de todos os componentes e da própria alvenaria na escala reduzida 1:5.

Obtidas as características e fazendo-se uso das técnicas de modelos físicos reduzidos em conjunto com os fatores de escala pode-se analisar a viabilidade e a extrapolação do comportamento obtido na escala reduzida para a escala natural, de forma que o comportamento na escala reduzida possa ser representativo.

Diante do exposto acima, apresenta-se neste capítulo toda a descrição do trabalho experimental desenvolvido para a caracterização dos componentes utilizados na pesquisa, sendo descritas as especificações de normas utilizadas, bem como os procedimentos, os métodos, e os equipamentos adotados.

Todos os ensaios de caracterização dos componentes foram realizados no NEPAE⁷, pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FEIS⁸/UNESP⁹).

Para a caracterização dos blocos cerâmicos na escala reduzida foram realizados os seguintes ensaios (Figura 4.1):

- Determinação das características geométricas: análise dimensional (dimensões efetivas), determinação do desvio em relação ao esquadro, determinação da planeza das faces (F), determinação da área bruta (A_b), e a determinação da área líquida (A_{liq});

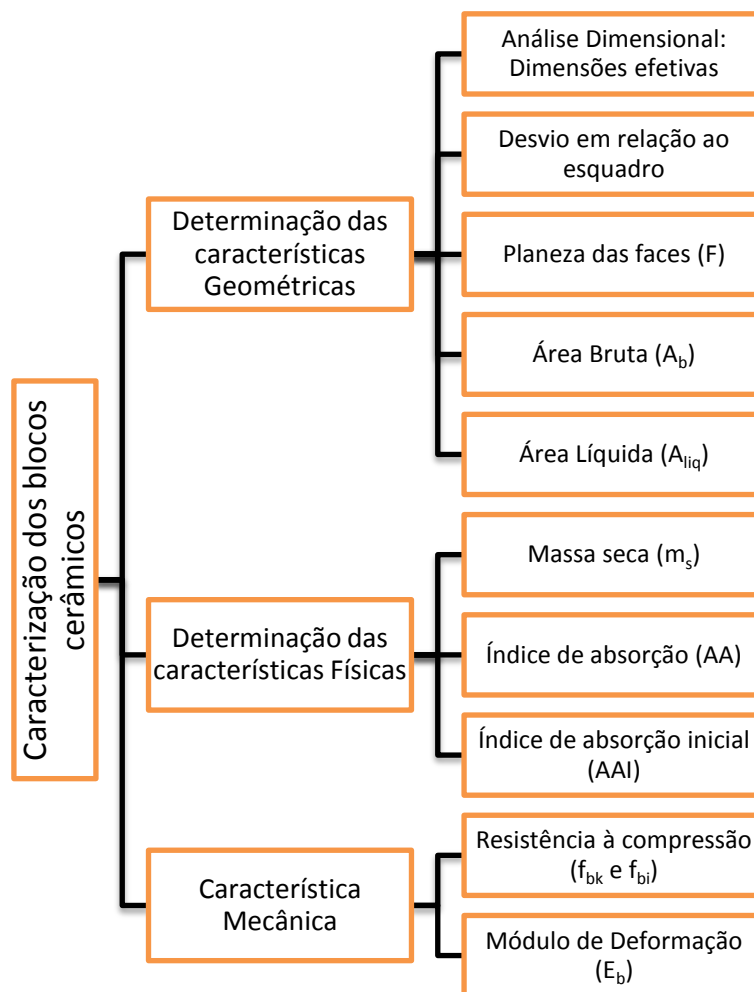
⁷ NEPAE - Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural.

⁸ FEIS - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

⁹ UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

- Determinação das características físicas: massa seca (m_s), índice de absorção de água (AA), e índice de absorção inicial (AAI);
- Caracterização mecânica: a característica mecânica do bloco cerâmico estrutural é a resistência característica do bloco (f_{bk}), estabelecida por meio dos ensaios de resistência à compressão individual (f_{bi}).

Figura 4.1 – Organograma dos ensaios realizados para a caracterização dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.



Além dos ensaios em unidades, também foram determinadas as resistências médias da argamassa de assentamento (f_{am}) e do graute (f_{gm}). Esses componentes foram utilizados, respectivamente, para o assentamento das unidades e para o preenchimento das canaletas de vergas e contravergas executadas no modelo físico reduzido que será apresentado em capítulo subsequente (Capítulo 6).

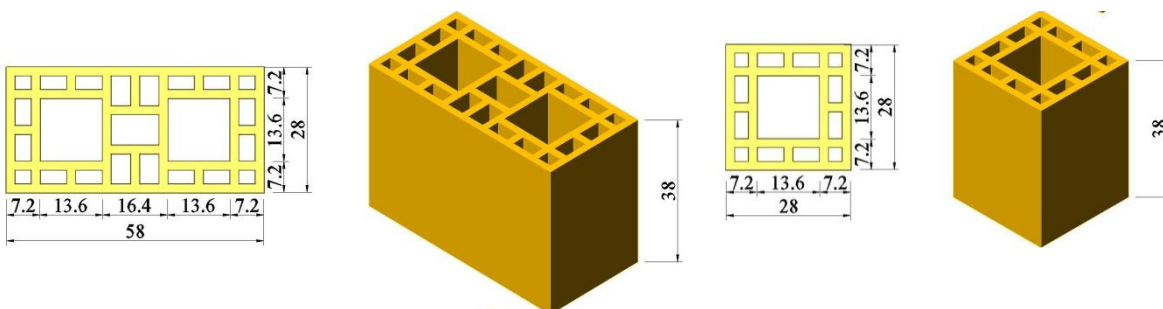
4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS BLOCOS CERÂMICOS

Conforme já citado, foram realizados os seguintes ensaios para a caracterização geométrica dos blocos cerâmicos: análise dimensional, determinação do desvio em relação ao esquadro, determinação da planeza das faces (F), determinação da área bruta (A_b), e a determinação da área líquida (A_{liq}).

Os blocos cerâmicos reduzidos foram representativos da família 14 x 19 x 29 cm (Largura x Altura x Comprimento) na escala natural, desta forma o bloco inteiro na escala reduzida possui as seguintes dimensões 2,8 x 3,8 x 5,8 cm; já para os meios-blocos as dimensões são de 2,8 x 3,8 x 2,8 cm. As respectivas áreas foram de: 16,24 cm² e 7,84 cm².

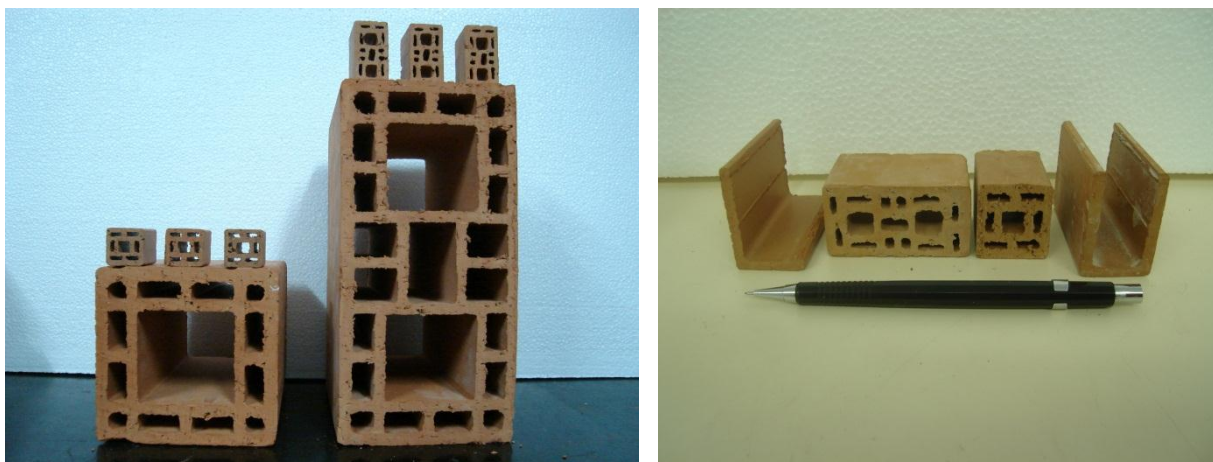
Os blocos cerâmicos foram produzidos e fornecidos pela Cerâmica Gresca (Jundiaí/SP), procurando-se representar a escala natural em suas formas e dimensões, com exceção da espessura das paredes internas e externas devido à dificuldade de produção na escala reduzida. Na figura 4.2 são representadas as respectivas dimensões e a geometria dos blocos (mm).

Figura 4. 2 – Representação das dimensões e da geometria dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5 (mm).



Fonte: Própria.

Na figura 4.3 ilustram-se os blocos cerâmicos na escala natural (1:1) e reduzida (1:5), além de outros dois tipos de blocos que foram utilizados para a construção do modelo físico reduzido. Os blocos tipo “canaleta”, utilizados nas vergas e contravergas, e os blocos tipo “L” utilizados no respaldo dos pavimentos como fôrma para as lajes; sendo que este corresponde ao bloco canaleta sem uma das “abas” laterais.

Figura 4.3 – Blocos cerâmicos na escala reduzida (1:5) e natural (1:1).

Fonte: Própria.

4.2.1 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES EFETIVAS: ANÁLISE DIMENSIONAL

A determinação das características geométricas do bloco cerâmico estrutural foi realizada de acordo com os métodos de ensaio constantes na ABNT NBR 15270-3:2005.

A dimensão nominal é definida como a dimensão especificada pela aresta dos blocos considerando-se a modulação. Para a determinação das dimensões efetivas, que são as medidas das faces, é preconizado que se devem medir 24 blocos, colocados lado a lado, e com a utilização de uma régua metálica ou trena metálica de graduação igual a 1 mm deve-se obter a medida do alinhamento. Se, por alguma razão, for impraticável medir os 24 blocos dispostos em uma fila, a norma permite que seja dividido em duas filas de 12 blocos, ou três filas de 8 blocos, que são medidas separadamente.

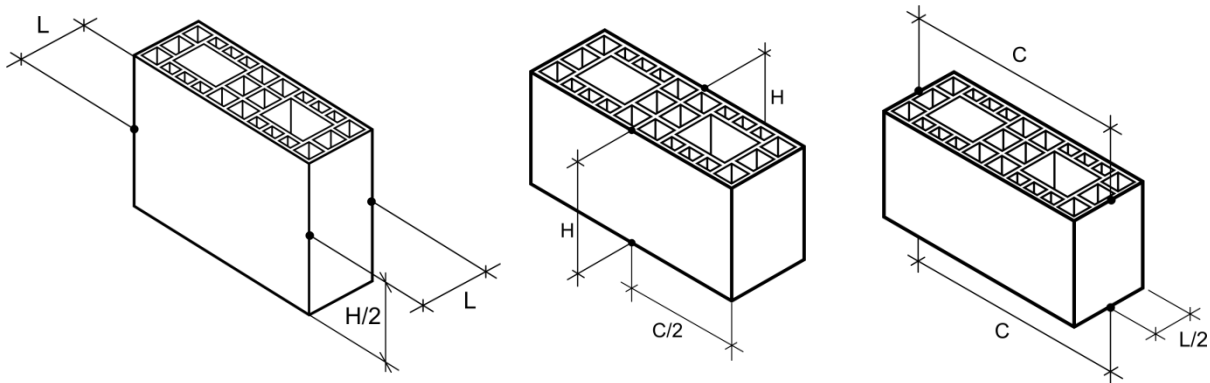
Deve-se posteriormente somar os valores obtidos em qualquer dos casos e dividir este resultado por 24 para a obtenção da dimensão efetiva dos blocos.

Para a obtenção das medidas citadas, devem-se alinhar os blocos em uma superfície plana e indeformável, sendo que as medidas devem ser segundo as linhas médias (Figura 4.4).

De acordo com a ABNT NBR 15270-2:2005 as tolerâncias dimensionais individuais devem ser de ± 5 mm em todas as dimensões. Para a tolerância dimensional relacionada à média das dimensões efetivas deve-se considerar ± 3 mm em todas as dimensões.

Para a escala reduzida foi adotada a tolerância de $\pm 0,6$ mm para a média das dimensões efetivas; mantendo-se assim um critério bastante rigoroso correspondente à redução proporcional de escala.

Figura 4. 4 – Representação esquemática dos locais pré-estabelecidos para a obtenção das dimensões efetivas dos blocos (ABNT NBR 15270-3:2005).



Fonte: ABNT NBR 15270-3:2005.

Foram determinadas as dimensões efetivas para os blocos inteiros e para os meios-blocos na escala reduzida (1:5). Na tabela 4.1 são apresentados os valores obtidos.

Tabela 4. 1 – Dimensões efetivas médias dos blocos cerâmicos para a escala reduzida 1:5.

| Escala | Bloco inteiro (mm) | | | Meio bloco (mm) | | | |
|--------|--------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| | Largura | Altura | Comprimento | Largura | Altura | Comprimento | |
| (1:5) | Nominal | 30,00 | 40,00 | 60,00 | 30,00 | 40,00 | 30,00 |
| | Efetiva | 28,00 | 38,00 | 58,00 | 28,00 | 38,00 | 28,00 |
| | Real | 28,09 | 39,47 | 58,07 | 29,40 | 39,99 | 29,29 |
| | Desvio | 0,09 | 1,47 | 0,07 | 1,40 | 1,99 | 1,29 |

Levando-se em consideração a redução de escala pôde-se observar que a altura obtida para os blocos inteiros na escala reduzida não atendeu à tolerância estipulada (desvio: $1,47 > 0,6$ mm), assim como todas as dimensões dos meios-blocos (desvios: largura: 1,40 / altura: 1,99 / comprimento: 1,29).

Conforme apresentado na tabela 4.1 pode-se observar que houve uma discrepância dimensional na produção dos meios-blocos na escala reduzida, porém este fator não influencia na caracterização específica, e foi corrigido para a caracterização da alvenaria e para a execução do modelo físico reduzido (vide capítulo subsequente).

Para os blocos inteiros e meios-blocos, na escala reduzida, foram obtidas as medidas individuais com a utilização de um paquímetro digital de 150 mm, sendo que os valores obtidos são apresentados na tabela 4.2.

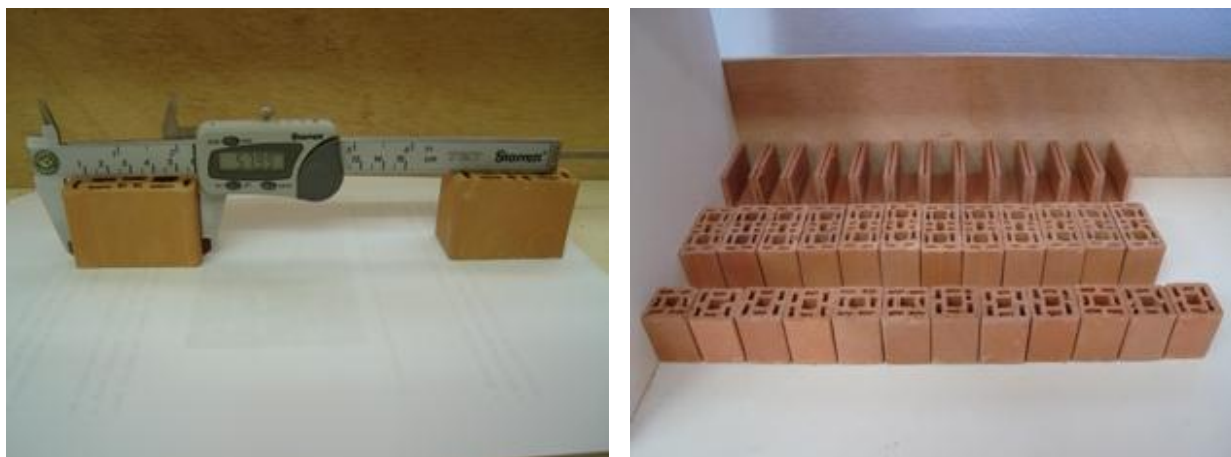
Tabela 4. 2 – Dimensões médias individuais dos blocos cerâmicos para a escala reduzida 1:5.

| Inteiro | Dimensões individuais - Bloco inteiro (1:5) - mm | | |
|-------------------|---|--------------|--------------|
| | Largura | Altura | Comprimento |
| Média | 28,09 | 39,47 | 58,07 |
| Máximo | 28,28 | 41,24 | 58,43 |
| Mínimo | 27,96 | 38,08 | 57,75 |
| Coef. Variação | 0,30% | 2,03% | 0,30% |
| Meio Bloco | Dimensões individuais - Meio bloco (1:5) - mm | | |
| | Largura | Altura | Comprimento |
| Média | 29,40 | 39,99 | 29,29 |
| Máximo | 29,62 | 41,17 | 29,66 |
| Mínimo | 29,12 | 39,31 | 29,11 |
| Coef. Variação | 0,49% | 1,13% | 0,51% |

Pôde-se observar que apesar das dimensões não obedecerem, inicialmente, a tolerância permitida, elas apresentaram um baixo coeficiente de variação, facilitando assim a execução dos corpos-de-prova a serem ensaiados.

Para a realização do modelo físico reduzido, que será abordado em item posterior (Capítulo 6), foi utilizado o bloco canaleta. Portanto, realizou-se também a determinação das suas dimensões efetivas, levando-se em consideração a tolerância permitida para a redução de escala.

Para a realização da fôrma externa da laje, no modelo físico reduzido (1:5), foram utilizados blocos no formato de “L”, sendo esses blocos obtidos com o corte de uma das “abas” das canaletas citadas anteriormente. Na figura 4.5 ilustram-se algumas imagens referentes à realização da caracterização geométrica dos blocos cerâmicos na escala reduzida.

Figura 4.5 – Detalhes da análise dimensional dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.

Fonte: Própria.

Na tabela 4.3 são apresentados os valores obtidos na análise dimensional dos blocos canaleta.

Tabela 4.3 – Dimensões médias efetivas dos blocos cerâmicos tipo canaleta na escala reduzida 1:5.

| Canaleta | Dimensões - Bloco canaleta (1:5) - mm | | |
|----------|---------------------------------------|-------------|-------------|
| | Largura | Altura | Comprimento |
| Nominal | 28,00 | 38,00 | 58,00 |
| Reduzida | 29,00 | 40,00 | 58,00 |
| Desvio | 1,00 | 2,00 | 0,00 |

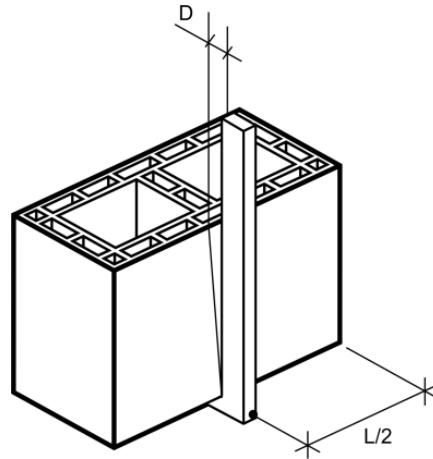
Salienta-se a dimensão dos blocos tipo canaleta, e conseqüentemente, dos blocos tipo “L”, apresentaram valores acima das tolerâncias dimensionais permitidas. Porém estas dimensões foram corrigidas para a caracterização da alvenaria e para a elevação do modelo físico reduzido que será apresentado em capítulo subsequente.

4.2.2 DETERMINAÇÃO DO DESVIO EM RELAÇÃO AO ESQUADRO E DA PLANEZA DAS FACES (F)

Para a determinação do desvio em relação ao esquadro e para a verificação da planeza das faces (F) seguiu-se o preconizado na ABNT NBR 15270-3:2005.

A norma estabelece que se deve medir o desvio em relação ao esquadro entre uma das faces destinadas ao assentamento e a maior face destinada ao revestimento do bloco, empregando-se esquadro metálico de $90\pm 0,5^\circ$ e a régua metálica com graduação de 1 mm (Figura 4.6).

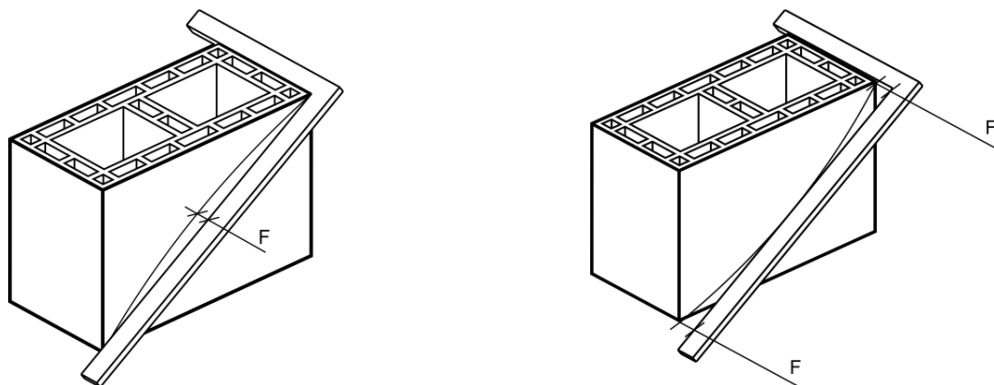
Figura 4. 6 – Representação esquemática para a determinação do desvio em relação ao esquadro (ABNT NBR 15270-3:2005).



Fonte: ABNT NBR 15270-3:2005.

Para a determinação da planeza das faces (F), destinadas ao provável revestimento, deve-se medir a flecha na região central de sua diagonal empregando-se réguas metálicas com graduação de 1 mm (Figura 4.7).

Figura 4. 7 – Representação esquemática para a determinação da planeza das faces (ABNT NBR 15270-3:2005).



Fonte: ABNT NBR 15270-3:2005.

De acordo com a ABNT NBR 15270-2:2005 a flecha e o desvio em relação ao esquadro deve ser, no máximo, de 3 mm. Para a análise dos blocos na escala reduzida levou-se em consideração a redução de escala no que diz respeito às tolerâncias, sendo adotado $\pm 0,6$ mm.

Com relação ao desvio em relação ao esquadro e a planeza das faces pôde-se concluir que os blocos cerâmicos estão de acordo com as disposições normativas.

4.2.3 DETERMINAÇÃO DA ÁREA BRUTA (A_b) E DA ÁREA LÍQUIDA (A_{liq})

Segundo a ABNT NBR 15270-3:2005 a área bruta corresponde à “área da seção de assentamento delimitada pelas arestas dos blocos, sem desconto das áreas dos furos, quando houver”. A ABNT NBR 15812-1:2010 a define como “a área de um componente ou elemento, considerando-se as suas dimensões externas, desprezando-se a existência de vazios”, já a área líquida é definida por esta norma como “a área de um componente ou elemento com desconto das áreas dos vazios”.

Para a determinação da área bruta e da área líquida foram seguidas as preconizações da ABNT NBR 15270-3:2005. Foram utilizados os mesmos corpos-de-prova da análise de dimensões efetivas médias apresentadas na tabela 4.1.

Na tabela 4.4 apresentam-se os resultados obtidos para a área bruta efetiva dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.

Tabela 4. 4 – Área bruta efetiva dos blocos cerâmicos para a escala reduzida 1:5.

| Escala | Bloco inteiro | | | Meio bloco | | |
|--------------|---------------|------------------|-------------------------|--------------|------------------|-------------------------|
| | Largura (cm) | Comprimento (cm) | Área (cm ²) | Largura (cm) | Comprimento (cm) | Área (cm ²) |
| (1:5) | 2,809 | 5,807 | 16,31 | 2,940 | 2,929 | 8,61 |

Para a determinação da área líquida dos blocos cerâmicos na escala reduzida foram utilizados 06 corpos-de-prova, os quais foram mantidos em água fervente durante 2 horas para a obtenção da massa saturada (m_u). Depois de saturados os corpos-de-prova foram pesados imersos em água à temperatura de $23 \pm 0,5$ °C com a utilização de uma balança digital com precisão de 5g, obtendo-se assim a sua massa aparente (m_a).

Após a pesagem imersa, os blocos foram enxugados superficialmente com pano úmido e pesados imediatamente, obtendo-se assim a sua massa saturada (m_u). A área líquida de cada corpo-de-prova, expressa em centímetros quadrados (cm^2), foi determinada segundo a equação 4.

$$A_{liq} = \frac{(m_u - m_a)}{\gamma \times H} \quad (4)$$

Sendo: m_u : massa do bloco saturado (grama);
 m_a : massa aparente do bloco (grama);
 H : altura do bloco (centímetros);
 γ : a massa específica da água, tomada igual a 1 g/cm^3 .

Na figura 4.8 são ilustrados alguns detalhes dos ensaios de determinação da área líquida dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.

Figura 4. 8 – Detalhes da determinação da área líquida dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

A ABNT NBR 15270-3:2005 cita que a massa do bloco saturado também pode ser obtida com a imersão das unidades em água à temperatura ambiente por 24 horas. Resultados de estudos realizados por Santos (2001) mostraram que a absorção em água fervente por 5 horas foi superior em aproximadamente 5% se comparada com a absorção por meio de imersão em água à temperatura ambiente por 24 horas.

Na tabela 4.5 são apresentados os resultados obtidos na determinação da área líquida dos blocos inteiros na escala reduzida. Com os dados obtidos, foi realizada a análise estatística para verificação de possíveis valores espúrios¹⁰.

Tabela 4.5 – Resultado da determinação da área líquida dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.

| Escala | CP's | Altura (cm) | Massa úmida (g) | Massa aparente imersa (g) | Área líquida (cm ²) |
|--------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|---------------------------------|
| (1:5) | CP-01 | 3,865 | 84,87 | 45,73 | 10,13 |
| | CP-02 | 3,900 | 85,81 | * 39,55 | * 11,86 |
| | CP-03 | 3,870 | 84,16 | 45,29 | 10,04 |
| | CP-04 | 3,900 | 86,41 | 47,34 | 10,02 |
| | CP-05 | 3,800 | 83,47 | 46,29 | 9,78 |
| | CP-06 | 3,855 | 84,44 | 43,73 | 10,56 |
| | Média: | 3,86 | 84,87 | 44,68 | 10,11 |
| | Coef. Variação | 0,95% | 1,30 | 2,91 | 2,82% |

* Valores espúrios: Descartados.

Pôde-se observar que, para um nível de 5% de significância, o valor correspondente à área líquida de 11,86 cm² (CP-02), é um valor espúrio devido à variação na massa aparente imersa, portanto, este valor foi descartado na determinação da área líquida média (Apêndice A: Determinação de valores espúrios: *One-Sided Test*). A relação entre A_{liq} e A_b para os blocos na escala reduzida foi de **61,98%**.

$$\frac{A_{liq}}{A_b} = \frac{10,11}{16,31} = 61,98\%$$

4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS BLOCOS CERÂMICOS

Conforme já citado, a caracterização física se resume na determinação da massa seca (m_s) e do índice de absorção de água (AA). Para a determinação destes índices adotou-se o preconizado na ABNT NBR 15270-3:2005.

¹⁰ Valores espúrios - Valores da amostra que não se encontram nos extremos dos valores (PRUDÊNCIO, 1999).

4.3.1 DETERMINAÇÃO DA MASSA SECA E DO ÍNDICE DE ABSORÇÃO

Os corpos-de-prova foram limpos e submetidos à secagem em estufa a $105\pm 5^\circ\text{C}$; após a estabilização das pesagens foi obtida a massa seca.

Após a determinação da massa seca, os corpos-de-prova foram imersos em água à temperatura ambiente e o recipiente foi gradativamente aquecido até a água no seu interior entrar em ebulição; os corpos-de-prova foram mantidos em água fervente por 2 horas.

A massa úmida (m_u), expressa em gramas, foi determinada pela pesagem de cada corpo-de-prova saturado. A determinação do índice de absorção de água (AA) de cada corpo-de-prova foi obtida pela equação 5. Na tabela 4.6 são apresentados os valores obtidos para o índice de absorção.

$$AA(\%) = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

Sendo: AA - Índice de absorção;
 m_u - Massa úmida (gramas);
 m_s - Massa seca (gramas).

Tabela 4. 6 – Resultado da determinação do índice de absorção dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.

| Escala | CP's | Massa seca (g) | Massa úmida (g) | Absorção (%) |
|--------|-----------------|----------------|-----------------|--------------|
| (1:5) | CP-01 | 75,59 | 84,87 | 12,28 |
| | CP-02 | 76,16 | 85,81 | 12,67 |
| | CP-03 | 74,62 | 84,16 | 12,78 |
| | CP-04 | 76,47 | 86,41 | 13,00 |
| | CP-05 | 74,42 | 83,47 | 12,16 |
| | CP-06 | 74,97 | 84,44 | 12,63 |
| | Média: | 75,37 | 84,86 | 12,59 |
| | Coef. Variação: | 1,11% | 1,28% | 2,50% |

Pôde-se observar que o índice de absorção médio foi de **12,59%**. A ABNT NBR 15270-1:2005, no item 5.6, preconiza que a taxa de absorção de água dos blocos não deve ser inferior a 8%, nem superior a 22%, portanto, as unidades atenderam ao preconizado.

O valor médio obtido para a razão entre massa úmida e massa seca na escala reduzida foi de 1,13.

$$\frac{m_u}{m_s} = \frac{84,86}{75,37} = 1,13$$

4.3.2 ÍNDICE DE ABSORÇÃO INICIAL (AAI)

Os blocos cerâmicos possuem a propriedade de absorver a água presente na argamassa de assentamento e/ou graute pelo efeito de capilaridade, que produz uma ação de sucção. Esta característica é estimada pela taxa de absorção inicial, conhecida internacionalmente como *Initial Rate of Absorption* (IRA).

Para a determinação do AAI, seguiu-se o preconizado pela ABNT NBR 15270-3:2005. As amostras foram as mesmas utilizadas para a determinação do índice de absorção de água e da área líquida.

As amostras foram secas em estufa por 24 horas à temperatura de 105 ± 5 °C e depois retiradas da estufa, aguardando-se por 2 horas. Após a secagem, as amostras foram pesadas e mantidas por 1 minuto em lâmina de água com 3 mm (± 2 mm). Após este intervalo, utilizando-se uma toalha umedecida, foi retirado o excesso de água da face ensaiada e posteriormente realizada nova pesagem.

Salienta-se, que não foi realizada a redução da altura da lâmina de água respeitando a proporcionalidade de escala. O índice de absorção de água inicial foi determinado de acordo com a equação 6.

$$AAI = 193,55 \times \frac{\Delta p}{Área} \quad (6)$$

Sendo: *AAI*: Índice de absorção inicial (sucção) da face ensaiada dos blocos, - expresso em (g/193,55cm²)/min;

Δp : Variação de massa obtida no ensaio (g);

Área: Área bruta ou área líquida dos blocos ensaiados (cm²).

De acordo com a ABNT NBR 15270-3:2005, caso o índice de absorção inicial seja superior a $30\text{g}/193,55\text{cm}^2/\text{min}$ os blocos devem ser umedecidos antes do assentamento para seu melhor desempenho.

Se o valor do AAI for menor que o limite mencionado os blocos podem ser assentados sem serem previamente umedecidos. De acordo com os resultados obtidos, mesmo sem a redução proporcional da lâmina de água para a escala reduzida, que provavelmente iria diminuir o AAI, não houve a necessidade de umedecer os blocos para a realização do assentamento. Na tabela 4.7 são apresentados os resultados obtidos para o índice de absorção inicial.

Tabela 4.7 – Resultado do índice de absorção inicial (AAI) para os blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.

| CP's | Escala reduzida (1:5) | | |
|-----------------|--|--------|-------|
| | m_s (g) | um (g) | AAI |
| CP-01 | 76,21 | 78,25 | 24,22 |
| CP-02 | 75,63 | 77,44 | 21,49 |
| CP-03 | 76,17 | 78,37 | 26,12 |
| CP-04 | 76,09 | 78,45 | 28,02 |
| CP-05 | 77,56 | 79,64 | 24,70 |
| CP-06 | 77,57 | 79,28 | 20,30 |
| Média: | 24,14 g/193,55 cm²/min | | |
| Coef. Variação: | 11,87% | | |

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para a determinação da resistência à compressão axial dos corpos-de-prova seguiu-se o preconizado pela ABNT NBR 15270-3:2005. Para a obtenção do paralelismo e da uniformidade das faces adotou-se a utilização do gesso em pasta como forma de capeamento.

De acordo com Maurício *et al.* (2004), “o gesso e o enxofre atuam de forma similar no ensaio de compressão axial”, portanto podem ser utilizados para estudos experimentais devido ao seu “fácil” manuseio.

A ABNT NBR 15270-3:2005 preconiza que os corpos-de-prova (blocos) para os ensaios à compressão axial devem ser ensaiados no estado saturado, sendo imersos em água no mínimo durante 6 horas. Com o intuito de avaliar a variabilidade deste parâmetro foram realizados ensaios em conformidade com a referida norma e ensaios com corpos-de-prova na condição ambiente.

Segundo a ABNT NBR 15270-3:2005 a taxa de carregamento deve ser de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s, portanto, os ensaios foram realizados à taxa de 0,1 kN/s. Para a realização dos ensaios, fez-se uso de uma prensa universal de ensaios com capacidade para 1000 kN, pertencente a FEIS.

4.4.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA DOS BLOCOS EM CONDIÇÃO AMBIENTE

Para a determinação da resistência dos blocos cerâmicos na condição ambiente foram ensaiados à compressão axial 15 corpos-de-prova (blocos inteiros).

As resistências foram determinadas em função da área efetiva bruta e da área líquida. Os resultados individuais foram avaliados estatisticamente para verificação de possíveis valores espúrios com um nível de significância correspondente a 5%. Na tabela 4.8 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios à compressão axial.

Tabela 4. 8 – Resultado da resistência média à compressão axial dos blocos cerâmicos na escala reduzida: condição ambiente.

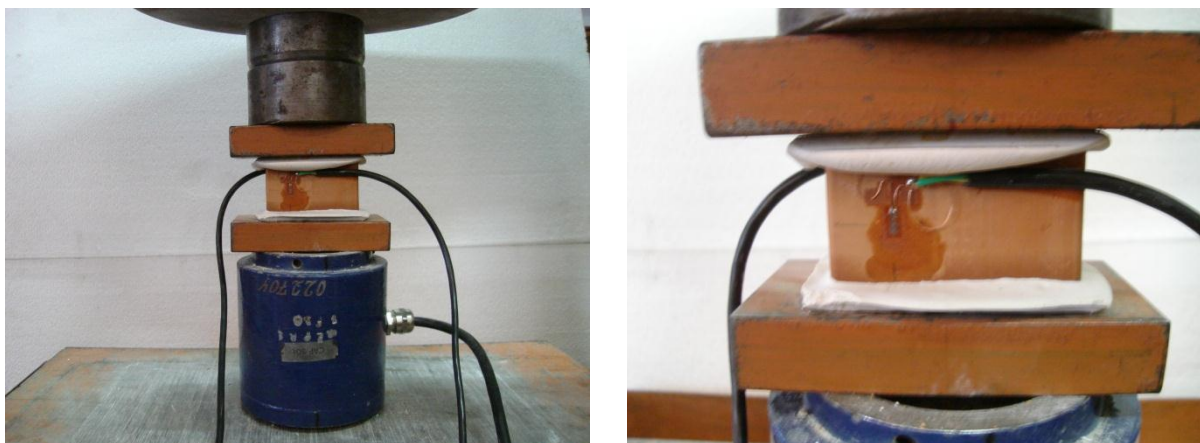
| CP's | Carga (kN) | Resistência (A_b) - $f_{(bi)}$ (MPa) | Resistência (A_{liq}) - $f_{(bi)}$ (MPa) |
|-------------------|------------|---|---|
| CP-01 | 14,10 | 8,65 | 13,95 |
| CP-02 | 20,20 | 12,39 | 19,98 |
| CP-03 | 21,10 | 12,94 | 20,87 |
| CP-04 | 21,50 | 13,19 | 21,27 |
| CP-05 | 22,00 | 13,50 | 21,76 |
| CP-06 | 22,40 | 13,74 | 22,16 |
| CP-07 | 27,80 | 17,06 | 27,50 |
| CP-08 | 28,00 | 17,18 | 27,70 |
| CP-09 | 28,20 | 17,30 | 27,89 |
| CP-10 | 36,40 | 22,33 | 36,00 |
| CP-11 | 38,40 | 23,56 | 37,98 |
| CP-12 | 38,80 | 23,89 | 38,38 |
| CP-13 | 39,00 | 24,01 | 38,58 |
| CP-14 | 40,00 | 24,54 | 39,56 |
| CP-15 | 44,20 | 27,22 | 43,72 |
| Resultados | | Área bruta | Área líquida |
| Mínimo | | 8,65 | 13,95 |
| Máximo | | 27,22 | 43,72 |
| f_{bma} : | | 18,10 | 29,15 |
| Coef. Variação: | | 31,54% | |

De acordo com os valores apresentados na tabela 4.8 pôde-se observar que a resistência média, em relação à área líquida (29,15 MPa), foi **61%** superior à resistência na área bruta (18,10 MPa).

Para os meios-blocos na escala reduzida foi obtida a resistência média, em relação à área bruta de **11,72 MPa**, com coeficiente de variação correspondente a **26,60%**.

O módulo de deformação dos blocos na escala reduzida foi obtido através da instrumentação de 03 corpos-de-prova com a utilização de extensômetros elétricos do tipo PA-060125BA-120L. Para a determinação do módulo de deformação, seguiram-se as recomendações da ABNT NBR 15812-2:2010, que especifica a inclinação da secante do digrama *tensão x deformação* entre 5% e 30% da tensão de ruptura. Na figura 4.9 ilustram-se alguns detalhes dos ensaios à compressão axial.

Figura 4.9 – Detalhe dos ensaios à compressão axial em unidades na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

Através da figura 4.9 pode-se observar que o sistema de ensaio consistiu na aplicação de carregamentos axiais com a utilização de uma articulação disposta sobre o perfil metálico superior de modo a reduzir e corrigir possíveis carregamentos excêntricos. Os perfis metálicos foram utilizados com a finalidade de proporcionar uma melhor distribuição do carregamento imposto.

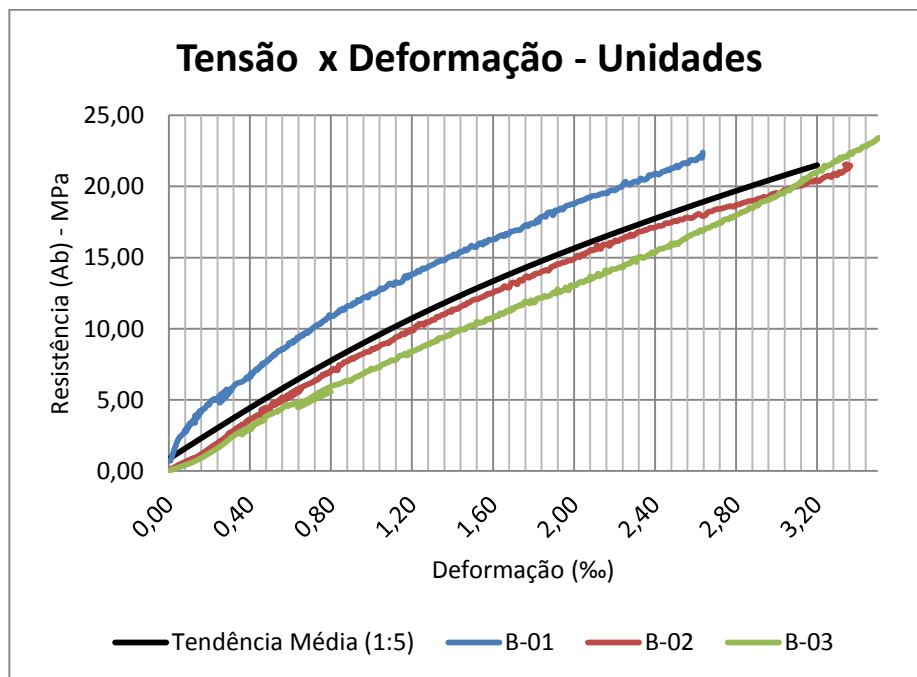
Abaixo do perfil metálico inferior foi disposta uma célula de carga conectada a um sistema de aquisição de dados que foi interligado a um microcomputador, possibilitando a obtenção do histórico dos ensaios e o devido acompanhamento do carregamento e das deformações.

Na tabela 4.9 apresentam-se os resultados obtidos para o módulo de deformação dos blocos cerâmicos na escala reduzida. Na figura 4.10 ilustra-se o gráfico *tensão x deformação* e a curva de tendência média obtidos nos ensaios de compressão axial para os blocos na escala reduzida.

Tabela 4. 9 – Resultado do módulo de deformação para os blocos cerâmicos na escala reduzida: condição ambiente.

| CP's | Módulo de deformação (MPa) |
|-----------------|----------------------------|
| CP-01 | 7037,30 |
| CP-02 | 9045,30 |
| CP-03 | 14016,50 |
| Média | 10.033,00 |
| Coef. Variação: | 35,8% |

Figura 4. 10 – Gráfico *tensão x deformação* para os blocos na escala reduzida 1:5.



4.4.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA DOS BLOCOS NA CONDIÇÃO SATURADA

Para os ensaios na condição saturada foram analisados 06 corpos-de-prova que permaneceram imersos em água por 24 horas. Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios foram os apresentados anteriormente, porém o módulo de deformação não foi obtido nesta condição. Na tabela 4.10 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 4. 10 – Resultado da resistência média à compressão axial dos blocos cerâmicos na escala reduzida: condição saturada.

| CP's | Carga (kN) | Resistência - $f_{(bi)}$ (MPa) | Resistência - $f_{(bi)}$ (MPa) |
|--|------------|--------------------------------|--------------------------------|
| CP1 | 18,50 | 11,34 | 18,30 |
| CP2 | 19,00 | 11,65 | 18,79 |
| CP3 | 27,50 | 16,86 | 27,20 |
| CP4 | 27,50 | 16,86 | 27,20 |
| CP5 | 28,50 | 14,47 | 28,19 |
| CP6 | 30,50 | 18,70 | 30,17 |
| Resultados | | Área efetiva | Área líquida |
| Mínimo | | 11,34 | 18,30 |
| Máximo | | 18,70 | 30,17 |
| f_{bms} : | | 14,98 | 24,98 |
| Coef. Variação: | | 20,14% | 20,42% |
| f_{bms} : Resistência média à compressão na condição saturada. | | | |

Pode-se observar que na condição saturada a resistência média, com relação à área líquida, foi **61,4%** superior à resistência média em relação à área bruta. Os valores encontrados para as resistências médias em relação à área líquida apresentaram índices percentuais próximos para as duas condições de ensaios.

4.4.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO (f_{bk})

Para a determinação da resistência característica à compressão dos blocos cerâmicos (f_{bk}) seguiu-se o preconizado pela ABNT NBR 15270-2:2005. A estimativa da resistência à compressão da amostra dos blocos é o valor estipulado pela expressão abaixo (Equação 7):

$$f_{bk,est} = 2 \left[\frac{f_{b(1)} + f_{b(2)} + \dots + f_{b(i-1)}}{i-1} \right] - f_{bi} \quad (7)$$

Onde: $f_{bk,est}$; é a resistência característica estimada da amostra, expressa em MPa;

$f_{b(1)} + f_{b(2)} + \dots + f_{b(i)}$; são os valores de resistência à compressão individual dos corpos-de-prova da amostra, ordenados crescentemente;

$i = n/2$; se n for par $i = (n-1)/2$; se n for impar;

n; é a quantidade de blocos da amostra.

Após a determinação da resistência característica estimada da amostra ($f_{bk,est}$), deve-se proceder a análise para a obtenção da resistência característica à compressão (f_{bk}) da seguinte forma:

a) Se o valor do $f_{bk,est} \geq f_{bm}$ (média da resistência à compressão de todos os corpos-de-prova da amostra), adota-se f_{bm} como a resistência característica do lote;

b) Se o valor de $f_{bk,est} < \phi \times f_{(b1)}$ (menor valor da resistência à compressão de todos os corpos-de-prova da amostra) adota-se a resistência característica à compressão determinada pela expressão $\phi \times f_{(b1)}$, sendo os valores de ϕ indicados na tabela 4.11.

c) Caso o valor calculado de $f_{bk,est}$ esteja entre os limites mencionados acima ($\phi \times f_{(b1)}$ e f_{bm}), adota-se este valor como a resistência característica à compressão (f_{bk}).

Tabela 4. 11 – Valores de ϕ em função da quantidade de blocos (ABNT NBR 15270-2:2005).

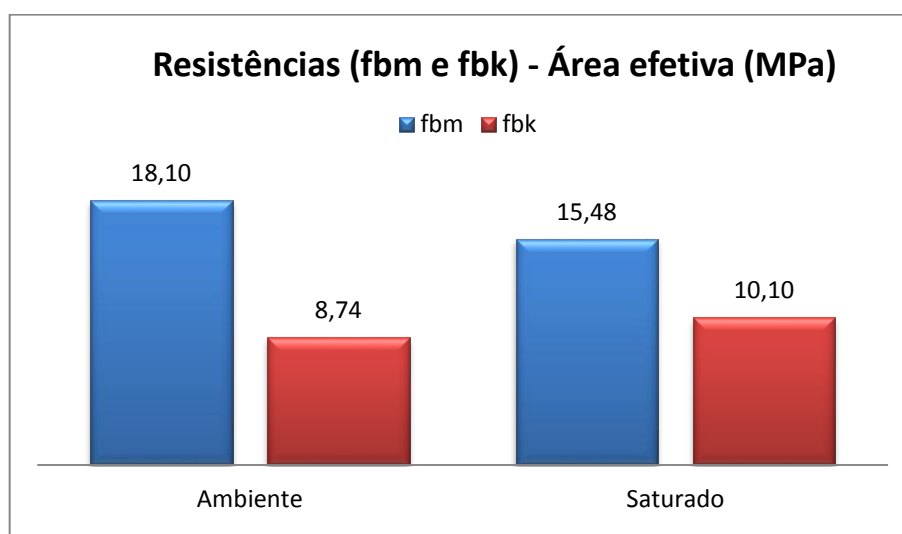
| Quantidade de blocos | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | ≥ 18 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|------|-----------|
| ϕ | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1 | 1,01 | 1,02 | 1,04 |

Na tabela 4.12 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos para a resistência característica dos blocos, em relação à área bruta. Já na figura 4.11 ilustram-se graficamente os resultados obtidos.

Tabela 4. 12 – Resumo da resistência característica (f_{bk}) para os blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.

| Resistência (A_b) (MPa) | Escala reduzida (1:5) | |
|--------------------------------|-----------------------|--------------|
| | Ambiente | Saturado |
| f_{bm} | 18,10 | 15,48 |
| $f_{bk, estimado}$ | 7,74 | 6,13 |
| $\phi \times f_{(b1)}$ | 8,74 | 10,10 |
| f_{bk} | 8,74 | 10,10 |

Figura 4. 11 – Representação dos resultados de resistência média (f_{bm}) e característica (f_{bk}) para os blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.



De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que a resistência média dos blocos saturados (15,48 MPa), em relação a área efetiva, é em torno de 14,5% inferior à resistência média dos blocos em umidade ambiente (18,10 MPa). Porém o valor da resistência média característica dos blocos saturados (10,10 MPa) é superior em aproximadamente 15,6%. As rupturas dos blocos cerâmicos demonstraram-se frágeis, caracterizando-se por estilhaços na forma de pequenas placas (Figura 4.12).

Figura 4. 12 – Forma de ruptura dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

4.5.1 GENERALIDADES

A alvenaria é definida por um material composto de blocos ou tijolos solidarizados pela argamassa de assentamento. Assim, para que possa caracterizar a alvenaria é necessária a caracterização da argamassa utilizada nos ensaios.

A argamassa de assentamento é definida “como elemento utilizado na ligação entre blocos, garantindo distribuição uniforme de esforços, composto de cimento, agregado miúdo, água e cal ou outra adição destinada a conferir plasticidade e retenção de água de hidratação à mistura” (ABNT NBR 15812-2:2010).

A função fundamental da argamassa de assentamento é unir as unidades de alvenaria constituindo um todo monolítico. Portanto, a argamassa de assentamento tem influência crítica no desempenho funcional de uma parede resistente.

Garcia (2000) cita que, em estudos realizados para a verificação da influência da argamassa de assentamento no comportamento de paredes submetidas à compressão axial, três fatores se destacaram em níveis consideráveis de importância: a espessura das juntas, a área de preenchimento das juntas, e a resistência à compressão da argamassa.

Para que a junta possa acomodar as pequenas deformações do conjunto, absorver imperfeições da unidade e reter água suficiente à sua hidratação é necessário que tenha uma espessura mínima (CALÇADA, 1998). De acordo com a ABNT NBR 15812-2:2010 “as juntas horizontais e verticais devem ter espessuras de 10 mm, exceto as juntas horizontais da primeira fiada” que devem ser de no mínimo 5 mm e no máximo 20 mm.

De acordo com Roman *et al.* (1996) valores menores de 10 mm para as juntas horizontais não são recomendáveis pois a junta não conseguiria absorver as imperfeições que ocorrem nas unidades.

Para Cunha (2001) as juntas verticais têm pouca influência na resistência à compressão, mas afetam a resistência ao cisalhamento e à flexão da parede, além de propiciar a vedação das juntas contra a umidade e promover um melhor isolamento térmico e acústico.

No que diz respeito às juntas horizontais, o não preenchimento correto de sua área pode reduzir a resistência da alvenaria em até 33% (ROMAN *et al.*, 1996).

Com relação à resistência da argamassa de assentamento, a ABNT NBR 15812-1:2010, deixa claro que deve ser atendida a resistência mínima de 1,5 MPa e a resistência máxima limitada a $0,70 f_{bk}$ referida à área líquida. Isto se explica pelo fato de que argamassas muito resistentes promovem a concentração dos efeitos das deformações diferenciais e a ruptura se torna excessivamente frágil, não havendo ductilidade suficiente para acomodações da estrutura diante dos esforços presentes.

4.5.2 PREPARO DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

No presente trabalho, ao longo de todos os ensaios, foi utilizada a argamassa de assentamento mista composta por Cimento Portland CP II Z 32, cal hidratada CHIII, e areia silicosa natural. Salienta-se que a ABNT NBR 15812-1:2010 apresenta a especificação sobre a produção e o manuseio das argamassas de assentamento, não fazendo distinção do tipo de cimento a ser utilizado.

Para um melhor controle na composição da argamassa, foi realizada a mistura a seco dos componentes após a devida pesagem. O traço em massa utilizado foi de 1: 0,30 : 5,89; que corresponde ao traço em volume de 1: 0,5 : 4,5. A condição plástica e a trabalhabilidade adequada foi encontrada com a relação água/cimento (a/c) correspondente a **1,50**.

Para a conversão do traço unitário em volume para o traço unitário em massa foi preciso determinar a massa específica dos componentes: Cimento, Cal e Areia; que corresponderam respectivamente a 1,13; 0,67; e 1,48 g/cm³.

Para a utilização da areia na escala reduzida realizou-se a redução granulométrica, mediante a utilização de um moinho apropriado para agregados miúdos pertencente à CESP (Figura 4.13).

Para a escala reduzida foi utilizada a areia retida na peneira 0,15 mm com a composição granulométrica apresentada na tabela 4.13.

Figura 4. 13 – Detalhes do moinho de agregados miúdos para redução granulométrica da areia.



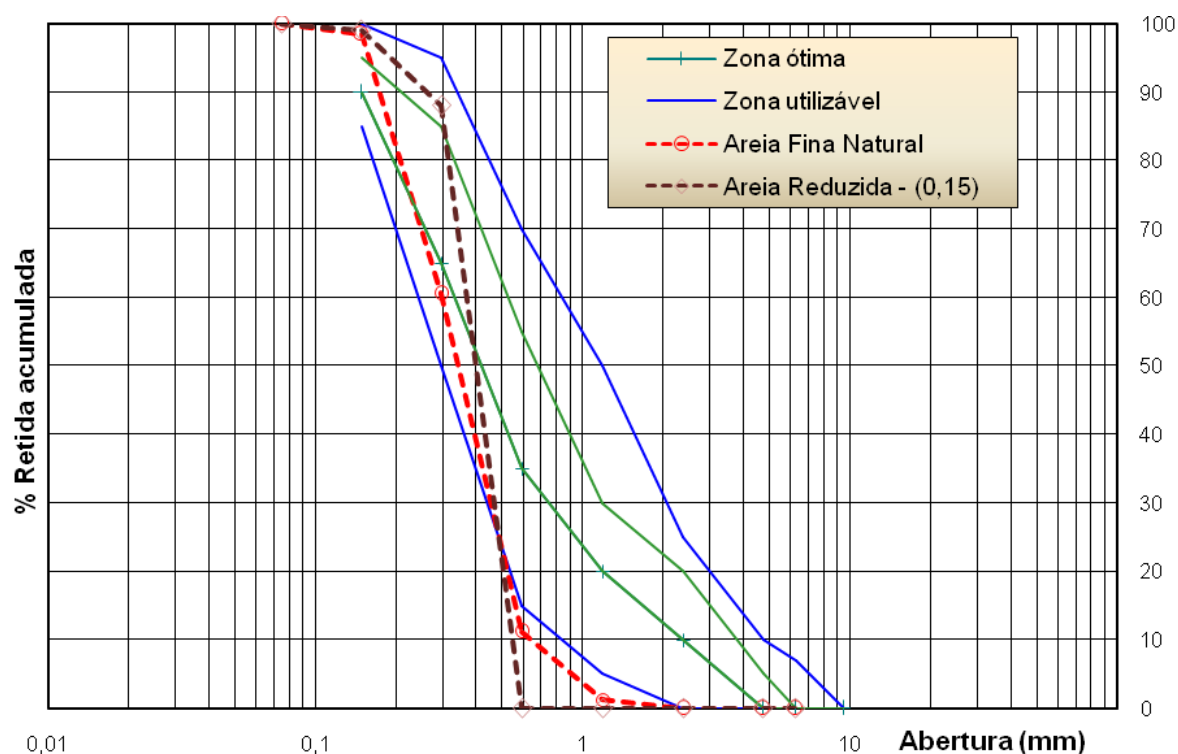
Fonte: Própria.

Tabela 4. 13 – Caracterização granulométrica da areia da argamassa de assentamento na escala reduzida 1:5.

| Peneira (mm) | Massa (g) | Retido (%) | Retido acumulado (%) |
|--------------------------------|-----------|------------|----------------------|
| 9,5 | 0,00 | 0,0 | 0 |
| 4,8 | 0,00 | 0,0 | 0 |
| 2,4 | 0,00 | 0,0 | 0 |
| 1,2 | 0,00 | 0,0 | 0 |
| 0,6 | 0,95 | 0,0 | 0 |
| 0,3 | 1761,50 | 88,1 | 88 |
| 0,15 | 220,20 | 11,0 | 99 |
| Fundo | 17,35 | 0,9 | 100 |
| Total | 2000,00 | 100 | - |
| Módulo de finura | | | 1,87 |
| Dimensão máxima característica | | | 0,6 mm |

Na figura 4.14 ilustra-se a curva granulométrica da areia na escala natural e a utilizada para a escala reduzida.

Figura 4. 14 – Curva granulométrica da composição granulométrica da areia para a confecção da argamassa de assentamento.



4.5.3 ENSAIO DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO À COMPRESSÃO AXIAL

Para a realização dos ensaios à compressão axial, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos na dimensão 5 x 10 cm (Diâmetro x Altura), conforme preconiza a ABNT NBR 5738:2003. Os corpos-de-prova foram desformados depois de decorrido três dias da confecção; sendo mantidos em água saturada de cal até a data de realização do ensaio.

O ensaio à compressão axial foi realizado aos 28 dias de idade, conforme preconização da ABNT NBR 5739:2007. Para a realização do capeamento das faces optou-se por utilizar gesso em pasta.

Para a realização dos ensaios à compressão axial fez-se uso da mesma prensa citada nos ensaios em unidades. Os corpos-de-prova foram submetidos à compressão axial com velocidade de carregamento correspondente a 1,0 kN/s, visto que a ABNT NBR 5739:2007, no item 4.8, preconiza a velocidade entre 0,3 e 0,8 MPa/s. A máquina de ensaio foi equipada com dois pratos de aço, sendo que o prato superior foi assentado em articulação esférica e o outro se caracterizou como um bloco rígido e plano, conforme especifica a referida norma.

4.5.4 RESULTADO DOS ENSAIOS À COMPRESSÃO AXIAL DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.

No decorrer da utilização da argamassa de assentamento foram moldados 13 corpos-de-prova com a areia na escala reduzida. Na tabela 4.14 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios à compressão axial para a argamassa de assentamento na escala reduzida.

Tabela 4. 14 – Resultado dos ensaios à compressão axial da argamassa de assentamento.

| CP's | Carga (kN) | Resistência (MPa) |
|-----------------|------------|-------------------|
| CP-01 | 7,90 | 4,02 |
| CP-02 | 8,20 | 4,18 |
| CP-03 | 8,30 | 4,23 |
| CP-04 | 8,70 | 4,43 |
| CP-05 | 8,90 | 4,53 |
| CP-06 | 9,30 | 4,74 |
| CP-07 | 9,60 | 4,89 |
| CP-08 | 9,90 | 5,04 |
| CP-09 | 10,00 | 5,09 |
| CP-10 | 10,90 | 5,55 |
| CP-11 | 11,00 | 5,60 |
| CP-12 | 11,40 | 5,81 |
| CP-13 | 12,90 | 6,57 |
| Média: | 9,77 | 4,98 |
| Coef. Variação: | | 14,95% |

4.6 CARACTERIZAÇÃO DO GRAUTE

4.6.1 GENERALIDADES

A caracterização do graute se fez necessário devido à utilização no preenchimento das vergas, contravergas, e das lajes do modelo físico reduzido, que será apresentado em item subsequente.

O graute, conforme define a ABNT NBR 15812-1:2010, é o “componente utilizado para preenchimento de espaços vazios de blocos, com a finalidade de solidarizar armaduras à alvenaria ou aumentar sua capacidade resistente”.

Uma das propriedades relevantes do graute é a trabalhabilidade, em que a fluidez e a coesão, duas propriedades contrárias, devem estar em um estado de equilíbrio, para que se possa obter um graute eficiente (CALÇADA, 1998).

A trabalhabilidade do graute também está ligada a outras propriedades, como a consistência e a plasticidade. Com isto, um dos parâmetros usados para se medir a trabalhabilidade e a consistência é a determinação do abatimento do tronco de cone, regulamentado pela ABNT NBR NM 67:1998.

4.6.2 PREPARO E MANUSEIO DO GRAUTE

O graute utilizado para o preenchimento das vergas, contravergas, e na execução das lajes do modelo físico reduzido foi composto de cimento, agregado miúdo (areia silicosa), agregado graúdo (pedrisco), e água.

Para a realização das vergas e contravergas utilizou-se o traço em massa correspondente a 1: 2,48 : 2,52 (Cimento Portland CP II Z : areia silicosa natural : pedrisco), com relação água/cimento (a/c) igual a **1,02**.

Para a realização das lajes o traço em massa utilizado foi de 1 : 1,2 : 1,8; com relação a/c igual a **0,55**. Além da diferença na composição do traço foi utilizado no graute das vergas um pedrisco com granulometria reduzida. A mistura entre os agregados e o cimento foi realizada a seco, como forma de controlar a dosagem.

Os componentes constituintes foram pesados e armazenados em sacos plásticos na ausência de umidade (Figura 4.15).

Figura 4. 15 – Preparação e pesagem dos componentes do graute.

Fonte: Própria.

O graute confeccionado foi submetido ao ensaio de abatimento do tronco de cone, para a determinação da consistência, no qual foi obtido um abatimento médio de **240** milímetros.

Para a confecção do graute é recomendado que o agregado miúdo (areia) possua características que conduzam a menor quantidade de cimento, pois assim proporcionará ao graute uma menor retração durante o endurecimento. Segundo Cunha (2001), encaixa-se nestas areias as que possuem módulo de finura entre 2,3 e 3,1.

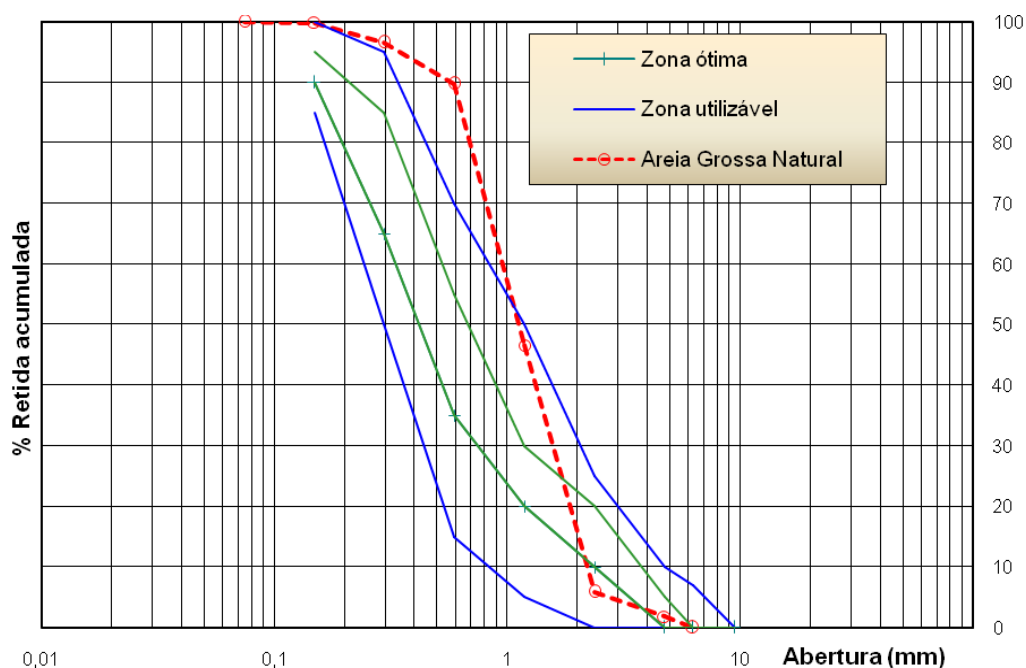
A caracterização granulométrica da areia utilizada para a confecção do graute foi realizada em conformidade com a ABNT NBR NM 248:2003. Na tabela 4.15 é apresentado o resultado obtido.

Tabela 4. 15 – Composição granulométrica da areia utilizada para confecção do graute das vergas, contravergas e laje do modelo físico reduzido.

| Peneira (mm) | Massa (g) | Retido (%) | Retido acumulado (%) |
|--------------------------------|-----------|------------|----------------------|
| 9,5 | 0,00 | 0,00 | 0 |
| 4,8 | 36,06 | 1,80 | 2 |
| 2,4 | 81,66 | 4,10 | 6 |
| 1,2 | 814,00 | 40,70 | 47 |
| 0,6 | 863,90 | 43,20 | 90 |
| 0,3 | 136,83 | 6,80 | 97 |
| 0,15 | 65,32 | 3,30 | 100 |
| Fundo | 2,23 | 0,10 | 100 |
| Total | 2000,00 | 100,00 | - |
| Módulo de finura | | | 3,41 |
| Dimensão máxima característica | | | 4,8 mm |

Na figura 4.16 ilustra-se a curva granulométrica da areia utilizada para a confecção do graute. A ABNT NBR 7211:2009 apresenta os limites granulométricos do agregado miúdo, a areia utilizada enquadra-se na zona 4 (grossa).

Figura 4. 16 – Composição granulométrica da areia utilizada para confecção do graute.



4.6.3 ENSAIO DO GRAUTE À COMPRESSÃO AXIAL

Para a realização dos ensaios à compressão axial e determinação da resistência característica do graute foram moldados 08 corpos-de-prova cilíndricos na dimensão 10 x 20 cm (Diâmetro x Altura).

Os corpos-de-prova foram desformados depois de decorridos 03 dias da confecção, sendo mantidos em água saturada de cal até a data da realização dos ensaios.

O ensaio à compressão axial foi realizado aos 28 dias de idade, conforme preconizado pela ABNT NBR 5739:2007. Para a realização do capeamento foi utilizado gesso em pasta.

Os ensaios foram realizados com a mesma prensa citada nos ensaios de compressão axial em unidades. Os corpos de prova foram submetidos à compressão axial com velocidade de carregamento correspondente a 4,0 kN/s, visto que a ABNT NBR 5739:2007, preconiza a velocidade entre 0,3 e 0,8 MPa/s.

4.6.4 RESULTADO DOS ENSAIOS À COMPRESSÃO AXIAL NO GRAUTE

Na tabela 4.16 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios à compressão axial para os dois traços de graute utilizados na pesquisa.

Tabela 4. 16 – Resultado dos ensaios à compressão axial do graute.

| Graute das vergas (1 : 2,48 : 2,52 : 1,02) | | | Graute da laje (1 : 1,2 : 1,8 : 0,55) | | |
|--|---------------|-------------------|---------------------------------------|---------------|-------------------|
| CP's. | Carga (kN) | Resistência (MPa) | CPs. | Carga (kN) | Resistência (MPa) |
| CP-01 | 84,50 | 10,76 | CP-01 | 157,00 | 19,99 |
| CP-02 | 100,80 | 12,83 | CP-02 | 170,00 | 21,65 |
| CP-03 | 120,50 | 15,34 | CP-03 | 224,00 | 28,52 |
| CP-04 | - | - | CP-04 | 231,00 | 29,41 |
| CP-05 | - | - | CP-05 | 297,00 | 37,82 |
| Média: | 101,93 | 12,98 | Média: | 215,80 | 27,48 |
| Coef. Variação: | | 17,7% | Coef. Variação: | | 25,8% |

4.7 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

Na tabela 4.17 apresenta-se o resumo de todos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos componentes na escala reduzida 1:5.

Tabela 4. 17 – Resumo dos resultados obtidos na caracterização dos componentes na escala reduzida 1:5.

| Fatores | | Escala reduzida (1:5) |
|--|---|-----------------------|
| Geométrica | Dimensão nominal (mm) – bloco inteiro | 30,0 x 40,0 x 60,0 |
| | Dimensão efetiva (mm) - bloco inteiro | 28,0 x 38,0 x 58,0 |
| | Dimensão real (mm) – bloco inteiro | 28,09 x 39,47 x 58,07 |
| | Dimensão nominal (mm) – meio bloco | 30,0 x 40,0 x 30,0 |
| | Dimensão efetiva (mm) - meio bloco | 28,0 x 38,0 x 28,0 |
| | Dimensão real (mm) – meio bloco | 29,40 x 39,99 x 29,29 |
| | Área real (cm ²) – bloco inteiro | 16,24 |
| | Área efetiva (cm ²) – bloco inteiro | 16,31 |
| | Área real (cm ²) – meio bloco | 7,84 |
| | Área efetiva (cm ²) – meio bloco | 8,61 |
| | Área líquida (cm ²) – bloco inteiro | 10,11 |
| Relação: $A_{liq} / A_{efetiva}$ – bloco inteiro | 61,98% | |
| Física | Massa seca (g) | 75,37 |
| | Massa úmida (g) | 84,86 |
| | Relação: Massa úmida / Massa seca | 1,13 |
| | Índice de absorção – AA | 12,59% |
| | Índice de absorção inicial – AAI (IRA) | 24,14% |
| Mecânica | Resistência média à compressão (MPa) – Ambiente (A_b) | 18,10 |
| | Resistência média à compressão (MPa) - Ambiente (A_{liq}) | 29,15 |
| | Resistência característica (MPa) - Ambiente (A_b) | 8,74 |
| | Resistência média à compressão (MPa) - Saturado (A_b) | 15,48 |
| | Resistência característica (MPa) - Saturado (A_b) | 10,10 |
| E_b | Módulo de deformação (MPa) – Ambiente | 10.033,00 |
| Graute | Graute: Vergas e Contravergas (1:2,48:2,52:1,02) – MPa | 12,98 |
| | Graute: Lajes (1:1,2:1,8:0,55) – MPa | 27,48 |
| | Argamassa – MPa | 4,98 |

5

TRABALHO EXPERIMENTAL CARACTERIZAÇÃO DA ALVENARIA

5 TRABALHO EXPERIMENTAL: CARACTERIZAÇÃO DA ALVENARIA

Para a caracterização da alvenaria na escala reduzida, foram confeccionados corpos-de-prova utilizando os componentes caracterizados no capítulo anterior.

Foram realizados ensaios à compressão axial em prismas de dois blocos (PR2B), em prismas de três blocos (PR3B), em prismas contrafiados (PRM3F), em painéis (PAI3B5F), e em paredes (PAR3B12F). Na tabela 5.1 apresenta-se a quantidade de corpos-de-prova ensaiados para a caracterização da alvenaria.

Tabela 5. 1 – Quantidade de corpos-de-prova ensaiados para caracterização da alvenaria na escala reduzida 1:5.

| Escala | Quantidade de corpos-de-prova (CP's) | | | | |
|--------|--------------------------------------|------|-------|---------|----------|
| | PR2B | PR3B | PRM3F | PAI3B5F | PAR3B12F |
| (1:5) | 15 | 14 | 10 | 05 | 02 |

5.1 ENSAIOS EM PRISMAS PR2B E PR3B NA ESCALA REDUZIDA

5.1.1 GENERALIDADES

De acordo com Ramalho e Corrêa (2003) “os prismas são elementos obtidos pela superposição de um certo número de blocos, normalmente dois ou três, unidos por junta de argamassa e destinados ao ensaio de compressão axial”.

A ABNT NBR 15812-1:2010 define os prismas como “corpos-de-prova obtido pela superposição de blocos unidos por junta de argamassa, grauteados ou não”. As resistências características dos prismas foram determinadas de acordo com a ABNT NBR 15812-2:2010, que regulamenta o método de ensaio.

De acordo com a ABNT NBR 15812-1:2010, a resistência característica à compressão simples da alvenaria (f_k) deve ser determinada com base no ensaio de paredes (ABNT NBR 8949:1985), ou ser estimada como 70% da resistência característica de compressão simples de prismas (f_{pk}), ou 85% da “pequena parede” (f_{ppk}).

De acordo com a ABNT NBR 15812-2:2010 – Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos – Parte 2: Execução e controle de obras:

[...] a caracterização da alvenaria deve ser feita através de ensaios de prismas, ou ensaios de pequenas paredes, ou ensaios de paredes em escala real executadas com blocos, argamassa e graute de mesma origem e característica dos que serão efetivamente utilizados na estrutura [...]” (ABNT NBR 15812-2:2010, p.9).

Devido a um menor custo e dispêndio para a realização dos ensaios os prismas têm sido empregados por muitos pesquisadores. Um fator importante nesse tipo de ensaio é a relação entre a altura do prisma (h) e sua espessura (t). No meio técnico é geralmente considerado que uma relação altura-espessura de aproximadamente cinco seja necessária para eliminar os efeitos dos pratos da prensa e para representar valores mais próximos da resistência à compressão axial da alvenaria.

Conforme já citado, no presente trabalho, foram realizados ensaios à compressão axial em prismas de dois (PR2B) e três blocos (PR3B), segundo recomendações da ABNT NBR 15812-2:2010.

Os ensaios em prismas foram realizados na escala reduzida (1:5), sendo que a relação entre a altura e a espessura para os prismas de dois e três blocos foram respectivamente de **2,79** e **4,21**.

Um conceito muito importante quando se trata da influência da resistência dos prismas na resistência à compressão axial das paredes é conhecido como “eficiência” (η); neste caso analisa-se uma relação entre a resistência média do prisma e a resistência média do bloco que o compõe (Equação 8).

$$\eta = \frac{f_p}{f_b} \quad (8)$$

Normalmente esses valores da eficiência prisma-bloco variam de 0,30 a 0,60 para os blocos cerâmicos e de 0,5 a 0,9 para os blocos de concreto (CORRÊA e RAMALHO, 2003).

Segundo Prudêncio Jr. *et al.* (2002), em diversos estudos realizados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em prismas de três blocos, pode-se constatar que as unidades cerâmicas apresentaram fatores de eficiência sempre abaixo de 50%, e que os blocos de concreto apresentaram valores muito superiores.

De acordo com Prudêncio Jr. *et al.* (2002), apesar dos resultados apontarem para o intervalo apresentado, o valor desse parâmetro não deve ser generalizado, pois a diferença entre a geometria dos blocos (formato, conicidade dos furos e espessura das paredes) tem influência. Assim, para ser utilizado em projetos e/ou especificações de blocos, precisa ser conhecido em cada caso ou determinado experimentalmente.

Prudêncio Jr. *et al.* (2002) cita que para a obtenção da resistência de projeto pode-se utilizar amostras de menor tamanho e procedimentos estatísticos para a estimação da média dos prismas. A expressão para o cálculo desta média, dada pelos autores é a indicada na equação 9.

$$f_{pmk} = f_{pm} - t_{0,05(n-1)} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Onde: f_{pmk} - é a resistência média característica do lote;

f_{pm} - é a resistência média dos prismas;

$t_{0,05(n-1)}$ - é a constante retirada da distribuição “t” de Student para um quantil de 5%;

S - é o desvio padrão da amostra de prismas ensaiados;

n - é o número de prismas da amostra.

Na tabela 5.2 são apresentados os valores da constante retirada da distribuição “t” de *Student* para um quantil de 5% ($t_{0,05(n-1)}$) para diferentes tamanhos de amostra (n). A resistência média característica do lote (f_{pmk}) é o valor que se pode afirmar, com 95% de confiança, que será ultrapassado pela média do lote.

Neste estudo o procedimento apresentado para a determinação da resistência média característica do lote foi utilizado para os prismas contrafiados, para os painéis e para as paredes, visto que o número de corpos-de-prova foram inferiores a 12 unidades.

Tabela 5. 2 – Valores de % ($t_{0,05(n-1)}$) em função do tamanho da amostra (PRUDÊNCIO JR. *et al.*, 2002).

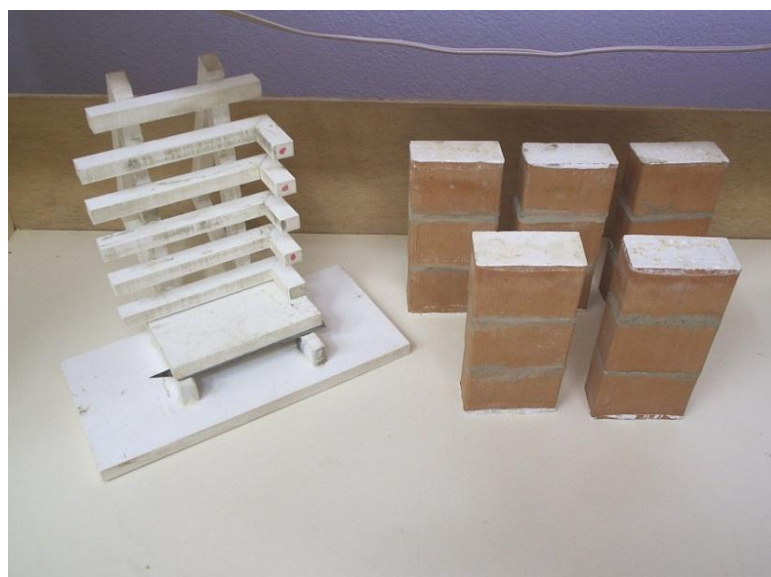
| n | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 12 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t_{0,05(n-1)}$ | 2,920 | 2,353 | 2,132 | 2,015 | 1,943 | 1,895 | 1,833 | 1,796 |

5.1.2 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DOS PRISMAS PR2B E PR3B

A ABNT NBR 15812-2:2010 determina que a resistência média dos prismas (f_{pm}) deve ser efetuada com um número mínimo de 12 corpos-de-prova.

Os componentes constituintes para a confecção dos prismas corresponderam aos caracterizados no capítulo 4 (argamassa e blocos).

Os parâmetros relativos à alvenaria, como prumo e espessura das juntas de argamassa, afetam consideravelmente os resultados dos ensaios. Para manter um maior controle destes fatores fez-se uso de gabaritos específicos para a finalidade. As juntas de argamassa foram executadas na espessura de $2\pm 0,6$ mm (Figura 5.1).

Figura 5. 1 – Gabarito utilizado para a confecção dos prismas PR2B e PR3B na escala reduzida 1:5.

Fonte: Própria.

Apesar do valor do índice de absorção inicial (AAI) indicar a não necessidade do prévio umedecimento dos blocos para o assentamento, optou-se em realizar este procedimento como forma de reduzir a absorção da água de amassamento da argamassa devido à pequena espessura da junta de assentamento.

Ressalta-se que todos os prismas foram confeccionados com a utilização da mesma mão-de-obra e mantidos em temperatura ambiente (laboratório) durante o tempo estimado para a cura e realização do ensaio à compressão axial (28 dias).

Para a realização dos ensaios, foram adotados os procedimentos preconizados pela ABNT NBR 15812-2:2010:

- A carga foi aplicada em todos os corpos-de-prova na direção do esforço que o bloco deve suportar durante o seu emprego na alvenaria;
- Os corpos-de-prova foram colocados na prensa de modo que o seu centro de gravidade estivesse no eixo de carga dos pratos da prensa.

5.1.3 INSTRUMENTAÇÃO E ENSAIO DOS PRISMAS DE DOIS E TRÊS BLOCOS

Foram confeccionados 29 corpos-de-prova, sendo 15 prismas de dois blocos (PR2B), e 14 prismas de três blocos (PR3B). Com o objetivo de determinar o módulo de deformação do conjunto (prisma) e o módulo de deformação do bloco intermediário, pertencente ao prisma, foram instrumentados 03 prismas PR3B. A determinação do módulo de deformação do bloco intermediário foi realizada como forma de comparar o resultado obtido nos ensaios de unidades à compressão.

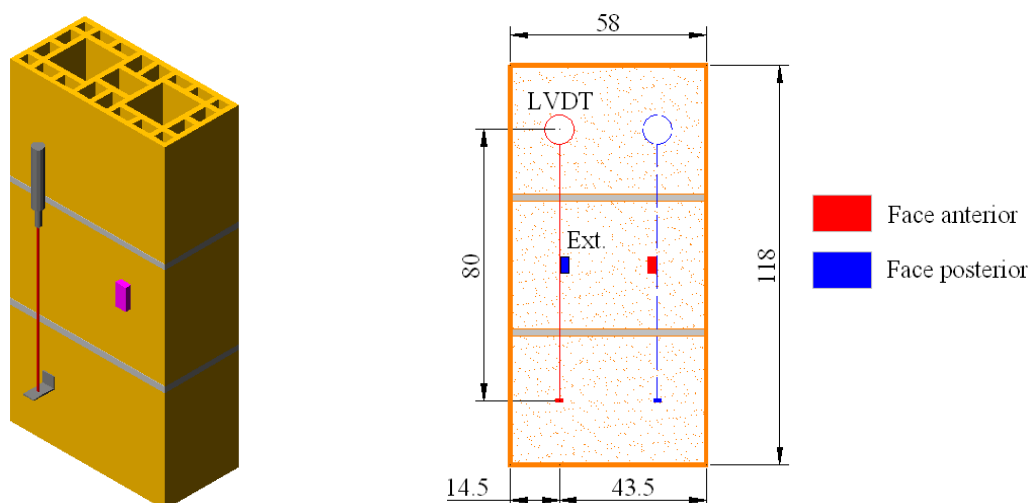
Para a determinação das deformações nos prismas, na direção do carregamento, foram utilizados 02 Transdutores Diferenciais de Variação Linear (LVDT¹¹), com resolução de milésimos de milímetros ($1/1000\text{ mm}$), e curso máximo de 30 mm. Para a determinação do módulo de deformação do bloco intermediário pertencente aos PR3B fez-se o uso de 02 extensômetros elétricos do tipo PA-06-125BA-120L.

Os LVDT's foram fixados em faces opostas e transversalmente, com a utilização de "pequenas" cantoneiras de alumínio coladas ao bloco com a utilização de cola instantânea, tomando-se o cuidado de reduzir a área de contato na colagem das cantoneiras de alumínio. Para o devido posicionamento da instrumentação foram utilizados gabaritos de madeira.

¹¹ LVDT - *Linear Variable Displacement Transducers.*

Na figura 5.2 representam-se os detalhes da instrumentação utilizada nos PR3B com os devidos posicionamentos dos instrumentos.

Figura 5. 2 – Detalhe esquemático da instrumentação dos prismas PR3B na escala reduzida 1:5.



A altura dos prismas PR2B e PR3B corresponderam respectivamente a 78 e 118 mm. A distância fixa entre os pontos de medida de deslocamento para o conjunto foi de 80 mm, e o deslocamento final foi determinado pela média dos deslocamentos dos transdutores.

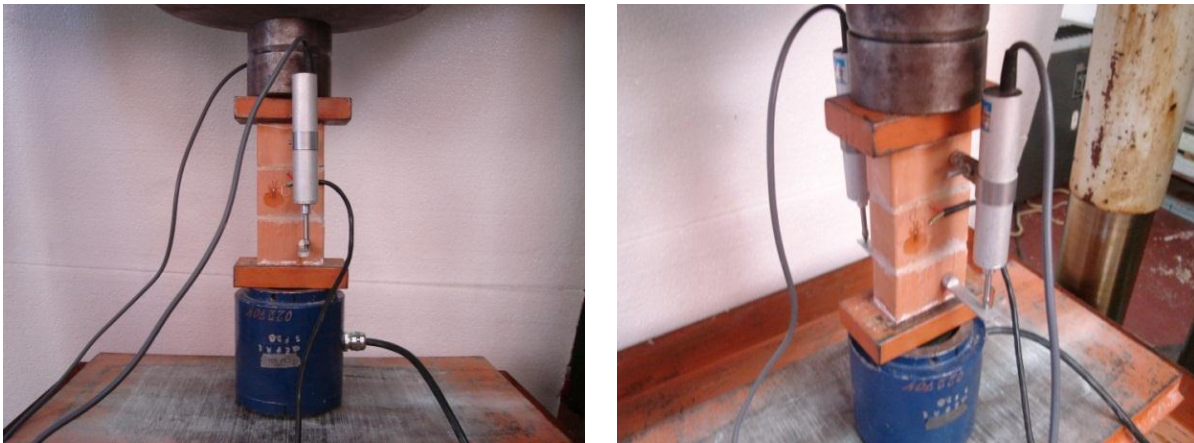
Para o controle do carregamento utilizou-se uma célula de carga com capacidade para 200 kN. Os LVDT's e a célula de carga foram ligados a um sistema de aquisição de dados conectado a um microcomputador. Através do *Software DasyLab 6.0* foi possível monitorar o carregamento e os deslocamentos durante a realização dos ensaios, propiciando assim o armazenamento dos históricos.

O ensaio à compressão axial foi realizado com a utilização da prensa citada nos ensaios em unidades, conforme ABNT NBR 15812-2:2010. A taxa de carregamento foi de aproximadamente 0,10 kN/s, visto que a ABNT NBR 15812-2:2010 preconiza $0,05 \pm 0,01$ MPa/s.

Antes da realização do ensaio propriamente dito, foram realizadas duas “pré-cargas” sucessivas de aproximadamente 10% da carga de ruptura estimada. Todos os prismas foram ensaiados à compressão axial após 28 dias do término da confecção.

Para a obtenção do nivelamento e do paralelismo das faces realizou-se o capeamento com a utilização de gesso em pasta. Na figura 5.3 são ilustrados alguns detalhes dos ensaios realizados nos prismas PR3B. Pode-se observar que para reduzir o efeito de um possível carregamento excêntrico fez-se o uso de articulações.

Figura 5. 3 – Detalhes da instrumentação e dos ensaios em prismas PR3B na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

5.1.4 RESULTADOS OBTIDOS PARA OS PRISMAS PR2B E PR3B

Os valores obtidos nos ensaios à compressão axial para os prismas PR2B e PR3B são apresentados na tabela 5.3. Devido à quantidade de corpos-de-prova (>12) não foi necessária a determinação da resistência média característica.

Levando-se em consideração a relação entre a resistência média dos prismas e a dos blocos (fator de eficiência), foi possível obter para os prismas PR2B e PR3B respectivamente 33% e 39,5%.

$$\eta = \frac{f_p}{f_b} = \frac{5,97}{18,10} \cong 33\% \quad \text{Fator de eficiência para os prismas PR2B}$$

$$\eta = \frac{f_p}{f_b} = \frac{7,14}{18,10} \cong 39,5\% \quad \text{Fator de eficiência para os prismas PR3B}$$

Conforme apresentado anteriormente o fator de eficiência para os blocos cerâmicos geralmente se encontram entre 30% e 60%, portanto o valor obtido encontra-se dentro do limite citado, confirmando o exposto por Prudêncio Jr *et al.* (2002).

Tabela 5. 3 – Resultado dos ensaios em prismas PR2B e PR3B na escala reduzida 1:5.

| Prismas (1:5) | PR2B | | PR3B | |
|-----------------|-------------|-------------------|--------------|-------------------|
| | Carga (kN) | Resistência (MPa) | Carga (kN) | Resistência (MPa) |
| CP-01 | 4,60 | 2,82 | 4,50 | 2,76 |
| CP-02 | 5,40 | 3,31 | 4,80 | 2,94 |
| CP-03 | 5,60 | 3,43 | 6,40 | 3,92 |
| CP-04 | 5,70 | 3,49 | 8,30 | 5,09 |
| CP-05 | 7,00 | 4,29 | 8,80 | 5,40 |
| CP-06 | 7,00 | 4,29 | 10,40 | 6,38 |
| CP-07 | 7,20 | 4,41 | 11,20 | 6,87 |
| CP-08 | 7,50 | 4,60 | 11,20 | 6,87 |
| CP-09 | 7,80 | 4,78 | 13,40 | 8,22 |
| CP-10 | 10,0 | 6,13 | 13,60 | 8,34 |
| CP-11 | 12,6 | 7,73 | 13,80 | 8,46 |
| CP-12 | 14,4 | 8,83 | 16,00 | 9,81 |
| CP-13 | 16,0 | 9,81 | 20,20 | 12,39 |
| CP-14 | 16,8 | 10,3 | 20,40 | 12,51 |
| CP-15 | 18,4 | 11,28 | - | - |
| Média | 9,73 | 5,97 | 11,64 | 7,14 |
| Desvio padrão | 4,65 | 2,85 | 5,02 | 3,07 |
| Coef. Variação: | 47,8% | | 43,1% | |

* A resistência média foi determinada com relação à área bruta efetiva: 16,31 cm².

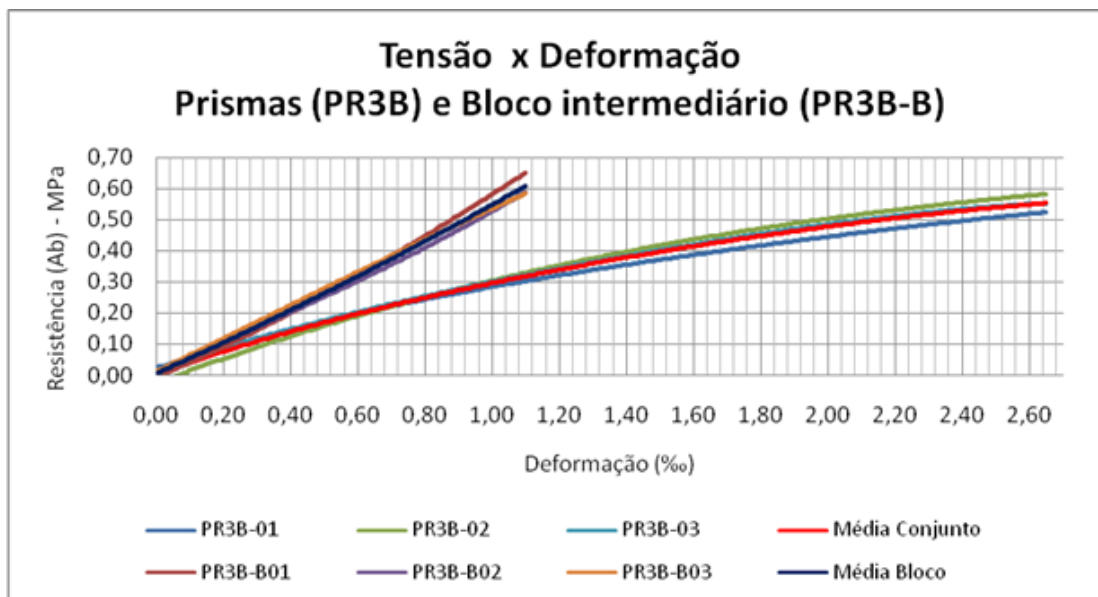
5.1.5 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO PARA OS PRISMAS NA ESCALA REDUZIDA

Conforme citado anteriormente, foram instrumentados 03 prismas PR3B para a obtenção da curva *Tensão x Deformação*. O módulo de deformação foi determinado de acordo com as recomendações da ABNT NBR 15812-2:2010, sendo a inclinação da secante do diagrama *Tensão x Deformação* entre 5% e 30% da tensão de ruptura.

Na figura 5.4 são ilustradas as curvas individuais obtidas e a curva de tendência média. Pode-se observar que o comportamento dos corpos-de-prova foram semelhantes entre si, tanto para o conjunto, quanto para o bloco intermediário do prisma PR3B.

O módulo de deformação médio obtido para o conjunto (PR3B) foi de 3.339,0 MPa, já para o bloco intermediário (PR3B-B) o módulo de deformação encontrado foi de 5.136,6 MPa (53,8% superior). O valor superior encontrado para o módulo de deformação do bloco intermediário pertencente ao prisma se justifica pela ausência das juntas.

Figura 5. 4 – Gráfico *tensão x deformação* para os prismas PR3B na escala reduzida 1:5.



Cabe ressaltar que os LVDT's foram retirados com o início da ruptura, evitando-se, assim, danos aos equipamentos de leitura. Dessa forma o gráfico obtido não representa a deformação última.

5.1.6 FORMA DE RUPTURA DOS PRISMAS

A forma de ruptura dos prismas foi semelhante ao que normalmente ocorre em ensaios de prismas na escala natural. Foi perceptível o “esfarelamento” da argamassa da junta com o lascamento e desprendimento das paredes externas dos blocos.

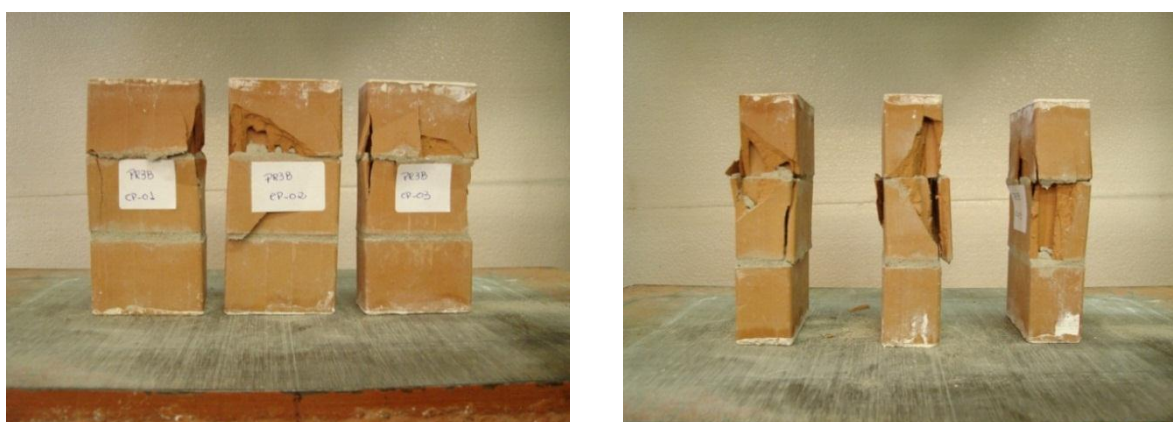
Nas figuras 5.5 e 5.6 é possível visualizar a forma de ruptura apresentada pelos prismas PR2B e PR3B nos ensaios à compressão axial, que foram realizados de acordo com os procedimentos descritos anteriormente.

Figura 5. 5 – Forma de ruptura para os prismas PR2B na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

Figura 5. 6 – Forma de ruptura para os prismas PR3B na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

5.1.3 RESUMO DOS RESULTADOS PARA OS ENSAIOS EM PRISMAS PR2B E PR3B

Na tabela 5.4 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos para os prismas PR2B e PR3B na escala reduzida 1:5. As resistências médias foram determinadas com relação à área bruta efetiva, ou seja, 16,31 cm².

O módulo de deformação (elasticidade secante) corresponde à reta que une os pontos cujas tensões correspondem a 5% e 30% da tensão de ruptura, conforme recomendado pela ABNT NBR 15812-2:2010.

Na tabela 5.4 também são apresentadas algumas relações que poderão ser utilizadas em pesquisas futuras.

- Módulo do prisma x Módulo do bloco intermediário ($E_{pm} \times E_{bm}$);
- Módulo do prisma x Resistência média do prisma ($E_{pm} \times f_{pm}$),
- Módulo do prisma x Resistência média do bloco ($E_{pm} \times f_{bm}$).

Tabela 5. 4 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios em prismas PR2B e PR3B na escala reduzida 1:5.

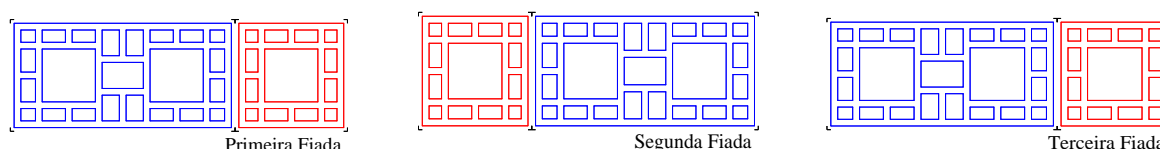
| PR2B | Carga (kN) | Resistência (MPa) |
|-------------------|---------------|-------------------|
| Média | 9,73 | 5,97 |
| Desvio padrão | 4,65 | 2,85 |
| Coef. Variação | 47,8% | |
| Eficiência | 32,98% | |
| PR3B | Carga (kN) | Resistência (MPa) |
| Média | 11,64 | 7,14 |
| Desvio padrão | 5,02 | 3,07 |
| Coef. Variação | 43,1% | |
| Eficiência | 39,4% | |
| E_{pm} (MPa) | 3339,00 | |
| E_{bm} (MPa) | 5.136,60 | |
| E_{pm} / E_{bm} | 0,650 (65%) | |
| E_{pm} / f_{pm} | 467,60 | |
| E_{pm} / f_{bm} | 184,50 | |

5.2 ENSAIOS EM PRISMAS CONTRAFIADOS (PRM3F)

Villar (2005) e Grohaman (2006) realizaram ensaios à compressão axial, na escala natural, em prismas contrafiados com a modulação de um bloco e meio de comprimento com 03 fiadas de altura. Diante disto surgiu a ideia de realizar ensaios em corpos-de-prova na escala reduzida com a mesma modulação para a obtenção da resistência média e do fator de eficiência.

Na figura 5.7 ilustra-se a modulação das fiadas utilizadas para confecção dos prismas PRM3F.

Figura 5. 7 – Modulação dos prismas PRM3F na escala reduzida 1:5.



Nos ensaios, na escala natural, realizados por Villar (2005), o autor obteve diferentes fatores de eficiência de acordo com a resistência média da argamassa utilizada. Os blocos cerâmicos estruturais utilizados pelo autor possuíam as dimensões nominais de 140 x 290 x 190 mm (Largura x Comprimento x Altura).

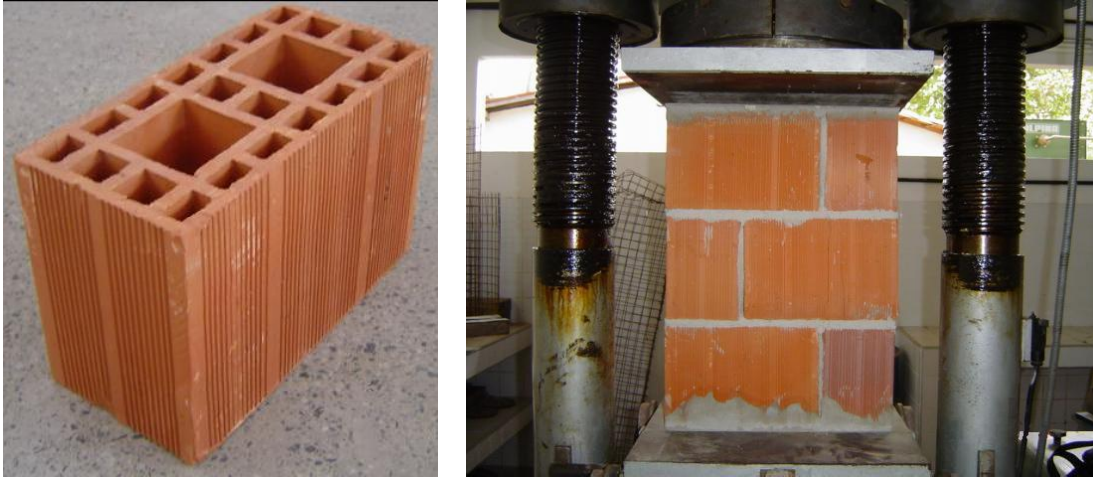
A resistência média dos blocos à compressão axial foi de 14,4 MPa. Na tabela 5.5 apresentam-se os resultados obtidos pelo referido autor.

Tabela 5. 5 – Resultados em prismas contrafiados (VILLAR, 2005).

| Traço da argamassa em volume | Resistência Média - Argamassa MPa | Resistência Média - Prisma Contrafiado (f_{PRM3F}) - MPa | Eficiência (f_b/f_{PRM3F}) |
|---|-----------------------------------|--|--------------------------------|
| T1 (1:0,25:3) | 15,40 | 8,00 | 55% |
| T2 (1:0,5:4,5) | 9,40 | 5,70 | 40% |
| T3 (1:1:6) | 4,70 | 3,60 | 25% |
| T1 / T2 / T3: Diferentes traços de argamassa | | | |
| Resistência média dos blocos (f_b): 14,40 MPa | | | |

Na figura 5.8 ilustra-se o bloco utilizado por Villar (2005) e o prisma PRM3F.

Figura 5. 8 – Blocos e corpos-de-prova utilizados por Villar (2005).



Fonte: (VILLAR, 2005).

Grohman (2006), também realizou ensaios em prismas contrafiados, na escala natural, utilizando blocos cerâmicos com as mesmas dimensões e formato utilizados por Villar (2005). Na figura 5.9 ilustra-se o prisma PRM3F utilizado por Grohman (2006).

Figura 5. 9 – Modelo de prisma contrafiado PRM3F utilizado por Grohmann (2006).



Fonte: (GROHMANN, 2006).

A resistência média dos blocos à compressão axial foi de 13,25 MPa. O referido autor utilizou dois traços de argamassa na confecção dos prismas PRM3F.

Na tabela 5.6 apresentam-se os resultados médios obtidos pelo autor.

Tabela 5.6 – Resultados em prismas contrafiados (GROHMAN, 2006).

| Traço da argamassa em volume | Resistência Média - Argamassa MPa | Resistência Média - Prisma Contrafiado (f_{PRM3F}) - MPa | Eficiência (f_b/f_{PRM3F}) |
|---|-----------------------------------|--|--------------------------------|
| T1 (1:1:5) | 8,31 | 5,56 | 42% |
| T2 (1:0,25:3) | 18,35 | 6,44 | 49% |
| T1 / T2 / T3: Diferentes traços de argamassa | | | |
| Resistência média dos blocos (f_b): 13,25 MPa | | | |

Na presente pesquisa foram confeccionados 10 prismas PRM3F na dimensão de 8,8 x 2,8 x 11,8 cm (Comprimento x Largura x Altura). Todos os componentes utilizados para a confecção foram os caracterizados e descritos anteriormente (argamassa e blocos).

Para a execução dos referidos prismas, foram utilizados gabaritos específicos, permitindo desta forma o controle da verticalidade e das espessuras das juntas horizontais e verticais ($2 \pm 0,6$ mm).

Após a confecção, os corpos-de-prova foram mantidos em ambiente laboratorial e ensaiados à compressão axial aos 28 dias.

Na figura 5.10 ilustram-se alguns detalhes da confecção dos prismas PRM3F na escala reduzida 1:5.

Figura 5.10 – Execução dos prismas PRM3F na escala reduzida 1:5.



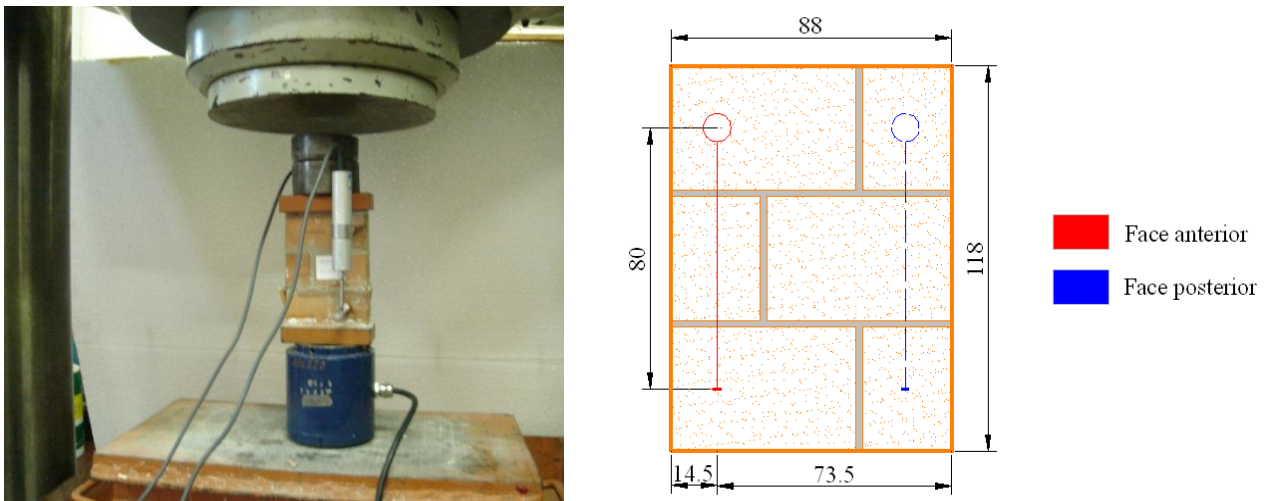
Fonte: Própria.

5.2.1 INSTRUMENTAÇÃO E ENSAIOS NOS PRISMAS CONTRAFIADOS

Para a obtenção do módulo de deformação dos prismas contrafiados realizou-se a instrumentação de 03 corpos-de-prova. As deformações foram obtidas na direção do carregamento, com a utilização de 02 LVDT's dispostos em faces opostas e transversalmente, sendo utilizada a média dos mesmos. A distância fixa entre os pontos de medida de deslocamentos foi de 80 mm.

Os ensaios à compressão axial foram realizados na mesma prensa citada nos ensaios anteriores. A taxa de carregamento foi de 0,1 kN/s, procurando-se manter a tensão em torno de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s. Na figura 5.11 ilustra-se o posicionamento da instrumentação e as dimensões (mm) dos prismas contrafiados.

Figura 5.11 – Detalhe da instrumentação dos prismas PRM3F na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

5.2.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS EM PRISMAS CONTRAFIADOS

Na tabela 5.7 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios em prismas PRM3F na escala reduzida 1:5. As resistências foram determinadas em função da área bruta (24,64 cm²).

Tabela 5.7 – Resultado dos ensaios em prismas contrafiados na escala reduzida 1:5.

| CP's. | Prismas contrafiados - PRM3F (1:5) | | |
|----------------|------------------------------------|-----------------------------|----------------|
| | Carga (kN) | Resistência (MPa) | Módulo (MPa) |
| PRM3F-01 | 5,60 | 2,27 | - |
| PRM3F-02 | 7,60 | 3,08 | - |
| PRM3F-03 | 10,40 | 4,22 | - |
| PRM3F-04 | 11,35 | 4,61 | 2073,77 |
| PRM3F-05 | 13,00 | 5,28 | - |
| PRM3F-06 | 13,50 | 5,48 | - |
| PRM3F-07 | 13,70 | 5,56 | 1688,65 |
| PRM3F-08 | 14,10 | 5,72 | - |
| PRM3F-09 | 15,20 | 6,17 | - |
| PRM3F-10 | 16,57 | 6,72 | 3621,42 |
| Média | 12,10 | f_m = 4,91 | 2461,28 |
| Desvio padrão | 3,41 | 1,39 | 1023,00 |
| Coef. Variação | 28,2% | | 41,6% |

* A resistência foi determinada com relação à área bruta: 24,64 cm².

Para o fator de eficiência, relação entre a resistência média dos prismas contrafiados (PRM3F) e a resistência média dos blocos, foi obtido o valor de **27,13%**.

$$\eta = \frac{f_{\text{prm3f}}}{f_b} = \frac{4,91}{18,10} = 27,13\% \quad \text{Fator de eficiência para os prismas contrafiados;}$$

5.2.3 FORMA DE RUPTURA DOS PRISMAS CONTRAFIADOS

Na figura 5.12 ilustra-se a forma de ruptura para os prismas contrafiados na escala reduzida 1:5. A forma de ruptura foi caracterizada pelo “lascamento” das paredes externas, ruptura esta característica e semelhante à apresentada nos prismas PR2B e PR3B na escala reduzida.

Figura 5. 12 – Forma de ruptura dos prismas contrafiados PRM3F na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

5.3 ENSAIOS EM PAINÉIS NA ESCALA REDUZIDA

5.3.1 GENERALIDADES

A ABNT NBR 8949:1985 preconiza que os corpos-de-prova devem ter as dimensões que os tornem representativos da estrutura real, e que sejam minimizadas as influências das variações das características dos materiais e mão-de-obra na resistência das paredes. Não sendo praticável reproduzir as paredes nas suas dimensões reais é admitido como sendo representativos os corpos-de-prova que tenham dimensões mínimas de 120 x 260 cm (Comprimento x Altura – Escala natural).

Devido ao maior custo e dispêndio nos ensaios em paredes com o pé-direito real, muitos estudos vêm sendo realizados em painéis que possuem a metade do pé-direito.

De acordo com Edgell¹² *et al.* (1990) *apud* Maurício (2005) foram realizados ensaios de paredes com altura de um pé-direito e painéis com altura de meio pé-direito para o estabelecimento de relações entre os resultados.

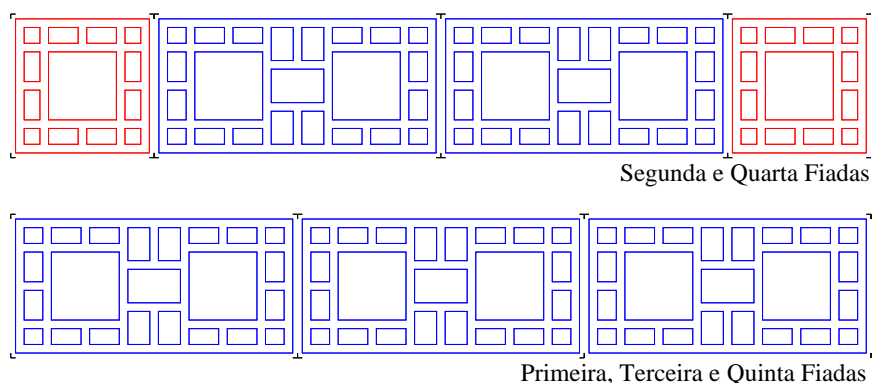
Foi observada pelo autor uma relação linear entre os dois tipos de corpos-de-prova, sendo a resistência nas paredes igual a **0,875** da resistência nos painéis. Esse último modelo foi batizado como “*Wallete*”.

No presente trabalho, os corpos-de-prova na escala reduzida (painéis) foram confeccionados com o comprimento de 03 blocos e na altura de 05 fiadas (PAI3B5F) na dimensão de 17,8 x 2,8 x 19,8 cm (Comprimento x Largura x Altura).

5.3.2 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DOS PAINÉIS NA ESCALA REDUZIDA (1:5)

Todos os painéis na escala reduzida foram confeccionados em ambiente laboratorial pela mesma mão-de-obra. Os componentes utilizados, blocos e argamassa, foram os caracterizados anteriormente. Na figura 5.13 representa-se esquematicamente a modulação das fiadas dos painéis.

Figura 5. 13 – Modulação dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5.



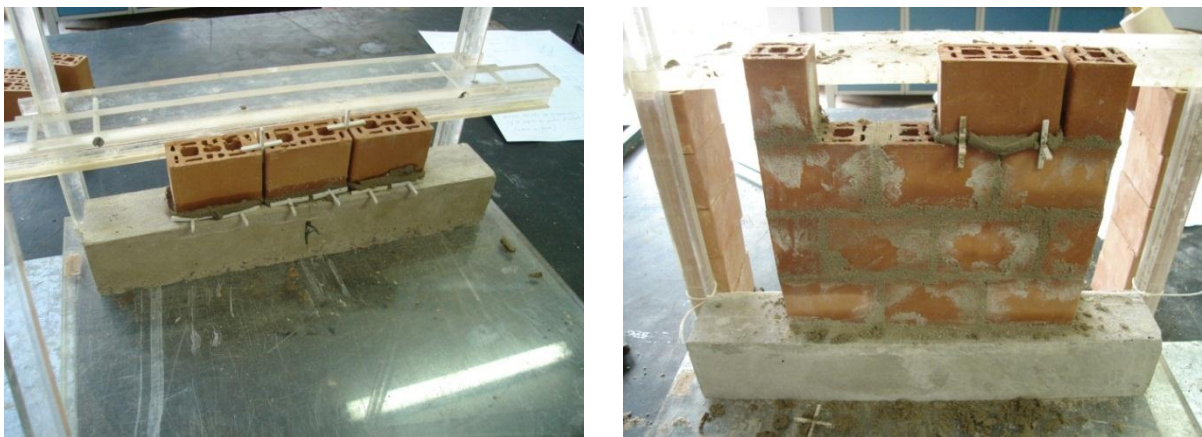
A ABNT NBR 8949:1985 preconiza que “a resistência média das paredes (painéis) deve ser determinada após o ensaio do número mínimo de 03 corpos-de-prova”. No presente trabalho, foram confeccionados e ensaiados 05 painéis.

¹² EDGELL, G. J.; VEKEY, R. C.; DUKES, R. **The compressive strength of masonry specimens.** *Proceedings...* British Masonry Society, 1990. P. 131-135.

Os painéis na escala reduzida foram construídos sobre viga de concreto para possibilitar o transporte até o local de ensaio. No assentamento das unidades, a argamassa utilizada foi disposta sobre todas as paredes externas e internas dos blocos.

Para o controle da verticalidade e das juntas de assentamento utilizou-se um gabarito de acrílico que foi confeccionado para a finalidade específica. As juntas verticais e horizontais, que foram totalmente preenchidas, foram realizadas na espessura de $2 \pm 0,6$ mm, mantendo-se, assim, a proporcionalidade de escala. Na figura 5.14 ilustram-se alguns detalhes da confecção dos painéis na escala reduzida 1:5.

Figura 5. 14 – Detalhes da execução dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

5.3.3 INSTRUMENTAÇÃO E ENSAIO EM PAINÉIS NA ESCALA REDUZIDA (1:5)

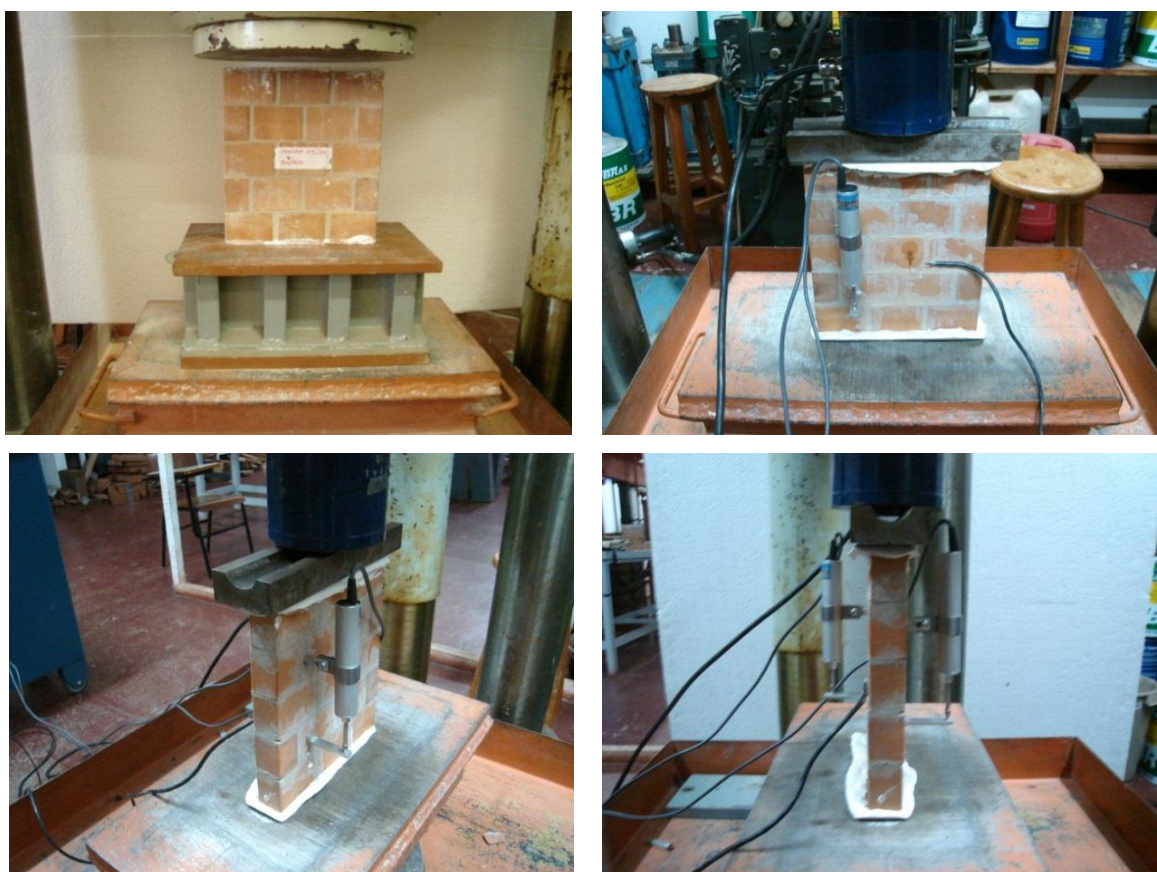
Como forma de instrumentação dos painéis PAI3B5F, na escala reduzida 1:5, foram utilizados 02 LVDT's dispostos em faces opostas e transversalmente, e um extensômetro do tipo PA-060125BA-120L que foi colado no bloco intermediário.

A distância fixa entre os LVDT's, para a obtenção das deformações, foi de 80 mm; sendo que o encurtamento final do painel foi obtido pela média dos 02 LVDT's. Para a realização do ensaio à compressão axial utilizou-se a mesma prensa citada nos ensaios em unidades. A taxa de carregamento foi de 0,01 kN/s.

Para a devida acomodação da instrumentação foram realizadas duas “pré-cargas” com aproximadamente 10% da carga de ruptura estimada. Com o indício de ruptura dos painéis a instrumentação foi retirada para evitar danos, porém as cargas foram incrementadas até a ruptura do corpo-de-prova.

Para o controle do carregamento imposto ao sistema utilizou-se uma célula de carga com capacidade de 500 kN. O histórico de ensaio e o devido controle dos carregamentos e deformações foram realizados com a interligação de todos os equipamentos de instrumentação a um sistema de aquisição de dados conectado a um microcomputador. Na figura 5.15 ilustram-se os detalhes de instrumentação dos painéis PAI3B5F.

Figura 5. 15 – Detalhes da instrumentação dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

Na figura 5.16 ilustra-se o painel PAI3B5F (1:5) e seu respectivo protótipo na escala natural (1:1).

Figura 5. 16 – Painel PAI3B5F na escala natural (1:1) e reduzida (1:5).

Fonte: Própria.

5.3.4 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS EM PAINÉIS (PAI3B5F)

Todos os painéis foram ensaiados à compressão axial após 28 dias. A resistência foi determinada em função da área bruta efetiva (49,84 cm²). Para a obtenção do módulo de deformação foram instrumentados 02 corpos-de-prova e realizada determinação segundo as recomendações da ABNT NBR 15812-2:2010, conforme citado nos ensaios anteriores. Na tabela 5.8 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios à compressão axial nos painéis na escala reduzida 1:5.

Para o fator de eficiência, relação entre a resistência média dos painéis e dos blocos, foi obtido o valor de **35,2%**.

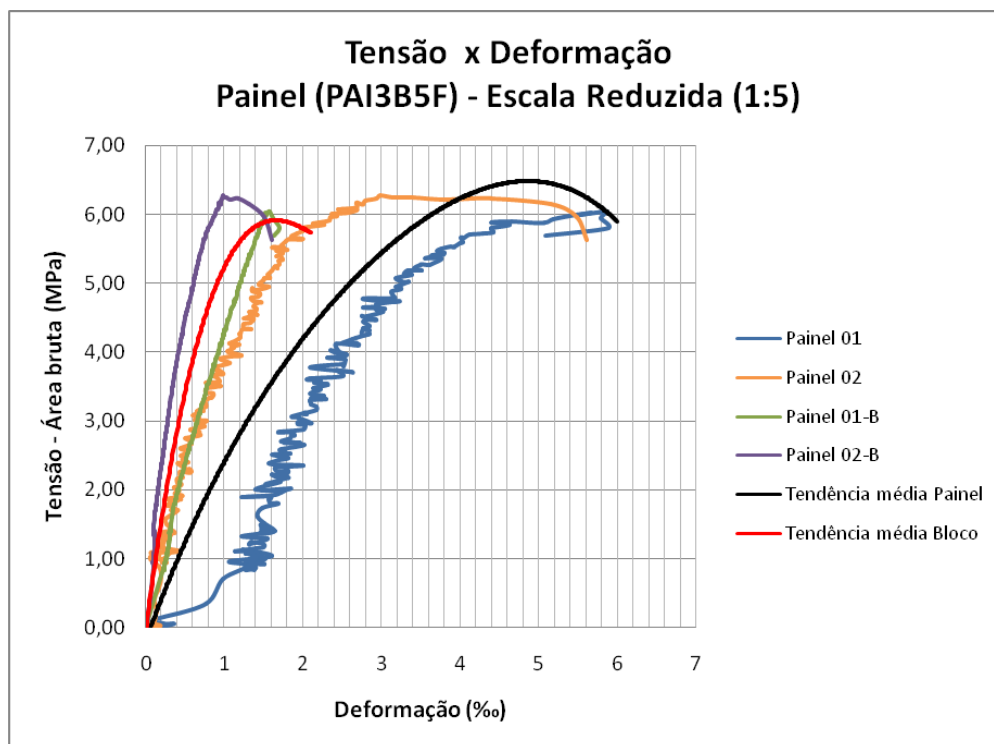
$$\eta = \frac{f_{\text{painel}}}{f_b} = \frac{6,38}{18,10} = 35,2\%$$

Fator de eficiência para os painéis;

Tabela 5. 8 – Resultado dos ensaios em painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5.

| Corpos-de-prova | Carga ruptura (kN) | Resistência (MPa) | Módulo painel (MPa) | Módulo bloco (MPa) |
|-----------------|--------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| PAI3B5F-01 | 28,40 | 5,70 | | - |
| PAI3B5F-02 | 30,11 | 6,04 | 2.737,20 | 5.216,90 |
| PAI3B5F-03 | 31,27 | 6,28 | 5.167,90 | 14.927,56 |
| PAI3B5F-04 | 32,20 | 6,46 | - | - |
| PAI3B5F-05 | 36,90 | 7,40 | - | - |
| Média | 31,78 | f_m= 6,38 | 3.952,55 | 10.072,23 |
| Desvio padrão | 3,20 | 0,64 | 1718,76 | 6866,47 |
| Coef. Variação | 10,10% | | 43,48% | 68,17% |

Ramalho e Corrêa (2003), citam que os valores da eficiência parede-bloco, para paredes executadas com bloco cerâmico e argamassas usuais, variam de 0,20 a 0,50. Estendendo esse conceito para painéis de alvenaria pode-se dizer que o resultado obtido encontra-se dentro do intervalo esperado. Na figura 5.17 ilustra-se o gráfico *tensão x deformação* obtido nos ensaios em painéis e a curva de tendência média.

Figura 5. 17 – Gráfico Tensão x Deformação para os painéis (PAI3B5F).

5.3.5 FORMA DE RUPTURA DOS PAINÉIS NA ESCALA REDUZIDA (1:5)

A forma de ruptura dos painéis na escala reduzida foi comum para todos os corpos-de-prova; ficou caracterizada pelos lascamento e desprendimento das paredes externas dos blocos. Nas figuras 5.18 e 5.19 ilustram-se a forma de ruptura dos painéis na escala reduzida.

Figura 5. 18 – Forma de ruptura dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

Figura 5. 19 – Detalhes da ruptura dos painéis PAI3B5F na escala reduzida 1:5.



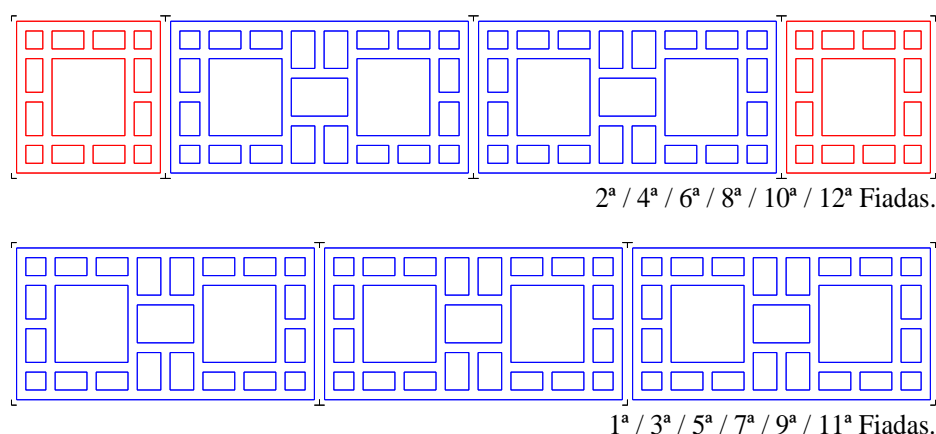
Fonte: Própria.

5.4 ENSAIOS EM PAREDES NA ESCALA REDUZIDA (PAR3B12F)

5.4.1 GENERALIDADES

Com o mesmo objetivo dos ensaios anteriores foram confeccionadas duas paredes (corpos-de-prova) com o comprimento de 03 blocos e na altura de 12 fiadas (PAR3B12F). A dimensão das paredes foi de 2,8 x 48 x 17,8 cm (Largura x Altura x Comprimento). Na figura 5.20 representa-se a modulação das fiadas dos corpos-de-prova.

Figura 5. 20 – Modulação das fiadas das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5.

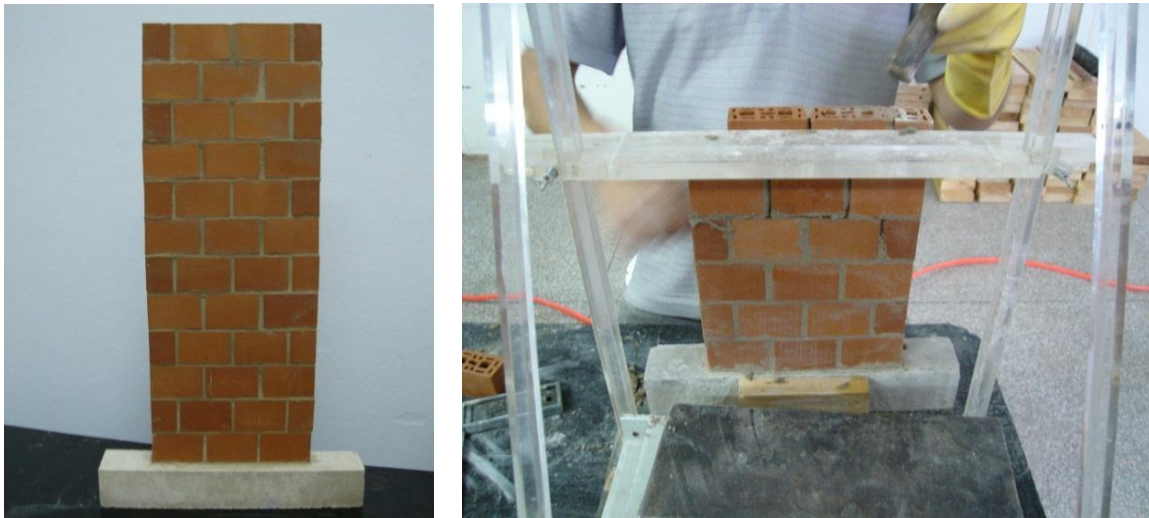


5.4.2 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DAS PAREDES PAR3B12F

As paredes PAR3B12F foram confeccionadas em ambiente laboratorial sobre uma viga de concreto armado para possibilitar o transporte e o posicionamento de ensaio. Todos os corpos-de-prova foram confeccionados pelo autor com os componentes caracterizados anteriormente no capítulo 4 (blocos e argamassa).

Com o intuito de minimizar os efeitos da mão-de-obra, foram tomados todos os cuidados inerentes à execução de paredes, fazendo-se uso de um gabarito específico em acrílico para o controle da verticalidade e das juntas de assentamento.

As juntas verticais e horizontais foram realizadas na espessura de $2 \pm 0,6$ mm com a utilização de espaçadores de PVC; mantendo-se assim a proporcionalidade de escala. Na figura 5.21 ilustram-se alguns detalhes de execução das paredes PAR3B12F.

Figura 5. 21 – Detalhes da execução das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5.

Fonte: Própria.

5.4.2 INSTRUMENTAÇÃO E ENSAIO DAS PAREDES PAR3B12F

Para a obtenção da resistência e da deformabilidade das paredes PAR3B12F foi realizada a instrumentação através de 02 LVDT's com precisão de milésimos de milímetros. Os LVDT's foram fixados em cada face da parede, de forma transversal, para a determinação dos deslocamentos na direção normal à junta de assentamento.

O módulo de deformação do bloco intermediário pertencente à parede foi obtido através da instrumentação por extensômetros elétricos. Os LVDT's foram fixados tomando-se o cuidado em reduzir a área de contato.

Os transdutores foram ligados a um sistema de aquisição de dados conectado a um microcomputador para a obtenção e acompanhamento do histórico de ensaio. Para o devido posicionamento da instrumentação foram utilizados gabaritos de madeira.

Os ensaios à compressão axial foram realizados com a mesma prensa citada para os ensaios em unidades. A taxa de carregamento foi de 0,01 kN/s.

Todos os corpos-de-prova foram ensaiados após 28 dias contados a partir do término da elevação. Antes da realização dos ensaios os corpos-de-prova foram submetidos a dois carregamentos sucessivos de aproximadamente 10% da carga de ruptura estimada. Na figura 5.22 ilustram-se alguns detalhes da instrumentação das paredes PAR3B12F na escala reduzida (1:5).

Figura 5. 22 – Detalhes da instrumentação das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5.

Fonte: Própria.

5.4.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA AS PAREDES PR3B12F

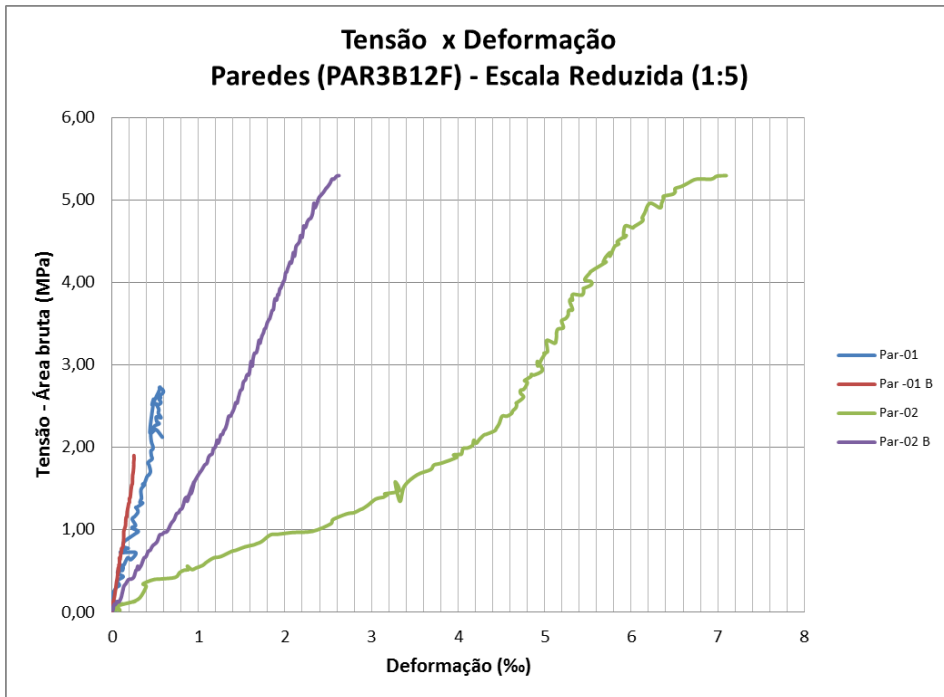
Na tabela 5.9 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios à compressão axial para as paredes PAR3B12F. A resistência média foi determinada em função da área bruta efetiva (49,84 cm²). O módulo de deformação foi determinado segundo as recomendações da ABNT NBR 15812-2:2010 (5% a 30%).

Tabela 5. 9 – Resultado dos ensaios em paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5.

| Paredes | Carga ruptura (kN) | Resistência (MPa) | Módulo (MPa) |
|----------------|--------------------|---------------------------|--------------|
| PAR3B12F-01 | 13,61 | 2,73 | 3805 |
| PAR3B12F-02 | 26,40 | 5,30 | 2317 |
| Média | 20,00 | f_m=4,02 | 3061 |
| Desvio padrão | 9,05 | 1,82 | 1052 |
| Coef. Variação | 45,26% | | 34,37% |

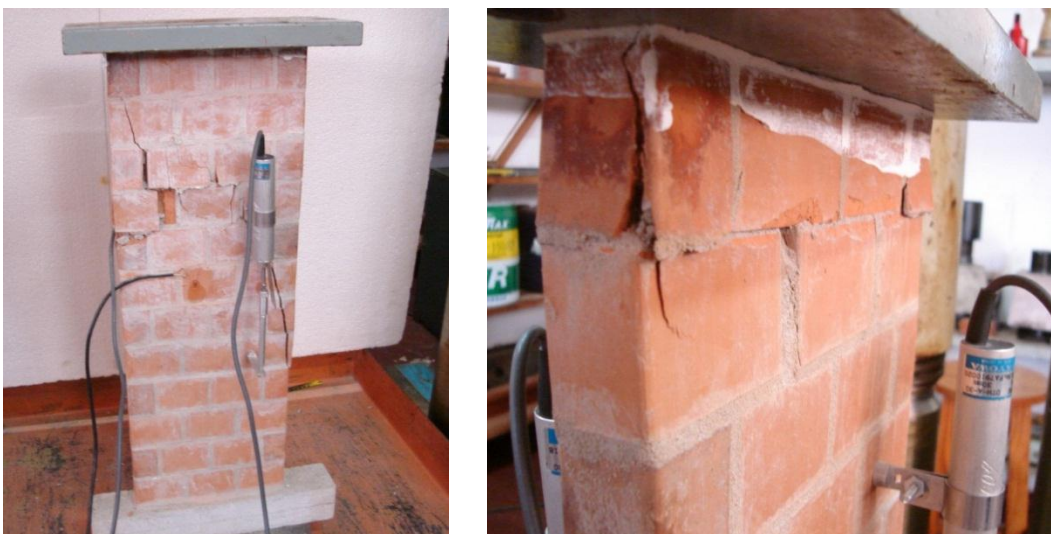
Para o fator de eficiência, relação entre a resistência média das paredes e dos blocos, foi obtido o valor de 22,2 %. Na figura 5.23 ilustra-se o gráfico de *tensão x deformação* para as paredes PAR3B12F.

$$\eta = \frac{f_{\text{PAR3B12F}}}{f_b} = \frac{4,02}{18,10} = 22,2 \%$$

Figura 5. 23 – Gráfico *tensão x deformação* das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5.

5.4.4 FORMA DE RUPTURA DAS PAREDES PAR3B12F

Na figura 5.24 ilustra-se a forma de ruptura para as paredes PAR3B12F. A forma de ruptura foi caracterizada pelo surgimento de trincas ao longo da altura da parede, e posterior lascamento das paredes externas do bloco. Pode-se observar a concentração de tensões no topo da parede.

Figura 5. 24 – Forma de ruptura das paredes PAR3B12F na escala reduzida 1:5.

Fonte: Própria.

5.5 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ALVENARIA

Na tabela 5.10 apresenta-se um resumo de todos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da alvenaria na escala reduzida 1:5.

Tabela 5. 10 – Resumo dos resultados obtidos na caracterização da alvenaria na escala reduzida 1:5.

| Corpos-de-prova | Escala (1:5) | Relação E/f_m |
|---|--|-----------------|
| Prisma de 02 blocos (PR2B) | $f_m = 5,97$ MPa Eficiência = 33,0 % | - |
| Prisma de 03 blocos (PR3B) | $f_m = 7,14$ MPa $E = 3339,00$ MPa Eficiência = 39,4 % | 467,6 |
| Prisma contrafiado (PRM3F) | $f_m = 4,91$ MPa $E = 2461,28$ MPa Eficiência = 27,1 % | 501,3 |
| Painel de 03 blocos e 05 fiadas (PAI3B5F) | $f_m = 6,38$ MPa $E = 3952,50$ MPa Eficiência = 35,3 % | 619,5 |
| Paredes de 03 blocos e 12 fiadas (PAR3B12F) | $f_m = 4,02$ MPa $E = 3061,00$ MPa Eficiência = 22,2 % | 761,4 |

Conforme já citado a ABNT NBR 15812-1:2010 descreve que a resistência característica à compressão simples da alvenaria (f_k) deve ser determinada com base no ensaio de paredes (ABNT NBR 8949), ou ser estimada como 70% da resistência característica de compressão simples de prismas (f_{pk}), ou 85% da pequena parede (f_{ppk}).

Considerando o exposto pela referida norma e fazendo uso dos resultados obtidos em todos os corpos-de-prova; temos que os resultados em prismas PR2B são os que mais se aproximam dos resultados obtidos para as paredes PAR3B12F. Ressaltando-se que foram ensaios apenas dois corpos-de-prova PAR3B12F.

6

TRABALHO EXPERIMENTAL MODELO FÍSICO REDUZIDO

6 TRABALHO EXPERIMENTAL: MODELO FÍSICO REDUZIDO

Andolfato (2006), com o objetivo de analisar a interação entre paredes de alvenaria estrutural com amarração direta e a real distribuição das ações verticais nestes tipos de sistemas estruturais, realizou estudos teóricos e experimentais durante a construção de um edifício em alvenaria estrutural de quatro pavimentos constituído com blocos de concreto. O edifício foi construído no município de Ilha Solteira, localizado no interior do estado de São Paulo.

Para atingir o objetivo proposto, o pesquisador monitorou a distribuição das ações verticais da edificação, ao longo da construção, através de células de carga (blocos instrumentados). Após o término da construção, o autor realizou “provas de carga”, com a inserção de carregamentos uniformemente distribuídos nas lajes, em diferentes ambientes (Figura 6.1).

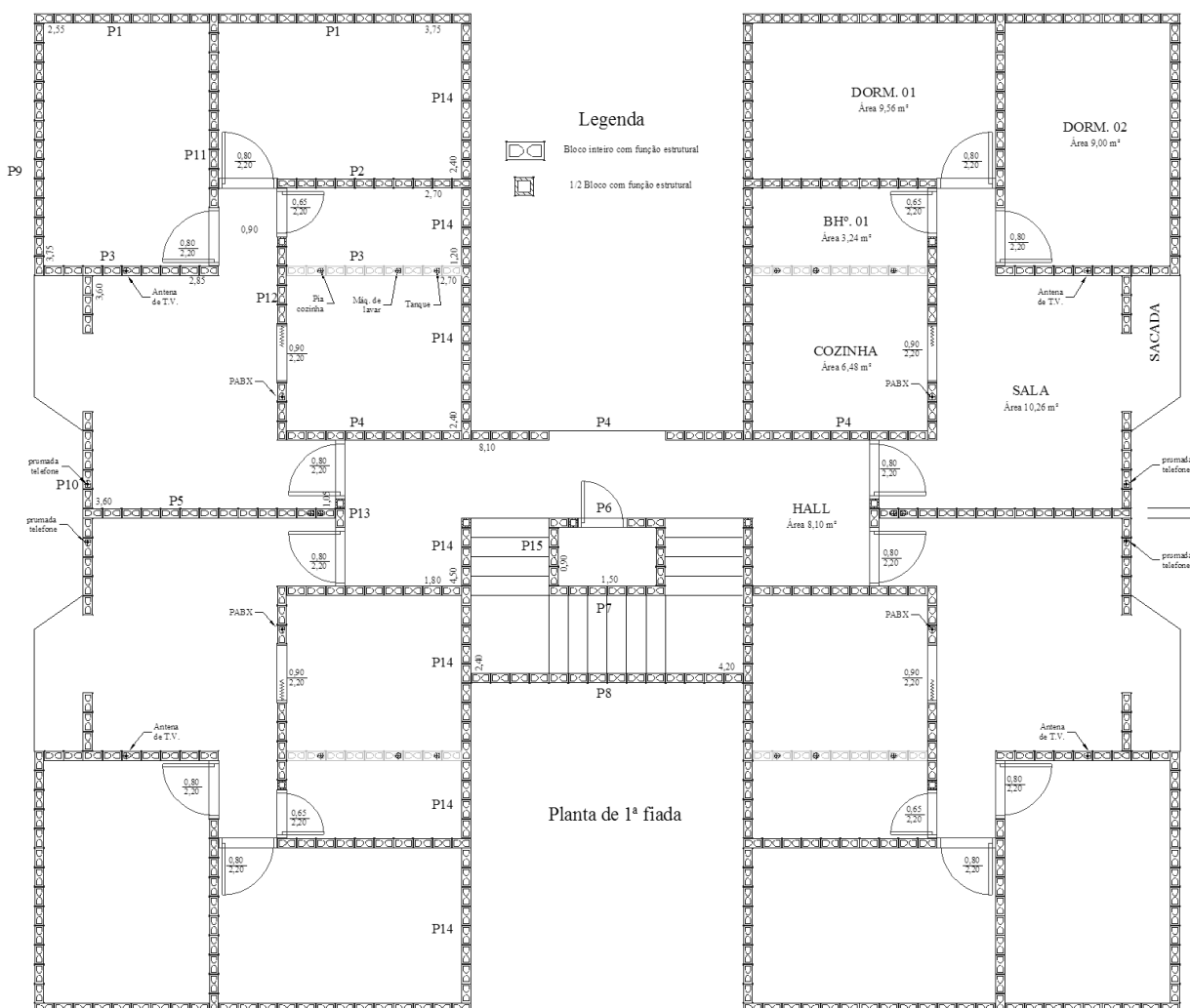
Figura 6. 1 – Forma de aplicação de carregamento uniformemente distribuído utilizado por Andolfato (2006).



Fonte: (ANDOLFATO, 2006).

Na figura 6.2 apresenta-se a planta de primeira fiada da edificação analisada por Andolfato (2006).

Figura 6. 2 – Planta de 1ª fiada da edificação analisada por Andolfato (2006).



Fonte: (ANDOLFATO, 2006).

Diante da citada pesquisa e com o conhecimento das dificuldades encontradas na realização de ensaios em protótipos surgiu a ideia de construir um modelo físico reduzido que pudesse representar a escala natural e proporcionar a análise da distribuição das ações verticais ao longo da altura da edificação.

Neste capítulo apresentam-se as etapas e os procedimentos adotados para a construção do modelo físico reduzido, na escala 1:5, bem como a descrição detalhada dos recursos e cuidados utilizados na construção.

6.1 ARQUITETURA DO MODELO FÍSICO REDUZIDO

O intuito era desenvolver em escala reduzida a mesma arquitetura da edificação analisada por Andolfato (2006), porém o desenvolvimento se tornaria dispendioso e as dificuldades inerentes poderiam interferir em futuras análises. Diante do exposto, optou-se por adotar uma arquitetura mais “simples”, de forma a facilitar a execução do modelo físico reduzido e, assim, reduzir parâmetros que pudessem influenciar na análise proposta.

Na figura 6.3 apresenta-se a planta baixa arquitetônica do modelo físico reduzido na qual é possível identificar a disposição das paredes, as suas dimensões lineares (eixo a eixo - metro), bem como as aberturas existentes.

O modelo foi construído em quatro pavimentos, sendo que a planta arquitetônica é composta por três “ambientes”, um *hall*, e um espaço “vazio” destinado à escadaria. Em sua totalidade, projeção em planta, o modelo físico reduzido possui a área de 3,69 m². Salienta-se que todos os componentes utilizados na construção foram os caracterizados e descritos no capítulo 4.

Na tabela 6.1 são apresentadas as áreas das lajes de todos os ambientes do modelo físico reduzido no qual foram inseridos os carregamentos uniformemente distribuídos.

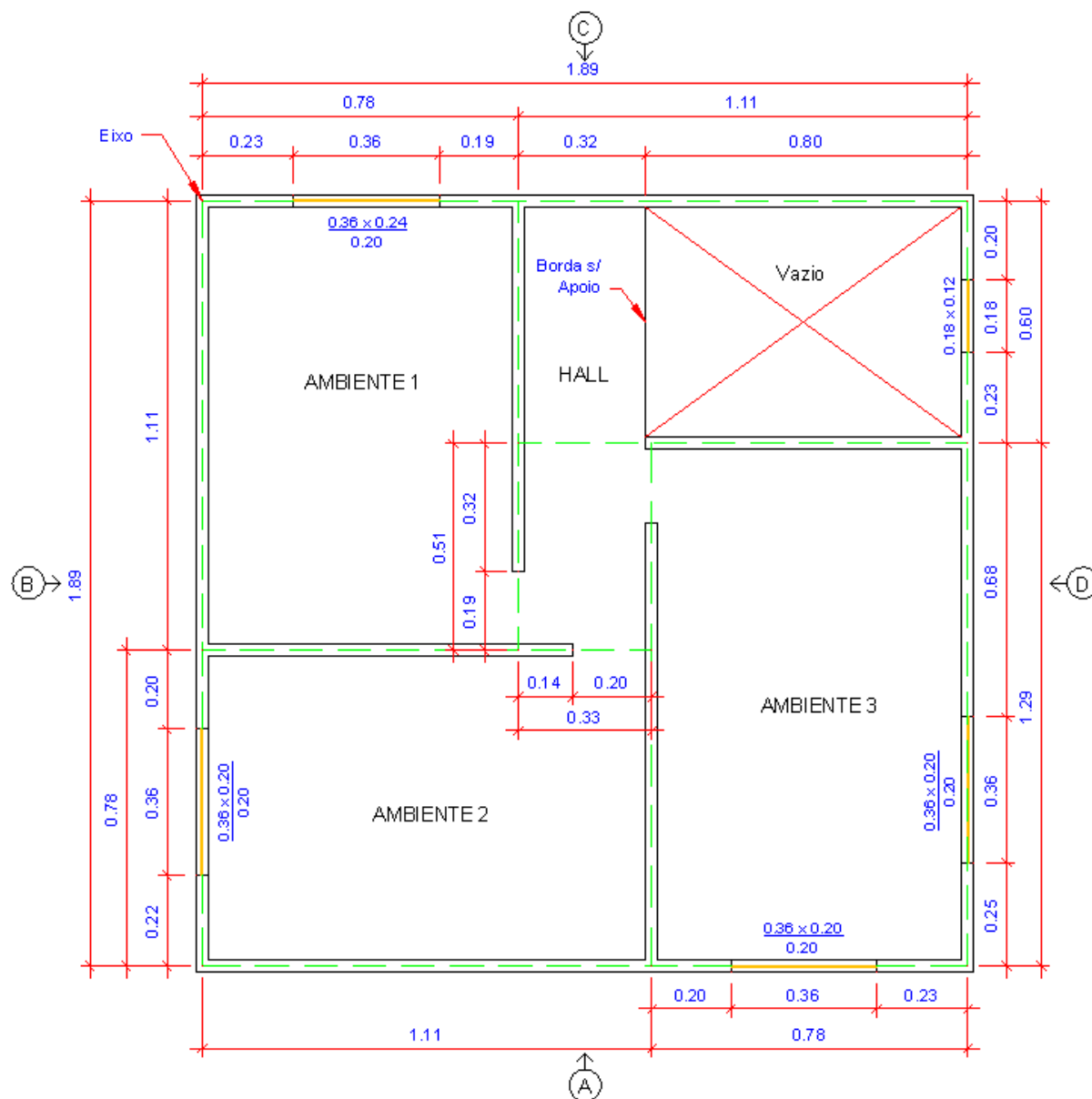
Tabela 6. 1 – Quadro de áreas das lajes do modelo físico reduzido.

| Lajes | Áreas (m ²) |
|---------------------|-------------------------|
| Laje 1 (Ambiente 1) | 0,810 |
| Laje 2 (Ambiente 2) | 0,810 |
| Laje 3 (Ambiente 3) | 0,945 |
| Laje de Cobertura | 3,460 |

Na figura 6.4 representa-se a elevação do modelo físico reduzido conforme as vistas externas “A”, “B” e “C” indicadas em planta baixa (Figura 6.3).

Na figura 6.5 representa-se a elevação “D” que difere das demais citadas. Destaca-se que a abertura correspondente ao local da escadaria inicia-se no segundo pavimento.

Figura 6.3 – Planta baixa arquitetônica e dimensões (m) do modelo físico reduzido na escala 1:5.



Fonte: Própria.

Figura 6. 4 – Vistas A, B e C do modelo físico reduzido.

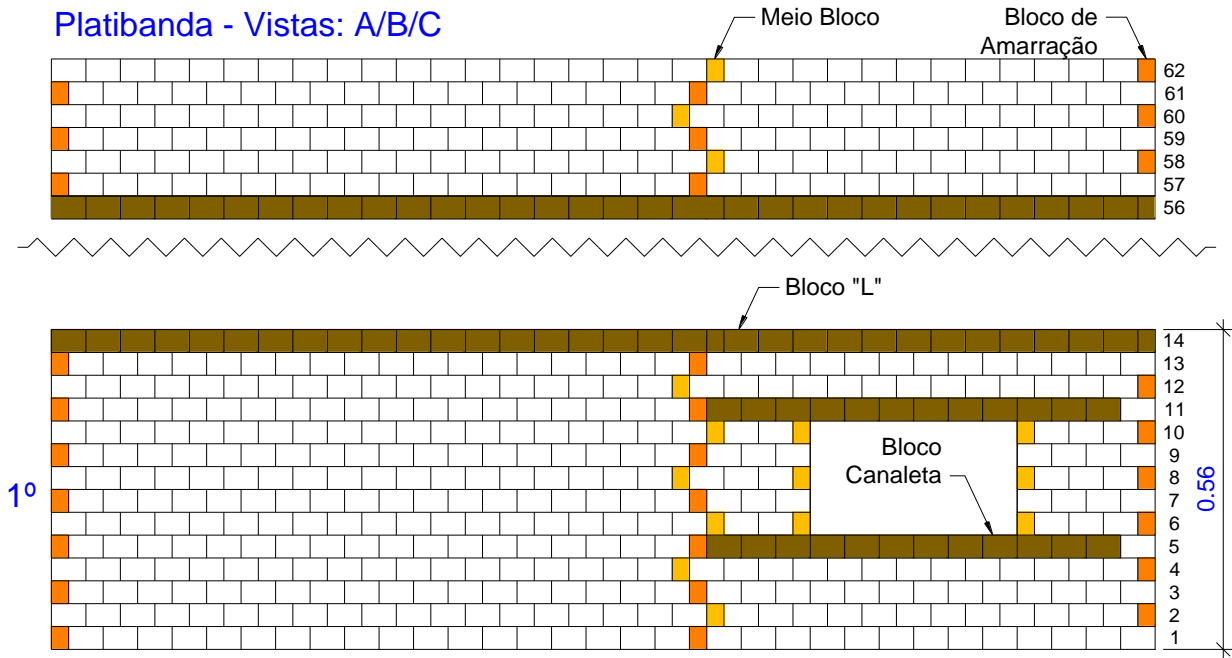
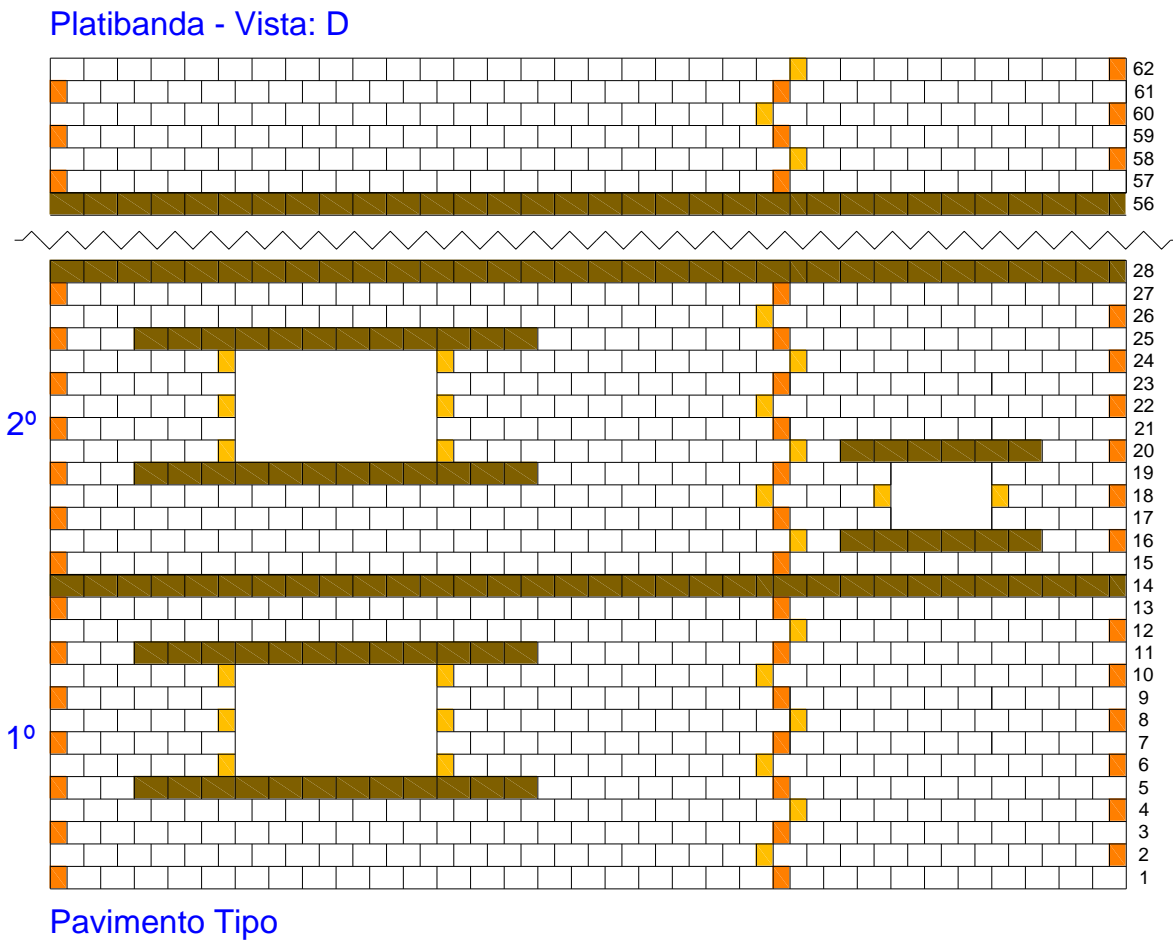


Figura 6. 5 – Vista "D" do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Através das representações das elevações externas (Vistas “A”, “B”, “C”, e “D”), é possível observar a disposição das vergas (11ª fiada), e das contravergas externas (5ª fiada), bem como o nível de execução da laje (14ª fiada). Além disso, também é possível denotar que acima do quarto pavimento foi construída uma platibanda na altura de 06 fiadas (Fiadas: 57 a 62).

O modelo foi concluído com um total de 62 fiadas de altura, totalizando 305 cm, levando-se em consideração a elevação da base da estrutura que possui 57 cm. Cada pavimento foi composto por 13 fiadas, sendo que a 14ª fiada de cada pavimento foi construída, externamente, com a utilização de blocos cerâmicos do tipo “L”, que serviram de fôrma para a execução das lajes maciças.

Outros detalhes de execução serão apresentados posteriormente. As modulações de fiadas do modelo físico reduzido encontram-se no apêndice B (caderno de fiadas). Apesar da modulação com três juntas verticais à prumo, ou seja, sem a utilização de blocos especiais, pode-se constatar que não houve o surgimento de trincas. Na figura 6.6 ilustram-se as vistas “C” e “D” do modelo físico reduzido

Figura 6. 6 – Vistas “C” e “D” do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Para evitar a ocorrência de erros e variações nos parâmetros de execução do modelo físico reduzido, o mesmo foi construído pelo autor deste trabalho com o auxílio de um ajudante por um período de 08 meses.

O rendimento diário de execução foi de aproximadamente uma fiada, tempo este que se justifica por todos os detalhes e cuidados inerentes a trabalhos na escala reduzida.

A partir da metade do 2º pavimento (20ª fiada) houve a necessidade da montagem de andaimes. Em sua totalidade, foram utilizadas 10.742 unidades (blocos).

Figura 6. 7 – Modelo físico reduzido após a conclusão (Vistas “A” e “D”).



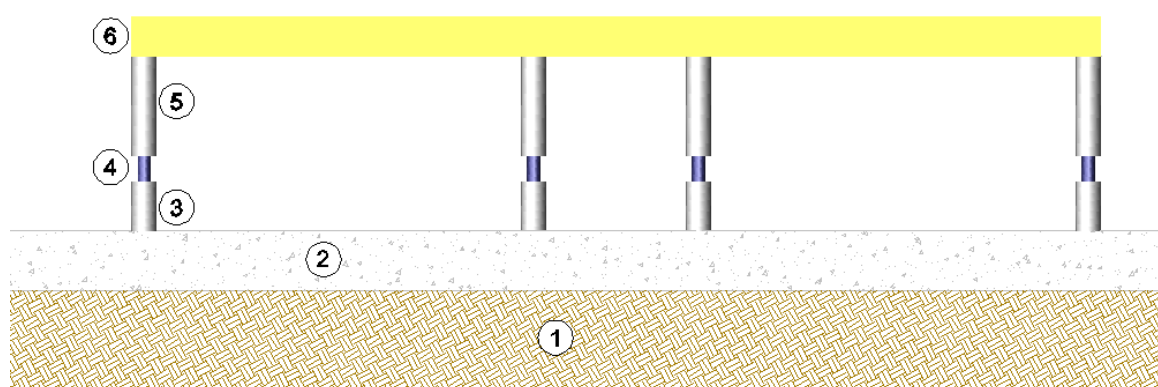
Fonte: Própria.

6.2 EXECUÇÃO DO MODELO FÍSICO REDUZIDO

6.2.1 PREPARAÇÃO DO TERRENO, FUNDAÇÃO E BASE

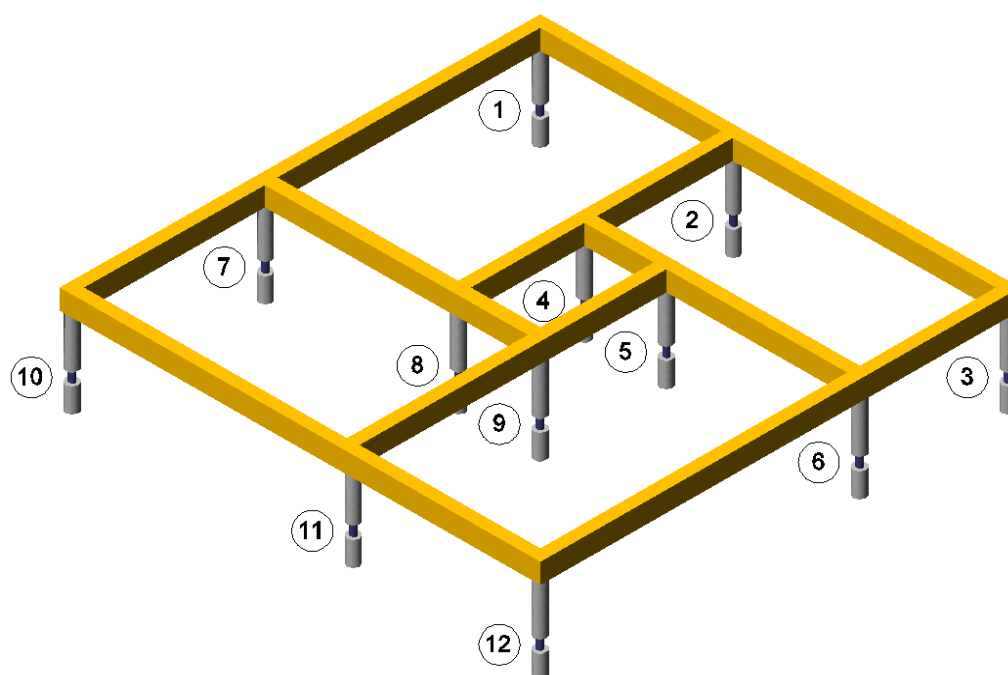
Para proporcionar o devido monitoramento das cargas, em nível de “fundação”, o modelo físico reduzido foi construído sobre um sistema diferenciado de sustentação. Através das figuras 6.8 e 6.9 representa-se o sistema adotado.

Figura 6. 8 – Representação esquemática dos componentes da base de sustentação do modelo físico reduzido.



- | | |
|--|--|
| 1 - Solo natural compactado sem camada vegetal | 4 - Célula de carga (Liga de alumínio) |
| 2 - Laje maciça (radier) | 5 - Tubo de aço galvanizado 1.1/2" |
| 3 - Barra roscada (1") | 6 - <i>Metalon</i> estrutural (Aço SAE 1010) |

Figura 6. 9 – Detalhe genérico da base de sustentação do modelo físico reduzido.



Conforme apresentado na figura 6.8, pode-se observar que foi realizada uma fundação do tipo “radier” que serviu de sustentação para os doze pontos de apoio da estrutura metálica (grelha).

A estrutura metálica, que serviu como alicerce às paredes do modelo físico reduzido foi composta por dois *metalons* soldados de 40 x 80 mm (Largura x Altura) com chapa em aço estrutural do tipo SAE 1010 na espessura de 2 mm; compondo desta forma um conjunto com medidas externas de 80 x 80 mm.

Para evitar a ação das intempéries foi realizada a pintura da estrutura metálica de sustentação com a utilização de zarcão, tomando-se o cuidado de não realizar a pintura sob a base de assentamento da primeira fiada; não interferindo desta forma na aderência da argamassa.

Na figura 6.10 podem-se observar os detalhes relatados e o não preenchimento do sulco criado na região de solda entre os dois perfis, proporcionando desta forma uma melhor aderência entre a argamassa da 1ª fiada e a estrutura metálica. Também é possível observar que a demarcação das fiadas foi realizada através de gabaritos externos que delineavam a face das paredes.

Figura 6. 10 – Detalhes da estrutura metálica de sustentação do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Para o preparo da base do radier foi realizada a retirada de toda a camada vegetal existente, e posteriormente realizada a devida compactação e nivelamento do solo. O radier foi construído em concreto armado com a finalidade de se criar um bloco indeformável para os apoios da estrutura. As dimensões do radier foram de 300 x 300 x 12 cm (Largura x Comprimento x Altura). Para efeitos de avaliação da rigidez dessa base, observa-se que na escala natural a espessura do radier corresponde a 60 cm.

O concreto utilizado para confecção do “radier” foi realizado no traço em massa de 1 : 1,2 : 1,8 : 0,22 (cimento : areia : pedrisco : a/c), com resistência média obtida de **27,00** MPa. Após a realização do “colchão” de brita, foi disposta uma armadura (tela soldada) na altura mediana do radier (6,0 cm), composta por uma malha de aço (7,5 x 7,5 cm) no diâmetro de 5,0 mm.

Como pontos de apoio para a estrutura de base do modelo, foram utilizadas barras roscadas (comercial) no diâmetro de 1” (01 polegada). Na extremidade inferior destas barras foram soldadas porcas sextavadas para aumentar a área de contato com o concreto.

Para o devido posicionamento dos pontos de apoio (barras roscadas) foram utilizados gabaritos de madeira construídos com tábuas de 15 cm de largura na espessura de 2 cm (Figura 6.11).

Para cada ponto de apoio do modelo físico reduzido foi instalada uma célula de carga para a obtenção das deformações provenientes do incremento de carregamentos. Salienta-se que as citadas células de carga foram desenvolvidas na UNESP (NEPAE) para a finalidade única.

Para a passagem da fiação das células de carga foi utilizada uma tubulação em PVC no diâmetro de 50 mm, interligada ao centro de medições, este localizado em uma sala acondicionada do laboratório de extensometria pertencente ao NEPAE.

Sobre o local destinado à execução do modelo foi construída uma cobertura provisória em estrutura de madeira e telhas metálicas para evitar a ação de intempéries durante a construção; posteriormente esta cobertura foi substituída por uma estrutura metálica definitiva em tubos de aço e lona. Nas figuras 6.11 e 6.12 ilustram-se algumas imagens referentes à execução da base para o modelo físico reduzido, como as fôrmas do radier, o gabarito em madeira para o posicionamento dos pontos de apoio, a tubulação em PVC para recebimento dos cabos das células de carga, e a estrutura provisória em madeira e telhas metálicas.

Figura 6. 11 – Detalhes do radier do modelo físico reduzido.

Fonte: Própria.

Figura 6. 12 – Detalhes do radier do modelo físico reduzido e da cobertura provisória em madeira e telhas metálicas.

Fonte: Própria.

6.2.2 INSTRUMENTAÇÃO DA BASE DO MODELO FÍSICO REDUZIDO

Conforme já citado, os doze pontos de apoio do modelo físico foram instrumentados com células de carga para possibilitar a obtenção das deformações pontuais, e conseqüentemente para a determinação das reações de apoio.

A ideia inicial foi instrumentar barras roscadas de 1" para a realização das células de carga através da colagem de extensômetros elétricos. Contudo, após alguns ensaios iniciais de compressão axial pode-se observar que a deformabilidade do material não foi adequada devido à alta rigidez dessas barras (Figura 6.13).

Diante dos resultados insatisfatórios procurou-se, então, reduzir a seção transversal das barras de aço de forma a aumentar a deformabilidade e reduzir a rigidez. Após várias tentativas, pode-se constatar que a estabilidade da estrutura ficaria comprometida com a reduzida seção "ideal".

Figura 6.13 – Detalhes da elaboração das primeiras células de carga para a base do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Diante dos primeiros resultados dos ensaios e das circunstâncias encontradas, optou-se por utilizar outro tipo de material que pudesse ter uma maior deformabilidade e a resistência necessária para suportar as ações impostas ao modelo, sem que a estabilidade do conjunto fosse comprometida.

Após algumas análises decidiu-se utilizar uma liga de alumínio (Duralumínio¹³). A liga de alumínio foi adquirida em barra cilíndrica maciça, sendo posteriormente torneada para a confecção das células de carga.

Primeiramente foi confeccionada apenas uma célula de carga “base” para a obtenção das características específicas do material e também para a avaliação da eficácia. Na figura 6.14 ilustram-se algumas imagens das etapas de fabricação das células de carga.

Figura 6. 14 – Detalhes da confecção das células de carga para a instrumentação da base do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Após o torneamento das células de carga foi realizada a preparação das superfícies para a colagem dos extensômetros elétricos em ponte completa.

¹³ Liga metálica de alumínio (95%), cobre, manganês e magnésio.

Para cada célula de carga foram utilizados dois extensômetros do tipo PA-13-125TG-120L, específicos para elementos em alumínio.

Na colagem dos extensômetros foram tomados os cuidados inerentes, como a preparação adequada da superfície e do adesivo, a força ideal de compressão na colagem, e todo o processo de secagem em estufa com temperatura e tempo pré-estabelecidos.

Após a colagem dos extensômetros, foram realizados ensaios de averiguação e comprovação do devido funcionamento das células de carga. Após os testes de funcionalidade, foi realizada a devida impermeabilização com a utilização de borracha de silicone, evitando-se desta forma a presença e ação da umidade. Na figura 6.15 ilustram-se alguns detalhes da confecção das células de carga.

Figura 6. 15 – Detalhes da execução das células de carga.



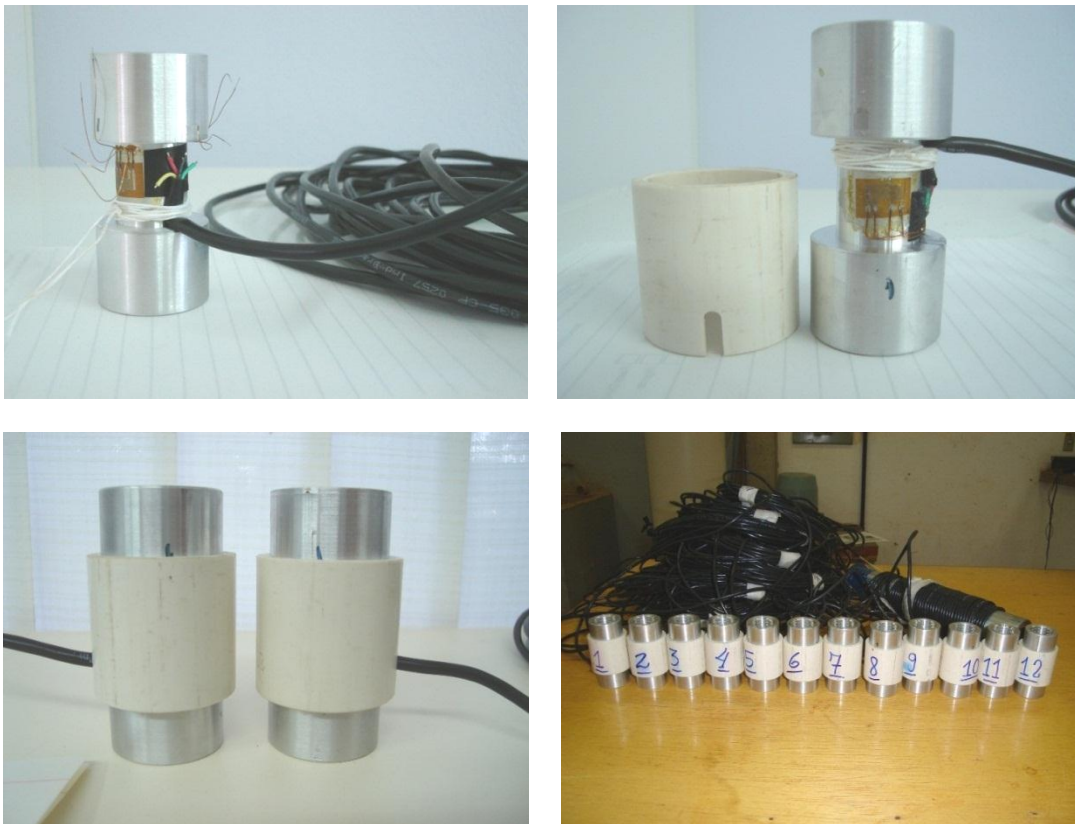
Fonte: Própria.

Nos terminais dos extensômetros foram soldados cabos do tipo AF 4 x 26 AWG (E), com isolamento e proteção para evitar interferências nas leituras de deformações.

Para evitar danos aos cabos e conexões, os mesmos foram devidamente fixados nas células de carga com a utilização de “cordoneê” e fita isolante de alta fusão.

Após nova verificação do funcionamento das células, realizou-se a devida proteção dos extensômetros contra a umidade e ao impacto, utilizando-se tubos de PVC torneados e silicone para o isolamento (Figura 6.16).

Figura 6. 16 – Detalhes do isolamento dos extensômetros das células de carga.



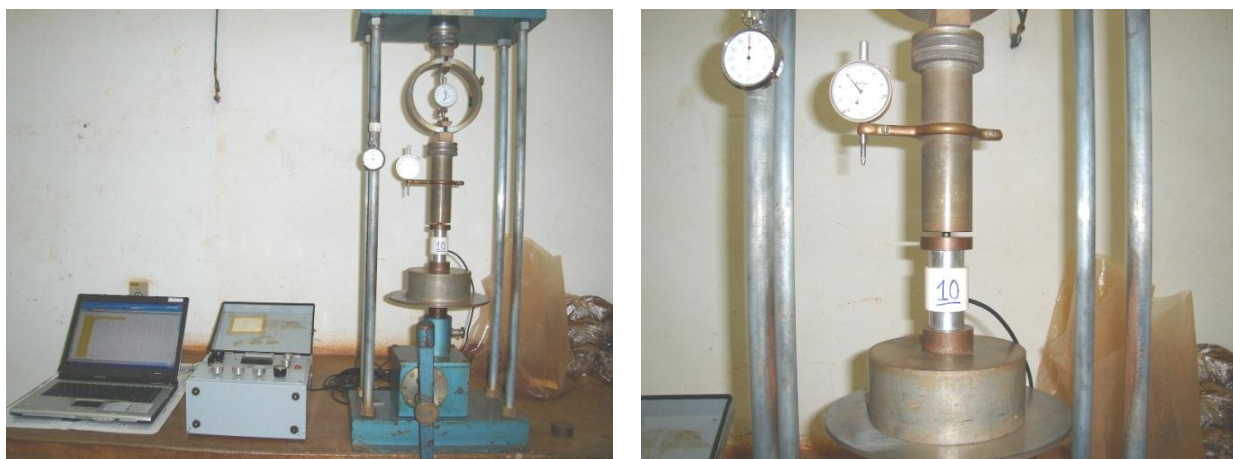
Fonte: Própria.

Todas as células de carga foram calibradas individualmente para a obtenção de suas constantes. Para a calibração, fez-se uso de uma máquina de solos pertencente ao laboratório de engenharia civil da UNESP de Ilha Solteira (Figura 6.17).

Utilizando-se a calibração da máquina de solos (constante do anel) foi possível obter a constante específica de cada célula de carga, sendo que para isto foi necessária a realização de várias etapas de carregamentos.

O carregamento máximo para cada célula de carga foi de 10,14 kN. Na figura 6.17 podem-se observar alguns detalhes da calibração.

Figura 6. 17 – Detalhes da calibração das células de carga.



Fonte: Própria.

Na tabela 6.2 apresentam-se os resultados obtidos na calibração das células de carga. Os resultados indicam a carga (10^{-2} kN) necessária para a deformação (1 *microstrain* = $1\mu\epsilon=10^{-6}$ m/m).

Tabela 6. 2 – Constante das células de carga.

| Célula | Constante | Célula | Constante |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 01 | 0,00515 | 07 | 0,00497 |
| 02 | 0,00519 | 08 | 0,00526 |
| 03 | 0,00519 | 09 | 0,00511 |
| 04 | 0,00517 | 10 | 0,00514 |
| 05 | 0,00504 | 11 | 0,00514 |
| 06 | 0,00510 | 12 | 0,00519 |

Após a confecção, identificação, testes de funcionalidade, e calibração das células de cargas, foi realizado o seu devido posicionamento para a posterior execução da base metálica de sustentação do modelo físico reduzido.

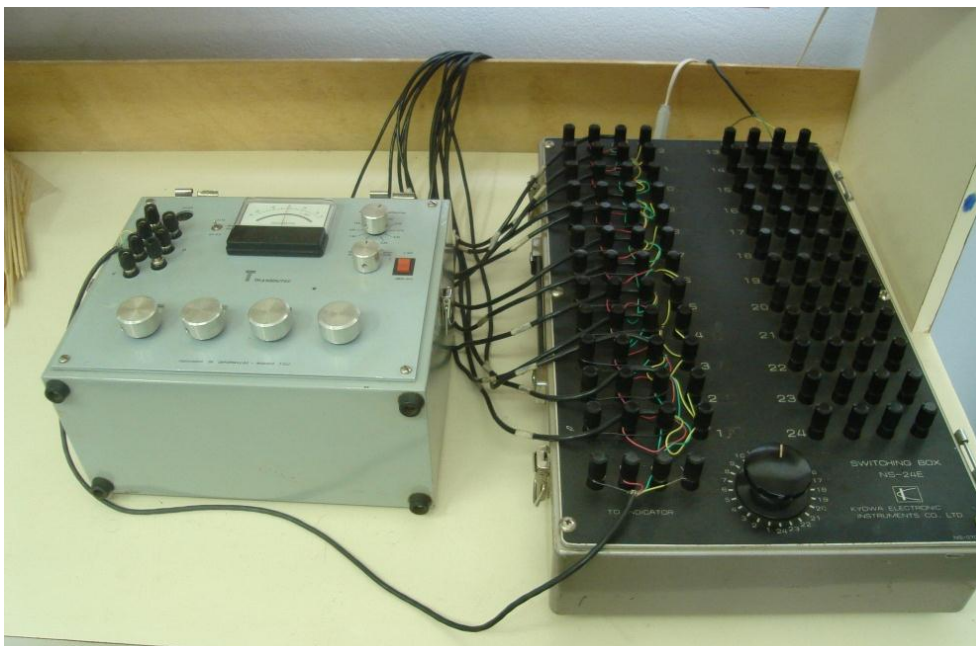
As células foram dispostas sobre as barras roscadas, e estas foram chumbadas no “radier” (concretagem). Na confecção das células tomou-se o cuidado de realizar roscas internas para a fixação adequada na região inferior e superior das barras roscadas.

As barras roscadas, na parte superior, foram revestidas por um tubo de aço galvanizado de uma polegada e meia de diâmetro (1½”). No topo de cada do tubo galvanizado foram soldadas bases de aço (chapa metálica com 80 x 80 x 5 mm - Largura x Comprimento x Espessura), para posterior soldagem do *metal on* estrutural (base metálica).

Todas as fiações das células de carga foram passadas pelo tubo de PVC e direcionadas ao laboratório de extensometria no NEPAE, sem emendas para evitar possíveis interferências nas posteriores leituras.

No laboratório de extensometria, as células de carga foram ligadas a uma caixa seletora de 24 canais (*Switching Box*) da marca *Kyowa Eletronic Instruments* (NS-070745), cedida a empréstimo pelo laboratório de Engenharia Civil da CESP (Figura 6.18).

Figura 6. 18 – Detalhes da caixa seletora e do indicador de deformação.



Fonte: Própria.

A caixa seletora foi interligada a um indicador de deformação (Modelo T.832) da *Transdutec*, possibilitando desta forma que as leituras de deformações fossem obtidas com a prévia seleção do canal desejado. Este mesmo indicador de deformação foi utilizado na realização da calibração das células de carga. Para evitar leituras com variações de resultados, o indicador de deformação foi utilizado com corrente contínua (baterias).

Para o controle das variações de temperatura utilizou-se a célula “base”, que foi posicionada no ambiente de ensaio sem a ação de carregamentos e interligada ao sistema descrito. Desta forma, toda deformação por ela registrada foi considerada como consequência da variação de temperatura. Na figura 6.19 ilustram-se os detalhes da base de sustentação do modelo físico reduzido.

Figura 6. 19 – Detalhes da instrumentação da base no modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Pode-se observar, em destaque, que abaixo do tubo de sustentação foi previsto, em cada ponto de apoio, um sistema composto com porca sextavada que possibilitou o nivelamento da base e que posteriormente, em pesquisas futuras, será utilizada pelo autor em estudos experimentais de recalques diferenciados.

Na figura 6.20 ilustra-se a base do modelo físico reduzido nivelado e preparado para o início do assentamento da primeira fiada.

Figura 6. 20 – Detalhes da base de sustentação do modelo físico reduzido

Fonte: Própria.

6.2.3 EXECUÇÃO DO MODELO FÍSICO REDUZIDO - ASSENTAMENTO

Antes do início da execução das paredes do modelo físico reduzido foi verificado o nivelamento da base de sustentação com a utilização de “mangueira de nível”. Para o assentamento da primeira fiada foram realizadas as devidas demarcações das faces das paredes com a utilização de gabaritos de madeira, cantoneiras metálicas (3/4” x 1/8”) e linha de *nylon*.

A verificação das medidas de modulação foi efetuada antes do início do assentamento, dispendo-se os blocos cerâmicos reduzidos sobre a base com a utilização de espaçadores de juntas de 2 mm (PVC); mantendo-se, assim, a proporcionalidade com a escala natural (Figura 6.20).

Para o controle do prumo e da verticalidade das paredes, foram utilizados *metalons* (20 x 30 mm), fixados com rebites de alumínio e aparafusados em sua base. Os *metalons* foram dispostos nas extremidades da base e serviram como escantilhões.

Para garantir a posição de verticalidade dos *metalons* foi realizada a fixação de suas extremidades superiores na estrutura provisória da cobertura em madeira (Figura 6.21).

Figura 6. 21 – Detalhes do controle da verticalidade na construção do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Nos escantilhões foram demarcadas todas as fiadas a serem executadas com a utilização de duas linhas de *nylon*, mantendo-se o nivelamento e o alinhamento das fiadas. Este procedimento foi necessário para manter não só a verticalidade do conjunto, mas também a das próprias unidades (blocos cerâmicos).

Ressalta-se que estas demarcações foram realizadas a cada fiada, com a utilização de grosa, evitando-se possíveis desnivelamentos e acúmulos de imperfeições no assentamento dos blocos em fiadas sucessivas.

Para o assentamento das unidades utilizou-se a argamassa caracterizada e descrita no capítulo 5. Durante toda a execução do modelo fez-se uso do mesmo traço de argamassa e da mesma mão-de-obra.

O controle do traço em massa foi realizado através da mistura a seco dos componentes, sendo adicionada a água (em massa) apenas no momento de sua utilização. Após a mistura, os componentes foram acondicionados em sacos plásticos para evitar a presença de umidade.

Para evitar a perda de umidade da argamassa durante a execução do modelo, após a mistura da argamassa de amassamento, tomou-se o cuidado de dispor, sobre o recipiente de argamassa, panos que foram mantidos permanentemente úmidos.

Antes do assentamento dos blocos, foi realizado o prévio umedecimento da face, com o intuito de reduzir a ação de absorção da água de amassamento. O prévio umedecimento foi realizado dispondo os blocos em um recipiente com lâmina de água de aproximadamente 5 mm.

No assentamento das unidades, a argamassa foi disposta sobre toda a face das unidades, devido à dificuldade na realização do assentamento na escala reduzida.

Após o assentamento de cada fiada, foi realizado o rejuntamento das juntas verticais com a utilização de recipiente específico (bisnaga). O rejuntamento foi realizado com o total preenchimento das juntas e com a mesma argamassa de assentamento, tendo sido necessário o acréscimo de água para aumentar a fluidez. Depois de realizado o rejuntamento, foi retirado o excesso de argamassa dos blocos com a utilização de uma esponja umedecida.

Na figura 6.22 ilustra-se a base de sustentação preparada para o assentamento da primeira fiada. Podem-se observar as linhas de *nylon* que serviram para a demarcação das faces das paredes, para o nivelamento, e para o controle dos alinhamentos.

Figura 6. 22 – Detalhes da demarcação da primeira fiada do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Todas as amarrações entre paredes no modelo físico reduzido foram executadas em amarração direta, conforme modulação (Apêndice B).

Nas aberturas de paredes (janelas e portas) foram realizadas vergas e contravergas com a utilização de blocos do tipo canaleta, que, após assentados e rejuntados, foram limpos, para a retirada de rebarbas de argamassa, e grauteados. Como suporte à execução das vergas foi utilizado madeira e isopor.

Nas vergas foram utilizadas duas barras “corridas” de aço inox no diâmetro de 2,3 mm (arame 12). Já para as contravergas, utilizou-se apenas uma barra corrida de mesmo diâmetro.

O graute utilizado para o preenchimento das vergas e contravergas foi o caracterizado no capítulo 5, com traço em massa correspondente a 1 : 2,48 : 2,52 : 1,02; e resistência média aproximada de **13,0 MPa**.

Durante o grauteamento das vergas e contravergas, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20 cm) para a análise da resistência à compressão. Nas figuras 6.23 e 6.24 ilustram-se alguns detalhes de execução das contravergas.

Figura 6. 23 – Detalhes da execução de contravergas no primeiro pavimento do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Figura 6. 24 – Detalhes das contravergas grauteadas no primeiro pavimento do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Nas figuras 6.25 e 6.26 ilustram-se alguns detalhes da execução de vergas do primeiro pavimento do modelo físico reduzido. Podem-se observar as duas barras de arame utilizado, o detalhe de escoramento com a utilização de madeira e isopor, além das canaletas internas utilizadas sobre as aberturas (vãos de portas).

Figura 6. 25 – Detalhes da execução de vergas no primeiro pavimento do modelo físico.



Fonte: Própria.

Figura 6. 26 – Detalhes da execução de vergas e contravergas, para os vão de janelas e portas do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Apesar de algumas imagens ilustrarem nas paredes “o excesso de argamassa” salienta-se que as mesmas foram limpas através de lixamento. Posteriormente, as faces das paredes externas foram impermeabilizadas com resina incolor à base de água.

Conforme já citado, cada pavimento foi construído com 14 fiadas, sendo a última fiada do tipo canaleta (bloco “L”) que serviu de forma externa para a laje. Durante a assentamento das fiadas foi necessária a correção da altura de alguns blocos cerâmicos, mediante a raspagem (Figura 6.27).

Figura 6.27 – Detalhes do ajuste da altura dos blocos cerâmicos na escala reduzida 1:5.



Fonte: Própria.

6.2.4 EXECUÇÃO DA LAJE DO MODELO FÍSICO REDUZIDO

Inicialmente a intenção foi confeccionar as lajes do modelo físico reduzido como um único elemento pré-moldado para posteriormente realizar o assentamento sobre a 13^a fiada. Diante da dificuldade encontrada em içar a laje pré-moldada (aproximadamente 3,00 kN), e até mesmo em realizar uma perfeita junção entre o pré-moldado e as paredes, optou-se em executá-las como laje maciça moldada no próprio local.

Após o assentamento da 13^a fiada foi realizado o assentamento dos blocos tipo “L” sobre as paredes externas que serviram de fôrma externa para a laje. Conforme já descrito anteriormente esses blocos são os blocos tipo “canaleta” com uma das abas laterais cortada.

Nas fiadas internas foi realizado o nivelamento e o fechamento dos vazios de topo dos blocos com a utilização de argamassa de assentamento. O desnível citado nas paredes internas se deve à espessura da junta de assentamento horizontal e da espessura da parede inferior dos blocos tipo “L”.

As fôrmas das lajes foram realizadas com a utilização de *madeirite* (10 mm) e, sobre ele, isopor na espessura de 30 mm. O escoramento de suporte ao carregamento inicial da laje (peso próprio) foi realizado através de pontaletes de madeira. Para possibilitar a retirada dos escoramentos e da fôrma em *madeirite* através das aberturas das janelas, foi necessária a confecção das fôrmas e pontaletes em dimensões reduzidas. Na figura 6.28 podem-se observar alguns detalhes citados.

Figura 6. 28 – Detalhes dos escoramentos para a confecção da laje do modelo físico reduzido.



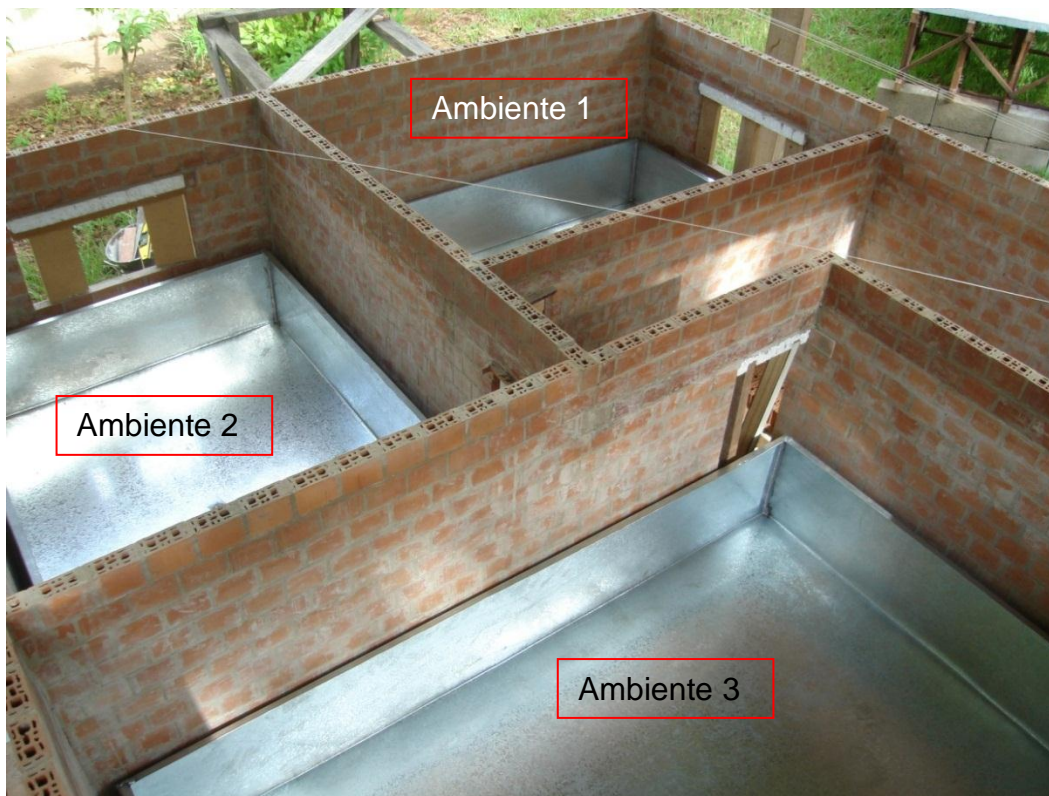
Fonte: Própria.

Durante a execução do modelo físico reduzido, foi realizado o posicionamento de “bandejas” metálicas (recipiente) em cada ambiente a ser introduzido o carregamento uniformemente distribuído. Os recipientes foram confeccionados em chapa galvanizada nº 28 (Figura 6.28).

Nas referidas “bandejas” foram deixados orifícios para facilitar o esvaziamento. No entanto, o descarregamento se apresentou moroso, optando-se por realiza-lo com uma bomba de sucção. A laje do último pavimento (cobertura) foi realizada sem o “espaço vazio” detalhado no projeto arquitetônico (escadaria), possibilitando a aplicação de carregamento em toda a área.

Na figura 6.29 ilustram-se os recipientes metálicos que foram dispostos sobre as lajes do modelo físico reduzido para a aplicação dos carregamentos e a denominação dos ambientes.

Figura 6. 29 – Detalhes dos recipientes para a aplicação de carregamentos uniformemente distribuídos no modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Na figura 6.30 pode-se observar a face superior das fôrmas das lajes do modelo físico reduzido. Para a confecção das fôrmas, em placas de isopor, foi necessário emenda-las com a utilização de “palitos” de madeira e cola especial para isopor; posteriormente foi utilizada fita adesiva para vedar as aberturas e assim evitar a perda de água na concretagem das lajes.

Conforme já citado, a laje maciça do modelo físico reduzido, armada em duas direções, foi construída no próprio local e apoiada sobre todas as paredes do modelo.

Figura 6. 30 – Detalhes da fôrma para as lajes do modelo físico reduzido.

Fonte: Própria.

Como ferragem foi utilizada uma malha de 7,5 x 7,5 cm no diâmetro de 3,4 mm, procurando manter a proporcionalidade na taxa de armadura em comparação com lajes na escala natural. Sobre as paredes internas foram dispostas armaduras negativas (Figuras 6.31 e 6.32).

Para evitar que a ferragem fosse disposta diretamente sobre a fôrma de isopor, foram utilizados espaçadores de PVC de 5 mm garantindo desta forma o cobrimento; as armaduras positivas foram apoiadas nas paredes externas através de ganchos à 90°. Toda a ferragem negativa também foi dobrada com ganchos a 90° em suas extremidades.

O graute utilizado para a laje foi o caracterizado no capítulo 4, realizado no traço 1 : 1,2 : 1,8 : 0,55; com resistência média de **27,5 MPa**.

Para a concretagem das lajes foi necessária a utilização de dois *metalons* externos que foram afixados nos *metalons* de controle da verticalidade e serviram de guia para o desempenamento da laje, evitando a quebra dos blocos cerâmicos do tipo “L”. Após a concretagem da laje, foi realizada a cura do graute durante 3 dias.

Figura 6. 31 – Detalhes da armadura positiva para as lajes do modelo físico reduzido.

Fonte: Própria.

Figura 6. 32 – Detalhes da armadura negativa para as lajes do modelo físico reduzido.

Fonte: Própria.

Os escoramentos das lajes foram mantidos até a execução da laje imediatamente superior. Após o levantamento do 1º pavimento, foi necessária a utilização de andaimes para dar continuidade ao assentamento das unidades.

No decorrer da construção do 4º pavimento houve a substituição da cobertura provisória por uma cobertura permanente, adquirida com verbas do fundo de reserva da bolsa de pesquisa (Figura 6.33).

Figura 6. 33 – Detalhes da construção do quarto pavimento do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Após a conclusão do assentamento da última fiada (Fiada 62), foi realizada a limpeza externa dos blocos cerâmicos com a utilização de palha de aço. Conforme já citado, após a limpeza foi aplicada, com rolo poliéster, uma resina incolor a base de água para impermeabilizar as paredes externas.

Ainda nesta etapa, foram inseridas sobre o radier, quatro cantoneiras metálicas, dispostas nas elevações externas do modelo, como forma de prevenção a possíveis ações horizontais, mantendo-se assim a estabilidade do conjunto (Figura 6.34).

Salienta-se que as cantoneiras fixadas no *radier*, conforme citado anteriormente, não tiveram contato com a base de sustentação (grelha), e que, durante os ensaios experimentais, foi realizada a devida instrumentação da base para o acompanhamento do possível surgimento de flechas nas vigas de sustentação (Figura 6.35).

Não foi constatado, durante a realização de todas as etapas de ensaios, o deslocamento vertical da estrutura de sustentação.

Após a conclusão da construção do modelo físico foi realizada a pintura da face superior do “radier”, a identificação externa dos níveis (lajes) com adesivos, e a localização das vergas e contravergas externas.

Figura 6. 34 – Detalhes das cantoneiras metálicas na base do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

Figura 6. 35 – Instrumentação para verificação do possível surgimento de flechas na grelha de sustentação do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.



ENSAIOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS MODELO FÍSICO REDUZIDO

7 ENSAIOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS: MODELO FÍSICO REDUZIDO

Neste capítulo apresentam-se os procedimentos adotados para a realização dos ensaios experimentais no modelo físico reduzido e os respectivos resultados obtidos.

7.1 PROCEDIMENTOS GERAIS DE ENSAIOS

Os ensaios experimentais no modelo físico reduzido consistiram na inserção de carregamentos uniformemente distribuídos sobre as lajes dos pavimentos em diferentes locais (ambientes) e níveis.

Através da inserção de carregamentos procurou-se determinar, experimentalmente, o caminho da distribuição das ações verticais com a obtenção das reações de apoio dos pontos de sustentação da grelha.

A determinação das reações de apoio apenas foram possíveis devido à instrumentação com células de carga previamente calibradas. A cada alteração de carregamento foram realizadas leituras de deformações e, por conseguinte, determinado o percentual de carga para o respectivo ponto de apoio.

Os carregamentos uniformemente distribuídos foram aplicados com a inserção de água nos recipientes metálicos (“bandejas”) que foram dispostos nos diferentes “ambientes” de cada pavimento, conforme descrito no capítulo anterior (Figura 7.1).

Todo o processo de aplicação de cargas foi realizado pelas aberturas externas das paredes, e fez-se uso de uma bomba de sucção convencional para facilitar o descarregamento.

Inicialmente todos os carregamentos impostos foram controlados com a pesagem da água; posteriormente foram realizadas demarcações de níveis nos recipientes metálicos, o qual facilitou a realização dos ensaios subsequentes.

Figura 7. 1 – Detalhes da inserção de carregamentos no modelo físico reduzido.

Fonte: Própria.

Ressalta-se que em todos os ambientes dos pavimentos foram aplicados apenas carregamentos uniformemente distribuídos. A taxa considerada foi limitada em função da capacidade do recipiente metálico, porém se aproximou dos valores mínimos de cargas verticais para edifícios residenciais indicados pela ABNT NBR 6120:2000 (1,50 kN/m²); carregamento suficiente para sensibilizar a instrumentação adotada (células de carga).

Nos ambientes denotados como 1 e 2 (Figura 7.2) foi aplicado o carregamento de 1,05 kN (105 litros de água), resultando na carga uniformemente distribuída de 1,30 kN/m². O ambiente denotado como 3 possui área superior aos outros dois ambientes, sendo necessário a aplicação de 1,23 kN, mantendo-se, dessa forma, o mesmo carregamento uniformemente distribuído para os três ambientes citados.

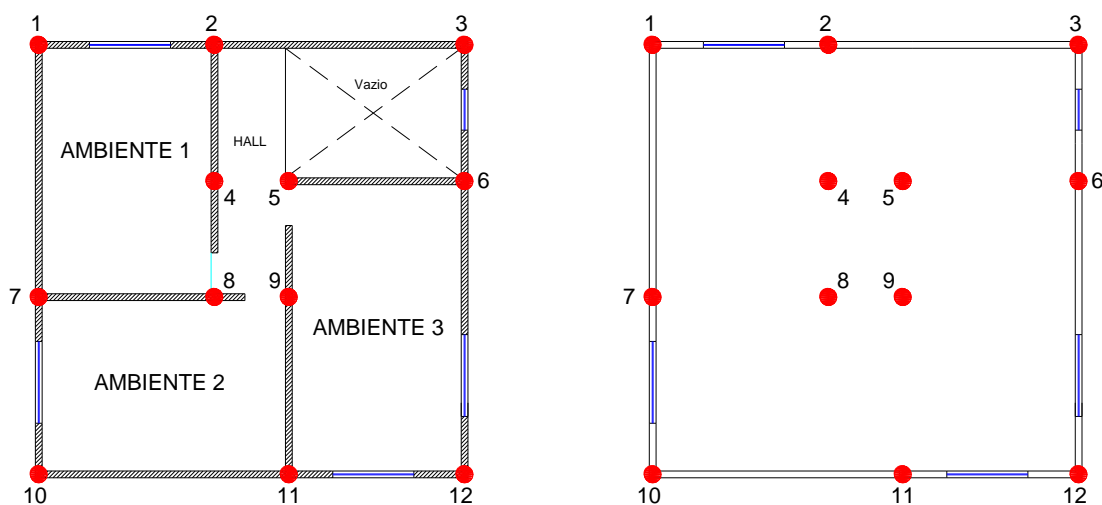
Na laje de cobertura foram analisados três taxas de carregamentos para a análise da distribuição das ações; sendo de 1,50 kN (0,43 kN/m²), de 3,00 kN (0,87 kN/m²), e de 4,5 kN (1,30 kN/m²), este último corresponde à taxa utilizada nos ambientes. Na tabela 7.1 apresenta-se o resumo dos carregamentos referentes a cada ambiente com suas respectivas áreas e cargas uniformemente distribuídas.

Conforme apresentado no capítulo anterior, as paredes do 1º pavimento do modelo físico reduzido foram apoiadas sobre uma estrutura metálica, formando um sistema do tipo grelha. A grelha possui doze pontos de apoio que foram instrumentados através das células de carga para a obtenção das deformações e consequentemente das reações de apoio que foram determinadas percentualmente.

Tabela 7. 1 – Resumo dos carregamentos uniformemente distribuídos aplicados nas lajes do modelo físico reduzido.

| Laje | Área (m ²) | Carregamento (kN) | Carga uniformemente distribuída (kN/m ²) |
|-------------------|------------------------|-------------------|--|
| Ambiente 1 | 0,810 | 1,05 | 1,30 |
| Ambiente 2 | 0,810 | 1,05 | |
| Ambiente 3 | 0,945 | 1,23 | |
| Laje da Cobertura | 3,460 | 1,50 | 0,43 |
| | | 3,00 | 0,87 |
| | | 4,50 | 1,30 |

Para exemplificar os procedimentos de ensaio, apresenta-se a planta baixa, dos pavimentos e da cobertura do modelo físico reduzido, com a identificação e numeração dos respectivos pontos de apoio e ambientes (Figura 7.2).

Figura 7. 2 – Planta baixa dos pavimentos e da cobertura do modelo físico reduzido com a identificação dos respectivos pontos de apoio e ambientes.

Para direcionamento dos ensaios experimentais, realizados no modelo físico reduzido, apresenta-se o resumo das etapas que serão realizadas posteriormente. O ambiente foi aqui representado pela letra “A” e o nível a ser carregado pela letra “N”, formando desta forma a combinação do ambiente com o nível de carregamento (A_nN_n). Foram realizadas cinco etapas de ensaios, os quais são descritos abaixo.

- ✓ 1ª etapa: Carregamento de todos os ambientes 1.
 - Carregamento do ambiente 1 no primeiro nível (A1N1);
 - Carregamento do ambiente 1 no segundo nível (A1N2);
 - Carregamento do ambiente 1 no terceiro nível (A1N3).

- ✓ 2ª etapa: Carregamento de todos os ambientes 2.
 - Carregamento do ambiente 2 no primeiro nível (A2N1);
 - Carregamento do ambiente 2 no segundo nível (A2N2);
 - Carregamento do ambiente 2 no terceiro nível (A2N3).

- ✓ 3ª etapa: Carregamento de todos os ambientes 3.
 - Carregamento do ambiente 3 no primeiro nível (A3N1);
 - Carregamento do ambiente 3 no segundo nível (A3N2);
 - Carregamento do ambiente 3 no terceiro nível (A3N3).

- ✓ 4ª etapa: Carregamento dos níveis.
 - Carregamento do primeiro nível (A3N1, A2N1, A1N1);
 - Carregamento do segundo nível (A3N2, A2N2, A1N2);
 - Carregamento do terceiro nível (A3N3, A2N3, A1N3).

- ✓ 5ª etapa: Carregamento da laje de cobertura.

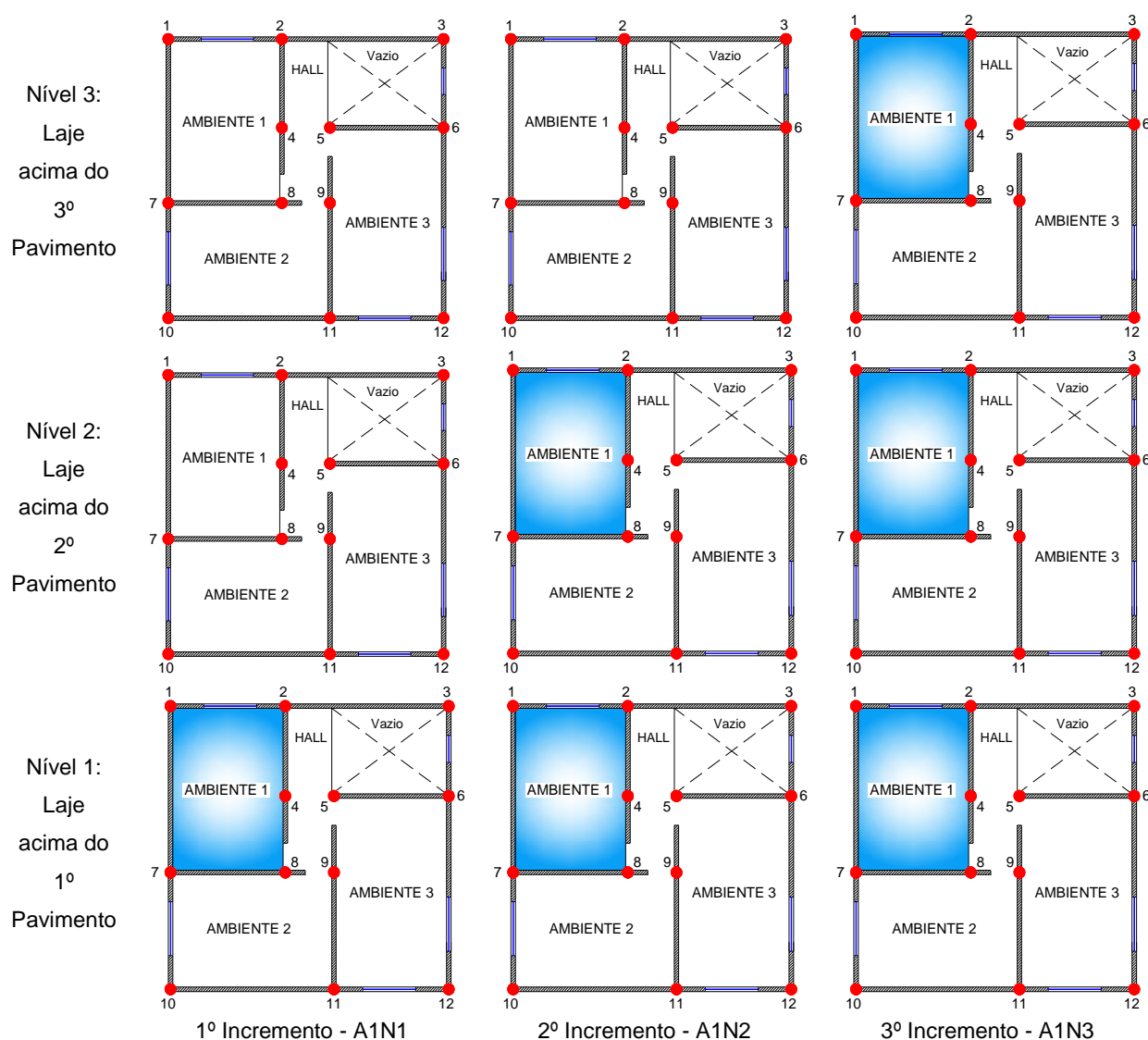
7.2 PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO DO AMBIENTE 1

Nesta primeira etapa de ensaios procurou-se analisar o comportamento da distribuição das ações verticais ao longo da altura do modelo com a aplicação do carregamento uniformemente distribuído em todos os Ambientes 1 (A1); sendo carregados de formas ascendentes, ou seja, o primeiro nível (A1N1), o segundo nível (A1N2), e por último, o terceiro nível (A1N3).

Conforme já descrito, para cada carregamento imposto ao sistema foi realizada a leitura dos doze pontos de deformação localizados na base do modelo (células de carga), obtendo-se assim as devidas reações de apoio que são apresentadas graficamente em valor percentual.

Para a determinação das reações, fez-se uso das constantes de cada célula de carga obtidas nos ensaios de calibração durante a confecção. Na figura 7.3 representam-se os incrementos de carga realizados nesta primeira etapa de ensaios. Como forma de verificar o comportamento das reações também foram realizadas leituras dos pontos de apoio após o descarregamento.

Figura 7.3 – Detalhe da sequência de carregamentos na 1ª etapa de ensaios: Ambiente 1.



Na figura 7.4 são ilustrados, através das demarcações, os níveis de carregamento utilizados no modelo. Salienta-se que na base do modelo, no nível da grelha metálica de sustentação, não há laje.

Figura 7. 4 – Detalhes do modelo físico reduzido com a demarcação dos níveis, das vergas e das contravergas.



Fonte: Própria.

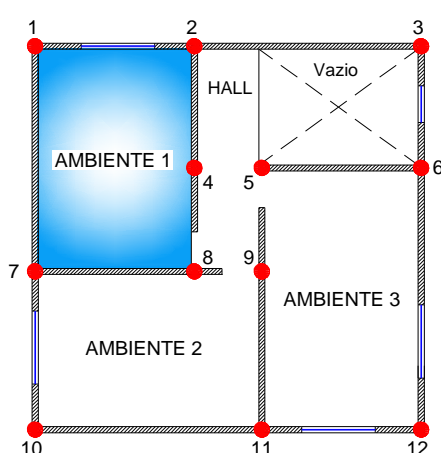
Para exemplificar os procedimentos de ensaios adotados durante a pesquisa experimental apresenta-se a seguir a descrição pormenorizada.

- Leitura das células de carga para o início do carregamento (“Leitura zero”);
- Aplicação de carregamento no “Ambiente 1” do primeiro nível – A1N1 (1,05 kN: 1,30 kN/m²);
- Leitura de deformação dos doze pontos de apoio através das células de carga, e determinação do percentual de carga correspondente a cada ponto de apoio;
- Inserção de carregamento no “Ambiente 1” no segundo nível – A1N2 (1,05 kN: 1,30 kN/m²);

- Leitura de deformação dos doze pontos de apoio através das células de carga, e determinação do percentual de carga correspondente a cada ponto de apoio;
- Inserção de carregamento no “Ambiente 1” do terceiro nível – A1N3 (1,05 kN: 1,30 kN/m²);
- Leitura de deformação dos doze pontos de apoio através das células de carga, e determinação do percentual de carga correspondente a cada ponto de apoio;
- Análise do percentual de carga para cada ponto de apoio, levando-se em consideração todos os Ambientes 1 carregados (A1N1+A1N2+A1N3);
- Descarregamento de todos os Ambientes 1.

Na tabela 7.2 apresentam-se os resultados percentuais das reações de apoio para cada ponto de sustentação da grelha devido à inserção do carregamento nos Ambientes 1. Para analisar a distribuição das ações atuantes optou-se por apresentar as reações de apoio em percentuais, sendo que os valores negativos representam o acréscimo de carga, e os positivos o alívio de cargas (“tração”).

Tabela 7. 2 – Resultado percentual das reações de apoio: Carregamento no Ambiente 1.



| Pontos | A1N1(%) | A1N2(%) | A1N3(%) | Média (%) |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | -10,85 | -8,23 | -8,35 | -9,14 |
| P2 | -22,30 | -22,99 | -21,23 | -22,17 |
| P3 | -0,84 | -1,51 | -2,56 | -1,64 |
| P4 | -14,25 | -13,51 | -12,76 | -13,51 |
| P5 | -8,99 | -8,78 | -9,24 | -9,00 |
| P6 | +0,83 | +1,48 | +0,72 | +1,01 |
| P7 | -22,16 | -21,65 | -22,08 | -21,96 |
| P8 | -7,25 | -6,11 | -5,94 | -6,43 |
| P9 | -2,90 | -2,23 | -2,52 | -2,55 |
| P10 | -2,50 | -3,36 | -3,63 | -3,16 |
| P11 | +0,42 | +1,49 | +1,81 | +1,24 |
| P12 | +6,73 | +8,68 | +9,15 | +8,19 |

Nas figuras 7.5, 7.6, e 7.7, são ilustrados os resultados obtidos para cada carregamento imposto. Para todos os gráficos, do presente trabalho, os valores negativos, expressos em vermelho, representam acréscimo de cargas; já os valores positivos (em verde) representam alívio.

Figura 7. 5 – Reações percentuais para o carregamento da primeira etapa: A1N1.

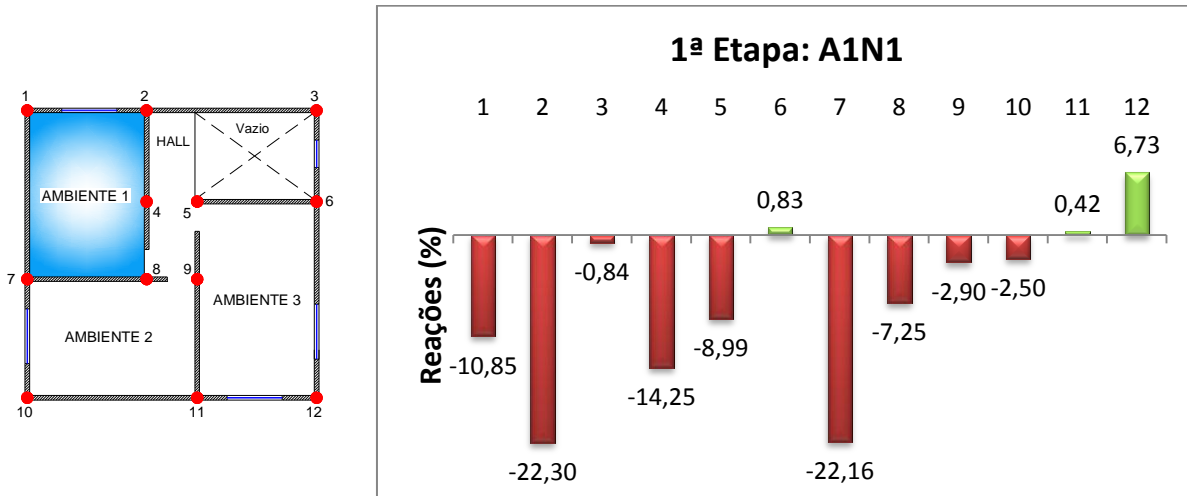


Figura 7. 6 – Reações percentuais para o carregamento da primeira etapa: A1N2.

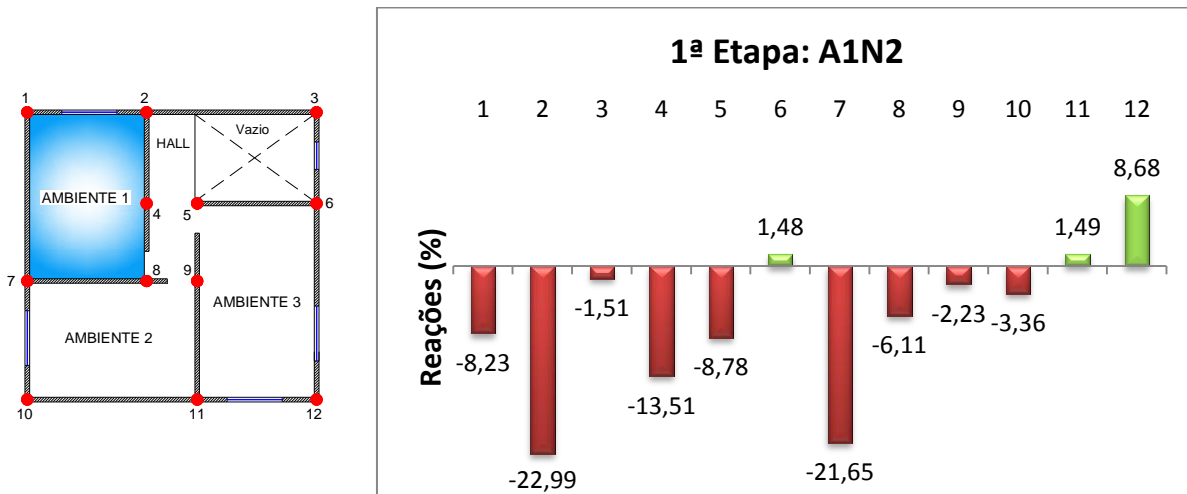
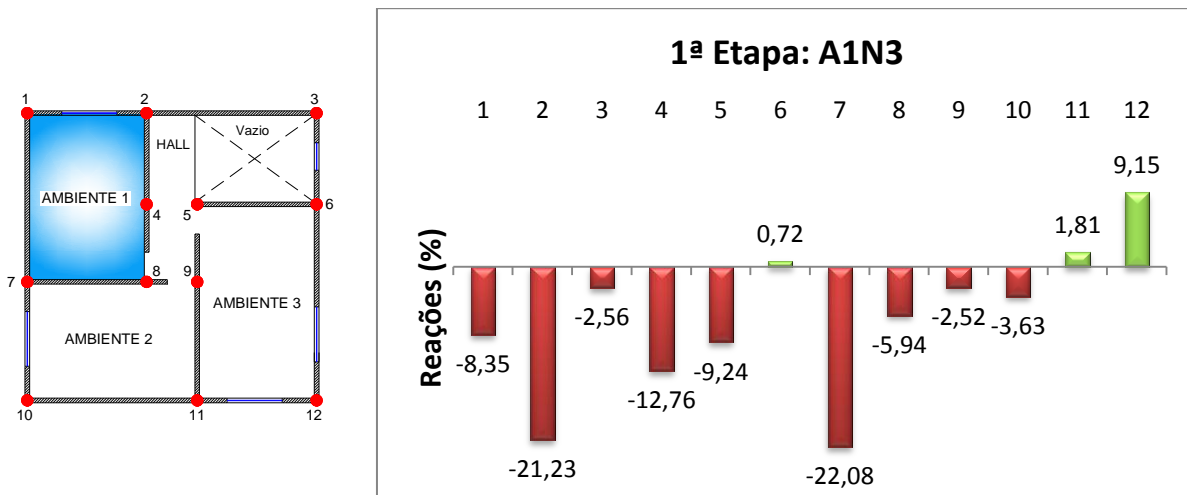
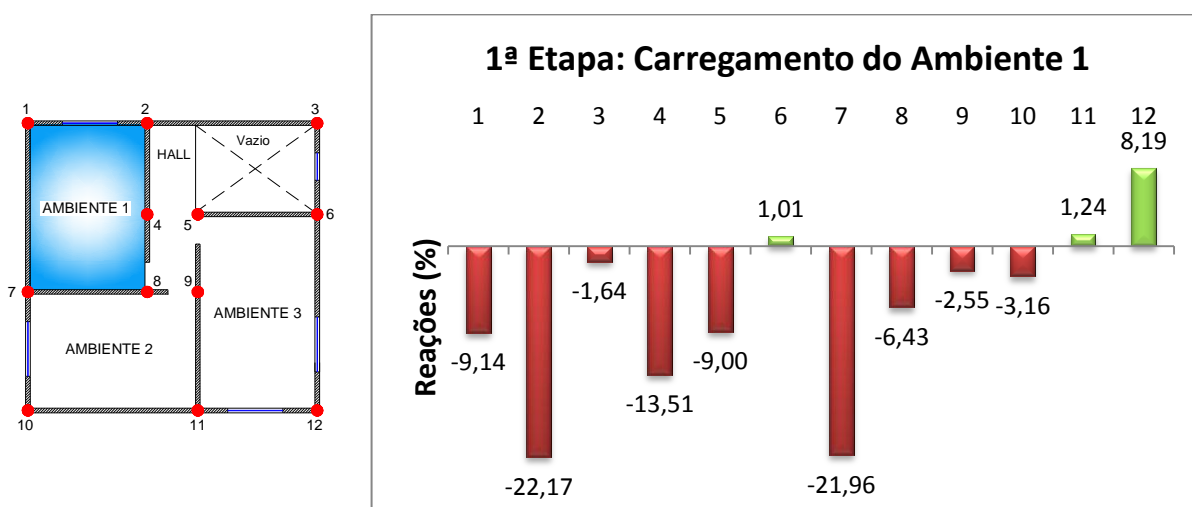


Figura 7. 7 – Reações percentuais para o carregamento da primeira etapa: A1N3.



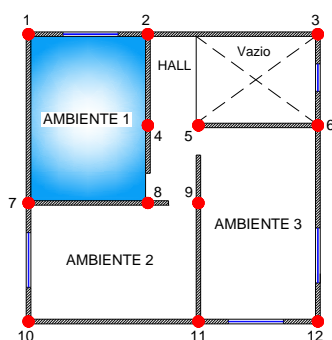
Observa-se que para todos os carregamentos aplicados no Ambiente 1, em diferentes níveis, o comportamento dos pontos de apoio se mantiveram. Os pontos de apoio P6, P11, e P12, mais distantes da área carregada, apresentaram alívio de reações em todos os níveis de carregamento. Na figura 7.8 apresentam-se os resultados globais médios obtidos para o carregamento de todos os Ambientes 1.

Figura 7. 8 – Reações percentuais médias para o carregamento da 1ª etapa: Ambiente 1.



Na tabela 7.3 são apresentados os resultados percentuais dos pontos de apoio que delimitam o Ambiente 1.

Tabela 7. 3 – Percentual de reação de apoio para os pontos que delimitam o ambiente 1.



| Pontos | A1N1(%) | A1N2(%) | A1N3(%) | Média (%) |
|------------|---------|---------|---------|-------------|
| P1 | -10,85 | -8,23 | -8,35 | -9,14 |
| P2 | -22,30 | -22,99 | -21,23 | -22,17 |
| P4 | -14,25 | -13,51 | -12,76 | -13,51 |
| P7 | -22,16 | -21,65 | -22,08 | -21,96 |
| P8 | -7,25 | -6,11 | -5,94 | -6,43 |
| Percentual | 76,8 | 72,5 | 70,4 | 73,2 |

Na tabela 7.3 observa-se que o Ambiente 1 é delimitado pelos pontos de apoio P1, P2, P4, P7, e P8; sendo estes pontos responsáveis pela absorção média de **73,21%** do carregamento imposto.

Destaca-se que à medida que o carregamento foi imposto nos níveis superiores, os percentuais das reações dos pontos de apoio circunvizinhos ao ambiente carregado tenderam a reduzir (N1: 76,8% – N2: 72,5% – N3: 70,4%), evidenciando desta forma uma alteração no fluxo de tensões, com a existência de uma tendência uniformizante à medida que os carregamentos são impostos em níveis superiores.

Com o carregamento do segundo nível, a redução média percentual foi de 4,3%, já para o carregamento do terceiro nível, em comparação com o segundo, a redução foi de 2,1%.

No ponto P3, que não é suporte direto para a laje do Ambiente 1, foi possível identificar um considerável acréscimo de reação quando aplicado o carregamento em níveis superiores. Na inserção do carregamento A1N2 houve o acréscimo de 79,8% em comparação com o carregamento A1N1; já para a aplicação do carregamento A1N3 houve o acréscimo de 69,5% em comparação com o nível imediatamente inferior (A1N2). De acordo com esses resultados pode-se evidenciar que o apoio P3 recebeu influência do carregamento aplicado nos Ambientes 1; seja pelo possível espraiamento de cargas através das paredes que não possuem aberturas, entre os apoios 2 e 3, bem como pela interação dessas paredes com as que lhe são ortogonais.

Assim, para o ponto P3, pode-se dizer que a ação atuante nos Ambientes 1, certamente se distribuiu pelas paredes até atingir a viga de sustentação de forma que a mesma não se limitou entre os pontos de apoio P1 e P2, mas com certeza avançou na direção do ponto em questão de forma que houve acréscimo de reação à medida que foram inseridos os carregamentos A1N2 e A1N3.

O ponto P4 pertencente à região central tendeu a sofrer alívio na ordem de 5% à medida que foram carregados os dois outros níveis superiores, porém foi responsável por absorver, em média, 13,5% do carregamento imposto.

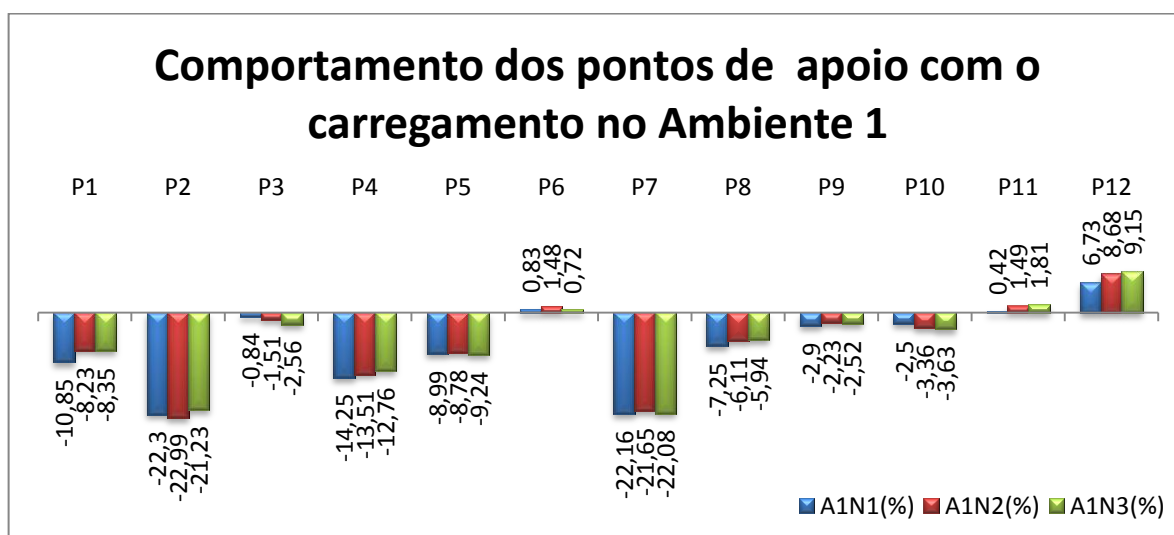
Para a análise do ponto P5 deve-se observar que entre os apoios P4 e P5 não existe a “bandeira” de alvenaria conectando as paredes, ou seja, a transferência de esforços entre a parede que se apoia entre os apoios P2 e P4 e a parede que se apoia entre os pontos P5 e P6 deve ter ocorrido pela ação da laje e/ou pelo sistema de grelha. O percentual de reação neste ponto tendeu a se manter com os incrementos de carregamentos.

O ponto P8 apresentou redução de 15,7% quando carregado o segundo nível, porém ao carregar o terceiro nível esta redução foi de apenas 2,8%. O ponto P9 apresentou comportamento semelhante ao ponto P5, mostrando redução com o carregamento no segundo nível e aumento com o carregamento no terceiro nível, apesar de existir alvenaria (“bandeira”) entre os pontos de apoio P8 e P9, o percentual de reação neste ponto tendeu a se manter.

O ponto P10 apresentou comportamento semelhante ao ponto P3. Entretanto, teve o acréscimo percentual de 34,4% para o carregamento do segundo nível, e apenas 8% para o carregamento do terceiro nível. A diferença de magnitude, se comparado com o ponto P3 pode ser devido à presença de abertura na parede que está apoiada entre os pontos P7 e P10, visto que o ponto P10 encontra-se mais próximo da área carregada. A presença da abertura interrompe possíveis trajetórias de tensões.

Através da figura 7.9 pode-se observar o comportamento das reações de apoio para o carregamento do Ambiente 1 em níveis diferentes.

Figura 7.9 – Comportamento dos pontos de apoio: Carregamento A1.

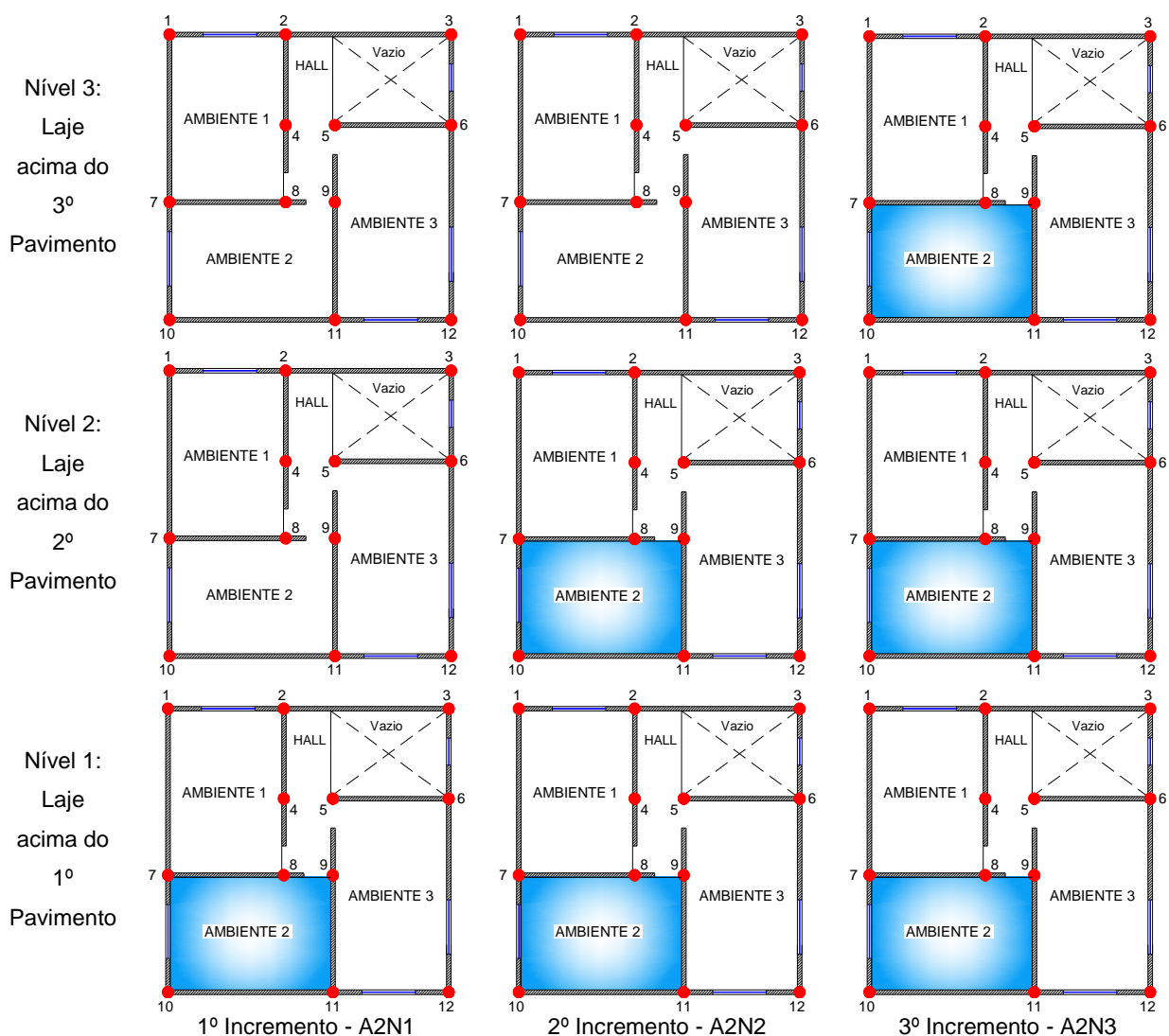


7.3 SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO DO AMBIENTE 2

Nesta segunda etapa de ensaios o objetivo foi o mesmo apresentado na etapa anterior. Foram realizados carregamentos uniformemente distribuídos em todos os Ambientes 2 (A2), sendo carregados de forma ascendente, ou seja, o primeiro nível (A2N1), o segundo nível (A2N2), e posteriormente o terceiro nível (A2N3).

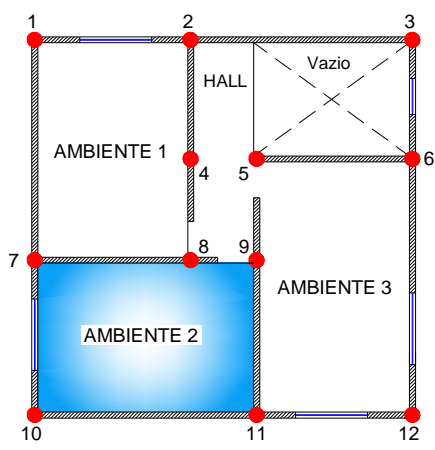
Será evitada a pormenorização de detalhes a partir desta etapa de ensaios, visto que os procedimentos foram os mesmos já citados, havendo diferença apenas no ambiente carregado. Na figura 7.10 ilustram-se os incrementos de cargas realizados nesta segunda etapa de ensaios.

Figura 7. 10 – Detalhe da sequência de carregamentos na 2ª etapa de ensaios: Ambiente 2



Na tabela 7.4 apresentam-se os resultados percentuais das reações de apoio, para cada ponto de sustentação, devido à inserção de carregamentos nos Ambientes 2.

Tabela 7. 4 – Resultado percentual das reações de apoio: Carregamento no Ambiente 2.



| Pontos | A2N1(%) | A2N2(%) | A2N3(%) | Média (%) |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | +1,98 | -0,94 | -1,79 | -0,25 |
| P2 | +0,50 | +0,47 | +0,45 | +0,47 |
| P3 | +2,50 | +2,97 | +5,86 | +3,78 |
| P4 | -5,98 | -6,59 | -7,19 | -6,59 |
| P5 | -4,37 | -5,50 | -5,26 | -5,04 |
| P6 | +1,96 | -0,46 | -0,00 | +0,50 |
| P7 | -22,50 | -23,04 | -21,16 | -22,23 |
| P8 | -12,67 | -9,56 | -9,14 | -10,46 |
| P9 | -5,91 | -6,04 | -5,77 | -5,91 |
| P10 | -20,30 | -18,69 | -19,65 | -19,55 |
| P11 | -15,84 | -20,56 | -19,21 | -18,54 |
| P12 | -5,50 | -5,19 | -4,51 | -5,07 |

Observa-se que ao carregar o A2N1, os pontos P1, P2, P3, e P6 apresentaram alívio de reação. Já para os outros dois níveis consecutivos (A2N2, e A2N3) apenas os pontos 02 e 03 apresentaram este comportamento.

Nas figuras 7.11, 7.12, e 7.13 são ilustrados os resultados obtidos para cada carregamento imposto.

Figura 7. 11 – Reações percentuais para o carregamento da segunda etapa: A2N1.

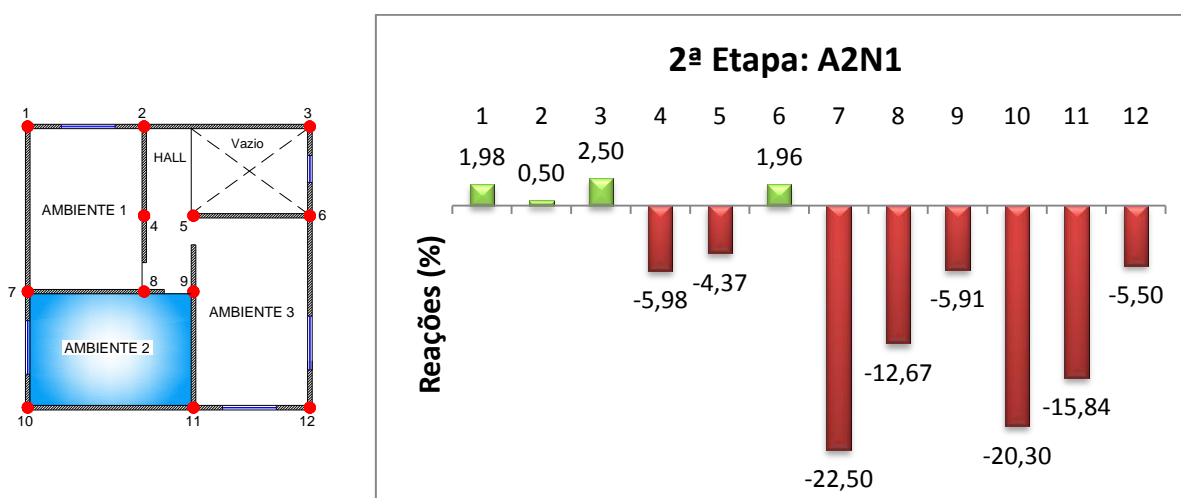


Figura 7. 12 – Reações percentuais para o carregamento da segunda etapa: A2N2

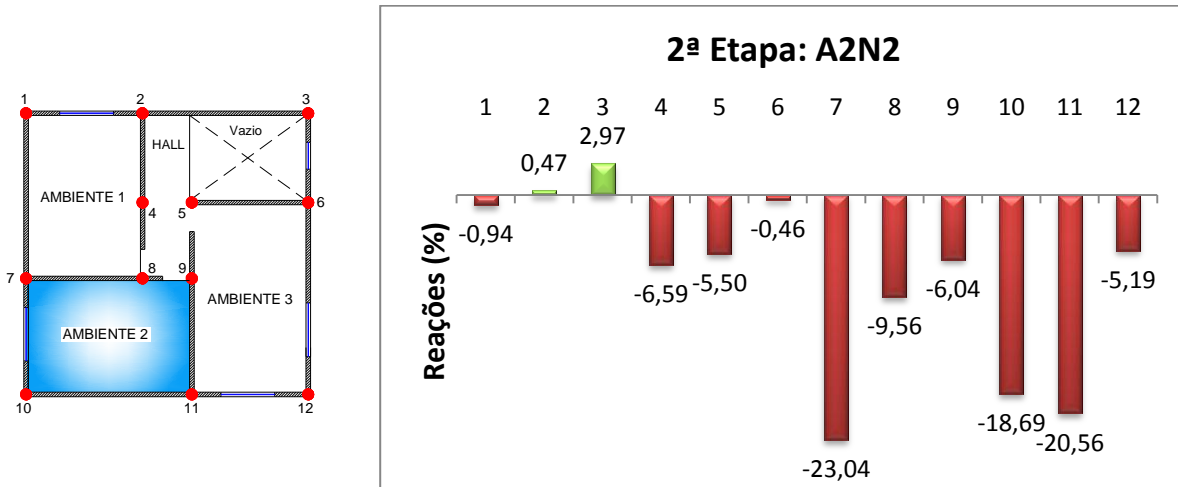
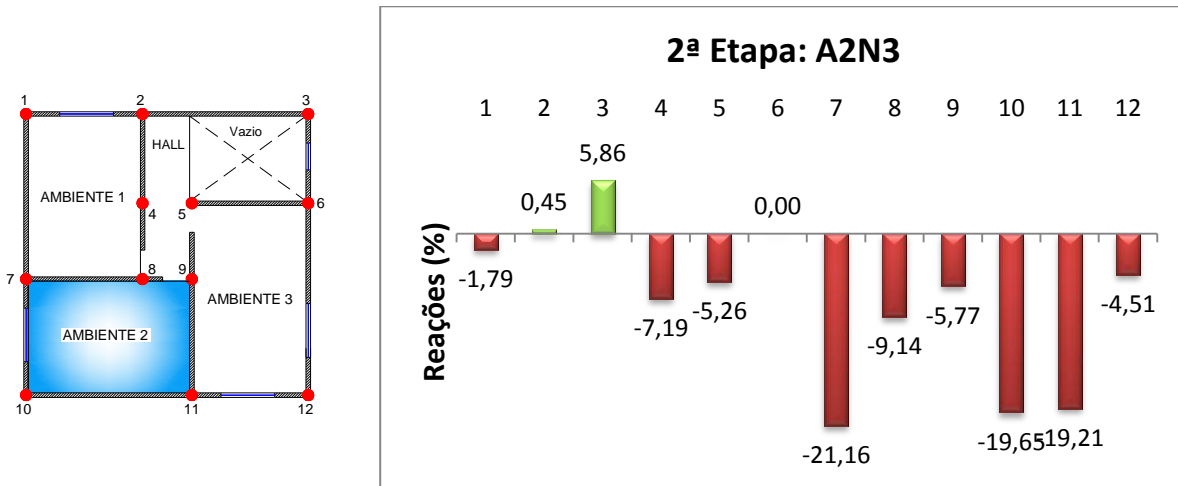
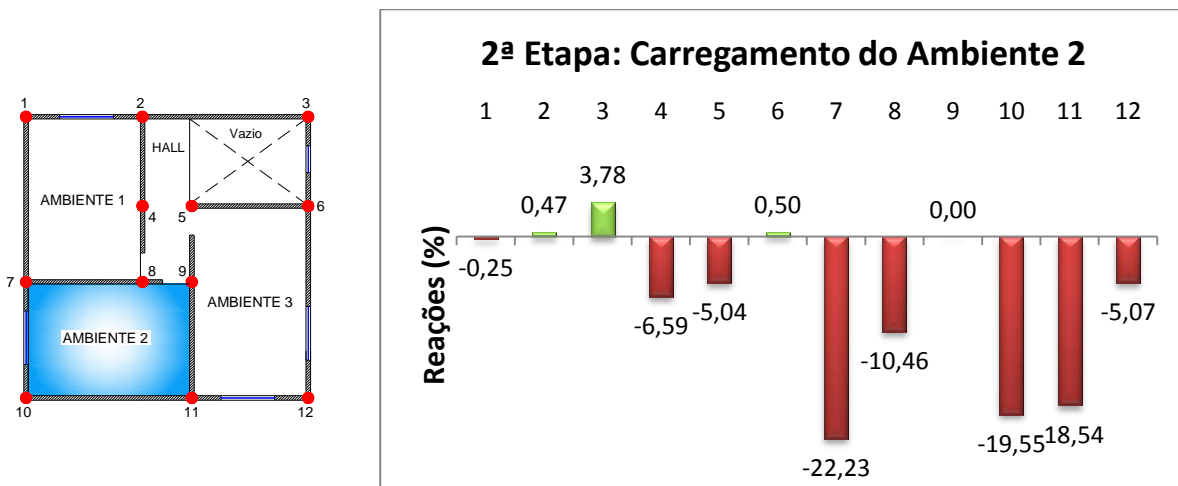


Figura 7. 13 – Reações percentuais para o carregamento da segunda etapa: A2N3



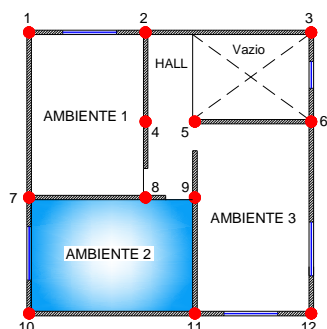
Na figura 7.14 apresentam-se as reações percentuais médias para o carregamento de todos os Ambientes 2.

Figura 7. 14 – Reações percentuais médias para o carregamento da 2ª etapa: Ambiente 2.



Na Tabela 7.5 apresentam-se os resultados percentuais, de reações de apoio, dos pontos que delimitam o Ambiente 2.

Tabela 7.5 – Percentual de reação de apoio para os pontos que delimitam o Ambiente 2.



| Pontos | A2N1(%) | A2N2(%) | A2N3(%) | Média (%) |
|------------|---------|---------|---------|-----------|
| P7 | -22,50 | -23,04 | -21,16 | -22,23 |
| P8 | -12,67 | -9,56 | -9,14 | -10,46 |
| P9 | -5,91 | -6,04 | -5,77 | -5,91 |
| P10 | -20,30 | -18,69 | -19,65 | -19,55 |
| P11 | -15,84 | -20,56 | -19,21 | -18,54 |
| Percentual | 77,2 | 77,9 | 74,9 | 76,7 |

Observa-se na tabela 7.5 que o Ambiente 2 é delimitado pelos pontos P7, P8, P9, P10, e P11. Esses pontos foram responsáveis, em média, por absorver **76,7%** do carregamento imposto.

O comportamento apresentado pelos pontos de apoio que delimitam a área carregada não foi igual ao apresentado na primeira etapa de ensaios. Com o carregamento do segundo nível, praticamente não houve aumento percentual; já para o carregamento do terceiro nível, em comparação com o segundo, a redução foi de 3%.

O ponto P1 apresentou acréscimos de reação sucessivos à medida que os níveis superiores foram carregados (47,5% e 90%), indicando que o carregamento não ficou limitado entre os pontos de apoio P7 e P10. Salienta-se que a parede que se apoia entre os pontos P1 e P7 não possui abertura.

No ponto P3 foi possível constatar que, para os três níveis de carregamento, houve o alívio de reação; para o carregamento do segundo nível o alívio foi de 18,8% se comparado com o primeiro nível, já para o carregamento do terceiro nível em comparação com o segundo o percentual de alívio foi bem mais elevado (97%). Ressalta-se que a laje dos níveis não se apoiam na alvenaria que circunda o ponto de apoio P3.

Para o ponto interno P4, que não delimita a área de carregamento, foi possível constatar que ao carregar os níveis superiores houve o aumento das reações em, respectivamente, 10% e 9%, salientando que entre os pontos de apoio P4 e P8 existe uma abertura com presença de alvenaria em forma de “bandeira”.

No ponto P5 foi identificado que o carregamento no segundo nível proporcionou o aumento da reação, o que não ocorreu para o carregamento do nível superior. A tendência foi de manter o percentual de reação.

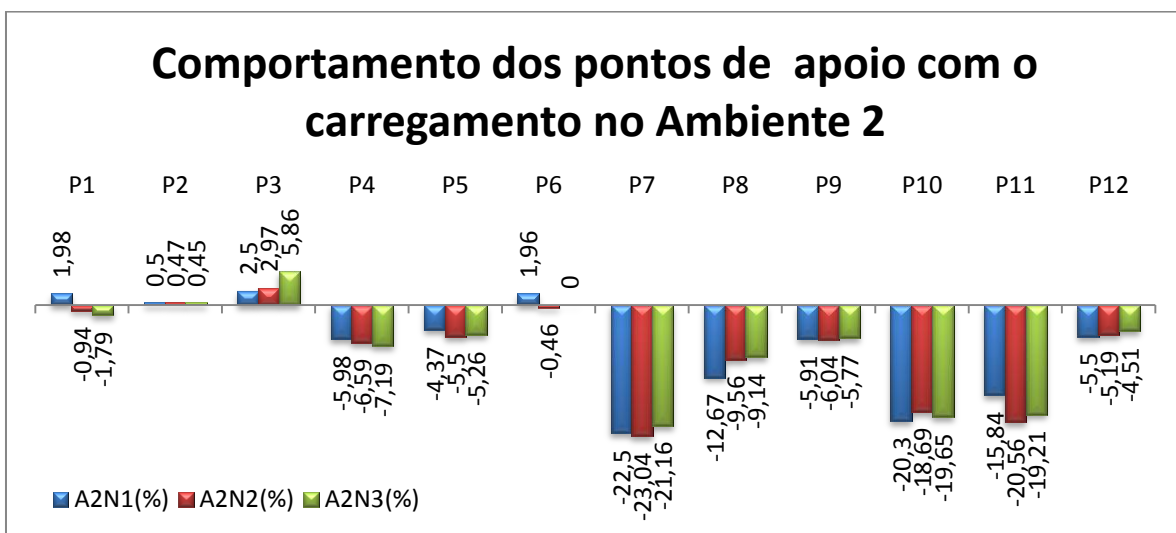
Para o ponto interno P8, que faz limite com a área carregada, pode-se constatar que, para os dois níveis de carregamento, houve a redução das reações; provavelmente as ações foram transferidas para os apoios mais próximos, como o P4 que teve sua reação acrescida.

Os pontos P9 e P11 apresentaram acréscimos de reação quando carregado o A2N2, e posteriormente, com o carregamento A2N3, as reações apresentaram redução. O ponto P10 apresentou comportamento contrário aos pontos P9 e P11.

O ponto P12 teve comportamento diferenciado do ponto P1, as reações tenderam a reduzir com a aplicação dos carregamentos em níveis superiores; 5,7% para o carregamento A2N2, e 13,1% para o carregamento A2N3. Nota-se que as condições geométricas das paredes localizadas entre os pontos P10 e P12 são diferentes das dispostas entre P10 e P1 quanto à posição das aberturas.

Através da figura 7.15 pode-se observar o comportamento das reações de apoio para o carregamento do Ambiente 2 em níveis diferentes.

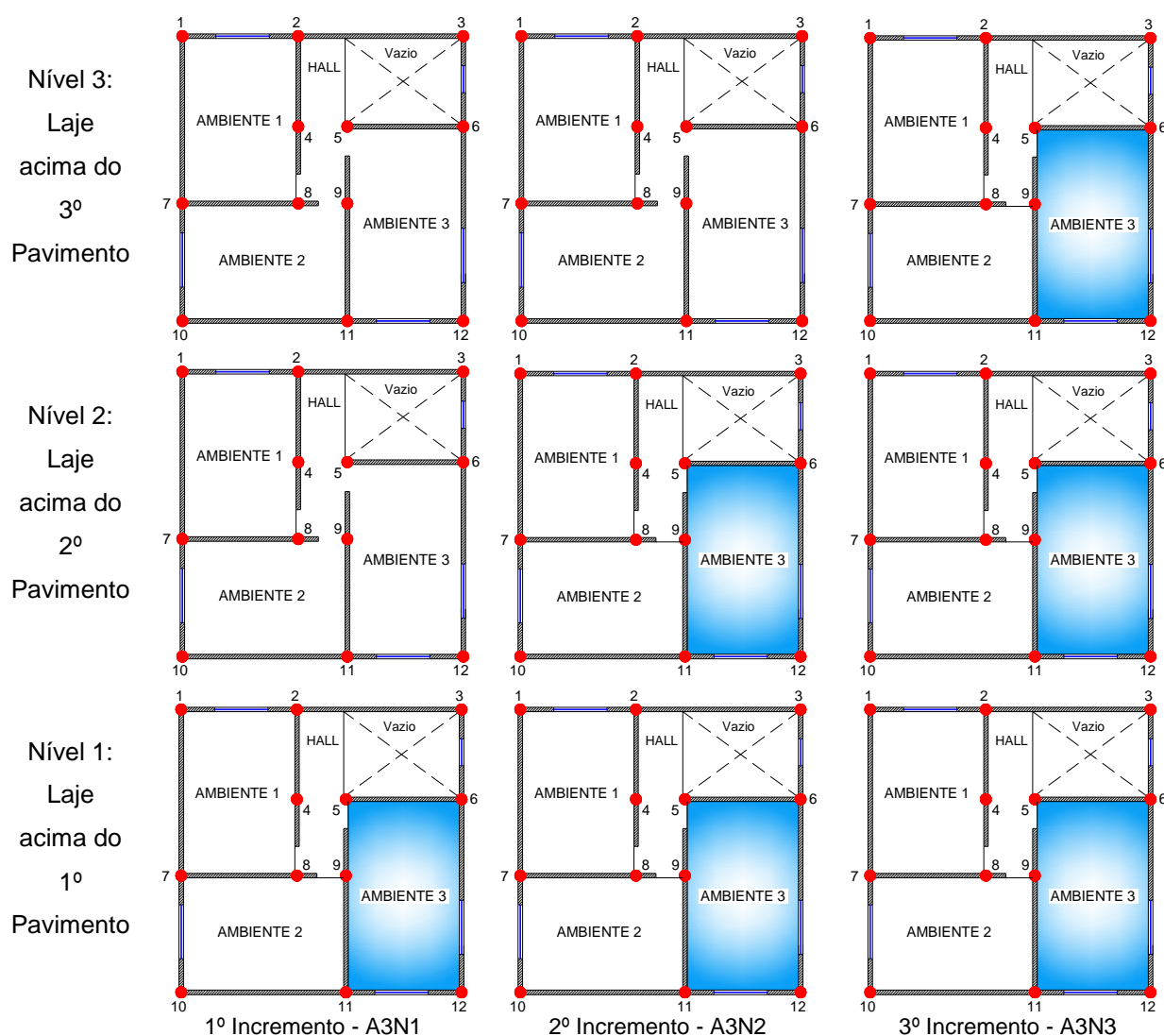
Figura 7. 15 – Comportamento dos pontos de apoio: Carregamento A2.



7.4 TERCEIRA ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO DO AMBIENTE 3

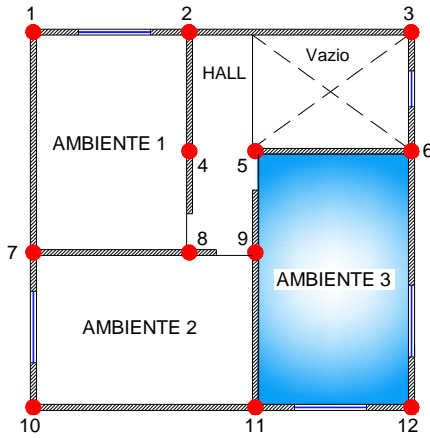
Nesta terceira etapa de ensaios o objetivo foi o mesmo apresentado nas etapas anteriores. Foram realizados carregamentos uniformemente distribuídos em todos os Ambientes 3 (A3), sendo carregados de forma ascendente, ou seja, o primeiro nível (A3N1), o segundo nível (A3N2), e posteriormente o terceiro nível (A3N3). Na figura 7.16 ilustram-se os incrementos de cargas realizados nesta terceira etapa de ensaios.

Figura 7. 16 – Detalhe da sequência de carregamentos na 3ª etapa de ensaios: Ambiente 3.



Na tabela 7.6 apresentam-se os resultados percentuais das reações de apoio, para cada ponto de sustentação, devido à inserção de carregamentos nos Ambientes 3.

Tabela 7. 6 – Resultado percentual das reações de apoio: Carregamento no Ambiente 3.



| Pontos | A3N1(%) | A3N2(%) | A3N3(%) | Média (%) |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | +4,72 | +1,43 | +0,35 | +2,17 |
| P2 | +1,58 | +3,25 | +3,16 | +2,66 |
| P3 | -9,90 | -8,66 | -10,17 | -9,58 |
| P4 | -2,76 | -2,52 | -2,45 | -2,58 |
| P5 | -12,31 | -11,22 | -10,56 | -11,36 |
| P6 | -14,01 | -13,83 | -14,82 | -14,22 |
| P7 | -2,28 | +4,84 | +3,36 | +1,97 |
| P8 | -5,22 | -5,49 | -5,33 | -5,35 |
| P9 | -7,80 | -7,82 | -7,94 | -7,85 |
| P10 | -1,18 | -2,56 | -3,13 | -2,39 |
| P11 | -19,62 | -18,59 | -19,80 | -19,34 |
| P12 | -18,62 | -19,49 | -18,94 | -19,02 |

Observou-se que ao carregar o A3N1 os pontos P1 e P2 apresentaram alívio de reação. Já para os outros dois níveis consecutivos (A3N2, e A3N3), o ponto P7 também passou a apresentar o mesmo comportamento.

Nas figuras 7.17, 7.18, e 7.19 são ilustrados os resultados percentuais obtidos para cada carregamento imposto. Na figura 7.20 ilustram-se as reações percentuais médias para o carregamento de todos os Ambientes 3.

Figura 7. 17 – Reações percentuais para o carregamento da terceira etapa: A3N1.

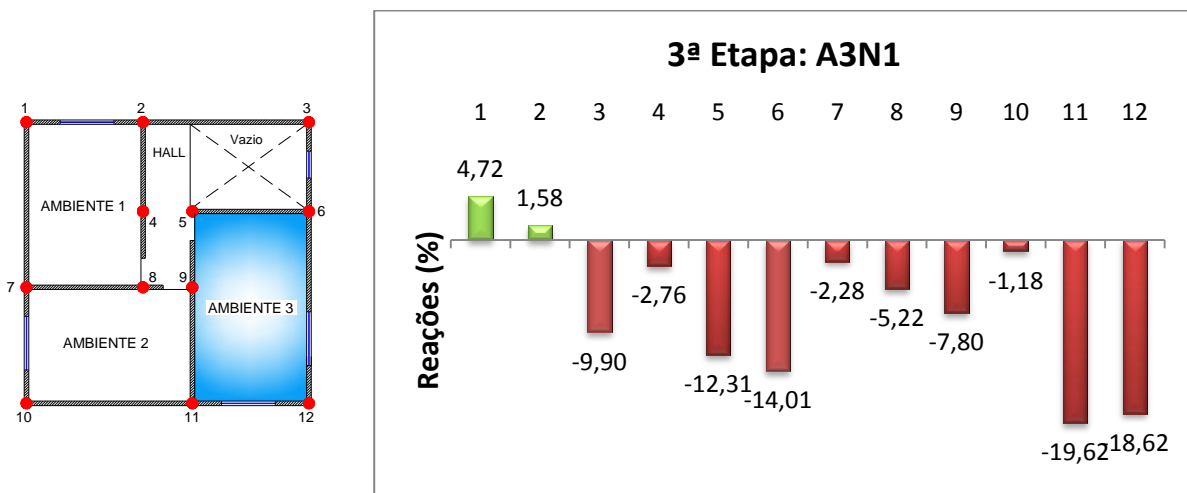


Figura 7. 18 – Reações percentuais para o carregamento da terceira etapa: A3N2.

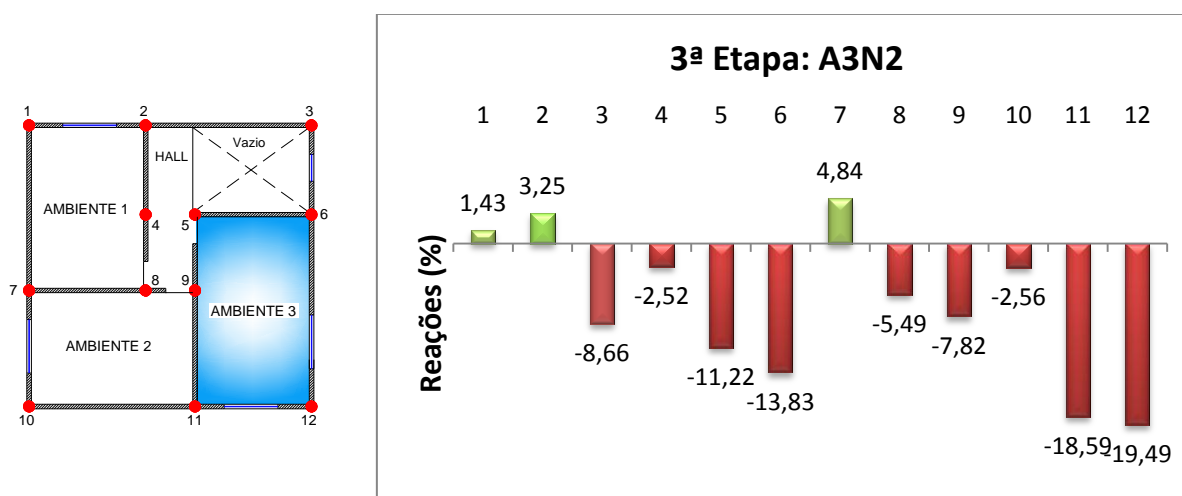


Figura 7. 19 – Reações percentuais para o carregamento da terceira etapa: A3N3.

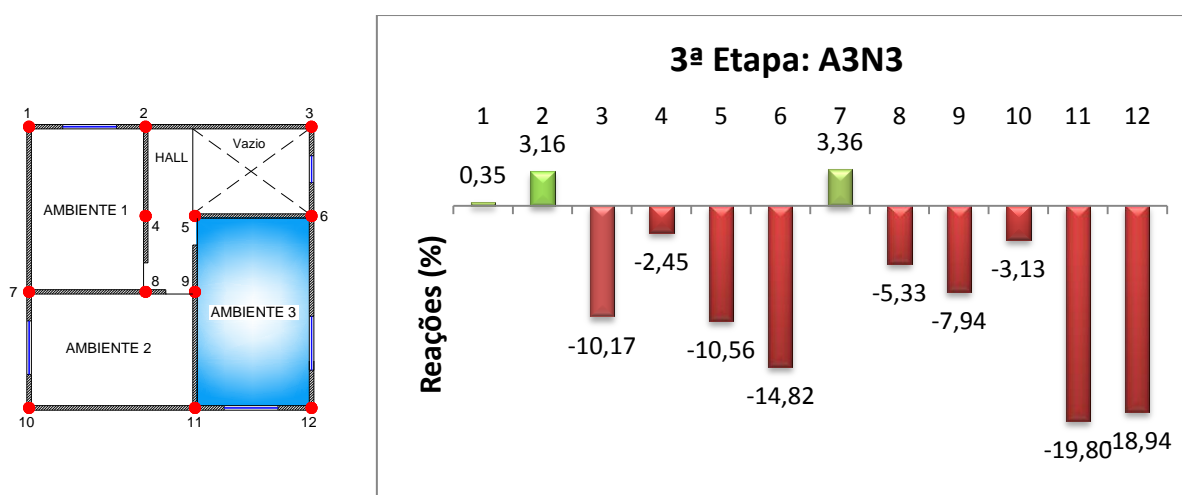
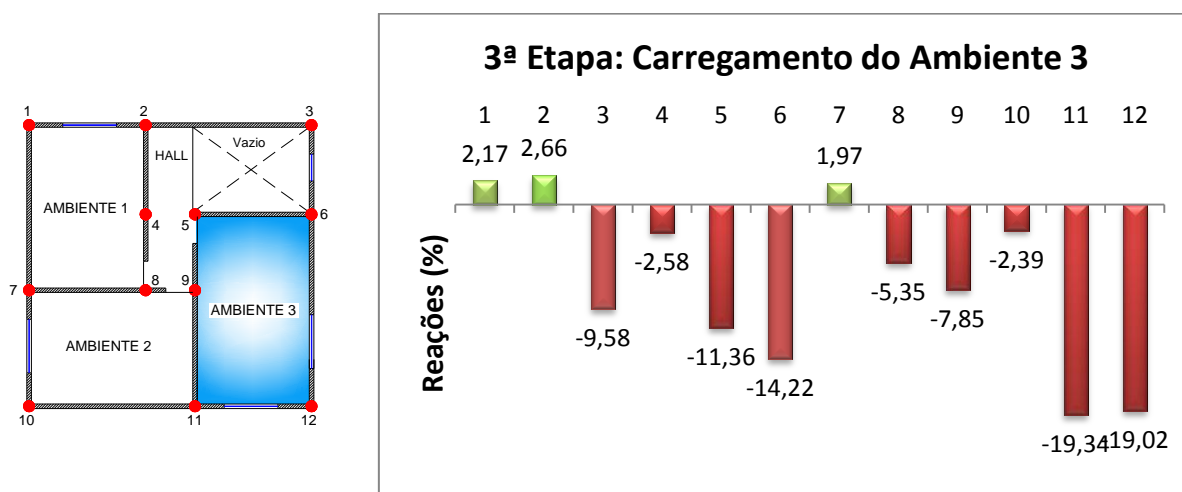
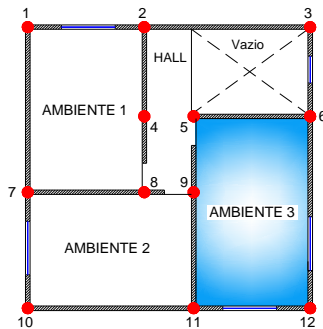


Figura 7. 20 – Reações percentuais médias para o carregamento da 3ª etapa: Ambiente 3.



Na tabela 7.7 apresentam-se os resultados percentuais dos pontos que delimitam o Ambiente 3.

Tabela 7.7 – Percentual de reação de apoio para os pontos que delimitam o Ambiente 3.



| Pontos | A3N1(%) | A3N2(%) | A3N3(%) | Média (%) |
|------------|---------|---------|---------|-----------|
| P5 | -12,31 | -11,22 | -10,56 | -11,36 |
| P6 | -14,01 | -13,83 | -14,82 | -14,22 |
| P9 | -7,80 | -7,82 | -7,94 | -7,85 |
| P11 | -19,62 | -18,59 | -19,80 | -19,34 |
| P12 | -18,62 | -19,49 | -18,94 | -19,02 |
| Percentual | 72,4 | 71,0 | 72,1 | 71,8 |

Observa-se na tabela 7.7 que o Ambiente 3 é delimitado pelos pontos P5, P6, P9, P11, e P12. Esses pontos foram responsáveis, em média, por absorver **71,8%** do carregamento imposto, valor percentual próximo ao obtido nos carregamentos da primeira e segunda etapa de ensaios respectivamente (**73,2% e 76,7%**).

Com o carregamento do segundo nível (A3N2), foi constatado que houve uma redução percentual das reações dos pontos que delimitam a área carregada, o que não ocorreu com o carregamento do nível superior (A3N3).

Os pontos P1, P2, e P7; mais distantes da área carregada, apresentaram alívio de reações, conforme ocorrido na primeira etapa de ensaios para os pontos P6, P11, e P12.

No ponto P3, constatou-se a influência da abertura na distribuição das ações verticais. Quando aplicado o carregamento A3N2 houve uma redução na reação de apoio (-12,5%), porém, quando inserido o carregamento A3N3 houve o acréscimo de 17,4%, se comparado com o carregamento imediatamente inferior (A3N2). Ressalta-se que a parede entre os pontos P3 e P6 não apresenta abertura apenas no primeiro nível.

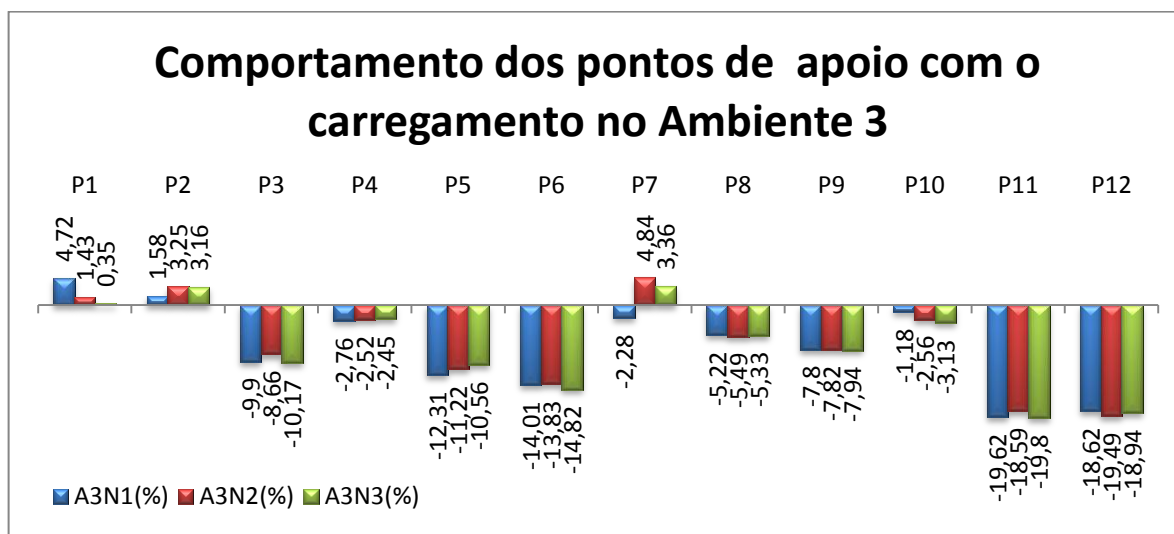
No ponto P4, a reação de apoio permaneceu na mesma magnitude, fato este que pode ser justificado pela ausência de alvenaria entre os pontos P4 e P5, conforme citado na primeira etapa de ensaios.

Para o apoio P5 a reação tendeu a reduzir com a aplicação de carregamentos em níveis superiores. Os pontos de apoio P6, P9, P11, e P12, apresentaram o mesmo comportamento; tenderam a se manter.

O ponto P10 foi o que apresentou maior percentual de acréscimos com a inserção de carregamentos em níveis superiores, 117% e 22,3% respectivamente; comprovando a influência de aberturas na transferência das ações verticais. Salienta-se que na parede localizada sobre os pontos P10 e P11 não há aberturas.

Através da figura 7.21 pode-se observar o comportamento das reações de apoio para o carregamento do Ambiente 3 em níveis diferentes.

Figura 7. 21 – Comportamento dos pontos de apoio: Carregamento A3.

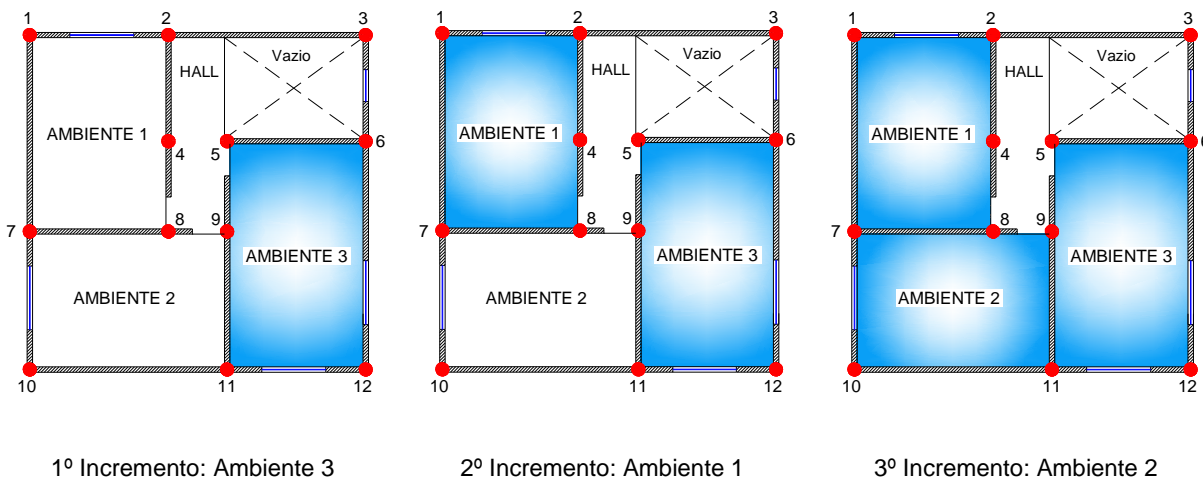


7.5 QUARTA ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO DOS NÍVEIS

Nesta etapa de ensaios foram inseridos carregamentos uniformemente distribuídos em todos os ambientes do modelo, de forma ascendente, sendo carregado primeiramente os ambientes do primeiro nível, os do segundo nível e, por fim, os ambientes do terceiro nível. Para todos os níveis, os carregamentos foram inseridos, respectivamente, nos ambientes 3, 2 e 1.

Na figura 7.22 representa-se a sequência de incrementos nos ambientes pertencentes ao mesmo nível. São apresentados os resultados percentuais para cada nível de carregamento e posteriormente apresenta-se a análise dos resultados obtidos.

Figura 7.22 – Quarta etapa de carregamentos: sequência de ambientes carregados nos níveis.

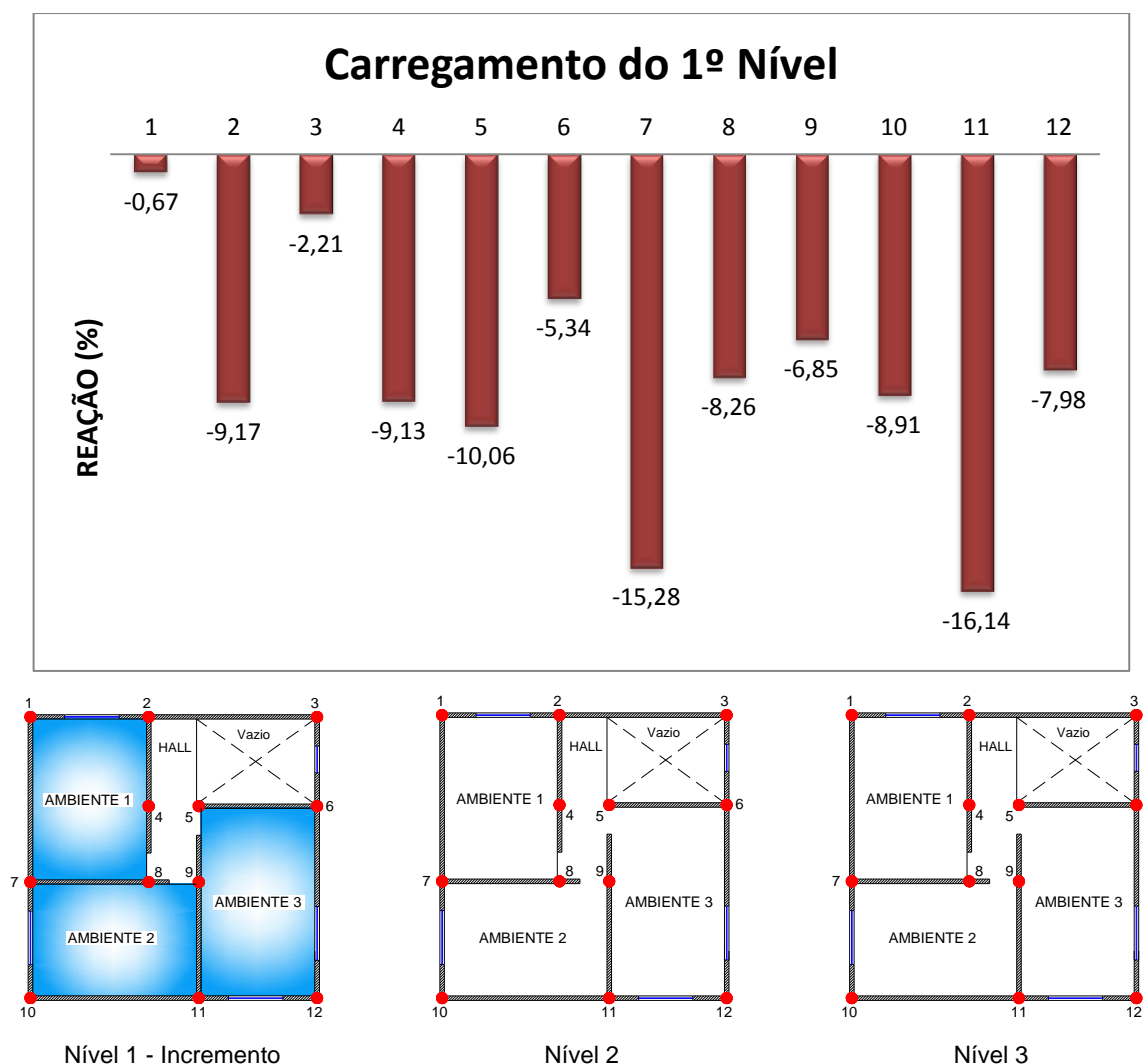


7.5.1 CARREGAMENTO DO NÍVEL 1

Na figura 7.23 apresentam-se os resultados percentuais de reações obtidos com o carregamento de todos os ambientes do primeiro nível.

Para o carregamento do primeiro nível, ou seja, todos os ambientes do primeiro nível carregados, pode-se obter experimentalmente que os pontos P7 e P11 foram os que apresentaram maiores reações percentuais. Estes apoios foram responsáveis por 31,4% das reações, enquanto os apoios internos em conjunto (P4, P5, P8, e P9) foram responsáveis por 34,4%.

Figura 7. 23 – Percentual das reações: Carregamento do primeiro nível.

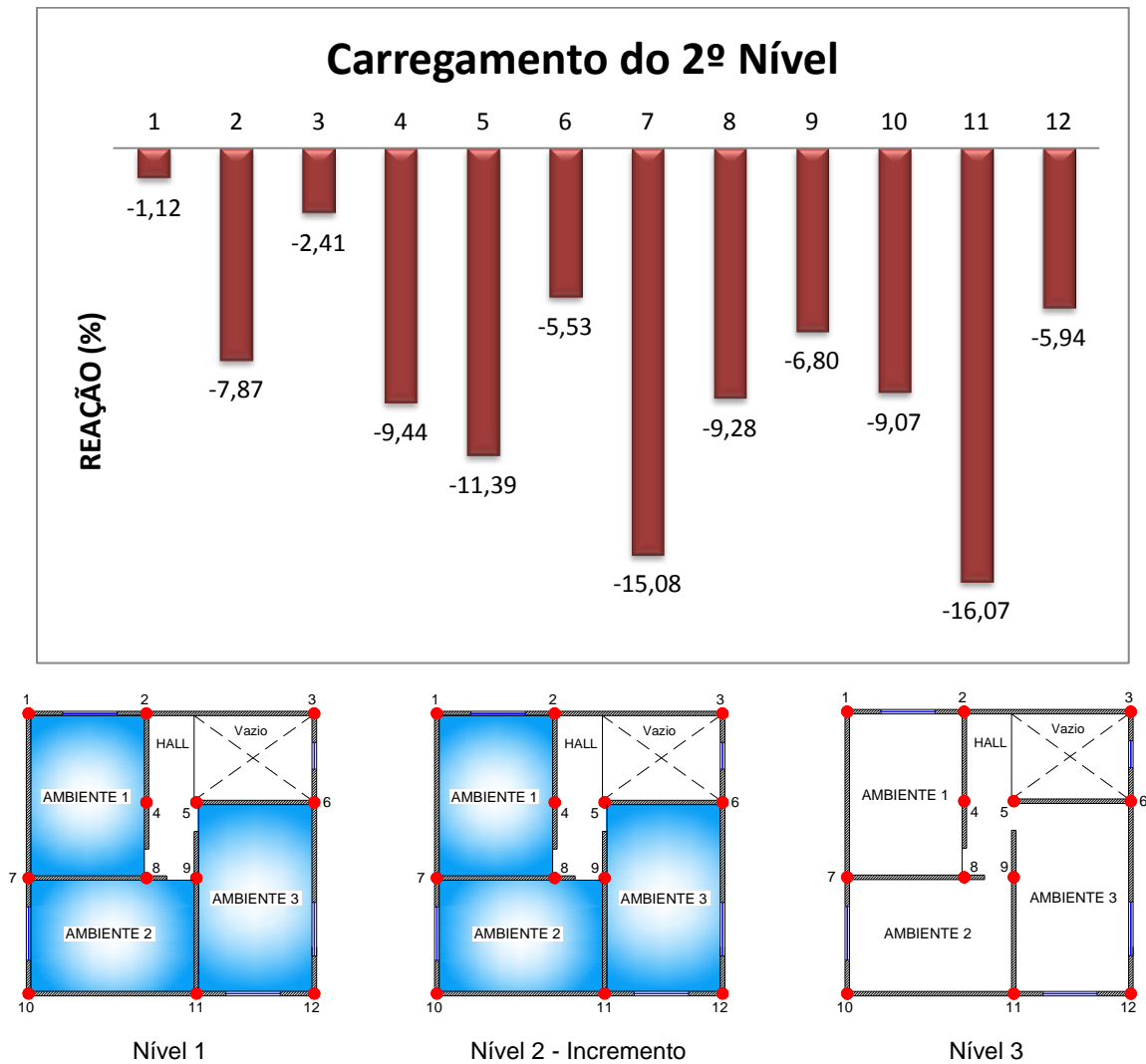


7.5.2 CARREGAMENTO DO NÍVEL 2.

A inserção do carregamento no segundo nível foi realizada com o primeiro nível carregado. Na figura 7.24 são apresentados os percentuais de reação obtidos com a aplicação dos carregamentos em todos os ambientes do segundo nível.

Os pontos P7 e P11 apresentaram reações de 31,15%; e os pontos internos (P4, P5, P8, e P9) reações percentuais de 36,9%.

Figura 7. 24 – Percentual das reações: Carregamento do segundo nível.

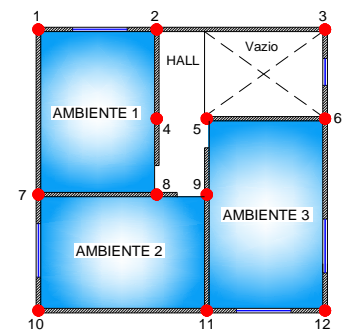
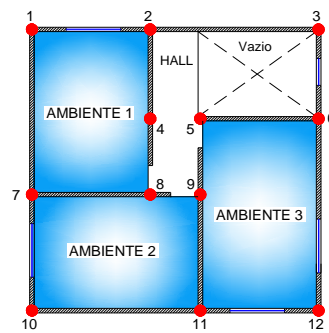
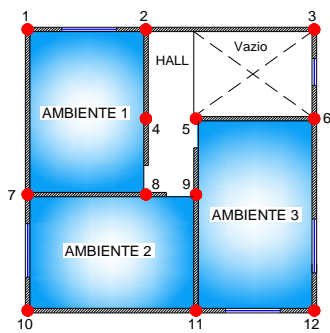
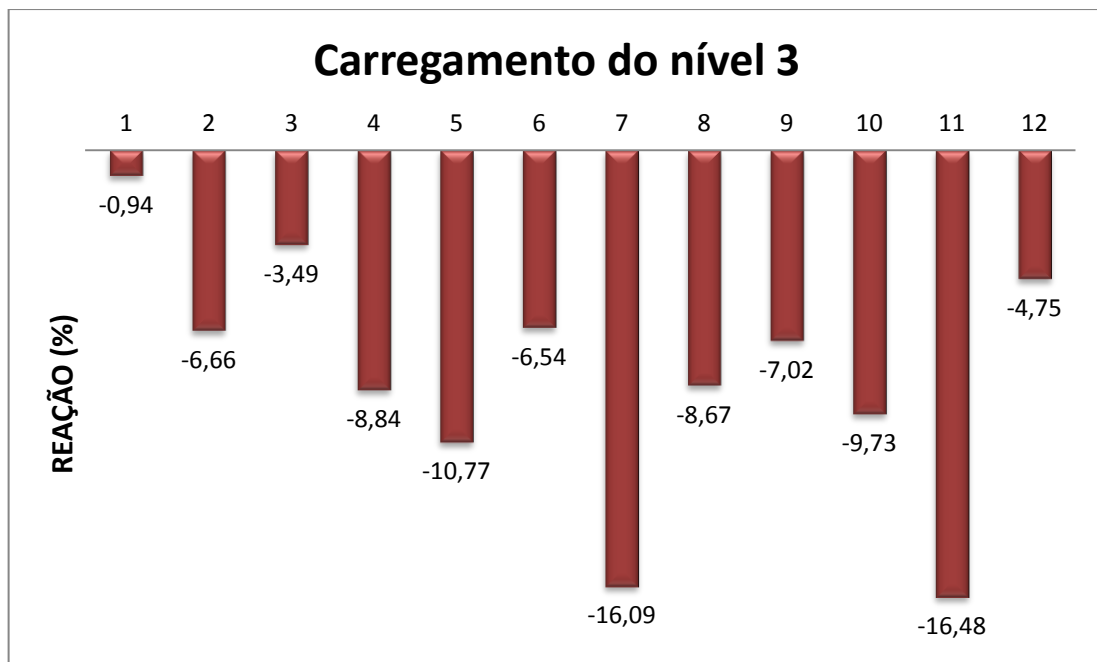


7.5.3 CARREGAMENTO NO NÍVEL 3

O carregamento do terceiro nível foi realizado com o primeiro e segundo níveis carregados. Na figura 7.25 são apresentados os percentuais de reações obtidos com o carregamento de todos ambientes do terceiro nível.

Os apoios P7 e P11 apresentaram reações de 32,6%; e os apoios internos (P4, P5, P8, e P9) reações percentuais de 35,3%.

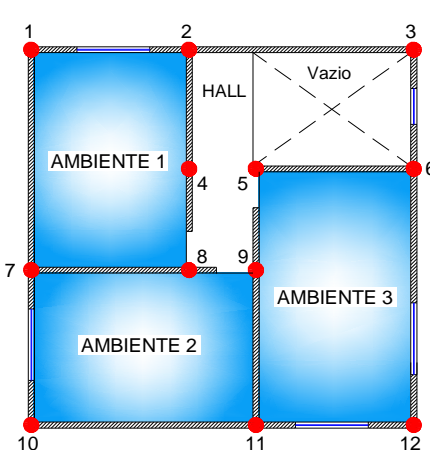
Figura 7. 25 – Percentual das reações: Carregamento do terceiro nível.



7.5.4 COMENTÁRIOS E ANÁLISES DA QUARTA ETAPA DE ENSAIOS

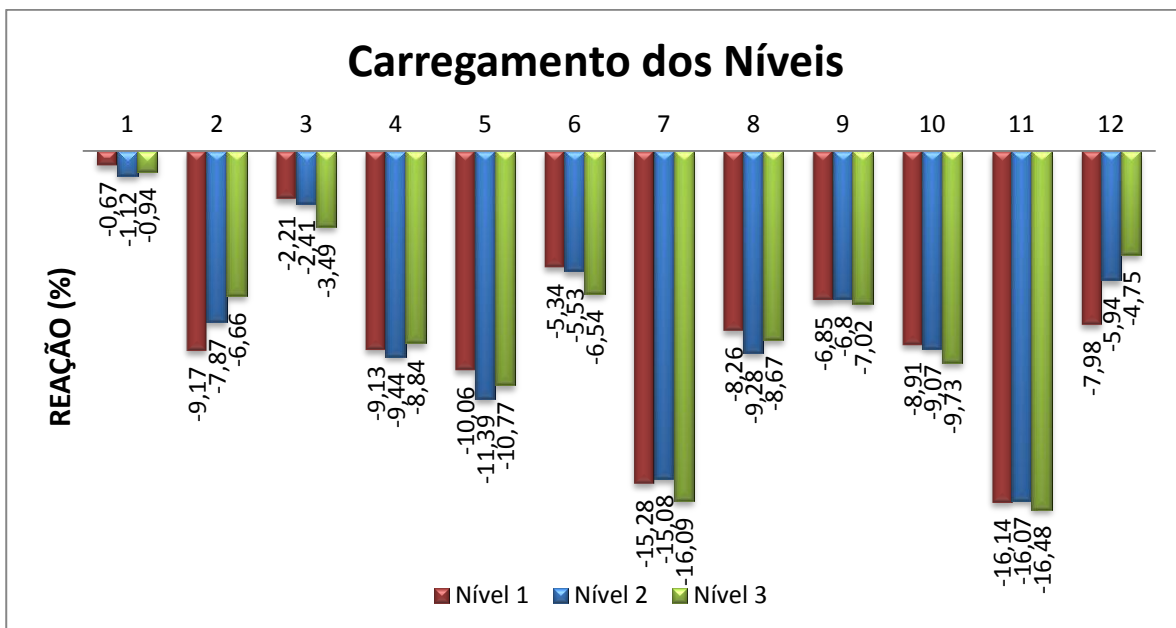
Para melhor visualização e discussão da quarta etapa de ensaios apresentam-se na tabela 7.8 os resultados percentuais para cada ponto. Na figura 7.26 representa-se graficamente a média dos resultados obtidos.

Tabela 7. 8 – Resultado percentual das reações de apoio: Carregamento dos níveis.



| Pontos | N1 (%) | N2 (%) | N3 (%) | Média (%) |
|--------|--------|--------|--------|-----------|
| P1 | -0,67 | -1,12 | -0,94 | -0,91 |
| P2 | -9,17 | -7,87 | -6,66 | -7,90 |
| P3 | -2,21 | -2,41 | -3,49 | -2,70 |
| P4 | -9,13 | -9,44 | -8,84 | -9,14 |
| P5 | -10,06 | -11,39 | -10,77 | -10,74 |
| P6 | -5,34 | -5,53 | -6,54 | -5,80 |
| P7 | -15,28 | -15,08 | -16,09 | -15,48 |
| P8 | -8,26 | -9,28 | -8,67 | -8,74 |
| P9 | -6,85 | -6,80 | -7,02 | -6,89 |
| P10 | -8,91 | -9,07 | -9,73 | -9,24 |
| P11 | -16,14 | -16,07 | -16,48 | -16,23 |
| P12 | -7,98 | -5,94 | -4,75 | -6,22 |

Figura 7. 26 – Percentual das reações de carregamento para a quarta etapa de ensaios: Carregamento dos níveis.



De acordo com os resultados apresentados na tabela 7.8, observa-se que os pontos P7 e P11 apresentaram os maiores percentuais de reação e apresentaram “pequena” variação ao longo do carregamento ascendente, sendo responsável, em média, por **31,7%** das reações oriundas do carregamento dos níveis.

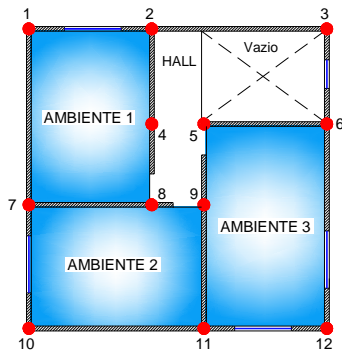
Os pontos internos (P4, P5, P8 e P9) também não apresentaram “grandes” diferenças percentuais ao carregamento ascendente, sendo responsáveis em absorver **35,5%** dos carregamentos impostos. Os pontos de apoio P2 e P12 tiveram a tendência em reduzir o percentual de reação ao longo dos carregamentos em níveis superiores.

O ponto externo P3, que não delimita nenhum ambiente carregado, tendeu a aumentar, com crescimento de **9%** quando carregado o segundo nível, e de **44,8%** quando carregamento o terceiro nível; desta forma, pode-se constatar que houve uma distribuição de cargas para o ponto P3, seja pela transferência de cargas entre as paredes ou pelo sistema de grelhas da base de sustentação. Ressalta-se novamente que entre os apoios P2 e P3 a parede não possui aberturas e que entre os apoios P3 e P6 há uma “pequena” abertura no 2º e 3º nível.

Os pontos internos P4, P5 e P8 apresentaram comportamentos semelhantes com relação às variações apresentadas, ocorrendo um aumento e uma queda do percentual das reações para os carregamentos do segundo e do terceiro níveis respectivamente. O ponto P6 teve aumento de apenas **3%** quando carregado o segundo nível, e de **18%** quando carregado o terceiro nível.

Foi explícito que o carregamento no terceiro nível proporcionou uma melhor distribuição percentual entre os pontos de apoio; fato este que evidencia a distribuição das ações verticais ao longo da altura da edificação.

A análise percentual dos pontos que circundam os ambientes, definidos para os três níveis de carregamentos, permite concluir que praticamente não houve diferença entre as médias dos percentuais (Tabela 7.9).

Tabela 7.9 – Percentual dos apoios que circundam os ambientes: Carregamento dos níveis.

| Pontos | N1 (%) | N2 (%) | N3 (%) | Média (%) |
|------------|--------|--------|--------|-----------|
| Ambiente 1 | 42,51 | 42,79 | 41,20 | 48,11 |
| Ambiente 2 | 55,44 | 56,30 | 57,99 | 48,27 |
| Ambiente 3 | 46,37 | 45,73 | 45,56 | 48,25 |
| Média: | 48,11 | 48,27 | 48,25 | 48,21 |

7.6 QUINTA ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO DA COBERTURA

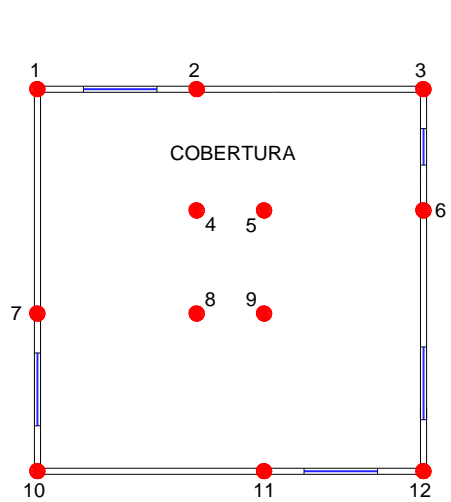
O objetivo desta etapa de ensaios foi analisar o efeito do carregamento na laje de cobertura. Para isto foi realizada a aplicação de carregamentos uniformemente distribuídos com diferentes magnitudes.

7.6.1 EFEITO DO CARREGAMENTO ISOLADO NA COBERTURA

Primeiramente foi inserido, na laje de cobertura, o carregamento de 1,50 kN, correspondente a 0,43 kN/m²; posteriormente aplicou-se 3,00 kN (0,86 kN/m²), e por fim, a mesma taxa de carregamento utilizada nos ensaios dos ambientes (1,30 kN/m²) referente à carga de 4,50 kN.

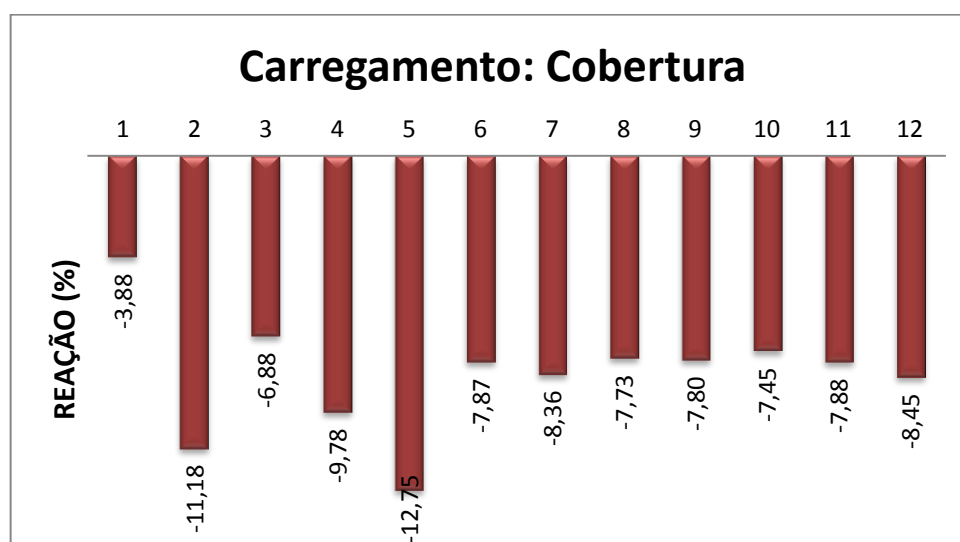
Com o carregamento da laje de cobertura observou-se que houve uma alteração na distribuição das ações em comparação com os outros ensaios das etapas anteriores. Nesta etapa as reações tenderam a uma distribuição mais uniforme, fato explicável pela maior abrangência da laje da cobertura que se apoia em todas as paredes do modelo.

Na tabela 7.10 são apresentados os resultados percentuais, obtidos para cada ponto de apoio, de acordo com o carregamento imposto, e a respectiva média obtida.

Tabela 7. 10 – Resultados das reações percentuais para o carregamento da laje da cobertura.


| Pontos | Resultados Percentuais | | | |
|--------|------------------------|---------|---------|-----------|
| | 1,50 kN | 3,00 kN | 4,50 kN | Média (%) |
| P1 | -5,88 | -2,45 | -3,30 | -3,88 |
| P2 | -9,55 | -12,34 | -11,65 | -11,18 |
| P3 | -5,27 | -7,40 | -7,99 | -6,88 |
| P4 | -12,46 | -8,60 | -8,29 | -9,78 |
| P5 | -13,43 | -11,58 | -13,25 | -12,75 |
| P6 | -7,76 | -7,68 | -8,17 | -7,87 |
| P7 | -6,30 | -9,85 | -8,92 | -8,36 |
| P8 | -8,67 | -7,09 | -7,42 | -7,73 |
| P9 | -9,08 | -8,10 | -6,22 | -7,80 |
| P10 | -6,85 | -6,92 | -8,57 | -7,45 |
| P11 | -5,87 | -10,18 | -7,58 | -7,88 |
| P12 | -8,89 | -7,81 | -8,65 | -8,45 |

Na figura 7.28 ilustram-se os resultados percentuais médios com a inserção do carregamento na laje da cobertura.

Figura 7. 27 – Reações percentuais médias para o carregamento da laje da cobertura.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 7.10 pode-se observar que para a primeira taxa de carregamento (1,50 kN: 0,43kN/m²) os pontos internos (P4, P5, P8, e P9) tenderam a absorver maiores esforços (43,6%). Já com a aplicação de maiores taxas de carregamento ficou evidente que as reações percentuais tenderam a se uniformizar com redução gradual das reações dos pontos

internos. Os pontos P2, P4, e P5 foram os que apresentaram maiores reações percentuais médias.

Por fim, constatou-se que os carregamentos inseridos na laje da cobertura do modelo físico reduzido produziram reações de apoio mais uniformes à medida que a taxa de carregamento foi acrescida. Nas etapas anteriores, quando carregado os ambientes e os níveis, determinadas regiões não foram submetidas ao carregamento uniformemente distribuído.

No capítulo 8 será apresentada a análise teórica dos procedimentos de distribuição de ações verticais fazendo-se uso do procedimento de Paredes Isoladas e do Procedimento de Grupos de Paredes para posteriores análises com os resultados experimentais.



ANÁLISE TEÓRICA DOS PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE AÇÕES VERTICAIS

8 ANÁLISE TEÓRICA DOS PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE AÇÕES VERTICAIS

Neste capítulo apresenta-se a análise teórica dos procedimentos de distribuição das ações verticais para a obtenção das reações de apoio da grelha de sustentação do modelo físico reduzido. Para a determinação das ações atuantes foram analisados o procedimento de Paredes Isoladas, o procedimento de Grupos de Paredes, e também uma proposta de criação de Novos Grupos de Paredes. A Modelagem por Elementos Finitos (MEF) será apresentada em capítulo subsequente (Capítulo 9).

Através da aplicação dos procedimentos usuais na determinação das ações atuantes nas paredes foi possível determinar as ações na grelha de sustentação, e por fim obter as reações de apoio e seus respectivos percentuais.

Para a determinação das reações de apoio da grelha de sustentação foi utilizado o *Software* SAP[®] 2000 V15. As vigas de sustentação foram definidas como elementos lineares de barras, com as suas respectivas propriedades geométricas, que serão apresentadas na Modelagem por Elementos Finitos. Adotou-se o comportamento elástico linear para o aço.

8.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS PARA ANÁLISE

As ações verticais atuantes nas paredes do modelo físico reduzido foram resultantes exclusivamente dos carregamentos uniformemente distribuídos impostos nas lajes, conforme descrito nos ensaios experimentais.

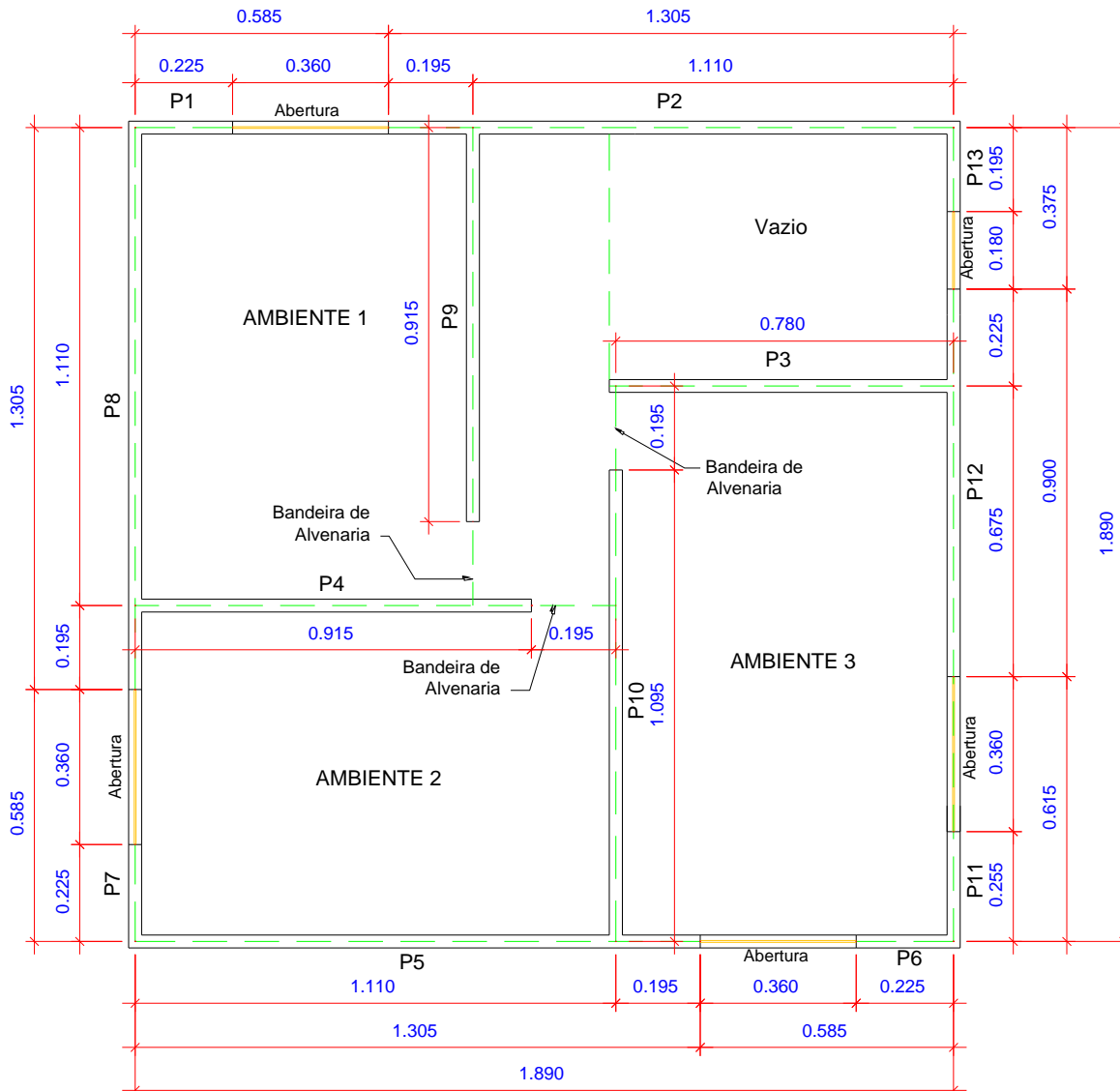
Para a determinação das cargas que atuam sobre cada parede, fez-se uso dos procedimentos convencionais adotados para o cálculo de pavimentos em concreto armado, subdividindo-se as lajes em triângulos e trapézios (ângulos de 30°, 45° e 60° graus para as charneiras), sendo que cada área determinada foi relacionada ao quinhão de carga a ser aplicada nas correspondentes paredes. Tal procedimento foi adotado visto que as lajes maciças do modelo físico reduzido foram armadas em duas direções e possuem armadura negativa, conforme apresentado no capítulo 6.

8.2 PROCEDIMENTO DE PAREDES ISOLADAS

No procedimento de Paredes Isoladas, conforme citado no capítulo 2, as paredes são “tratadas” isoladamente, não havendo nenhuma transferência de ações entre elas.

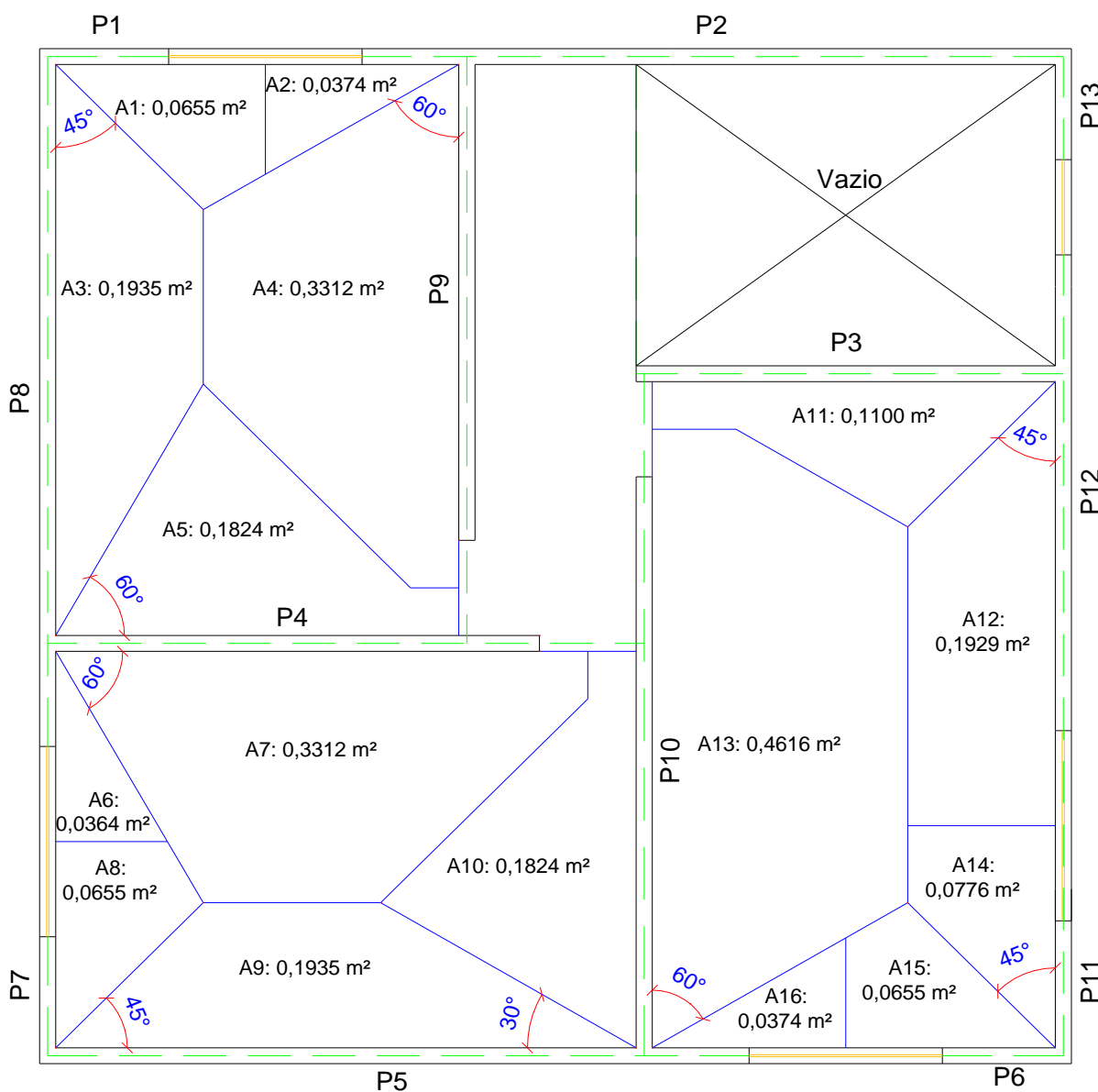
Na figura 8.1 apresenta-se a planta baixa do modelo físico reduzido com a identificação das respectivas paredes e suas dimensões lineares (eixo a eixo - metro), sendo que as aberturas e mudanças de direções foram os fatores determinantes para a definição das paredes.

Figura 8. 1 – Representação gráfica das paredes do modelo físico reduzido para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas (dimensões em m).



A área de influência foi determinada considerando-se apenas as áreas internas das lajes dos ambientes que foram submetidas ao carregamento uniformemente distribuído. Nas aberturas de portas e janelas, a divisão da área foi definida como metade do vão da abertura, salientando-se que nestas ainda se pode ter a alvenaria das “bandeiras”. Na figura 8.2 representam-se as respectivas áreas de influência, para cada parede em questão, para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas.

Figura 8. 2 – Representação gráfica das áreas de influência para aplicação do procedimento de Paredes Isoladas.



8.3 PROCEDIMENTO DOS GRUPOS DE PAREDES

No procedimento dos Grupos de Paredes, conforme exposto no capítulo 2, considera-se que as paredes pertencentes ao mesmo grupo interagem entre si formando grupos independentes. O fator determinante para a definição das paredes pertencentes a cada grupo foram as aberturas existentes. Os comprimentos dos grupos foram definidos de eixo a eixo (m), e para a determinação das áreas de influência seguiu-se o exposto para o procedimento de Paredes Isoladas.

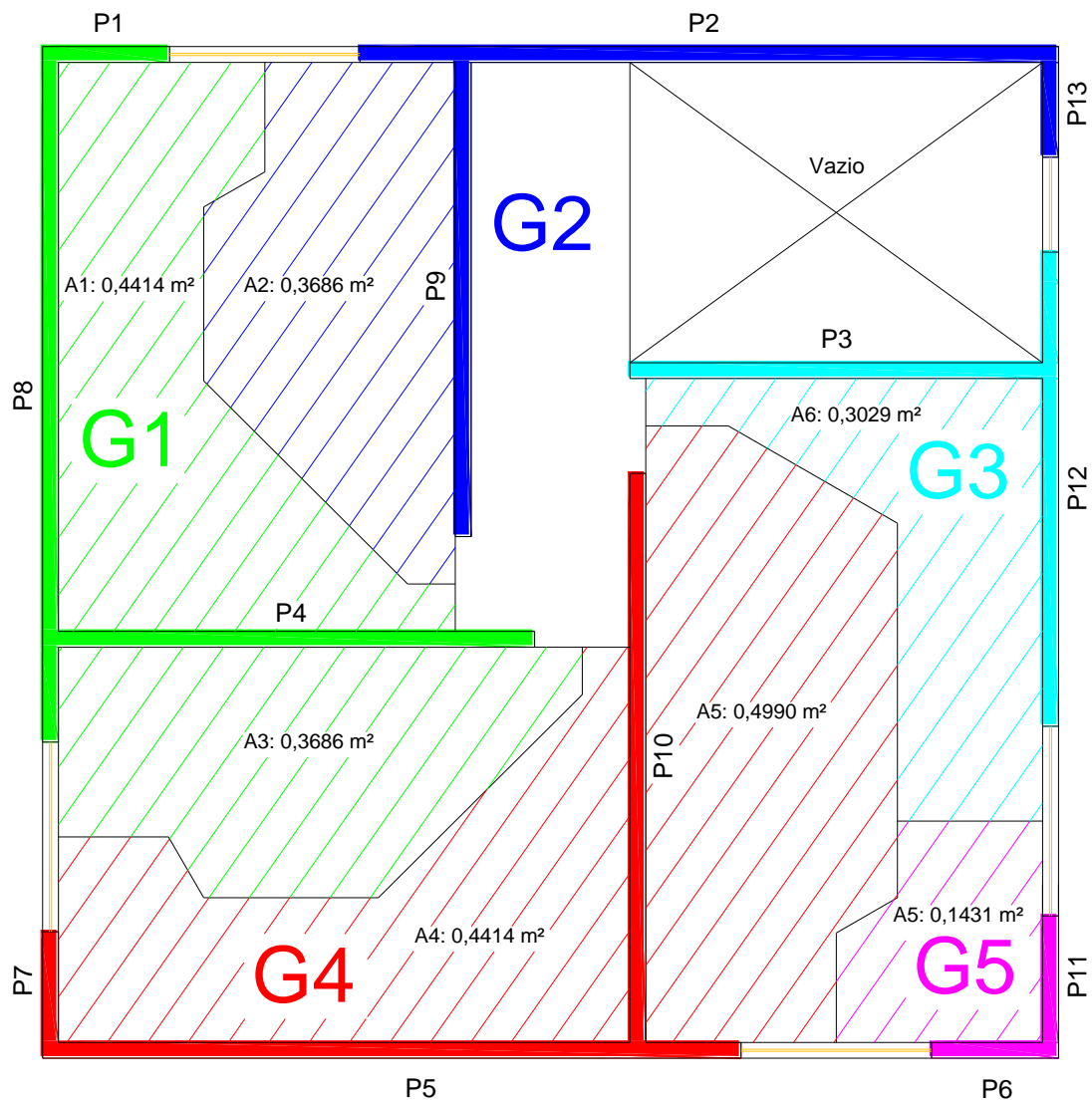
Na tabela 8.3 destacam-se as paredes pertencentes a cada grupo, e os grupos de paredes que recebem influência do carregamento imposto no respectivo ambiente.

Tabela 8. 3 – Relação de Grupos e Paredes que recebem a influência do carregamento de acordo com o ambiente carregado.

| Grupos | Paredes | Ambiente 1 | Ambiente 2 | Ambiente 3 | Cobertura |
|---------|---------|------------|------------|------------|-----------|
| Grupo 1 | P1 | √ | √ | | √ |
| | P4 | | | | |
| | P8 | | | | |
| Grupo 2 | P2 | √ | | | √ |
| | P9 | | | | |
| | P13 | | | | |
| Grupo 3 | P3 | | | √ | √ |
| | P12 | | | | |
| Grupo 4 | P5 | | √ | √ | √ |
| | P7 | | | | |
| | P10 | | | | |
| Grupo 5 | P6 | | | √ | √ |
| | P11 | | | | |

Conforme já exposto, a laje de cobertura ocupa toda a área do modelo físico reduzido e, assim, quando carregada, exerce influência sobre todos os grupos. Na figura 8.3 apresenta-se a definição dos grupos de paredes com as suas respectivas áreas de influência para a aplicação do procedimento dos Grupos de Paredes.

Figura 8. 3 – Representação gráfica das áreas de influência e dos grupos de paredes para a aplicação do Procedimento dos Grupos de Paredes.



8.4 DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES DE APOIO PARA A 1ª ETAPA DE ENSAIOS

A primeira etapa de ensaios consistiu na inserção de carregamentos uniformemente distribuídos nos ambientes 1 (A1N1, A1N2, A1N3), ou seja, foram carregados todos os Ambientes 1 nos diferentes níveis.

Nas tabelas 8.4 e 8.5 apresentam-se, respectivamente, o quadro de cargas atuantes nas paredes pelo procedimento de Paredes Isoladas e pelo procedimento dos Grupos de Paredes. Nas tabelas são apresentadas apenas as paredes que recebem influência do carregamento imposto. Salieta-se que o carregamento indicado no quadro de cargas refere-se apenas ao carregamento uniformemente distribuído imposto ao sistema, ou seja, não está sendo considerada a ação do peso próprio das lajes e das paredes.

Tabela 8. 4 – Quadro de cargas para o procedimento de Paredes Isoladas com carregamento no Ambiente 1.

| Paredes | Comprimento eixo a eixo (m) | Área (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carga (kN/m) | Trecho Carregado (kN/m) | Total (3x) (kN/m) |
|---------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------------|-------------------|
| P1 | 0,225 | 0,0655 | 0,0852 | 0,3784 | 0,3784 | 1,135 |
| P2 | 1,305 | 0,0374 | 0,0486 | 0,0373 | 0,2493 | 0,748 |
| P4 | 0,915 | 0,1824 | 0,2371 | 0,2591 | 0,3040 | 0,912 |
| P8 | 1,305 | 0,1935 | 0,2516 | 0,1928 | 0,2266 | 0,680 |
| P9 | 0,915 | 0,3312 | 0,4306 | 0,4706 | 0,4706 | 1,412 |

Os valores apresentados na coluna “Trecho carregado (kN/m)” da tabela 8.4 referem-se aos carregamentos efetivamente aplicados em cada pavimento.

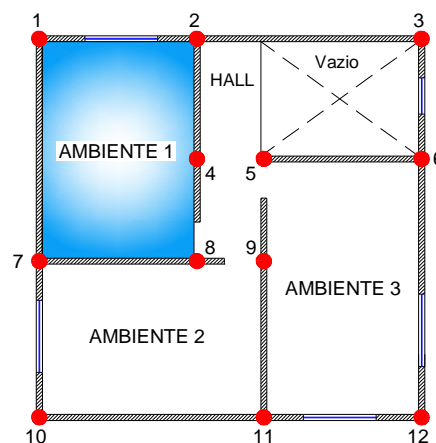
Tabela 8. 5 – Quadro de cargas para o procedimento dos Grupos de Paredes com carregamento no Ambiente 1.

| Grupos | Paredes | Comprimentos (m) | Área (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carga (kN/m) | Total (x3) (kN/m) |
|--------|---------|------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------|
| G1 | P1 | 0,225 | 2,445 | 0,4414 | 0,5738 | 0,2347 |
| | P4 | 0,915 | | | | |
| | P8 | 1,305 | | | | |
| G2 | P2 | 1,305 | 2,415 | 0,3686 | 0,4792 | 0,1984 |
| | P9 | 0,915 | | | | |
| | P13 | 0,195 | | | | |

Na tabela 8.6 são apresentados os percentuais de reação para cada ponto de sustentação da grelha, levando-se em consideração o procedimento de Paredes Isoladas e o procedimento dos Grupos de Paredes. Os valores negativos indicam que naquele ponto houve o acréscimo de cargas, e os valores positivos indicam o alívio.

Tabela 8. 6 – Resultados percentuais teóricos das reações apoio: Ambiente 1.

| Apoios | Paredes Isoladas (%) | Grupo de Paredes (%) |
|--------|----------------------|----------------------|
| P1 | -14,94 | -11,99 |
| P2 | -14,13 | -19,81 |
| P3 | +0,44 | -10,84 |
| P4 | -25,94 | -11,38 |
| P5 | +0,30 | -1,52 |
| P6 | -0,27 | -0,17 |
| P7 | -21,85 | -25,20 |
| P8 | -15,57 | -14,08 |
| P9 | +4,08 | +2,70 |
| P10 | +2,15 | +1,92 |
| P11 | -0,30 | -0,29 |
| P12 | +0,04 | +0,10 |

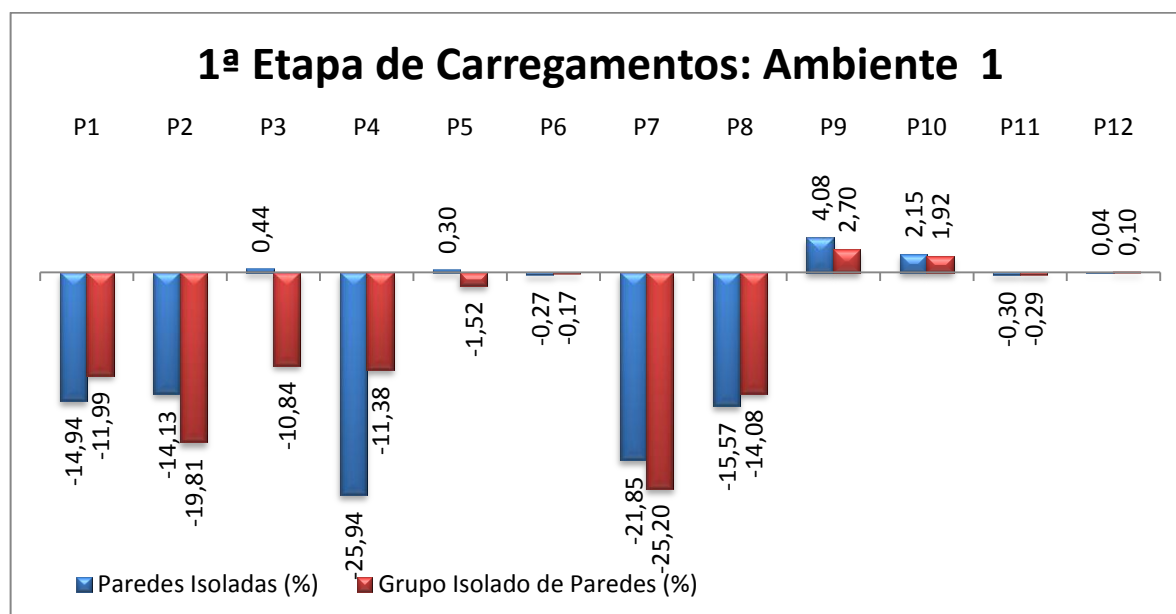


No procedimento de Paredes Isoladas obteve-se que **92,4%** das reações correspondem aos pontos que delimitam o ambiente carregado (P1, P2, P4, P7, e P8). Já para os Grupos de Paredes, este percentual foi de **82,5%**. Salienta-se que para os procedimentos teóricos, os percentuais não se alteram de acordo com o carregamento em níveis superiores, visto que o carregamento aplicado na grelha corresponde ao somatório de todos os pavimentos.

Os pontos P9, P10 e P12 apresentaram alívio de reação para os dois procedimentos apresentados. Já para o procedimento de Paredes Isoladas os pontos P3 e P5 também apresentaram o referido alívio. Pode-se observar que os pontos que apresentaram o alívio delimitam externamente a área carregada, ou seja, são os pontos de apoio sucessivos às vigas de sustentação submetidas às ações.

Na figura 8.4 ilustram-se graficamente os resultados. Observa-se que os maiores valores percentuais estão localizados nos pontos de apoio que delimitam o ambiente carregado.

Figura 8. 4 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes: Ambiente 1.



Com o objetivo de representar a localização das ações uniformemente distribuídas na grelha de sustentação do modelo, apresentam-se nas figuras 8.5 e 8.6, respectivamente, as cargas referentes ao procedimento de Paredes Isoladas e ao procedimento de Grupos de Paredes, para o carregamento no Ambiente 1. Salienta-se que todas as figuras são esquemáticas, e que representam as ações uniformemente distribuídas (de cima para baixo) independente do sentido representado.

Figura 8.5 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Ambiente 1.

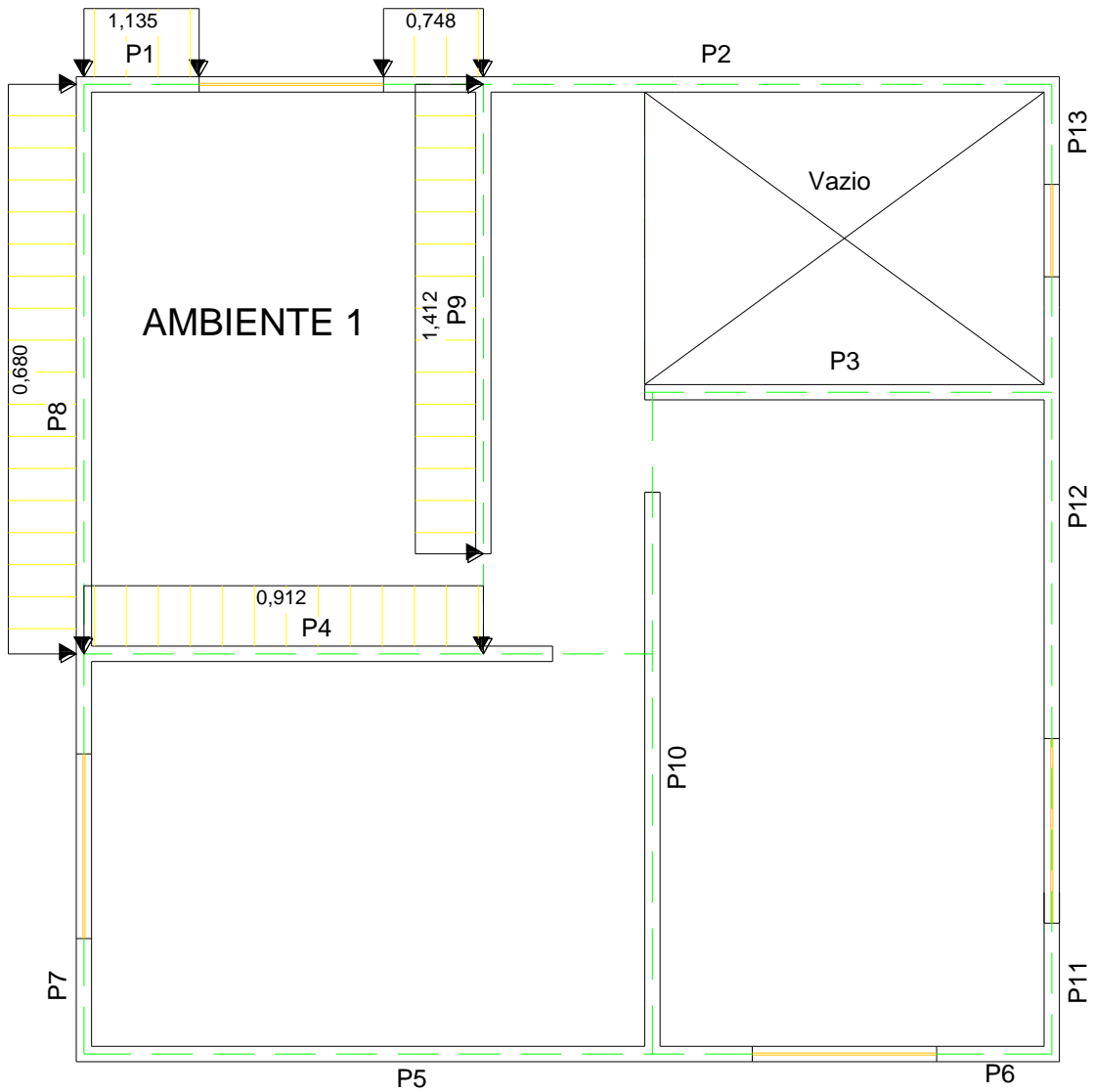
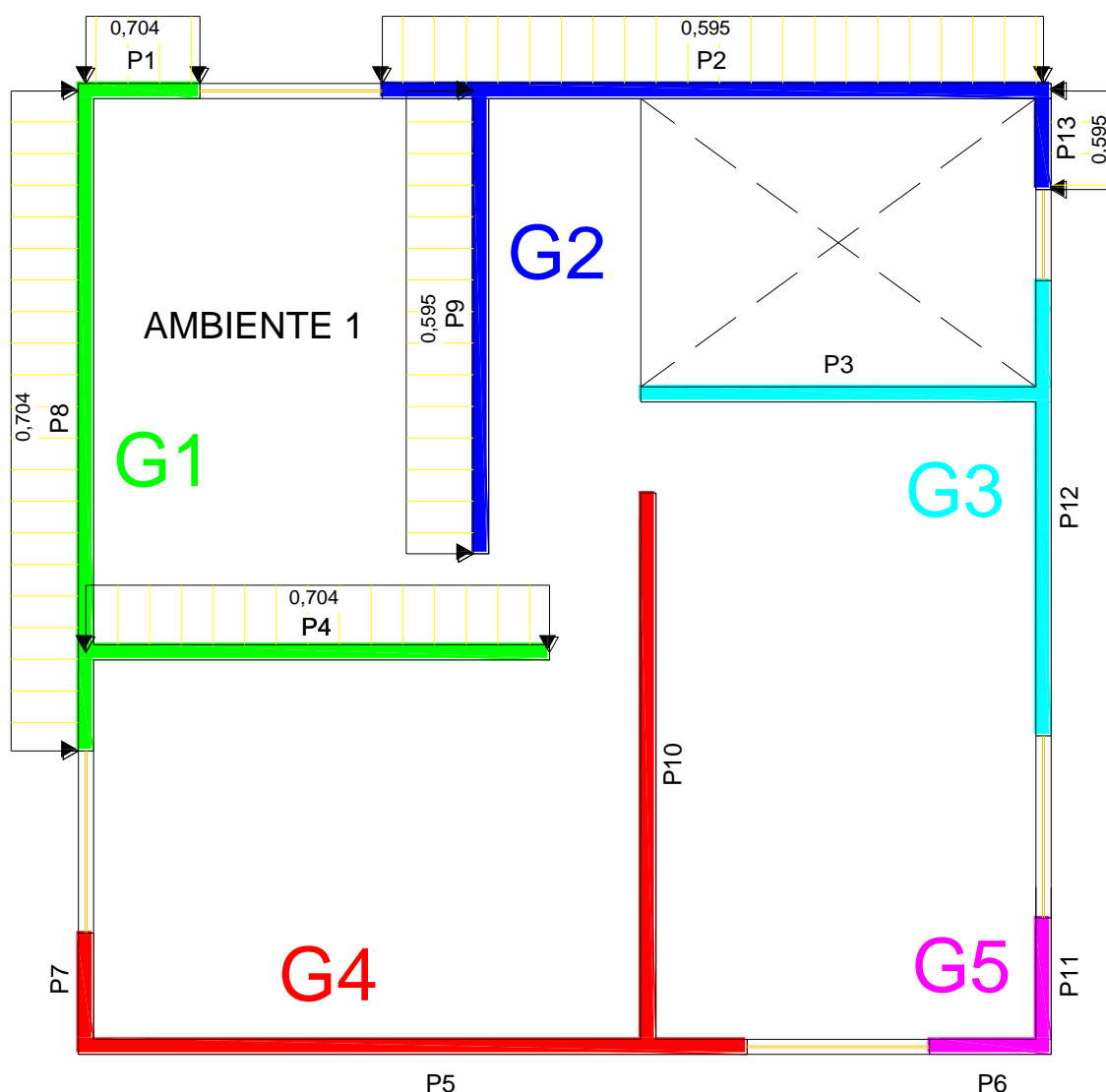


Figura 8.6 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Grupos de Paredes: Ambiente 1.



8.5 DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES DE APOIO PARA A 2ª ETAPA DE ENSAIOS

A segunda etapa de ensaios consistiu na aplicação de carregamentos uniformemente distribuídos nos Ambientes 2 (A2N1, A2N2, A2N3); ou seja, foram carregados todos os Ambientes 2 nos diferentes níveis.

Nas tabelas 8.7 e 8.8 apresentam-se, respectivamente, o quadro de cargas atuantes nas paredes pelo procedimento de Paredes Isoladas e pelo procedimento dos Grupos de Paredes.

Tabela 8. 7 – Quadro de cargas para o procedimento de Paredes Isoladas com carregamento no Ambiente 2.

| Paredes | Comprimento eixo a eixo (m) | Área (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carga (kN/m) | Trecho Carregado (kN/m) | Total (3x) (kN/m) |
|---------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------------|-------------------|
| P4 | 0,915 | 0,3312 | 0,4306 | 0,4706 | 0,4706 | 1,412 |
| P5 | 1,305 | 0,1935 | 0,2516 | 0,3225 | 0,3225 | 0,968 |
| P7 | 0,225 | 0,0655 | 0,0852 | 0,3784 | 0,3784 | 1,135 |
| P8 | 1,305 | 0,0364 | 0,0473 | 0,2427 | 0,2427 | 0,728 |
| P10 | 1,095 | 0,1824 | 0,2371 | 0,3040 | 0,3040 | 0,912 |

Tabela 8. 8 – Quadro de cargas para o procedimento dos Grupos de Paredes com carregamento no Ambiente 2.

| Grupos | Paredes | Comprimentos (m) | Área (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carga (kN/m) | Total (x3) (kN/m) |
|--------|---------|------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------|
| G1 | P1 | 0,225 | 2,445 | 0,3686 | 0,4792 | 0,1960 |
| | P4 | 0,915 | | | | |
| | P8 | 1,305 | | | | |
| G4 | P5 | 1,305 | 2,625 | 0,4414 | 0,5738 | 0,2186 |
| | P7 | 0,225 | | | | |
| | P10 | 1,095 | | | | |

Na tabela 8.9 são apresentados os percentuais de reação para cada ponto de apoio de sustentação da grelha, levando-se em consideração o procedimento de Paredes Isoladas e o procedimento dos Grupos de Paredes. Na figura 8.7 ilustram-se graficamente os resultados.

Tabela 8. 9 – Resultados percentuais das reações apoio para o carregamento de todos os Ambientes 2.

| Apoios | Paredes Isoladas (%) | Grupos de Paredes (%) |
|--------|----------------------|-----------------------|
| P1 | +0,53 | -11,66 |
| P2 | -0,48 | -0,28 |
| P3 | +0,07 | +0,18 |
| P4 | +0,05 | -1,26 |
| P5 | +2,66 | +0,39 |
| P6 | -0,35 | -0,30 |
| P7 | -16,02 | -22,35 |
| P8 | -27,55 | -13,79 |
| P9 | -6,38 | -11,75 |
| P10 | -17,33 | -11,51 |
| P11 | -25,86 | -24,67 |
| P12 | +2,73 | +1,87 |

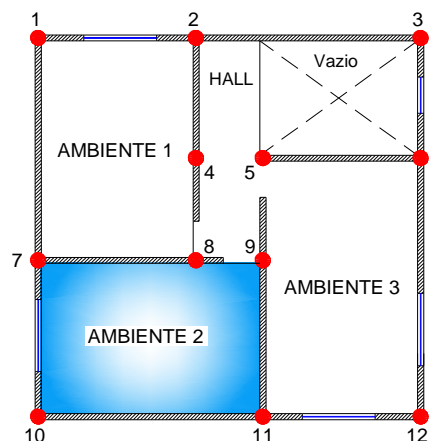
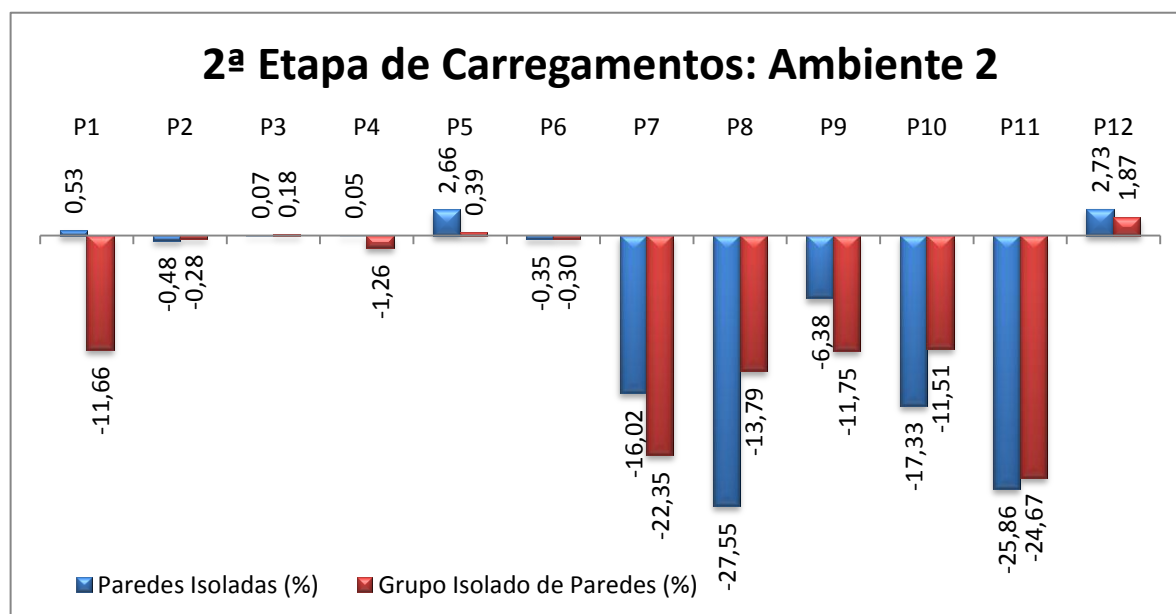


Figura 8.7 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes: Ambiente 2.



Através dos resultados teóricos observa-se que os maiores valores percentuais foram obtidos nos pontos de apoio que delimitam o ambiente carregado (P7, P8, P9, P10 e P11), conforme ocorrido na primeira etapa de ensaios (A1). Para o procedimento de Paredes Isoladas o percentual dos pontos que delimitam a área carregada foi de **93,1%**, já para os Grupos de Paredes o percentual foi de **84,1%**.

Os pontos P1, P3, P4, P5, e P12 apresentaram alívio de reações na aplicação do procedimento de Paredes Isoladas, já para o procedimento de Grupos de Paredes os pontos P1 e P4 não apresentaram este comportamento.

Conforme ocorrido na primeira etapa de carregamentos (Ambiente 1) pode-se observar que os pontos que apresentaram o alívio delimitam externamente a área carregada.

Nas figuras 8.8 e 8.9 são representadas as cargas referentes ao procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes para o carregamento do Ambiente 2.

Figura 8. 8 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Ambiente 2.

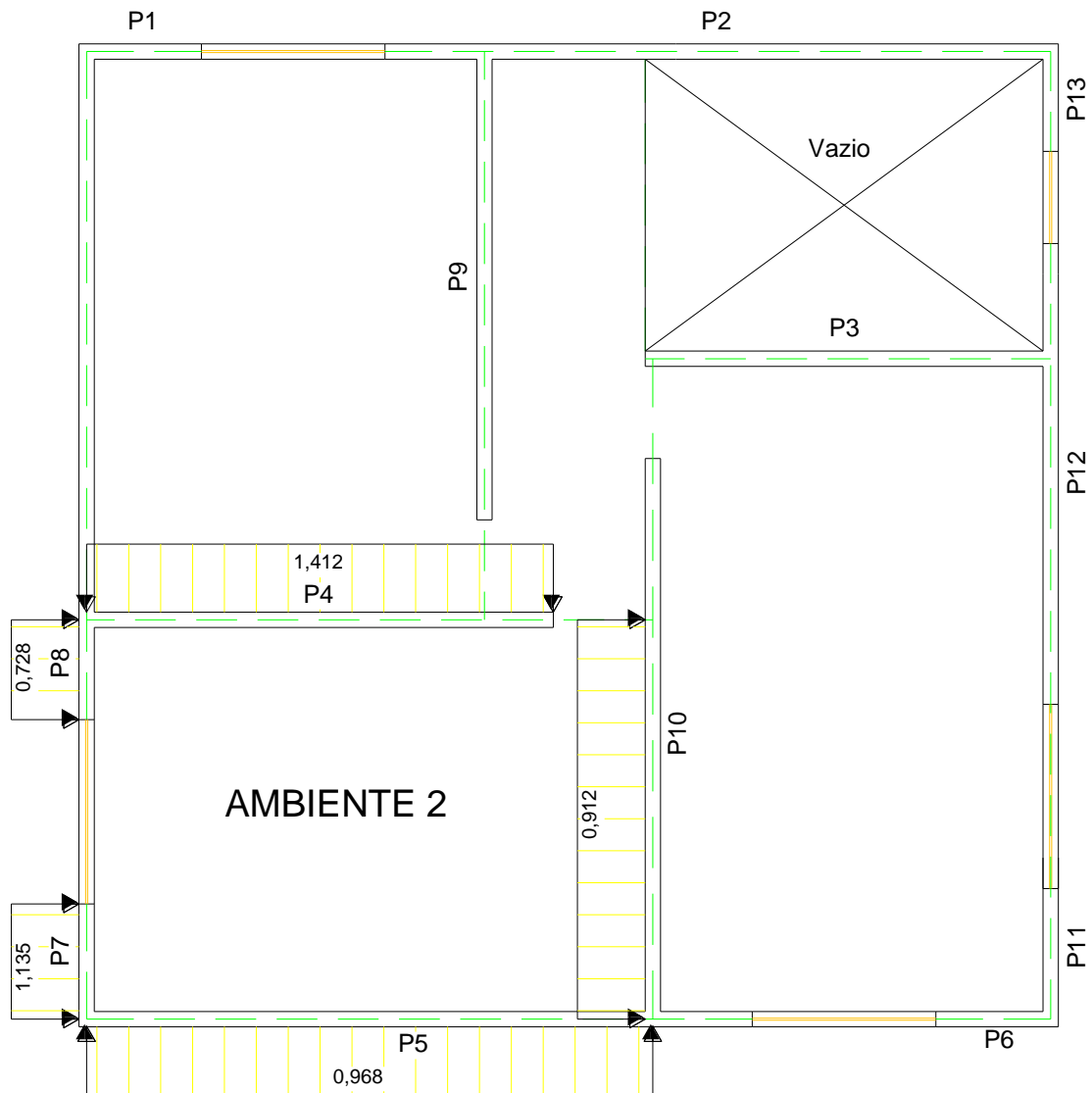
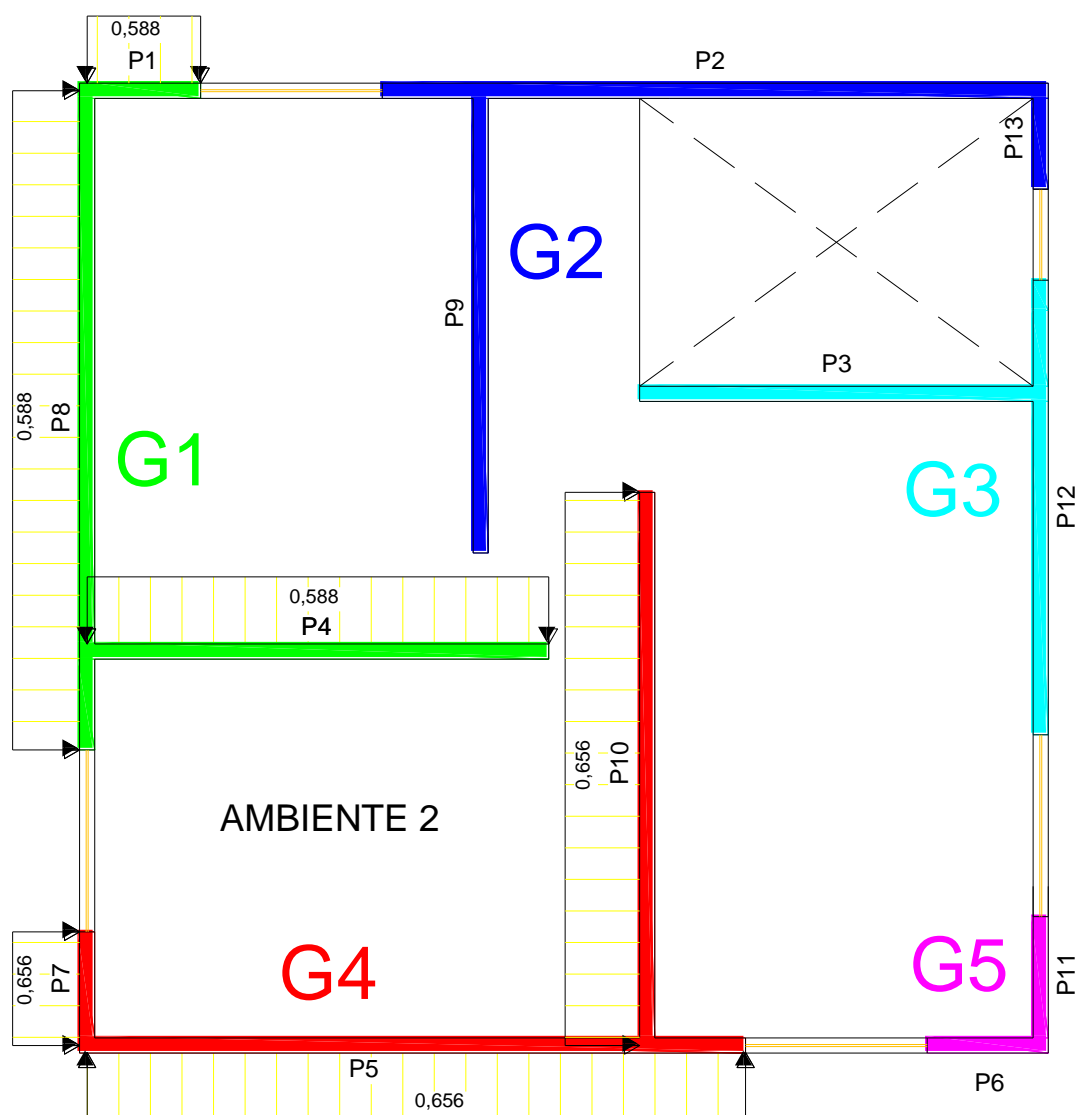


Figura 8.9 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento dos Grupos de Paredes: Ambiente 2.



8.6 DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES DE APOIO PARA A 3ª ETAPA DE ENSAIOS

A terceira etapa de ensaios consistiu na aplicação de carregamentos uniformemente distribuídos em todos Ambientes 3 (A3N1, A3N2, A3N3), ou seja, foram carregados todos os Ambientes 3 nos diferentes níveis. Nas tabelas 8.10 e 8.11 apresenta-se respectivamente o quadro de cargas atuantes nas paredes pelo procedimento de Paredes Isoladas e procedimento dos Grupos de Paredes.

Tabela 8. 10 – Quadro de cargas para o procedimento de Paredes Isoladas com carregamento no Ambiente 3.

| Paredes | Comprimento eixo a eixo (m) | Área (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carga (kN/m) | Trecho Carregado (kN/m) | Total (3x) (kN/m) |
|---------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------------|-------------------|
| P3 | 0,780 | 0,1100 | 0,1430 | 0,1833 | 0,1833 | 0,550 |
| P5 | 1,305 | 0,0374 | 0,0486 | 0,0373 | 0,2493 | 0,748 |
| P6 | 0,225 | 0,0655 | 0,0852 | 0,3784 | 0,3784 | 1,135 |
| P10 | 1,095 | 0,4616 | 0,6001 | 0,5480 | 0,5480 | 1,644 |
| P11 | 0,255 | 0,0776 | 0,1009 | 0,3956 | 0,3956 | 1,187 |
| P12 | 0,900 | 0,1929 | 0,2508 | 0,2786 | 0,3715 | 1,115 |

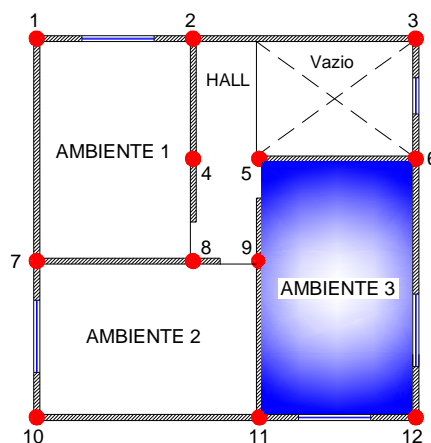
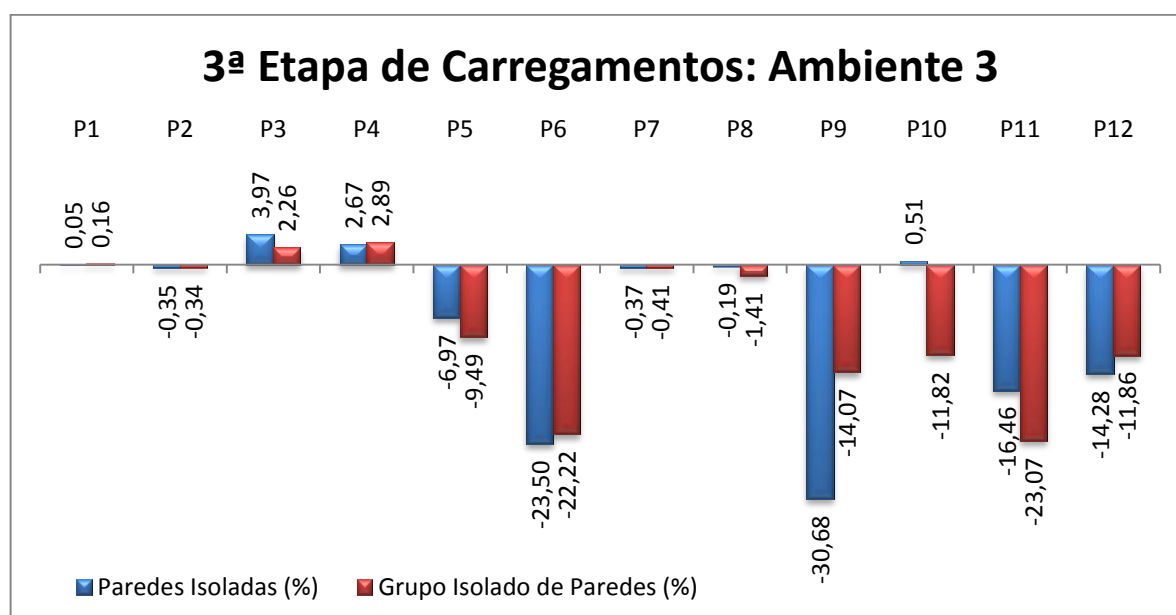
Tabela 8. 11 – Quadro de cargas para o procedimento dos Grupos de Paredes com carregamento no Ambiente 3.

| Grupos | Paredes | Comprimentos (m) | Área (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carga (kN/m) | Total (x3) (kN/m) |
|--------|---------|------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------|
| G3 | P3 | 0,780 | 1,680 | 0,3029 | 0,3938 | 0,2344 |
| | P12 | 0,900 | | | | |
| G4 | P5 | 1,305 | 2,625 | 0,4990 | 0,6487 | 0,2477 |
| | P7 | 0,225 | | | | |
| | P10 | 1,095 | | | | |
| G5 | P6 | 0,225 | 0,480 | 0,1431 | 0,1860 | 0,3876 |
| | P11 | 0,255 | | | | |

Na tabela 8.12 são apresentados os percentuais de reação para cada ponto de apoio de sustentação da grelha, levando-se em consideração o procedimento de Paredes Isoladas e o procedimento dos Grupos de Paredes. Na figura 8.10 ilustram-se graficamente os resultados.

Tabela 8. 12 – Resultados percentuais das reações de apoio para o carregamento de todos os Ambientes 3.

| Apoios | Paredes Isoladas (%) | Grupos de Paredes (%) |
|--------|----------------------|-----------------------|
| P1 | +0,05 | +0,16 |
| P2 | -0,35 | -0,34 |
| P3 | +3,97 | +2,26 |
| P4 | +2,67 | +2,89 |
| P5 | -6,97 | -9,49 |
| P6 | -23,50 | -22,22 |
| P7 | -0,37 | -0,41 |
| P8 | -0,19 | -1,41 |
| P9 | -30,68 | -14,07 |
| P10 | +0,51 | -11,82 |
| P11 | -16,46 | -23,07 |
| P12 | -14,28 | -11,86 |

**Figura 8. 10** – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes: Ambiente 3.

Através dos resultados teóricos nota-se que os maiores valores percentuais foram obtidos nos pontos de apoio que delimitam o ambiente carregado (P5, P6, P9, P11, e P12), conforme ocorrido nas outras duas etapas anteriores.

Para o procedimento de Paredes Isoladas o percentual dos pontos que delimitam a área carregada foi de **91,9%**, já para os Grupos de Paredes o percentual foi de **80,7%**.

Os pontos P1, P3, e P4 apresentaram alívio de reações para os dois procedimentos. O ponto P10, além dos pontos citados, também apresentou alívio de reações no procedimento de Paredes Isoladas.

Com exceção do ponto P8, observou-se nesta etapa de carregamentos que os pontos que apresentaram alívio de reações delimitam externamente a área carregada, conforme ocorrido nas etapas anteriores.

Na tabela 8.13 apresenta-se o resumo dos valores percentuais para os pontos que delimitam os ambientes submetidos ao carregamento, levando-se em consideração o procedimento de Paredes Isoladas e o procedimento dos Grupos de Paredes.

Tabela 8. 13 – Resumo dos valores percentuais para os pontos que delimitam os ambientes.

| Ambiente carregado | Paredes Isoladas (%) | Grupos de Paredes (%) | Diferença (%) |
|--------------------|----------------------|-----------------------|---------------|
| Ambiente 1 | 92,4 | 82,5 | 10,0 |
| Ambiente 2 | 93,1 | 84,1 | 9,1 |
| Ambiente 3 | 91,9 | 80,7 | 11,2 |
| Média | 92,5 | 82,4 | 10,1 |

Através dos resultados apresentados na tabela 8.13 tem-se que para o procedimento de Paredes Isoladas, em média, **92,5%** dos carregamentos permaneceram nos apoios que circundam o ambiente carregado, e que para o procedimento dos Grupos de Paredes, este percentual foi de **82,4%**, gerando uma diferença média de 10,1% entre os procedimentos.

Nas figuras 8.11 e 8.12 são representadas as cargas referentes ao procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes para o carregamento do Ambiente 3.

Figura 8. 11 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Ambiente 3.

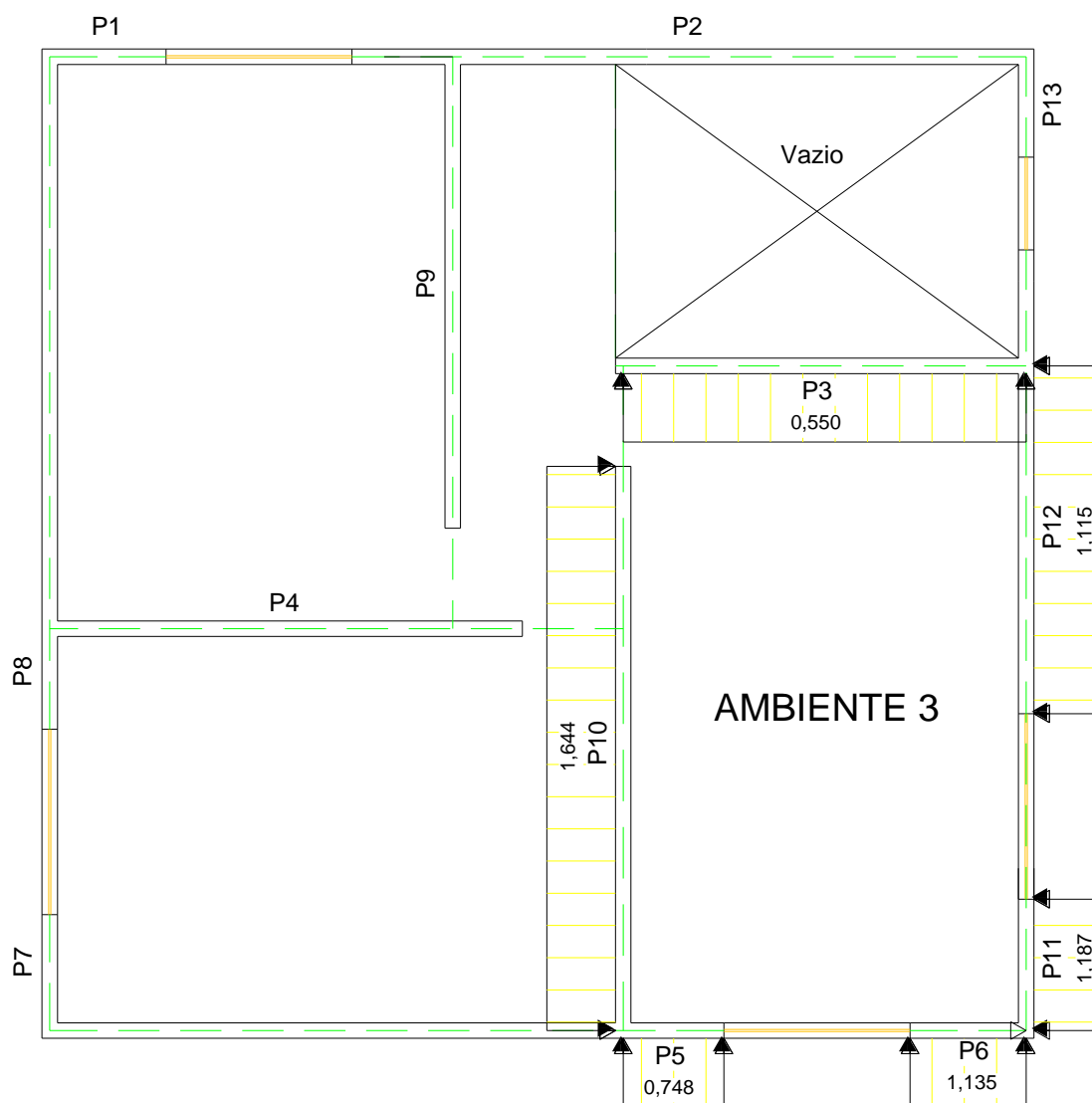
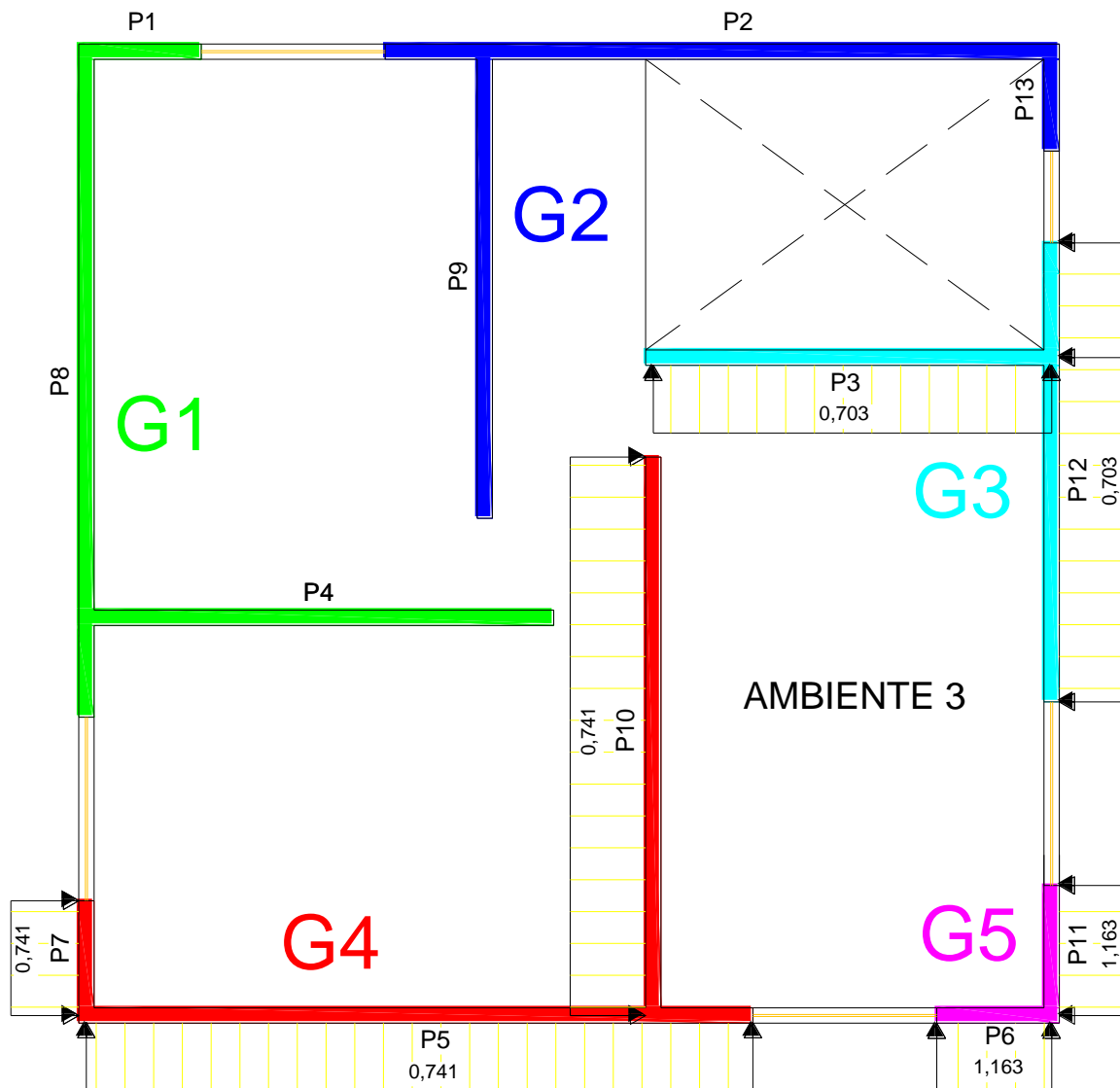


Figura 8. 12 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento dos Grupos de Paredes: Ambiente 3.



8.7 DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES DE APOIO PARA A 4ª ETAPA DE ENSAIOS

A quarta etapa de ensaios consistiu na aplicação de carregamentos uniformemente distribuídos em todos os ambientes por níveis, ou seja, foram carregados os ambientes do primeiro nível (A1N1, A2N1, A3N1); posteriormente os ambientes do segundo nível (A1N2, A2N2, A3N2), e por fim, os ambientes do terceiro nível (A1N3, A2N3, A3N3); desta forma todos os ambientes do modelo físico reduzido foram carregados.

Na tabela 8.14 apresentam-se o quadro de cargas atuante nas paredes pelo procedimento dos Grupos de Paredes. Para o procedimento de Paredes Isoladas não será apresentado o quadro devido a diferentes trechos de carregamentos, mas os mesmos encontram-se na representação esquemática das ações (Figura 8.14).

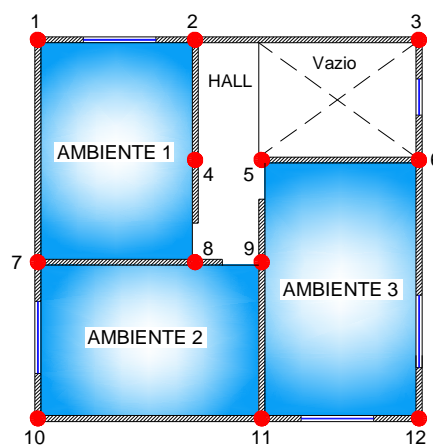
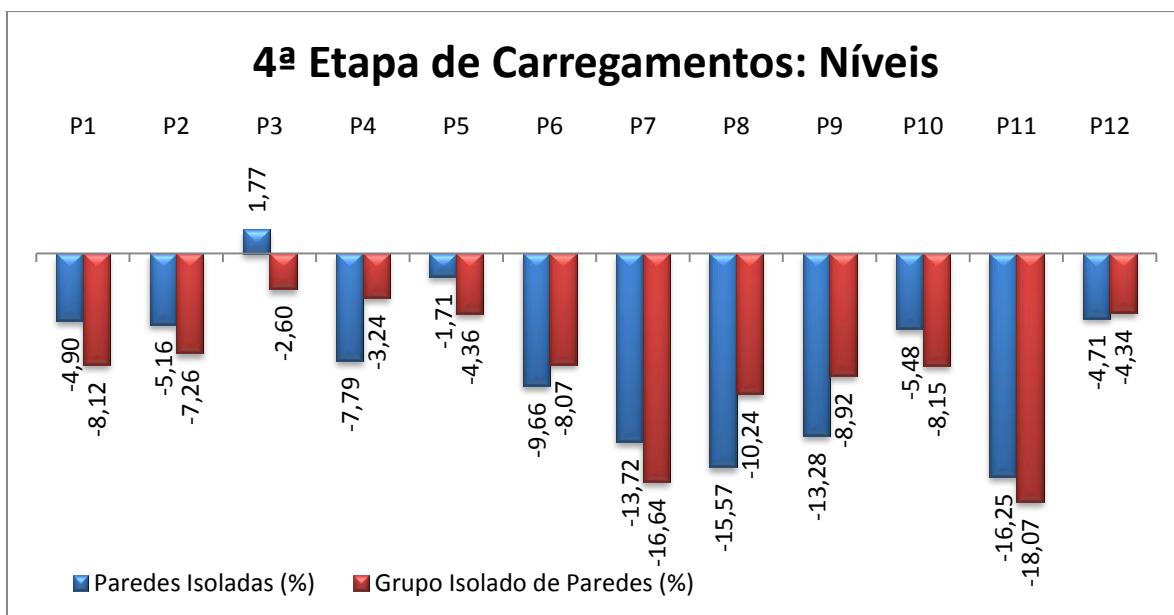
Tabela 8. 14 – Quadro de cargas para o procedimento dos Grupos de Paredes: Carregamento em todos os níveis.

| Paredes | Procedimento de Grupos de Paredes (kN/m) | | | TOTAL (kN/m) |
|---------|--|------------|------------|--------------|
| | Ambiente 1 | Ambiente 2 | Ambiente 3 | |
| P1 | 0,704 | 0,588 | - | 1,292 |
| P2 | 0,595 | - | - | 0,595 |
| P3 | - | - | 0,703 | 0,703 |
| P4 | 0,704 | 0,588 | - | 1,292 |
| P5 | - | 0,656 | 0,741 | 1,397 |
| P6 | - | - | 1,163 | 1,163 |
| P7 | - | 0,656 | 0,741 | 1,397 |
| P8 | 0,704 | 0,588 | - | 1,292 |
| P9 | 0,595 | - | - | 0,595 |
| P10 | - | 0,656 | 0,741 | 1,397 |
| P11 | - | - | 1,163 | 1,163 |
| P12 | - | - | 0,703 | 0,703 |
| P13 | 0,595 | - | - | 0,595 |

Na tabela 8.15 são apresentados os percentuais de reação para cada ponto de apoio de sustentação da grelha levando-se em consideração o procedimento de Paredes Isoladas e o procedimento dos Grupos de Paredes. Na figura 8.13 ilustram-se graficamente os resultados.

Tabela 8. 15 – Resultados percentuais das reações apoio: Carregamento de todos os níveis.

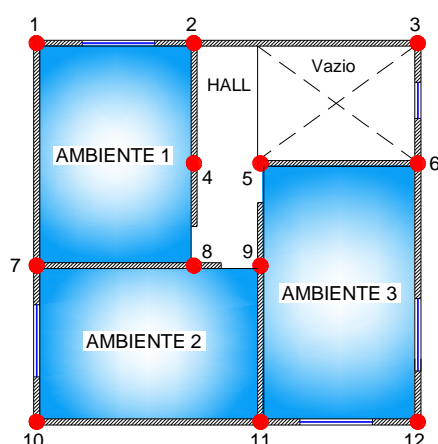
| Apoios | Paredes Isoladas (%) | Grupos de Paredes (%) |
|--------|----------------------|-----------------------|
| P1 | -4,90 | -8,12 |
| P2 | -5,16 | -7,26 |
| P3 | +1,77 | -2,60 |
| P4 | -7,79 | -3,24 |
| P5 | -1,71 | -4,36 |
| P6 | -9,66 | -8,07 |
| P7 | -13,72 | -16,64 |
| P8 | -15,57 | -10,24 |
| P9 | -13,28 | -8,92 |
| P10 | -5,48 | -8,15 |
| P11 | -16,25 | -18,07 |
| P12 | -4,71 | -4,34 |

**Figura 8. 13** – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes: Carregamento dos níveis.

Através dos resultados teóricos observou-se que para os dois procedimentos analisados as reações de apoio tenderam a se concentrar nos pontos internos do modelo circunvizinhos a áreas carregadas, e nos pontos internos de borda (P7 e P11). Através do procedimento de Paredes Isoladas pode-se confirmar o exposto, visto que a magnitude das reações dos pontos de canto (P1, P10, e P12) é próxima.

Na tabela 8.16 apresentam-se os resultados da somatória das reações dos pontos que delimitam o respectivo ambiente carregado. Com o carregamento dos níveis pôde-se obter que o percentual de reações foi próximo para os dois procedimentos teóricos, com média de 52,4% para o procedimento de Paredes Isoladas, e de 50,4% para o procedimento dos Grupos de Paredes.

Tabela 8. 16 – Percentual da reações que delimitam o ambiente: Carregamento dos níveis pelo procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes.



| Ambientes | Paredes Isoladas (%) | Grupos de Paredes (%) |
|------------|----------------------|-----------------------|
| Ambiente 1 | 47,1% | 45,5% |
| Ambiente 2 | 64,3% | 62,0% |
| Ambiente 3 | 45,6% | 43,8% |
| Média: | 52,4% | 50,4% |

Como forma de analisar o efeito de sobreposição, do carregamento dos ambientes, com o carregamento dos níveis, apresentam-se na tabela 8.17 os respectivos resultados para o procedimento de Paredes Isoladas. Através da comparação entre a média dos ambientes, e os níveis pode-se confirmar a credibilidade dos resultados obtidos.

Tabela 8. 17 – Quadro comparativo entre o carregamento dos ambientes e o carregamento dos níveis para o procedimento de Paredes Isoladas.

| Apoios | Ambiente 1 (%) | Ambiente 2 (%) | Ambiente 3 (%) | Média dos Ambientes (%) | Níveis (%) |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|--------------|
| P1 | -14,94 | +0,53 | +0,05 | -4,79 | -4,90 |
| P2 | -14,13 | -0,48 | -0,35 | -4,99 | -5,16 |
| P3 | +0,44 | +0,07 | +3,97 | +1,49 | +1,77 |
| P4 | -25,94 | +0,05 | +2,67 | -7,74 | -7,79 |
| P5 | +0,30 | +2,66 | -6,97 | -1,34 | -1,71 |
| P6 | -0,27 | -0,35 | -23,50 | -8,04 | -9,66 |
| P7 | -21,85 | -16,02 | -0,37 | -12,75 | -13,72 |
| P8 | -15,57 | -27,55 | -0,19 | -14,44 | -15,57 |
| P9 | +4,08 | -6,38 | -30,68 | -10,99 | -13,28 |
| P10 | +2,15 | -17,33 | +0,51 | -4,89 | -5,48 |
| P11 | -0,30 | -25,86 | -16,46 | -14,21 | -16,25 |
| P12 | +0,04 | +2,73 | -14,28 | -3,84 | -4,71 |

Nas figuras 8.14 e 8.15 apresentam-se, respectivamente, as cargas referentes ao procedimento de Paredes Isoladas e Grupos de Paredes para o carregamento dos níveis.

Figura 8. 14 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Níveis.

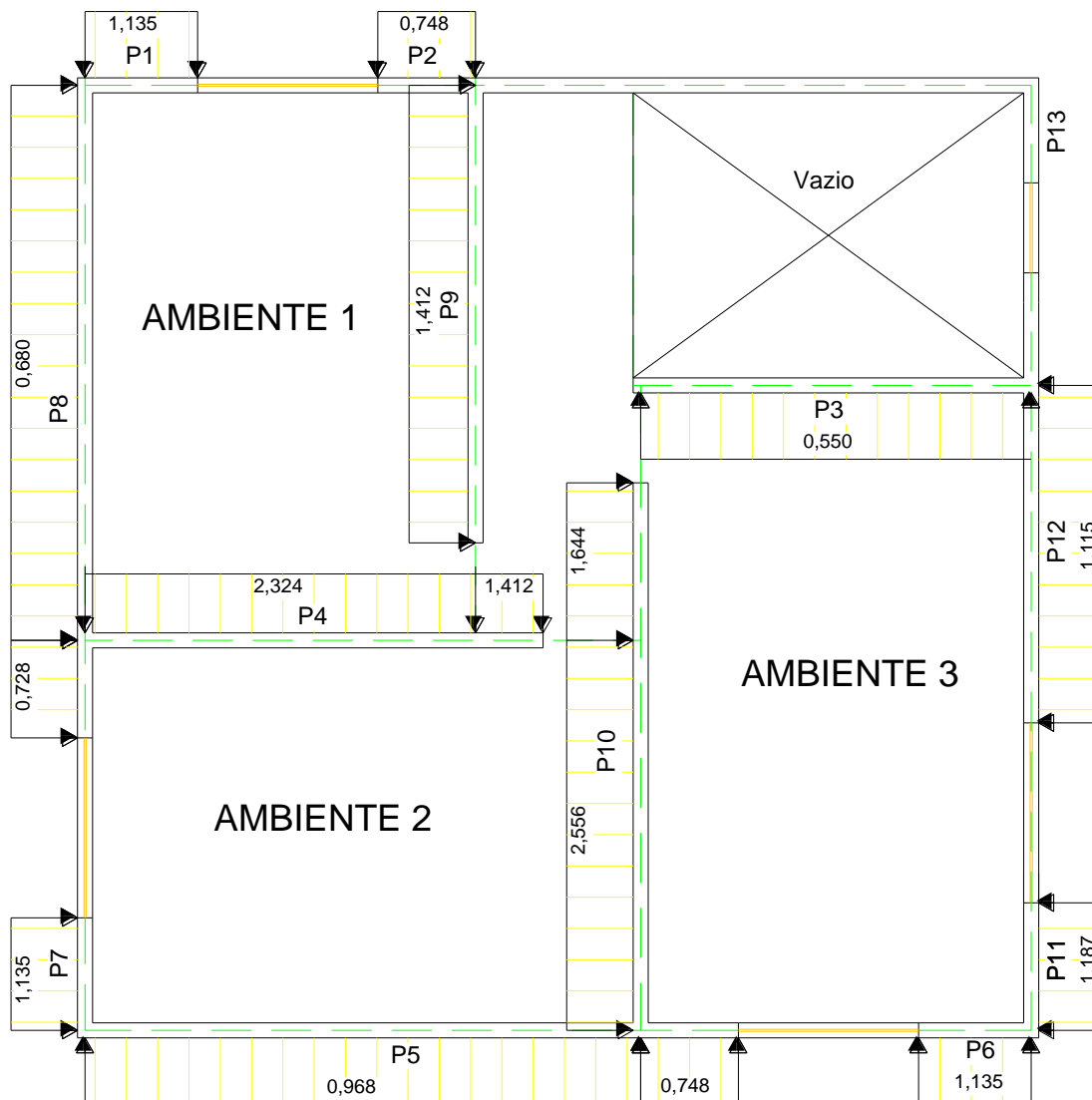
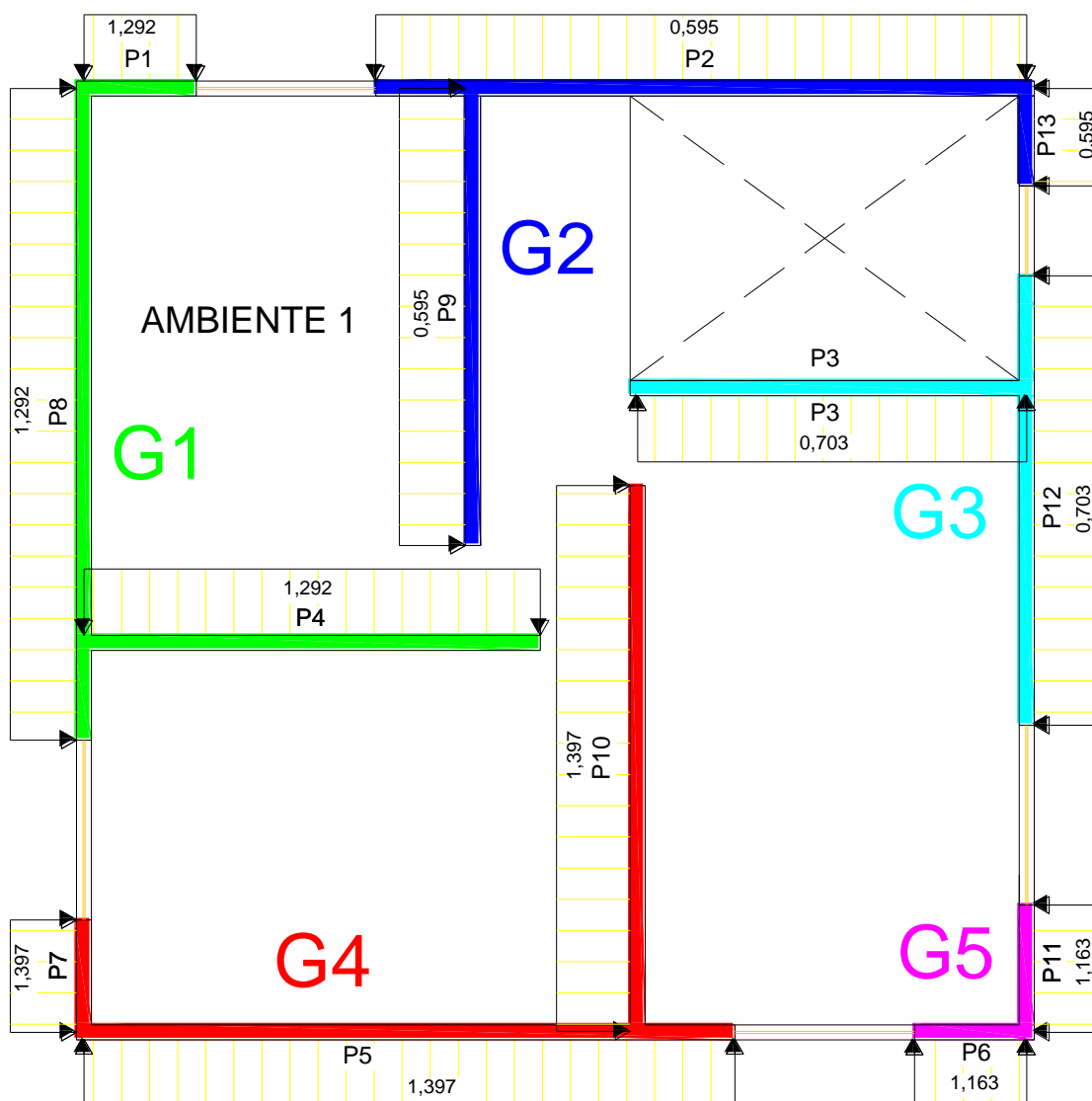


Figura 8. 15 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento dos Grupos de Paredes: Níveis.



8.8 DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES PARA O CARREGAMENTO DA COBERTURA

Conforme descrito na análise experimental, foram aplicados carregamentos na laje de cobertura para a análise da distribuição das ações verticais. Para a análise teórica com a aplicação do procedimento das Paredes Isoladas, e do procedimento dos Grupos de Paredes foi necessária a determinação das áreas de influência da laje de cobertura.

Nas figuras 8.16 e 8.17 ilustram-se, respectivamente, para a laje de cobertura, as áreas de influência para o procedimento de Paredes Isoladas e para os Grupos de Paredes.

Figura 8. 16 – Área de influência da laje de cobertura: Paredes Isoladas.

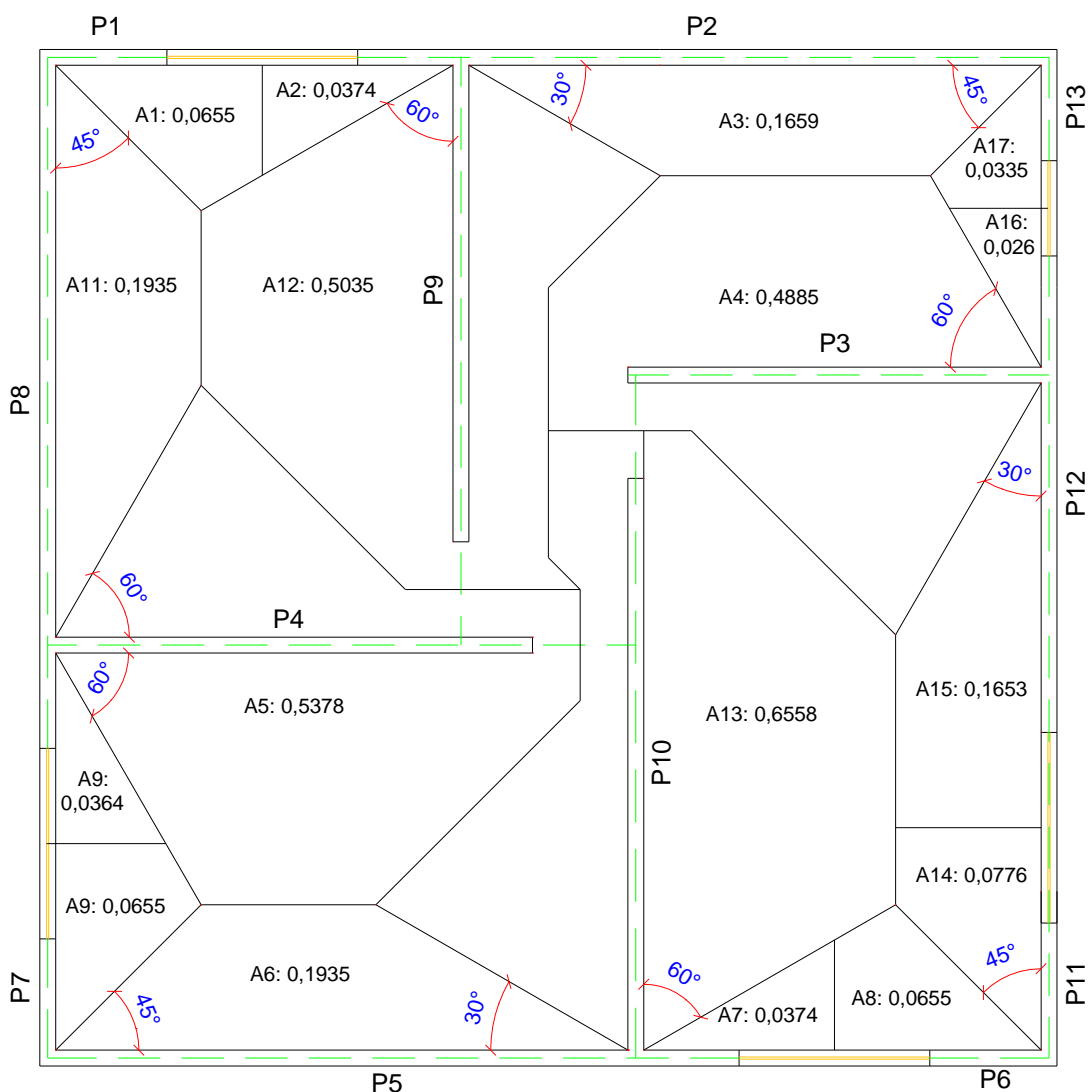
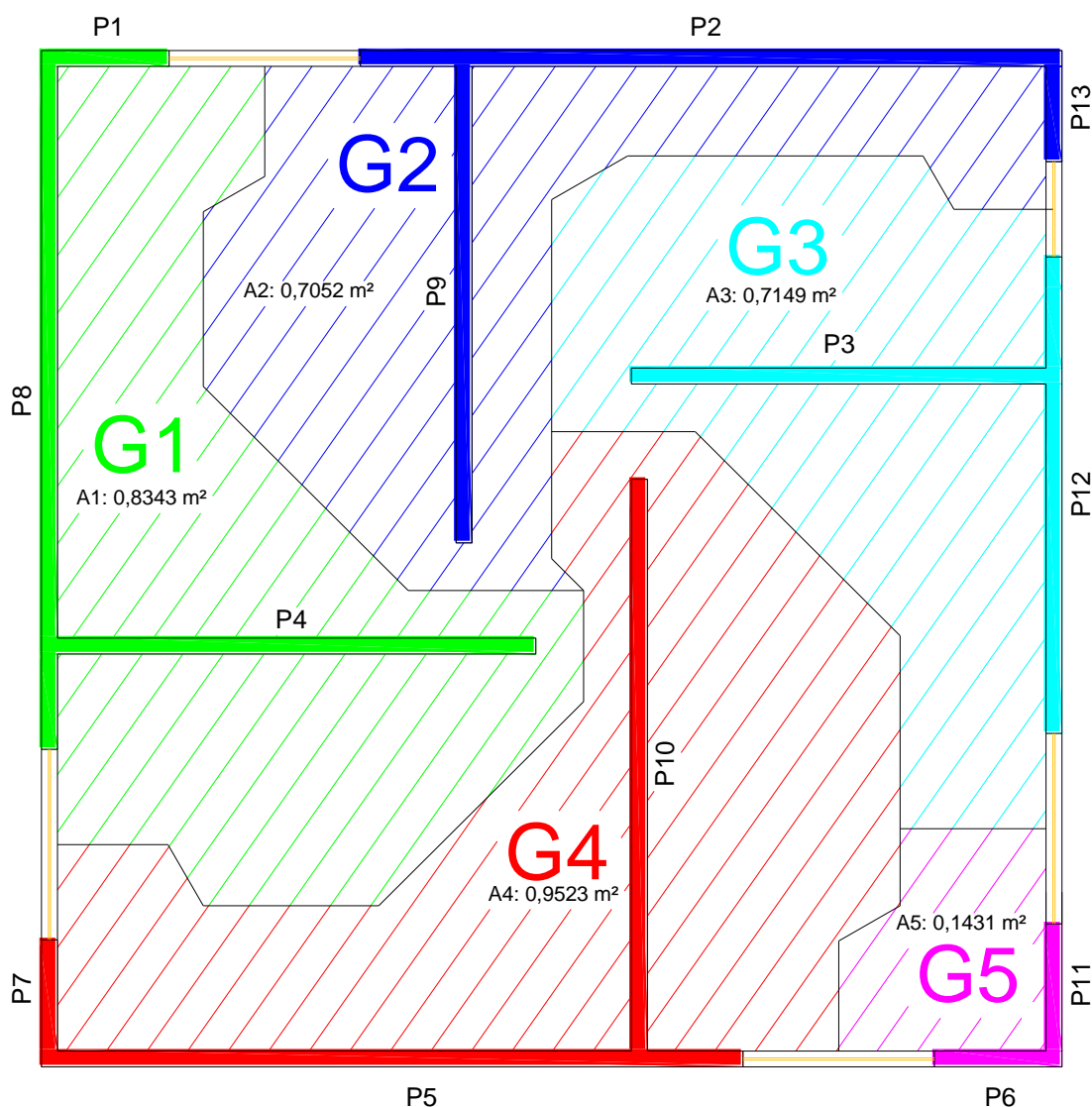


Figura 8. 17 – Área de influência da laje de cobertura: Grupos de Paredes.

Nas tabelas 8.18 e 8.19 apresentam-se, respectivamente, o quadro de cargas para o procedimento de Paredes Isoladas e para os Grupos de paredes.

Na tabela 8.20 são apresentados os percentuais de reação para cada ponto de apoio de sustentação da grelha, levando-se em consideração o procedimento de Paredes Isoladas e o procedimento dos Grupos de Paredes, para o carregamento aplicado na laje de cobertura. Na figura 8.18 ilustram-se graficamente os resultados.

Tabela 8. 18 – Quadro de cargas e área de influência da laje de cobertura: procedimento de Paredes Isoladas.

| Paredes | Comprimento (eixo a eixo - m) | Área de Influência (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carregamento (kN/m) |
|---------|----------------------------------|---|---|------------------------|
| P1 | 0,225 | 0,0655 | 0,0852 | 0,378 |
| * P2 | 0,195 | 0,0374 | 0,0486 | 0,249 |
| * P2 | 1,11 | 0,1659 | 0,2157 | 0,194 |
| P3 | 0,78 | 0,4885 | 0,6351 | 0,814 |
| P4 | 0,915 | 0,5378 | 0,6991 | 0,764 |
| * P5 | 1,11 | 0,1935 | 0,2516 | 0,227 |
| * P5 | 0,195 | 0,0374 | 0,0486 | 0,249 |
| P6 | 0,225 | 0,0655 | 0,0852 | 0,378 |
| P7 | 0,225 | 0,0655 | 0,0852 | 0,378 |
| * P8 | 0,195 | 0,0364 | 0,0473 | 0,243 |
| * P8 | 1,11 | 0,1935 | 0,2516 | 0,227 |
| P9 | 0,915 | 0,5035 | 0,6546 | 0,715 |
| P10 | 1,095 | 0,6558 | 0,8525 | 0,779 |
| P11 | 0,255 | 0,0776 | 0,1009 | 0,396 |
| * P12 | 0,675 | 0,1653 | 0,2149 | 0,318 |
| * P12 | 0,225 | 0,026 | 0,0338 | 0,150 |
| P13 | 0,195 | 0,0335 | 0,0436 | 0,223 |

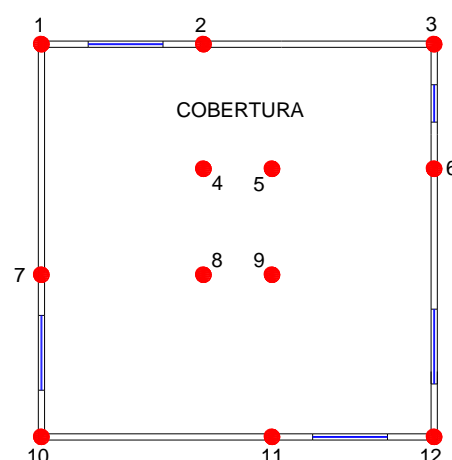
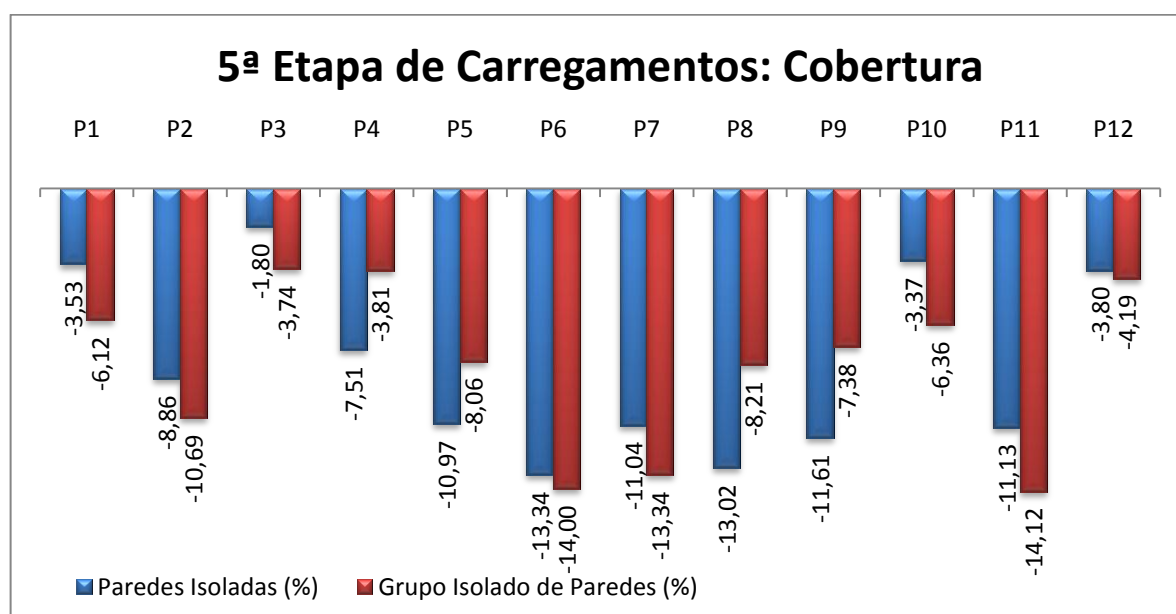
* Paredes com trechos diferentes de carregamento.

Tabela 8. 19 – Quadro de cargas e área de influência da laje de cobertura: procedimento dos Grupos de Paredes.

| Grupos | Paredes | Comprimentos (m) | Área (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carregamento (kN/m) |
|--------|---------|------------------|------------------------|---|------------------------|
| G1 | P1 | 0,225 | 2,445 | 0,8343 | 1,0846 |
| | P8 | 1,305 | | | |
| | P4 | 0,915 | | | |
| G2 | P2 | 1,305 | 2,415 | 0,7052 | 0,9168 |
| | P9 | 0,915 | | | |
| | P13 | 0,195 | | | |
| G3 | P3 | 0,780 | 1,68 | 0,7149 | 0,9294 |
| | P12 | 0,900 | | | |
| G4 | P5 | 1,305 | 2,625 | 0,9523 | 1,2380 |
| | P7 | 0,225 | | | |
| | P10 | 1,095 | | | |
| G5 | P6 | 0,225 | 0,48 | 0,1431 | 0,1860 |
| | P11 | 0,255 | | | |

Tabela 8. 20 – Resultados percentuais das reações de apoio: Carregamento da cobertura.

| Apoios | Paredes Isoladas (%) | Grupos de Paredes (%) |
|--------|----------------------|-----------------------|
| P1 | -3,53 | -6,12 |
| P2 | -8,86 | -10,69 |
| P3 | -1,80 | -3,74 |
| P4 | -7,51 | -3,81 |
| P5 | -10,97 | -8,06 |
| P6 | -13,34 | -14,00 |
| P7 | -11,04 | -13,34 |
| P8 | -13,02 | -8,21 |
| P9 | -11,61 | -7,38 |
| P10 | -3,37 | -6,36 |
| P11 | -11,13 | -14,12 |
| P12 | -3,80 | -4,19 |

**Figura 8. 18** – Resultado gráfico das reações de apoio para o procedimento de Paredes isoladas e Grupos de Paredes: Carregamento da cobertura.

Através da análise dos resultados obteve-se que os pontos de apoio internos (P4, P5, P8, e P9) foram responsáveis por absorver 43,1% das reações quando adotado o procedimento das Paredes Isoladas, valor este que coincide com os resultados experimentais (43,6%) apresentados no capítulo 7 quando a taxa de carregamento foi de 0,43 kN/m² (1,5 kN).

Para o procedimento de Paredes Isoladas observou-se que os pontos de canto (P1, P10, e P12) apresentaram a mesma magnitude, fato este que pode ser justificado pela melhor distribuição dos carregamentos impostos sobre a laje de cobertura, visto que a mesma abrange toda a área do modelo físico reduzido. Quando utilizado o procedimento dos Grupos de Paredes verificou-se uma melhor distribuição das ações.

Nas figuras 8.19 e 8.20 apresentam-se, respectivamente, as cargas referentes ao procedimento de Paredes Isoladas e ao Grupos de Paredes para o carregamento da laje de cobertura.

Figura 8. 19 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Paredes Isoladas: Laje de cobertura.

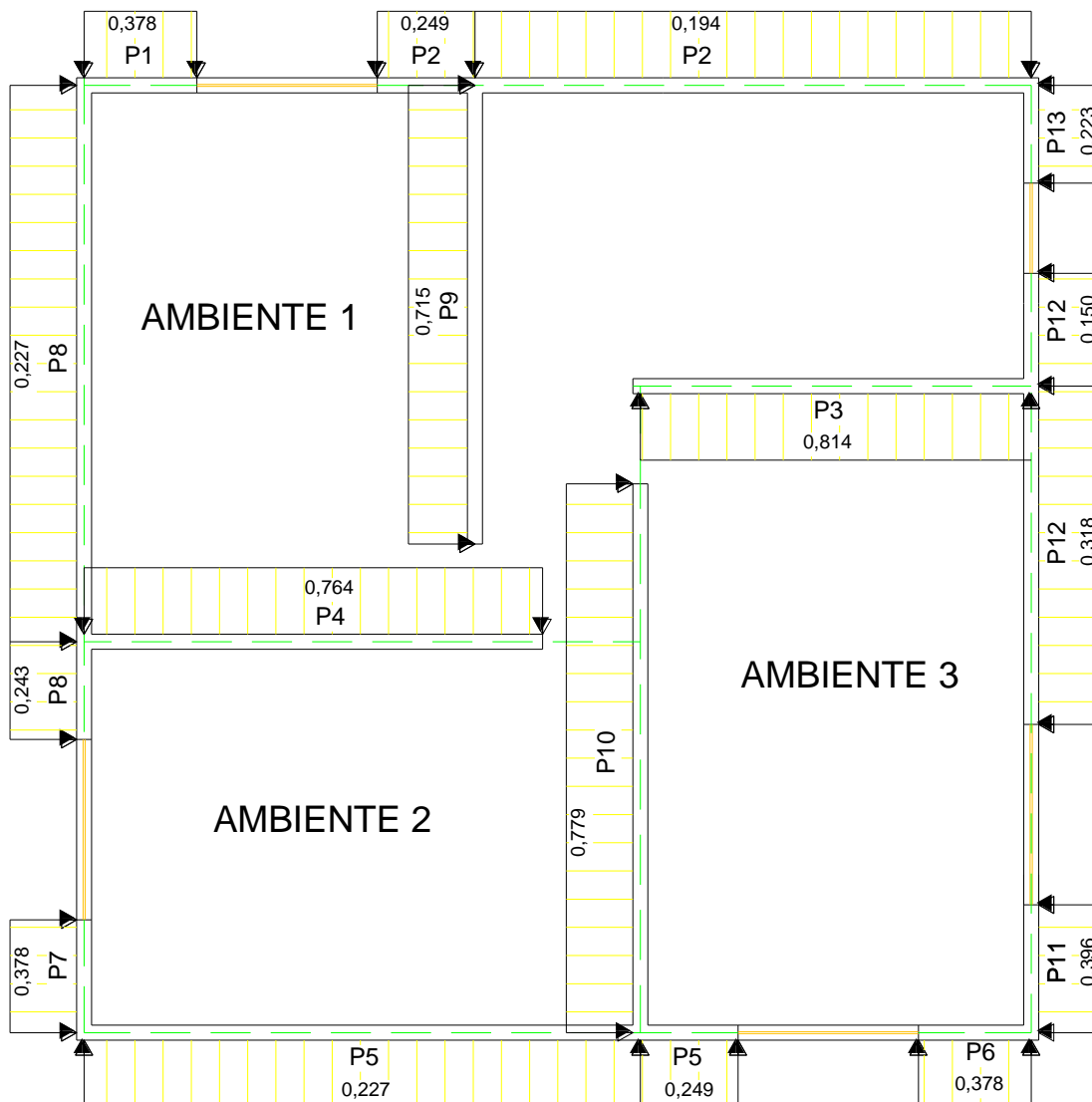
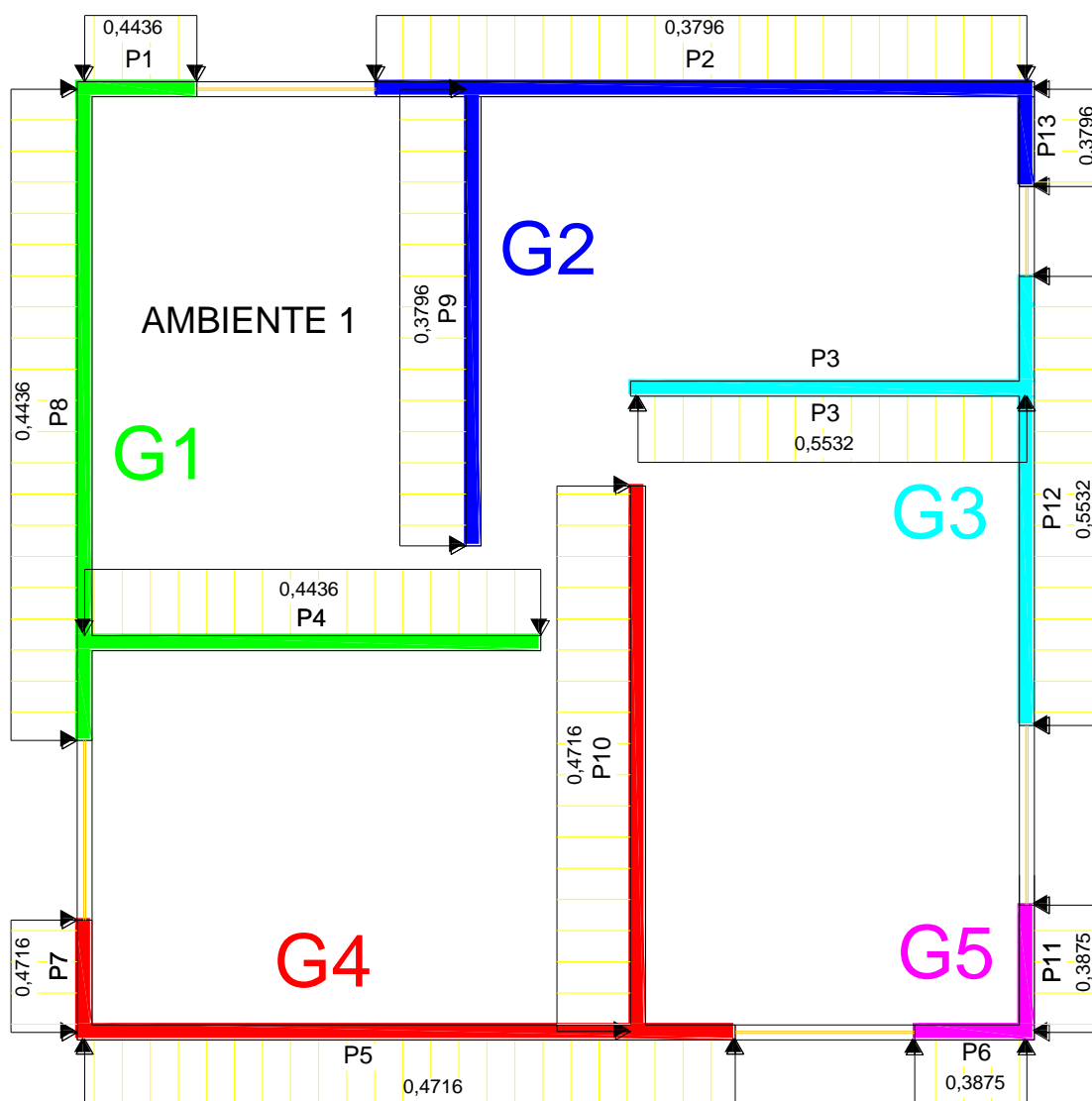


Figura 8. 20 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento dos Grupos de Paredes: Laje de cobertura.



8.9 PROPOSTA DE PROCEDIMENTO DE DISTRIBUIÇÃO DAS AÇÕES VERTICAIS

Silva (2011), em sua pesquisa de Mestrado pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FEIS), propõe um procedimento de distribuição de ações verticais intitulado “Processo dos Centros de Cargas” que tem por objetivo a obtenção de um “novo” arranjo dos Grupos de Paredes para a obtenção de valores mais próximos aos obtidos em ensaios experimentais.

Para a aplicação do procedimento proposto, Silva (2011), fez uso das conclusões obtidas por Corrêa (2003), em sua pesquisa de livre docência, relativo à homogeneização de cargas.

O princípio de *Saint Venant* governa o processo de homogeneização. A distância vertical necessária para atingir a homogeneização deve ser maior que o diâmetro do círculo que circunscreve em planta a seção transversal do grupo de paredes (CORRÊA, 2003, p.143).

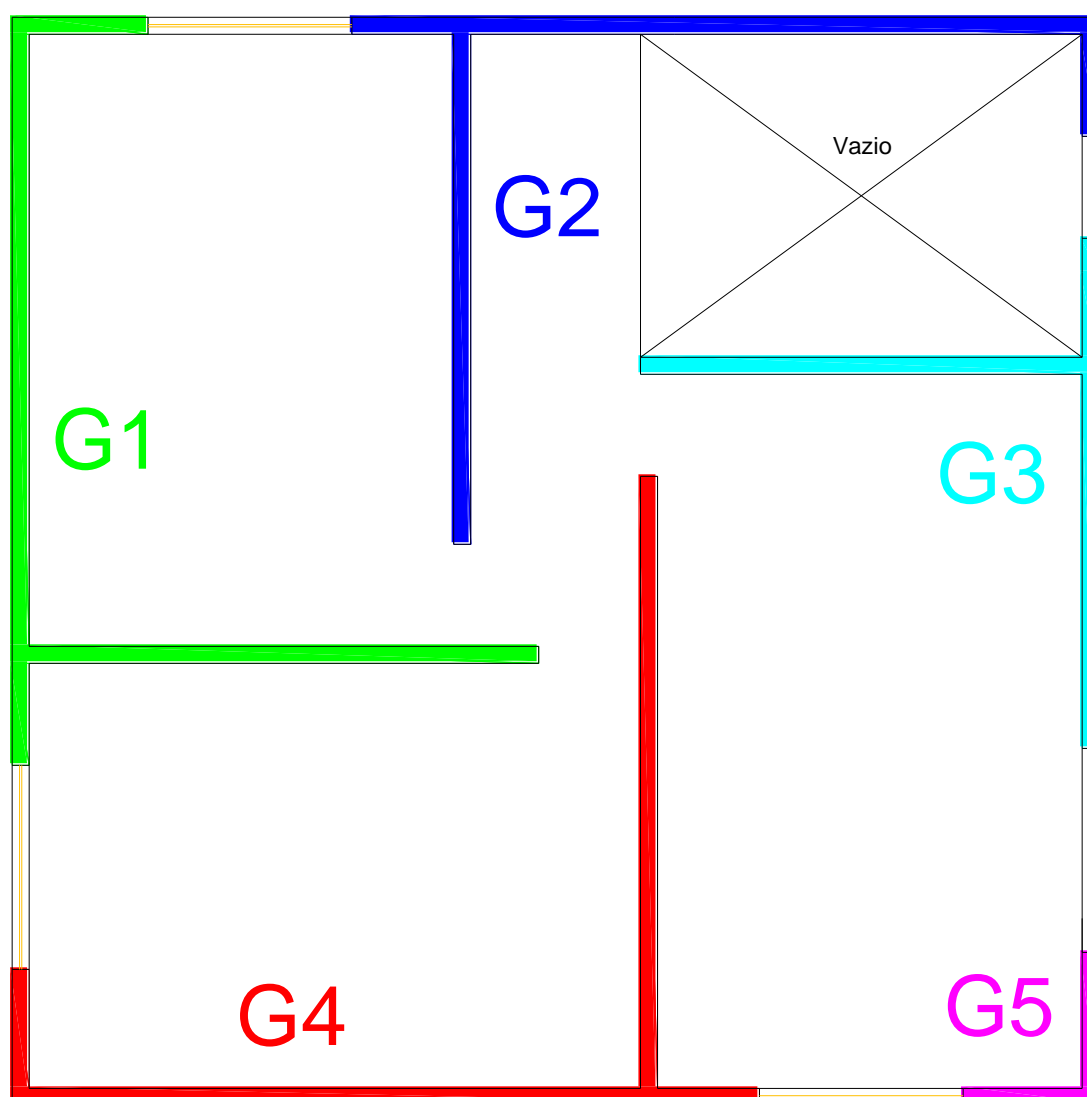
Nos tópicos seguintes será “aplicada” a proposta de Silva (2011), no modelo físico reduzido, com o intento de comparar os resultados obtidos e a validação da proposta. Para melhor descrição, neste trabalho, o procedimento será identificado como “Novo Grupo de Paredes” (NGP). Descrevem-se abaixo os passos para a aplicação do procedimento.

1º Passo: De posse das ações verticais uniformemente distribuídas atuantes sobre as lajes da estrutura prossegue-se para a escolha dos grupos de paredes que suportarão os esforços verticais (conforme exposto nos Grupos de Paredes);

2º Passo: As aberturas de portas e janelas são elementos principais para a definição dos grupos. Para o projeto em questão temos os grupos definidos no procedimento de Grupos de Paredes (Figura 8.21).

3º Passo: O comprimento das paredes é determinado através de seus eixos, ou seja, medindo-se de eixo a eixo em planta, considerando a fiada onde existem as aberturas. Na figura 8.22 apresentam-se as dimensões.

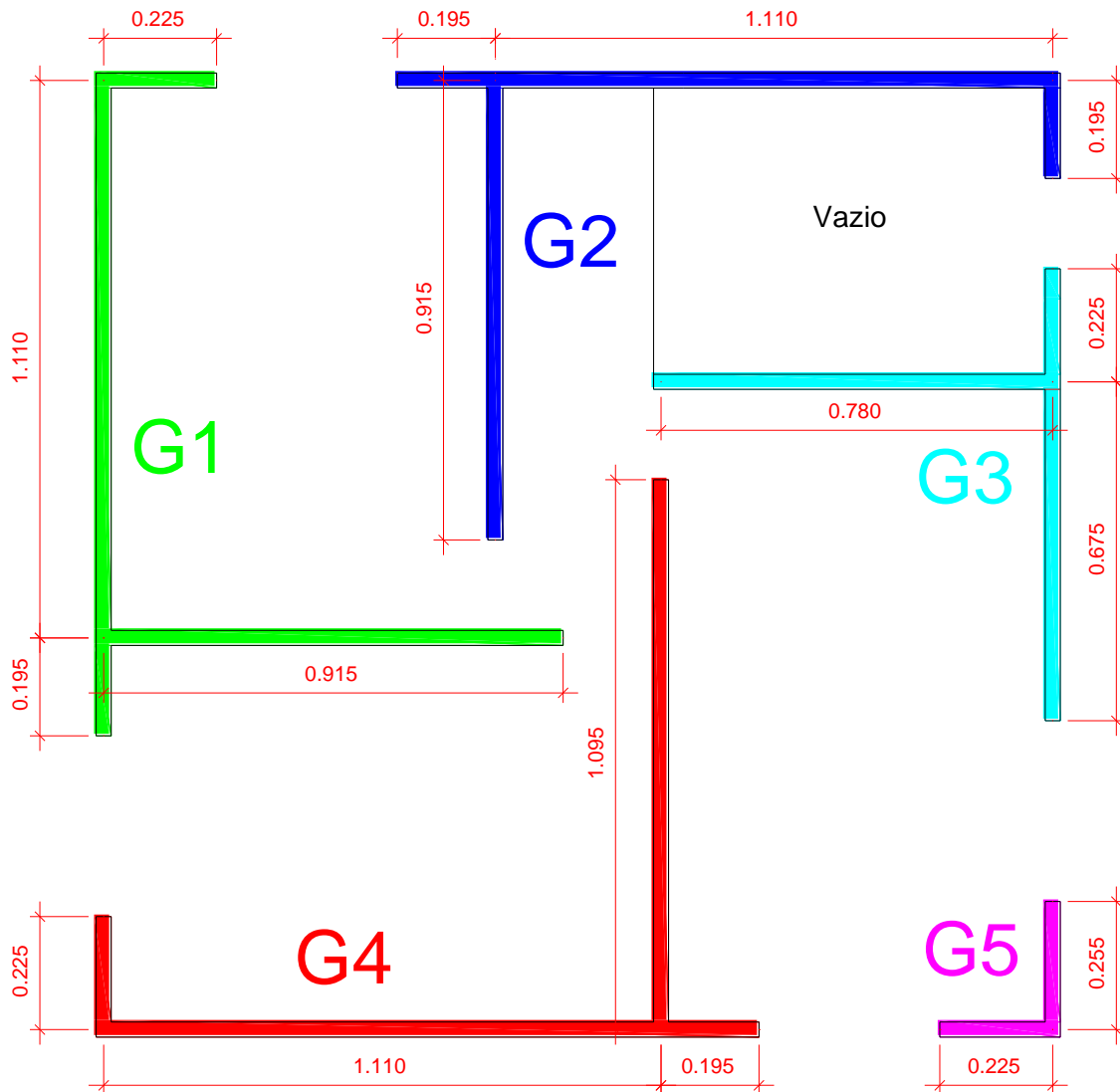
Figura 8. 21 – Grupos de Paredes para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes.



4º Passo: Procede-se com a determinação das áreas de influência das ações verticais uniformemente distribuídas e localização do Centro de Carga (CC) das áreas carregadas; que neste caso corresponde ao Centro Geométrico da figura. Caso haja mais de uma área de contribuição para o grupo deve-se determinar o Centro de Carga Resultante (CCR);

5º Passo: Para os grupos estabelecidos, criar nós localizados no encontro de paredes concorrentes. O comprimento de uma parede limitado entre dois destes nós será denominado L_n , já quando uma parede está entre um nó e uma abertura seu comprimento é denominado de L ;

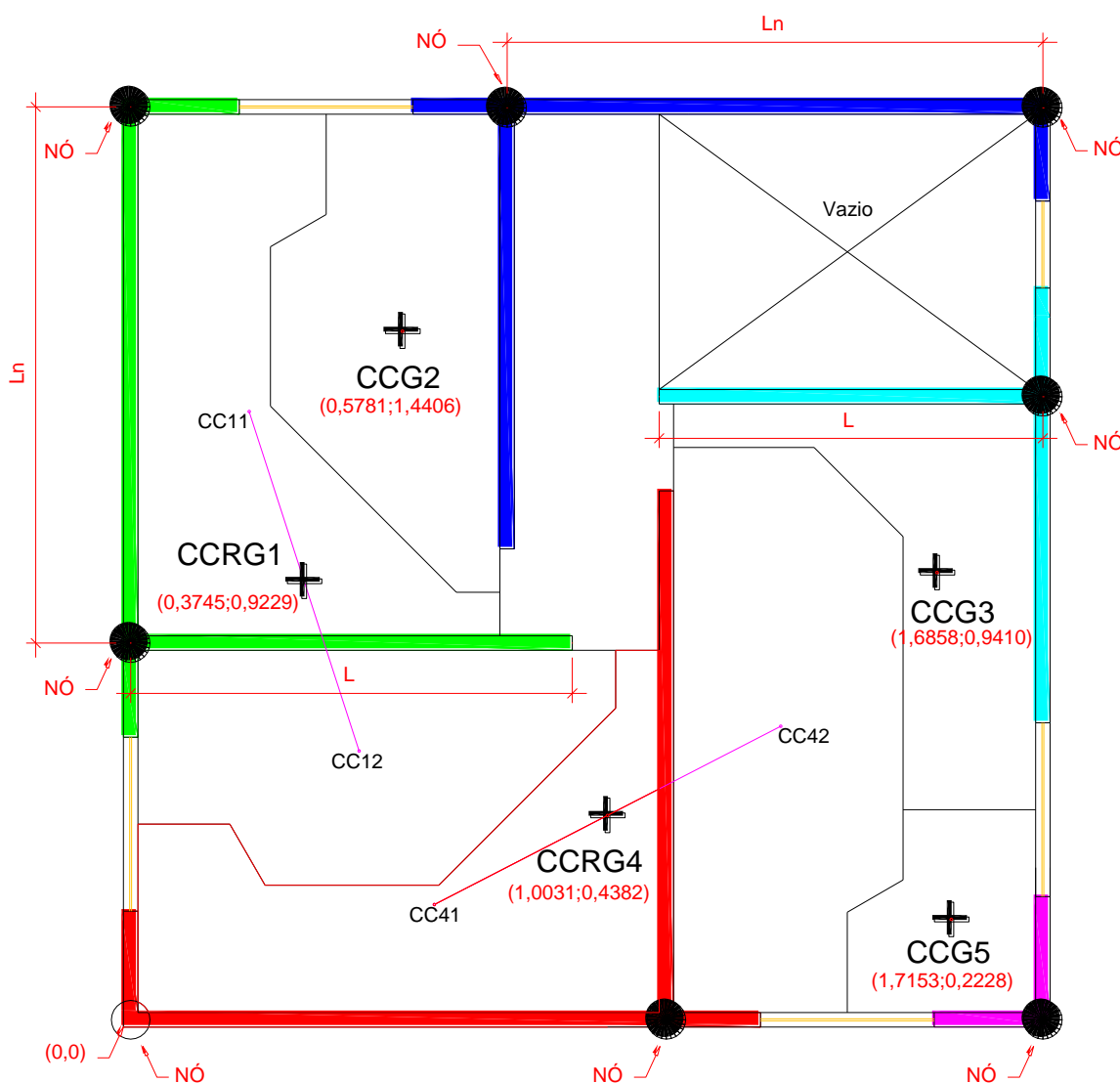
Figura 8. 22 – Dimensões lineares das paredes (m) para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes.



6º Passo: Determinado o CC e o CCR (caso exista), deve-se traçar uma circunferência de raio igual ao pé direito do edifício. Esta proposta de Silva (2011) teve como base a proposta de Corrêa (2003), no qual é exposto que se devem comparar os diâmetros dos grupos com o pé-direito da edificação para a determinação do número mínimo de pavimentos necessários para a obtenção da uniformidade das tensões normais verticais.

Na figura 8.23 estão representados os CC e CCR com as suas respectivas coordenadas, bem como os nós criados entre as paredes concorrentes. Para a determinação do centroide fez-se uso do *software AutoCAD 2010*, com a criação de uma região (*Boundary Creation*) e posteriormente o uso do comando *massprop* para a listagem das coordenadas do centroide.

Figura 8. 23 – Representação da localização dos Centros de Cargas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes.



7º Passo: “Após traçado a circunferência de raio igual ao pé-direito, com centro no CCR ou CC; o comprimento das paredes pertencentes ao grupo será determinado pelo comprimento que estiver circunscrito à circunferência” (SILVA, 2011), sendo este comprimento denominado de L_g , adotando-se o seguinte:

7.1 – Paredes compreendidas entre dois nós principais:

- Se $L_n \leq 2 \times \text{pé-direito}$: $L_g = \frac{L_n}{2}$
- Se $L_n > 2 \times \text{pé-direito}$ deve-se observar duas situações:
 - A circunferência circunscreve pelo menos um nó principal:
 $L_g = L_n$
 - Nenhum nó está circunscrito:
 $L_g = L_n - \text{pé-direito}$

Silva (2011), cita que se deve observar que o comprimento denominado “Lg” tem que ter sua origem no nó principal circunscrito à circunferência ou no nó mais próximo, no caso em que a circunferência somente delimita uma parede contínua, não conectada à outra.

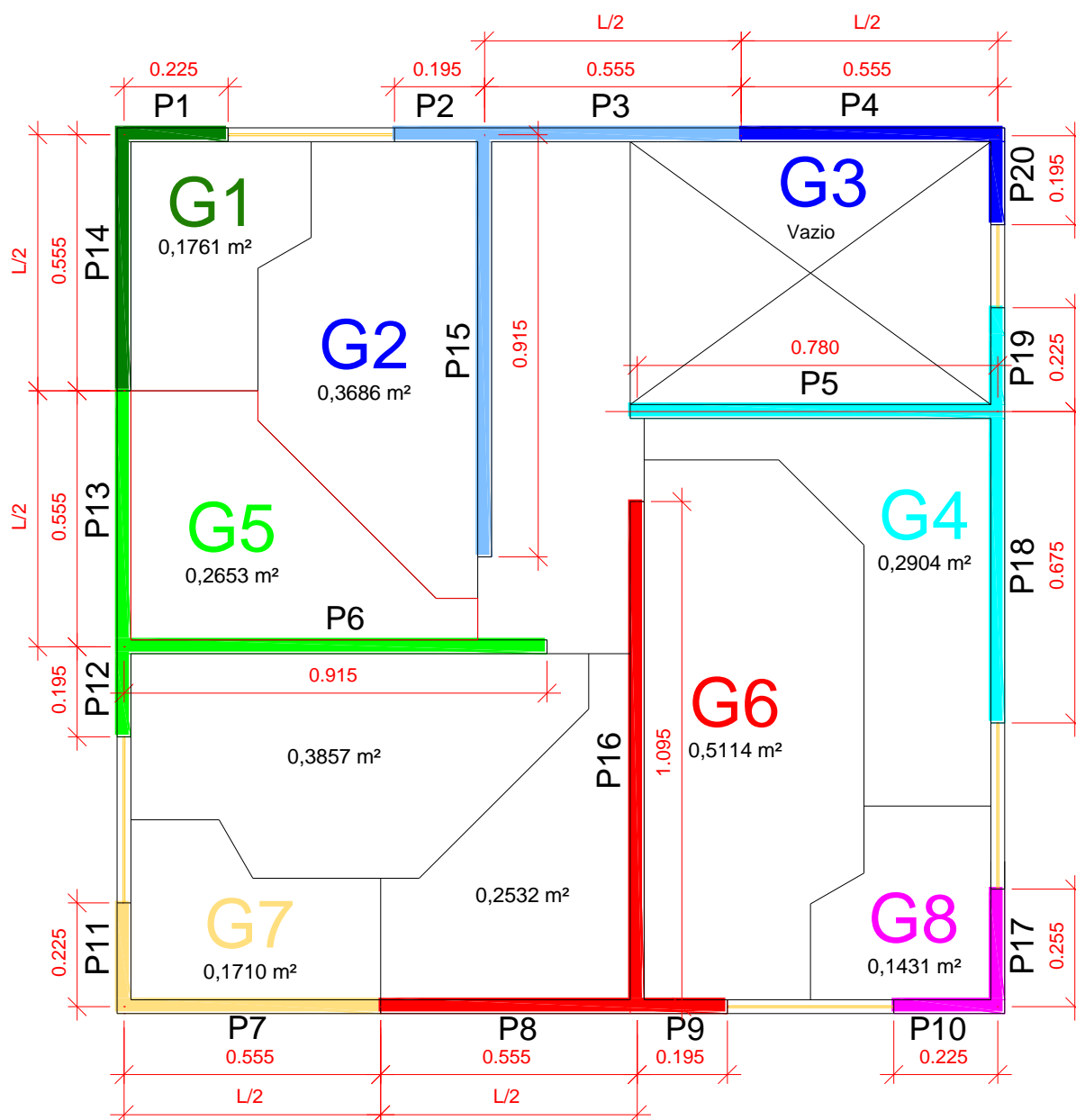
7.2 – Paredes compreendidas entre um nó e uma abertura:

- Se $L \leq 2 \times \text{pé-direito}$: $L_g = L$
- Se $L > 2 \times \text{pé-direito}$ deve-se observar duas situações do item anterior.

Para os cinco grupos (Figura 8.22) foram aplicados os procedimentos do sétimo passo (Apêndice C). Aplicando-se as etapas do procedimento proposto temos então a criação de novos grupos de paredes contíguos aos grupos iniciais, conforme se representa na figura 8.24.

Com os novos grupos de paredes definidos aplica-se o procedimento usual de Grupos de Paredes para a determinação das reações de apoio para cada etapa de carregamento.

Figura 8. 24 – Grupos de paredes definidos para a análise da distribuição das ações verticais utilizando o procedimento de Novos Grupos de Paredes.



8.9.1 DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES DE APOIO PARA O CARREGAMENTO ISOLADO NOS AMBIENTES – NGP

Nos procedimentos usuais já apresentados, foi descrito pormenorizado todas as etapas de carregamentos nos ambientes, neste tópico será apresentado o quadro de cargas, os resultados percentuais de reações de apoio, e a representação gráfica dos resultados e dos carregamentos impostos para as três etapas iniciais de carregamentos, ou seja, o carregamento dos Ambientes 1 (A1N1, A1N2, A1N3), Ambientes 2 (A2N1, A2N2, A2N3), e Ambientes 3 (A3N1, A3N2, A3N3). Na tabela 8.21 apresenta-se o quadro de cargas para o procedimento de Novos Grupos de Paredes.

Tabela 8. 21 – Quadro de cargas para o procedimento do Novo Grupo de Paredes com carregamento no Ambiente 1.

| Ambientes | Grupos | Paredes | Comprimentos (m) | | Área (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carga (kN/m) | Total (x3) (kN/m) |
|------------|------------|---------|------------------|-------|------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------|
| Ambiente 1 | G1 | P1 | 0,225 | 0,780 | 0,1761 | 0,229 | 0,294 | 0,881 |
| | | P14 | 0,555 | | | | | |
| | G2 | P2 | 0,195 | 1,665 | 0,3686 | 0,479 | 0,288 | 0,863 |
| | | P3 | 0,555 | | | | | |
| | | P15 | 0,915 | | | | | |
| | G5 | P6 | 0,915 | 1,665 | 0,2653 | 0,345 | 0,207 | 0,621 |
| | | P12 | 0,195 | | | | | |
| | | P13 | 0,555 | | | | | |
| | Ambiente 2 | G5 | P6 | 0,915 | 1,665 | 0,3857 | 0,501 | 0,301 |
| P12 | | | 0,195 | | | | | |
| P13 | | | 0,555 | | | | | |
| G6 | | P8 | 0,555 | 1,845 | 0,2532 | 0,329 | 0,178 | 0,535 |
| | | P9 | 0,195 | | | | | |
| | | P16 | 1,095 | | | | | |
| G7 | | P7 | 0,555 | 0,780 | 0,171 | 0,222 | 0,285 | 0,855 |
| | | P11 | 0,225 | | | | | |
| Ambiente 3 | | G4 | P5 | 0,780 | 1,680 | 0,2904 | 0,378 | 0,225 |
| | P18 | | 0,675 | | | | | |
| | P19 | | 0,225 | | | | | |
| | G6 | P8 | 0,555 | 1,845 | 0,4990 | 0,665 | 0,360 | 1,081 |
| | | P9 | 0,195 | | | | | |
| | | P16 | 1,095 | | | | | |
| | G8 | P10 | 0,225 | 0,480 | 0,1431 | 0,186 | 0,388 | 1,163 |
| | | P17 | 0,255 | | | | | |

Na tabela 8.22 são apresentados os percentuais de reação, para cada ponto de apoio de sustentação da grelha, levando-se em consideração o procedimento de Novos Grupos de Paredes para os três ambientes. Na figura 8.25 representam-se graficamente os resultados expostos na tabela 8.22.

Tabela 8. 22 – Resultado das reações apoio com a utilização do procedimento de Novos Grupos de Paredes para os ambientes 1, 2, e 3.

| Apoios | Novo Grupo de Paredes (%) | | |
|--------|---------------------------|--------------|--------------|
| | Ambiente 1 | Ambiente 2 | Ambiente 3 |
| P1 | -15,08 | +0,32 | +0,07 |
| P2 | -23,81 | -0,20 | -0,32 |
| P3 | -2,07 | +0,07 | +2,21 |
| P4 | -16,63 | +0,37 | +2,87 |
| P5 | -0,95 | +0,60 | -9,20 |
| P6 | 0,15 | -0,39 | -21,46 |
| P7 | -23,72 | -0,93 | 0,03 |
| P8 | -12,78 | -3,57 | -0,95 |
| P9 | +2,47 | -20,31 | -20,58 |
| P10 | +2,04 | -29,75 | -2,12 |
| P11 | -0,25 | -39,96 | -27,98 |
| P12 | +0,05 | +3,51 | -12,21 |

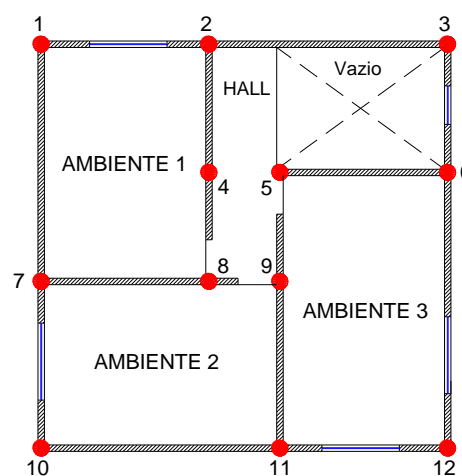
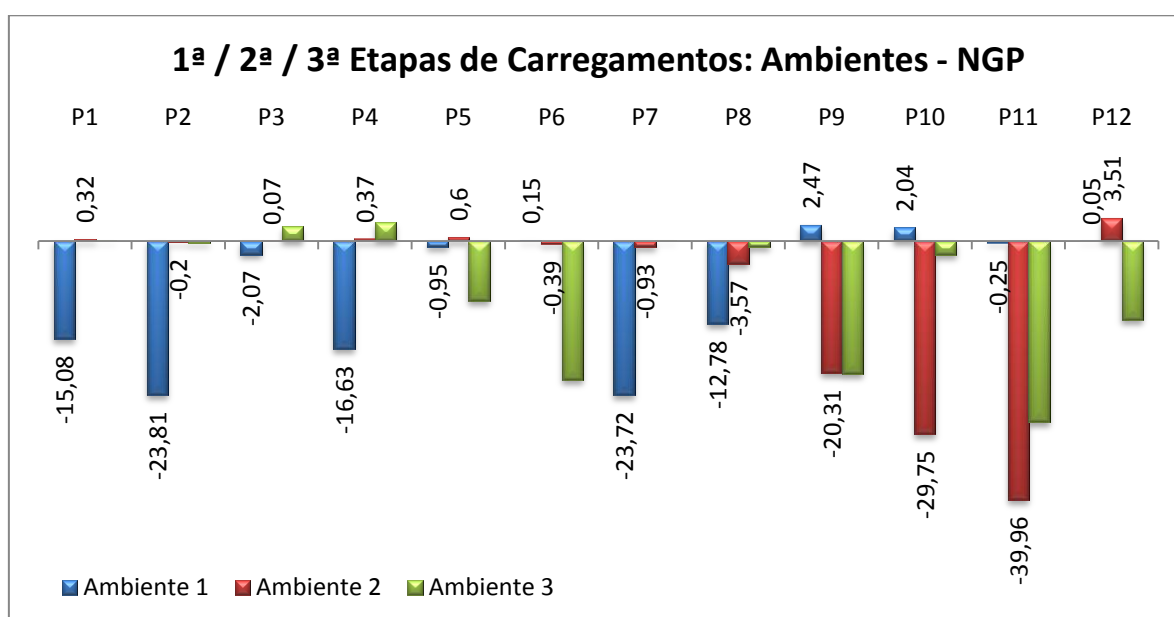


Figura 8. 25 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Novo Grupo de Paredes: Ambiente 1.



Na tabela 8.23 apresenta-se um resumo dos valores percentuais para os pontos que delimitam os ambientes submetidos ao carregamento utilizando o procedimento de Novos Grupos de Paredes.

Tabela 8. 23 – Resumo dos valores percentuais para os pontos de apoio que delimitam os ambientes: Procedimento de Novos Grupos de Paredes.

| Ambiente carregado | Novo Grupo de Paredes (%) | Grupo de Paredes (%) | Diferença (%) |
|--------------------|---------------------------|----------------------|---------------|
| Ambiente 1 | 92,0 | 82,5 | 9,5 |
| Ambiente 2 | 94,5 | 84,1 | 10,4 |
| Ambiente 3 | 91,4 | 80,7 | 10,7 |
| Média | 92,7 | 82,4 | 10,2 |

No procedimento de Novos Grupos de Paredes tem-se que **92,7%** das reações correspondem aos pontos que delimitam o ambiente carregado, com diferença percentual superior de **10,2%** se comparado com o procedimento dos Grupos de Paredes. O valor percentual para os pontos que delimitam o ambiente carregado foi praticamente o obtido para o procedimento de Paredes Isoladas (**92,5%**).

Se comparado os resultados obtidos entre os procedimentos dos Grupos de Paredes e o Novo Grupo de Paredes, pode-se constatar que alguns pontos apresentaram a inversão de esforços, principalmente pelo não carregamento das paredes P4 e P20 (Figura 8.24) quando utilizado o procedimento de Novos Grupos de Paredes.

Com o objetivo de representar a localização das ações uniformemente distribuídas na grelha de sustentação do modelo físico, apresenta-se na figura 8.26, 8.27, e 8.28, respectivamente, o carregamento referente ao procedimento de Novos Grupos de Paredes para os ambientes 1, 2, e 3.

Figura 8. 26 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Ambiente 1.

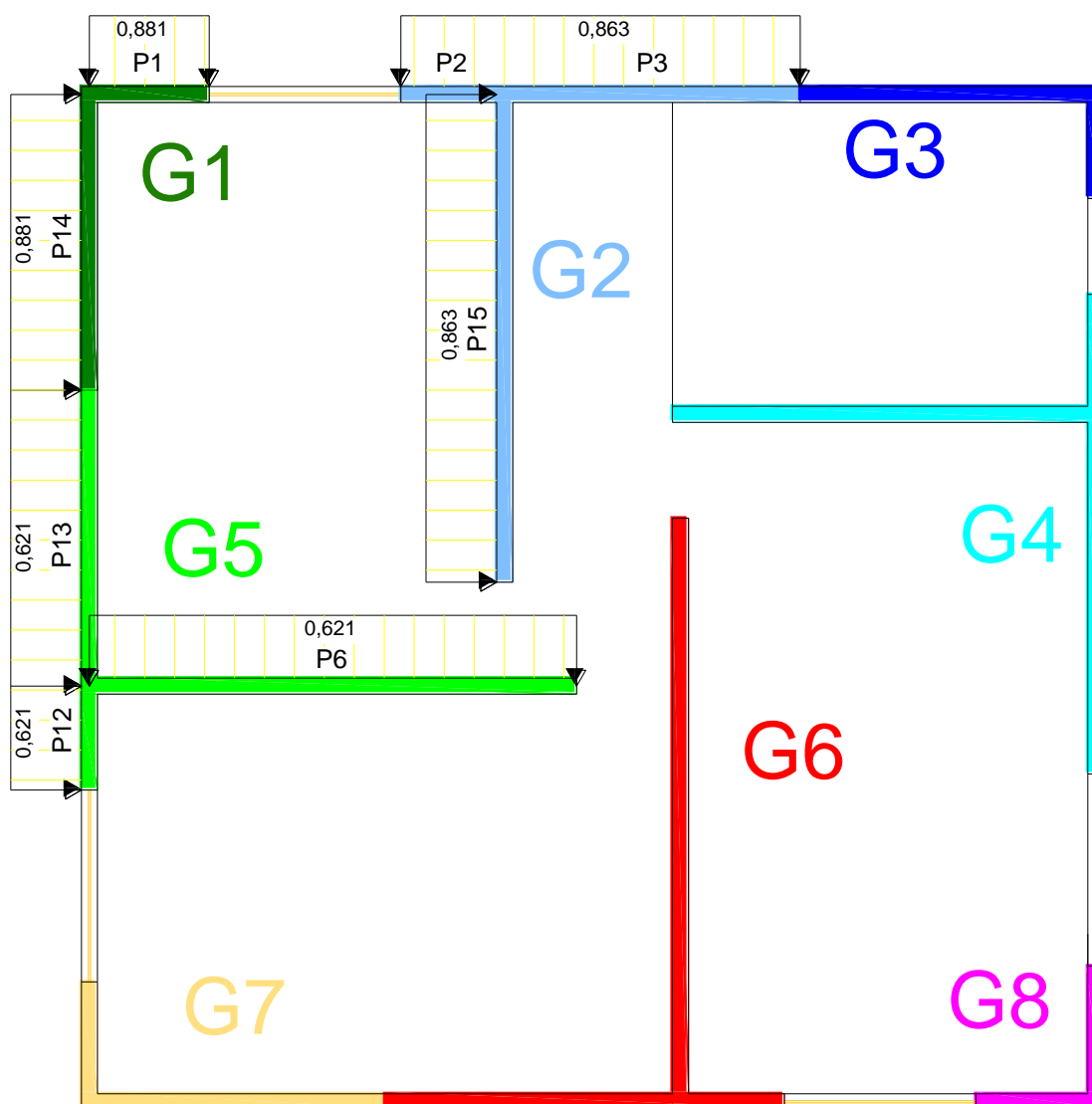


Figura 8. 27 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Ambiente 2.

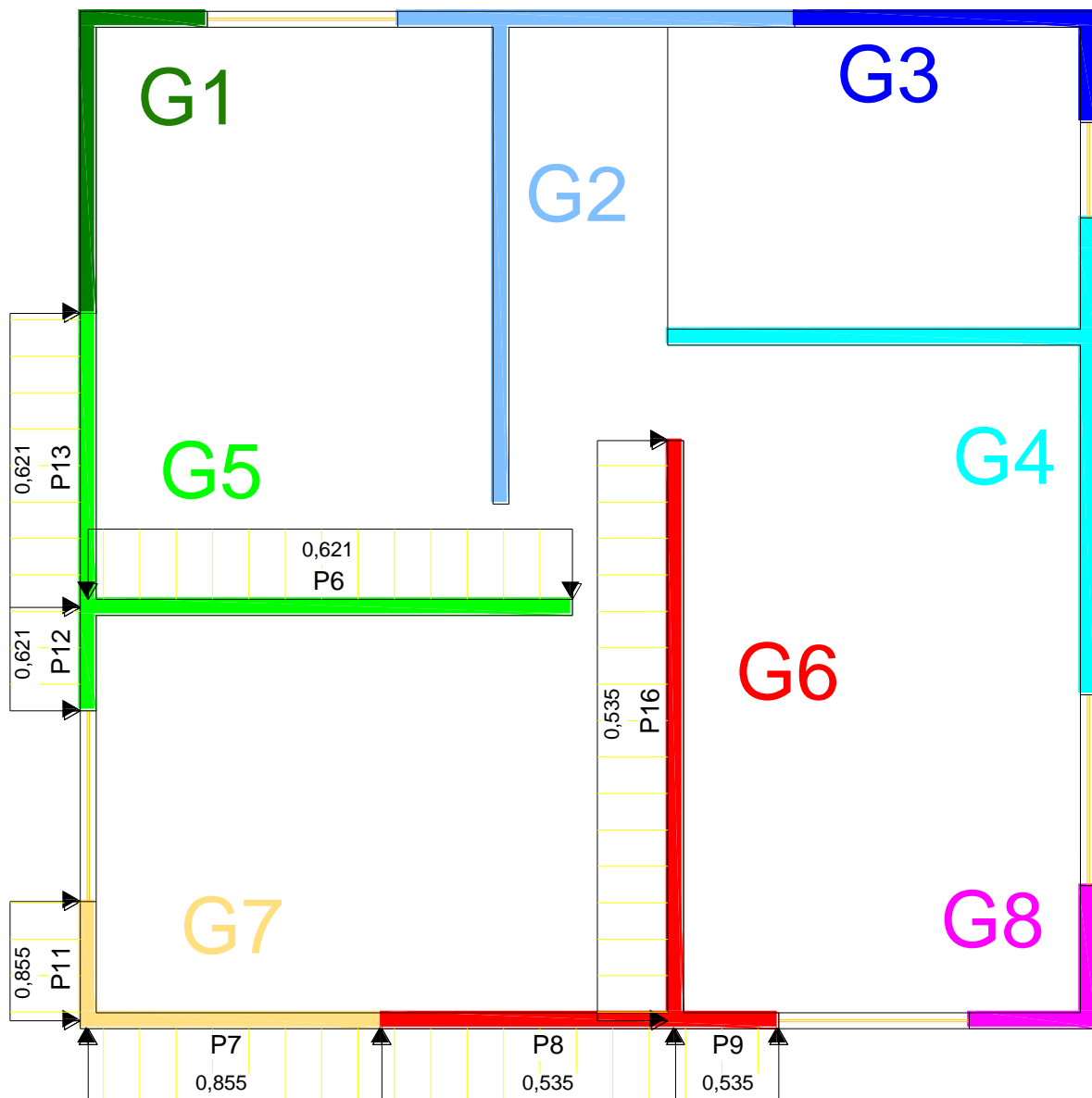
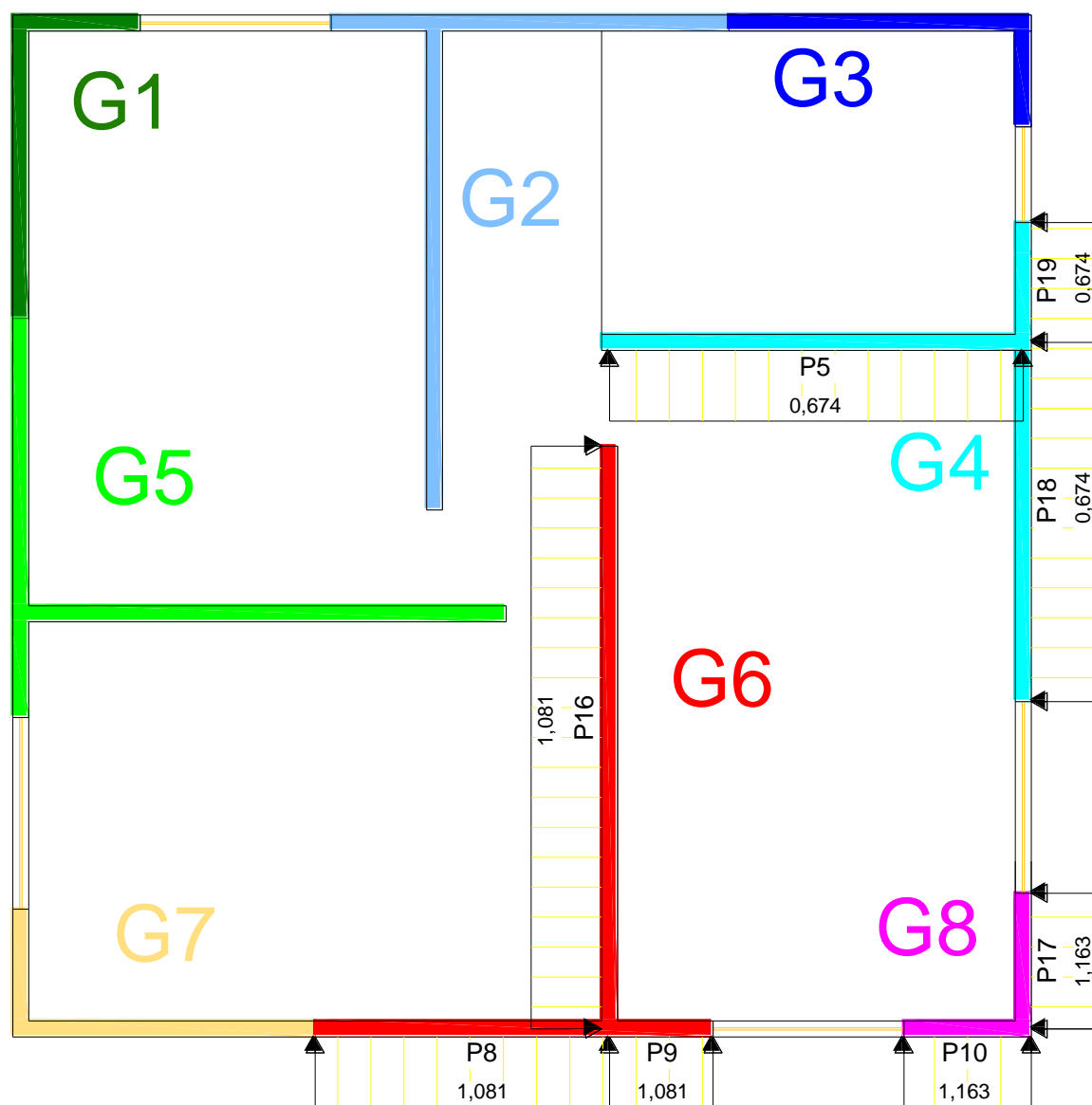


Figura 8. 28 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Ambiente 3.



8.9.2 DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES DE APOIO PARA A 4ª ETAPA DE ENSAIOS

A quarta etapa de ensaios consistiu na inserção de carregamentos uniformemente distribuídos em todos os ambientes nos níveis, ou seja, foram carregados os ambientes do primeiro nível (A1N1, A2N1, A3N1); posteriormente os ambientes do segundo nível (A1N2, A2N2, A3N2), e por fim, o terceiro nível (A1N3, A2N3, A3N3); desta forma todos os ambientes do modelo físico reduzido foram carregados.

Na tabela 8.24 apresentam-se o quadro de cargas atuante nas paredes pelo procedimento do Novo Grupo de Paredes.

Tabela 8. 24 – Quadro de cargas para o procedimento de Novos Grupos Paredes: Carregamento de todos os níveis.

| Paredes | Procedimento de Novos Grupos de Paredes (kN/m) | | | TOTAL (kN/m) |
|---------|--|------------|------------|--------------|
| | Ambiente 1 | Ambiente 2 | Ambiente 3 | |
| P1 | 0,881 | - | - | 0,881 |
| P2 | 0,863 | - | - | 0,863 |
| P3 | 0,863 | - | - | 0,863 |
| P4 | - | - | - | |
| P5 | - | - | 0,674 | 0,674 |
| P6 | 0,621 | 0,903 | - | 1,524 |
| P7 | - | 0,855 | - | 0,855 |
| P8 | - | 0,535 | 1,081 | 1,616 |
| P9 | - | 0,535 | 1,081 | 1,616 |
| P10 | - | - | 1,163 | 1,163 |
| P11 | - | 0,855 | - | 0,855 |
| P12 | 0,621 | 0,903 | - | 1,524 |
| P13 | 0,621 | 0,903 | - | 1,524 |
| P14 | 0,881 | - | - | 0,881 |
| P15 | 0,863 | - | - | 0,863 |
| P16 | - | 0,535 | 1,081 | 1,616 |
| P17 | - | - | 1,163 | 1,163 |
| P18 | - | - | 0,674 | 0,674 |
| P19 | - | - | 0,674 | 0,674 |

Na tabela 8.25 são apresentados os percentuais de reação para cada ponto de sustentação da grelha, levando-se em consideração o procedimento de Novos Grupos de Paredes. Na figura 8.29 ilustram-se graficamente os resultados em comparação com os Grupos de Paredes.

Tabela 8. 25 – Resultados percentuais das reações apoio: Carregamento dos níveis – NGP.

| Apoios | Grupos de Paredes (%) | Novos Grupos de Paredes (%) |
|--------|-----------------------|-----------------------------|
| P1 | -8,12 | -5,93 |
| P2 | -7,26 | -8,36 |
| P3 | -2,60 | +0,21 |
| P4 | -3,24 | -4,89 |
| P5 | -4,36 | -3,93 |
| P6 | -8,07 | -8,82 |
| P7 | -16,64 | -17,71 |
| P8 | -10,24 | -11,64 |
| P9 | -8,92 | -10,16 |
| P10 | -8,15 | -5,12 |
| P11 | -18,07 | -18,88 |
| P12 | -4,34 | -4,34 |

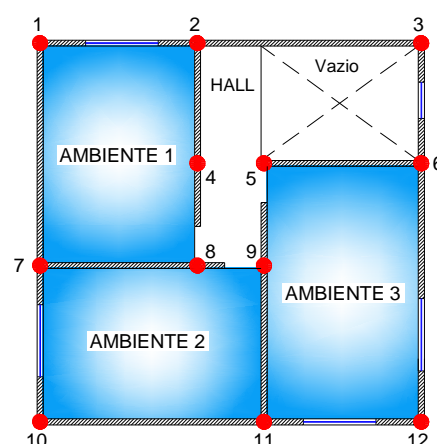
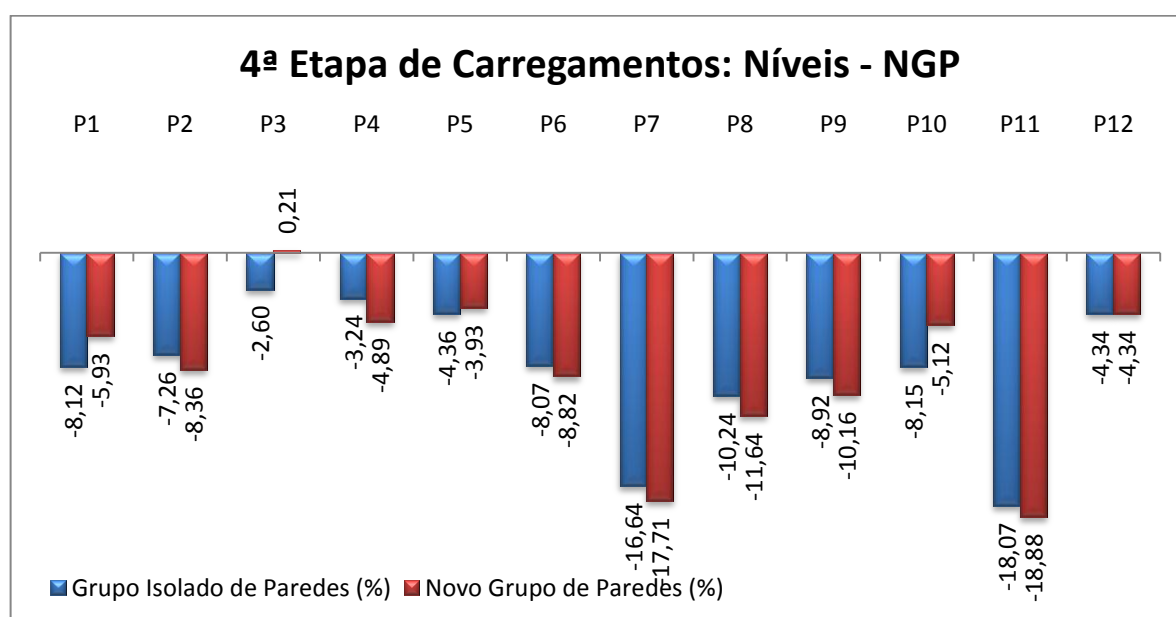


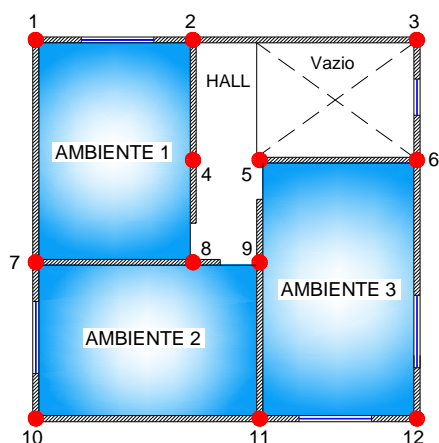
Figura 8. 29 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Novos Grupos de Paredes: Carregamento dos níveis.



Através da análise dos resultados obteve-se que o procedimento de Novos Grupos de Paredes apresentou resultados percentuais próximos ao procedimento de Grupos de Paredes. O ponto P3 foi o único que apresentou a inversão dos esforços devido a não inserção de carregamentos na parede P4 e P20.

Na tabela 8.26 apresentam-se os resultados da somatória das reações dos pontos que delimitam o respectivo ambiente carregado. Com o carregamento dos níveis pôde-se obter que o percentual de reações foi praticamente igual ao apresentado no procedimento dos Grupos de Paredes.

Tabela 8. 26 – Percentual da reações que delimitam o ambiente para o carregamento dos níveis pelo procedimento de Novos Grupos de Paredes.



| Ambientes | Grupos de Paredes (%) | Novo Grupo de Paredes (%) |
|------------|-----------------------|---------------------------|
| Ambiente 1 | 45,5 | 48,5 |
| Ambiente 2 | 62,0 | 63,5 |
| Ambiente 3 | 43,8 | 46,1 |
| Média: | 50,4 | 52,7 |

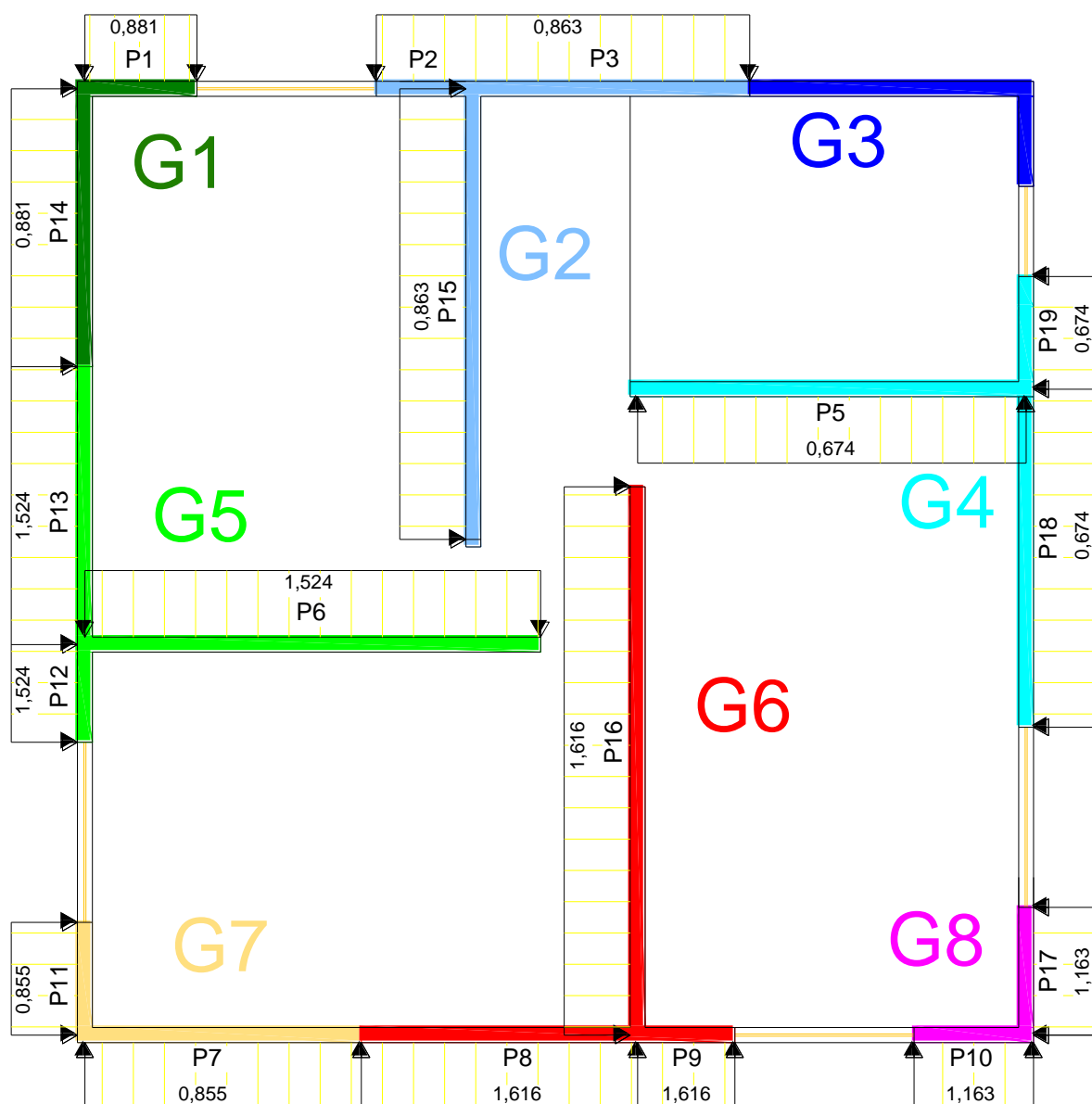
Na tabela 8.27 apresenta-se o quadro comparativo entre os resultados obtidos no carregamento dos ambientes e no carregamento dos níveis.

Tabela 8. 27 – Quadro comparativo entre o carregamento dos ambientes e carregamento dos níveis para o procedimento de Novos Grupos de Paredes.

| Apoios | Ambiente 1 (%) | Ambiente 2 (%) | Ambiente 3 (%) | Média dos Ambientes (%) | Níveis (%) |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|--------------|
| P1 | -15,08 | +0,32 | +0,07 | -4,90 | -5,93 |
| P2 | -23,81 | -0,20 | -0,32 | -8,11 | -8,36 |
| P3 | -2,07 | +0,07 | +2,21 | 0,07 | +0,21 |
| P4 | -16,63 | +0,37 | +2,87 | -4,46 | -4,89 |
| P5 | -0,95 | +0,60 | -9,20 | -3,18 | -3,93 |
| P6 | 0,15 | -0,39 | -21,46 | -7,23 | -8,82 |
| P7 | -23,72 | -0,93 | 0,03 | -8,21 | -17,71 |
| P8 | -12,78 | -3,57 | -0,95 | -5,77 | -11,64 |
| P9 | +2,47 | -20,31 | -20,58 | -12,81 | -10,16 |
| P10 | +2,04 | -29,75 | -2,12 | -9,94 | -5,12 |
| P11 | -0,25 | -39,96 | -27,98 | -22,73 | -18,88 |
| P12 | +0,05 | +3,51 | -12,21 | -2,88 | -4,34 |

Na figura 8.30 representa-se a localização das ações uniformemente distribuídas na grelha de sustentação do modelo físico para a obtenção das reações de apoio utilizando o procedimento de Novos Grupos de Paredes para o carregamento dos níveis.

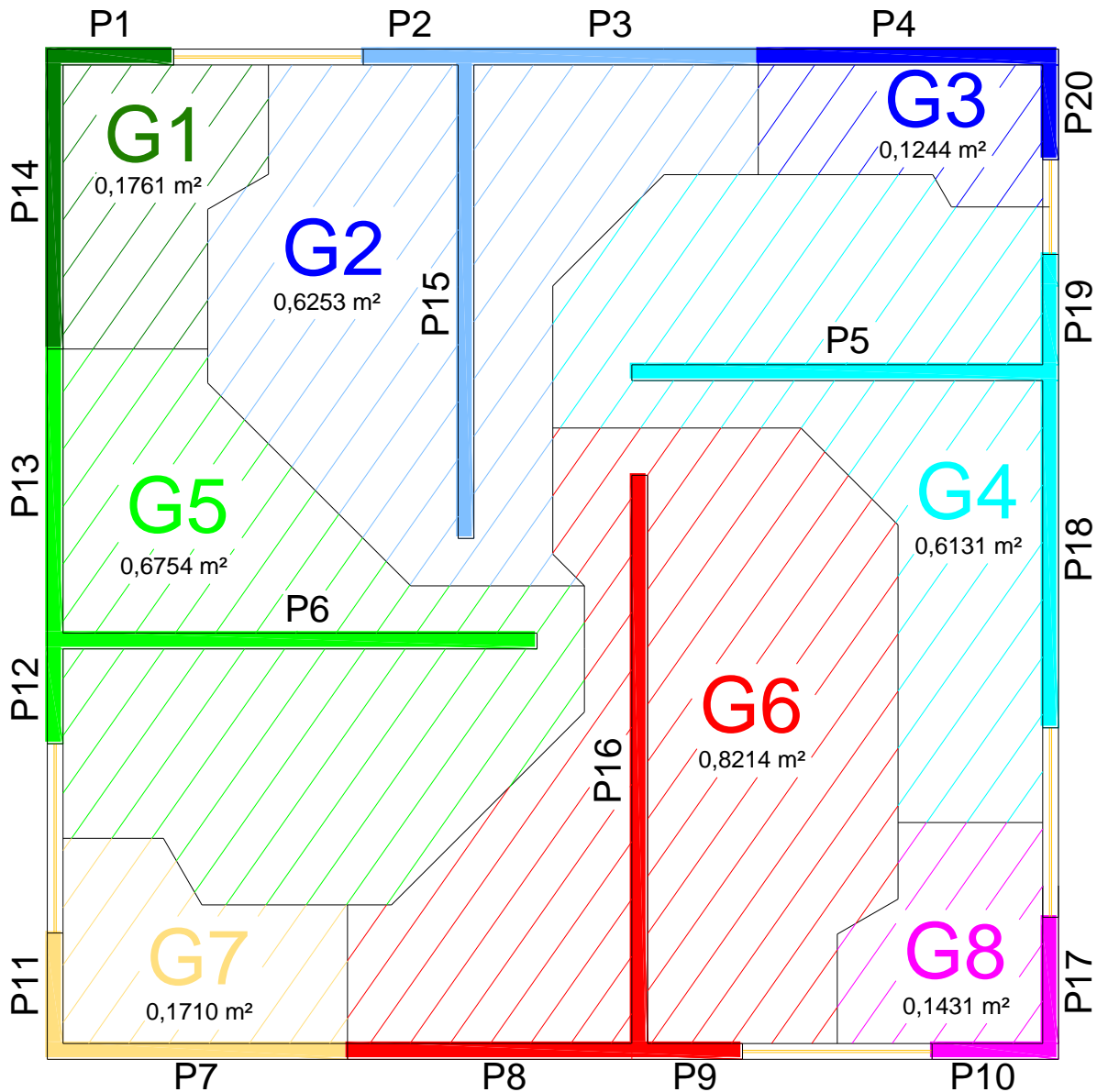
Figura 8. 30 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Níveis.



8.9.3 DETERMINAÇÃO DAS REAÇÕES PARA O CARREGAMENTO DA COBERTURA

Na figura 8.31 ilustram-se, para a laje de cobertura, as áreas de influência para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes.

Figura 8. 31 – Áreas de influência da laje de cobertura: Novos Grupos de Paredes.



Na tabela 8.28 apresenta-se o quadro de cargas com as respectivas áreas de influência para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes na laje de cobertura.

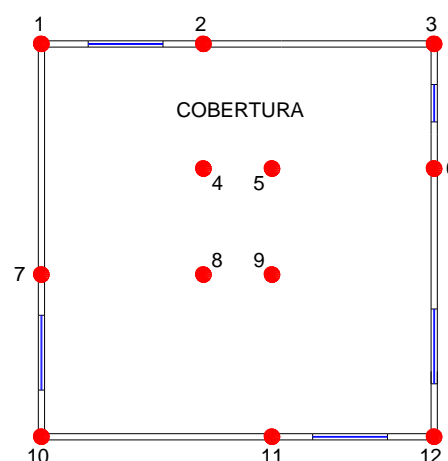
Tabela 8. 28 – Quadro de cargas e área de influência da laje de cobertura: procedimento de Novos Grupos de Paredes.

| Grupos | Paredes | Comprimentos (m) | | Área (m ²) | Carga (kN) (1,30 kN/m ²) | Carregamento (kN/m) |
|--------|---------|------------------|-------|------------------------|---|------------------------|
| G1 | P1 | 0,225 | 0,780 | 0,1761 | 0,229 | 0,294 |
| | P14 | 0,555 | | | | |
| G2 | P2 | 0,195 | 1,665 | 0,6253 | 0,813 | 0,488 |
| | P3 | 0,555 | | | | |
| | P15 | 0,915 | | | | |
| G3 | P4 | 0,555 | 0,750 | 0,1244 | 0,162 | 0,216 |
| | P20 | 0,195 | | | | |
| G4 | P5 | 0,78 | 1,680 | 0,6131 | 0,797 | 0,474 |
| | P18 | 0,675 | | | | |
| | P19 | 0,225 | | | | |
| G5 | P6 | 0,915 | 1,665 | 0,6754 | 0,878 | 0,527 |
| | P12 | 0,195 | | | | |
| | P13 | 0,555 | | | | |
| G6 | P8 | 0,555 | 1,845 | 0,8214 | 1,068 | 0,579 |
| | P9 | 0,195 | | | | |
| | P16 | 1,095 | | | | |
| G7 | P7 | 0,555 | 0,780 | 0,1710 | 0,222 | 0,285 |
| | P11 | 0,225 | | | | |
| G8 | P10 | 0,225 | 0,480 | 0,1431 | 0,186 | 0,388 |
| | P17 | 0,255 | | | | |

Na tabela 8.29 são apresentados os percentuais de reação, para cada apoio de sustentação da grelha, para o procedimento de Grupos de Paredes e Novos Grupos de Paredes.

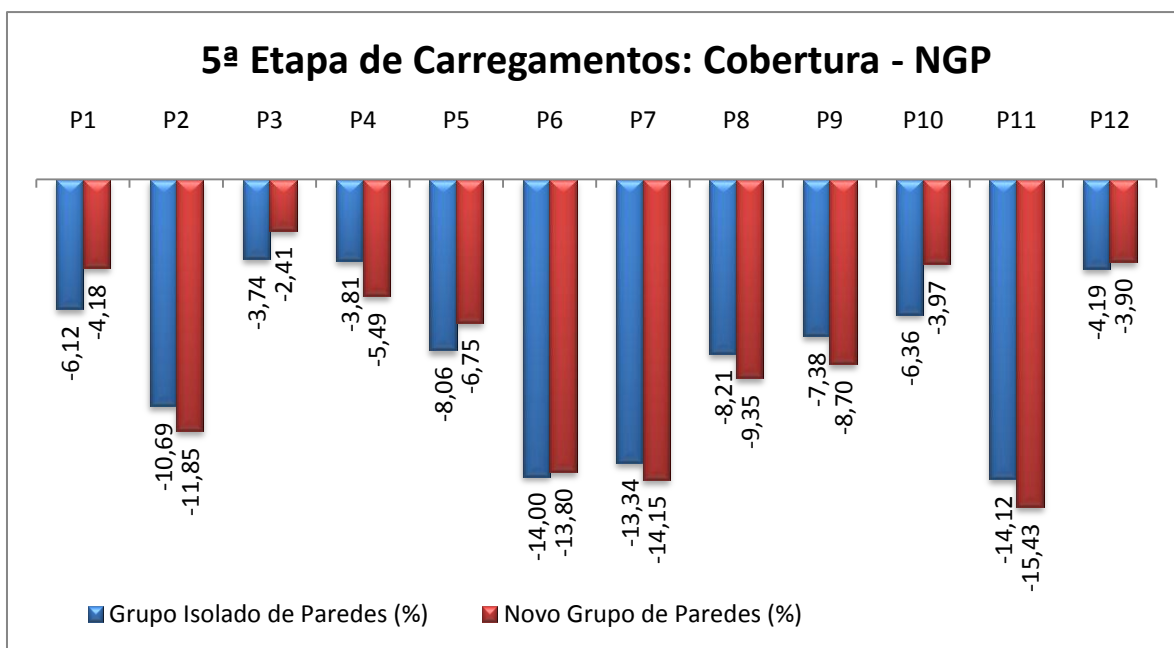
Tabela 8. 29 – Resultados percentuais das reações de apoio: Carregamento da cobertura.

| Apoios | Grupos de Paredes (%) | Novo Grupo de Paredes (%) |
|--------|-----------------------|---------------------------|
| P1 | -6,12 | -4,18 |
| P2 | -10,69 | -11,85 |
| P3 | -3,74 | -2,41 |
| P4 | -3,81 | -5,49 |
| P5 | -8,06 | -6,75 |
| P6 | -14,00 | -13,80 |
| P7 | -13,34 | -14,15 |
| P8 | -8,21 | -9,35 |
| P9 | -7,38 | -8,70 |
| P10 | -6,36 | -3,97 |
| P11 | -14,12 | -15,43 |
| P12 | -4,19 | -3,90 |



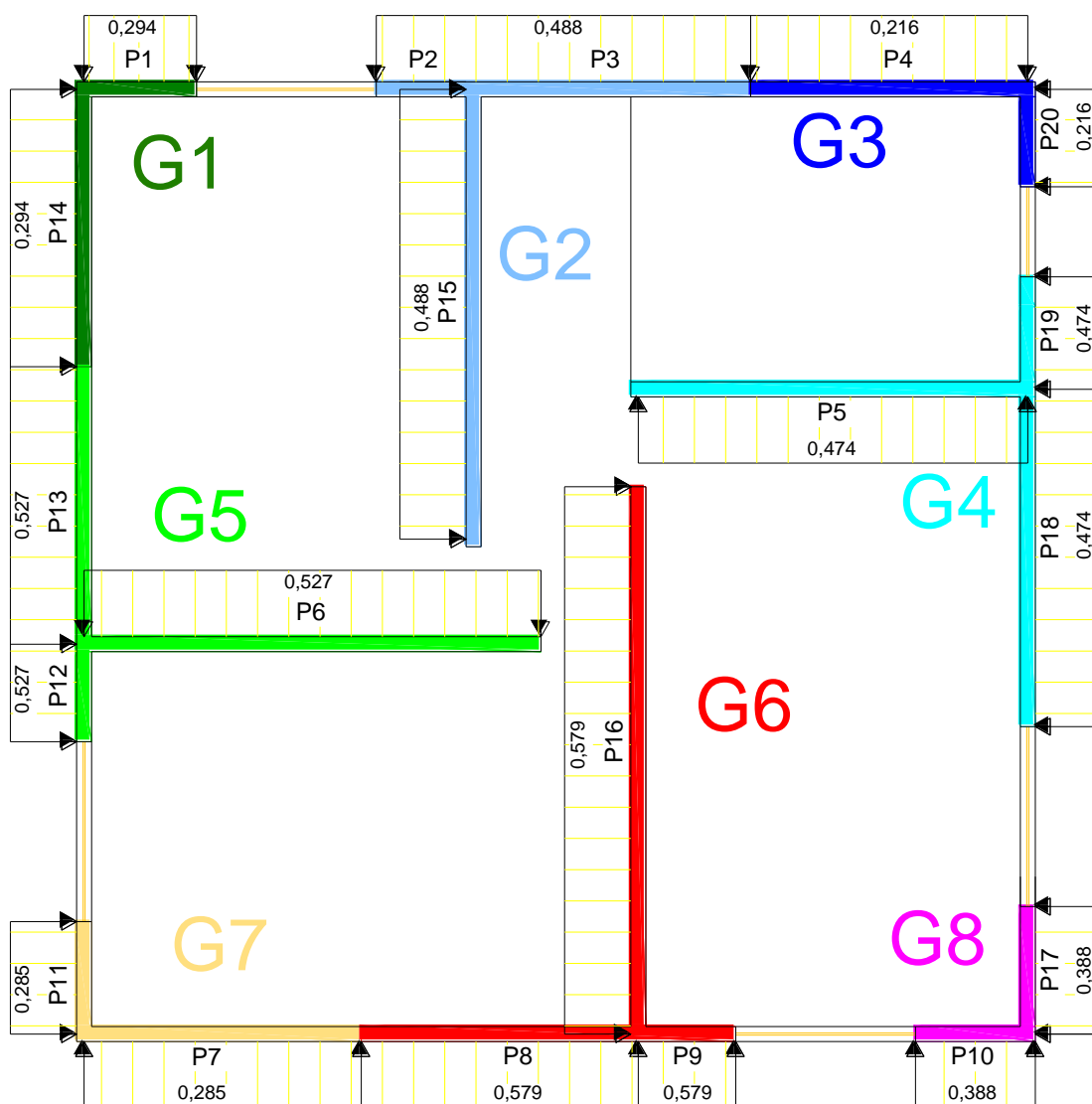
Na figura 8.32 ilustram-se os resultados do procedimento de Grupos de Paredes e Novos Grupos de Paredes.

Figura 8. 32 – Resultado gráfico dos percentuais das reações de apoio para o procedimento de Grupos de Paredes e Novos Grupos de Paredes: Carregamento da cobertura.



Na figura 8.33 apresentam-se as cargas referentes ao procedimento de Novos Grupos de Paredes para o carregamento da laje de cobertura.

Figura 8. 33 – Representação das ações uniformemente distribuídas para a aplicação do procedimento de Novos Grupos de Paredes: Laje de cobertura.



No próximo capítulo será apresentada a análise das etapas de ensaios com a utilização da Modelagem por Elementos Finitos (MEF) para posterior comparação com os ensaios experimentais e procedimentos teóricos.



MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS (MEF)

9 MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O objetivo neste capítulo é apresentar a análise da distribuição das ações verticais no modelo físico reduzido através da macro modelagem em Elementos Finitos utilizando a análise linear e materiais isotrópicos.

Para a discretização do modelo físico reduzido em elementos finitos fez-se uso do software SAP2000® V15, sendo discretizados todos os elementos constituintes.

9.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO

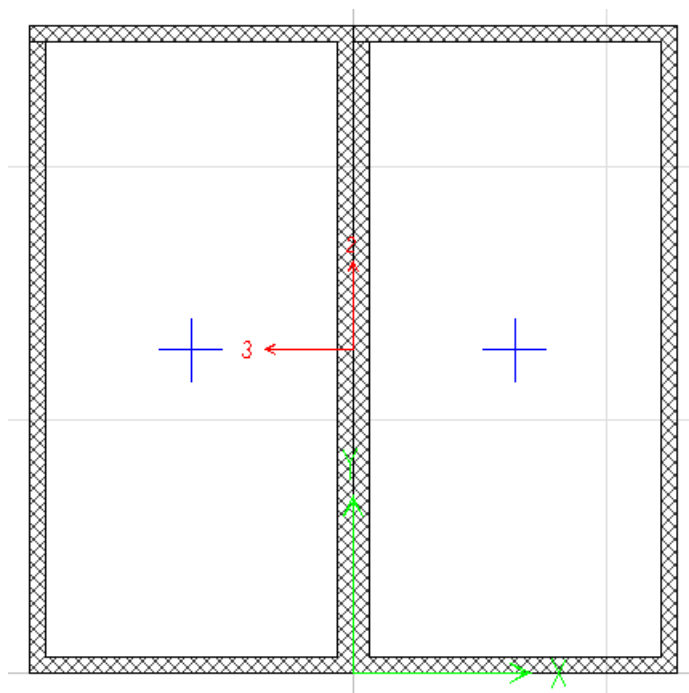
Para representar o comportamento físico das paredes de alvenaria e das lajes foram utilizados elementos de casca (*Shell*) quadrilaterais, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó, que simulam o comportamento de membrana e de placa.

O elemento alvenaria foi discretizado na horizontal com as dimensões do meio bloco e na vertical com a metade da altura da fiada. Para o módulo de elasticidade adotou-se o valor de 3.061 MPa, resultado obtido nos ensaios de caracterização das paredes PAR3B12F (Capítulo 5), e a espessura de 0,028 m, obtido na caracterização dos componentes (Capítulo 4).

A grelha de sustentação, que serviu de alicerce para as paredes do modelo físico reduzido, foi composta por dois *metalons* soldados de 40x80 mm (Largura x Altura), compondo desta forma um conjunto com medidas externas de 80x80 mm, em aço estrutural do tipo SAE 1010 na espessura de 2 mm, com módulo de elasticidade de 200.000 MPa e *Poisson* de 0,29; conforme catálogo (Figura 9.1).

Para a modelagem foram utilizados elementos lineares (*Frame*) com seis graus de liberdade por nó. A grelha de sustentação foi considerada apoiada em pontos discretos, os quais foram restritos quanto a possíveis translações nas três direções dos eixos globais de referência.

As lajes do modelo físico reduzido foram modeladas com concreto de 25000 MPa e coeficiente de *Poisson* correspondente a 0,20.

Figura 9. 1 – Ilustração da seção da grelha de sustentação.

Fonte: Própria.

Na tabela 9.1 apresentam-se o resumo das propriedades dos materiais utilizadas para a modelagem em MEF.

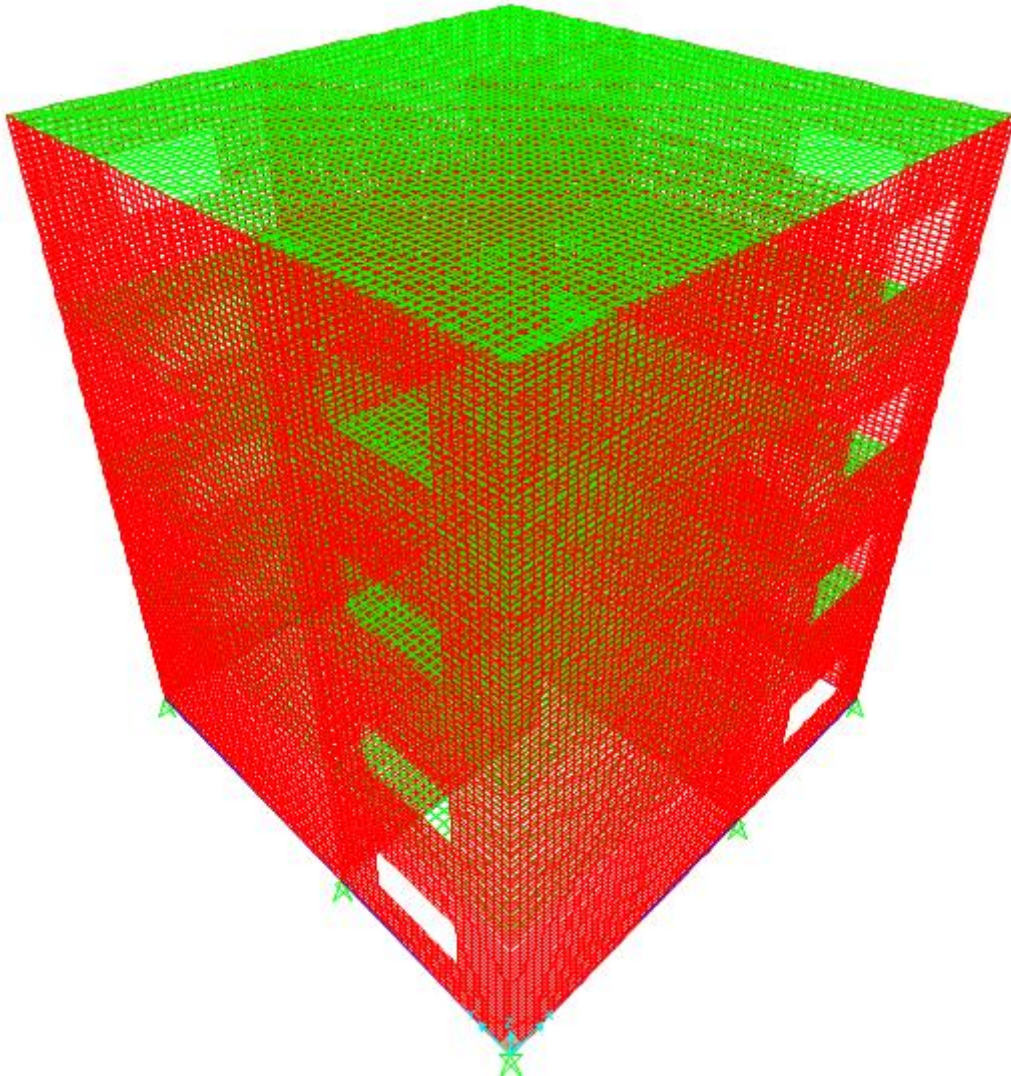
Tabela 9. 1 – Propriedade dos materiais utilizados na modelagem em MEF.

| Material | Módulo de Elasticidade (E) | Coefficiente de <i>Poisson</i> (ν) |
|---------------------|----------------------------|--|
| Alvenaria | 3.061 MPa | 0,20 |
| Base de sustentação | 200.000 MPa | 0,29 |
| Lajes | 25.000 MPa | 0,20 |

As ações foram impostas através da inserção de carregamentos uniformemente distribuídos sobre as lajes discretizadas. De posse dos resultados encontrados utilizando o MEF, realizou-se a comparação com os resultados experimentais e teóricos.

Na figura 9.2 ilustra-se a discretização do modelo físico reduzido. Pode-se observar que nos apoios das vigas de sustentação há restrição aos deslocamentos nas três direções.

Figura 9. 2 – Discretização do modelo físico reduzido.



Fonte: Própria.

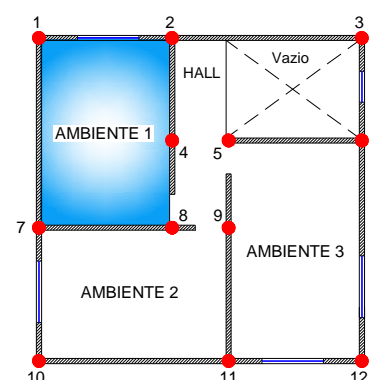
9.2 MODELAGEM PARA A 1ª ETAPA DE CARREGAMENTOS

Conforme já citado nos ensaios experimentais, a primeira etapa consistiu na inserção de carregamentos uniformemente distribuídos no Ambiente 1 em diferentes níveis (A1N1, A1N2, A1N3). Na tabela 9.2 apresentam-se os resultados obtidos das reações de apoio com a utilização da Modelagem por Elementos Finitos.

Salienta-se, novamente, que os valores percentuais negativos representam o acréscimo de reação (compressão), já os valores positivos representam o alívio.

Tabela 9. 2 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 1ª etapa de ensaios: Carregamento no Ambiente 1.

| Pontos | MEF (%) | | | |
|--------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| | A1N1 | A1N2+A1N1 | A1N3+A1N2+A1N1 | Média |
| P1 | -17,62 | -17,16 | -16,93 | -17,24 |
| P2 | -18,71 | -19,26 | -19,44 | -19,14 |
| P3 | -1,38 | -1,93 | -2,28 | -1,86 |
| P4 | -20,01 | -17,85 | -16,43 | -18,10 |
| P5 | -0,54 | -1,15 | -1,57 | -1,09 |
| P6 | +1,22 | +1,26 | +1,24 | +1,24 |
| P7 | -23,22 | -23,30 | -23,28 | -23,27 |
| P8 | -11,79 | -11,20 | -10,77 | -11,25 |
| P9 | -0,23 | -0,42 | -0,85 | -0,35 |
| P10 | -2,92 | -3,65 | -4,11 | -3,56 |
| P11 | +0,55 | +0,59 | +0,58 | +0,57 |
| P12 | +1,80 | +2,23 | +2,53 | +2,19 |



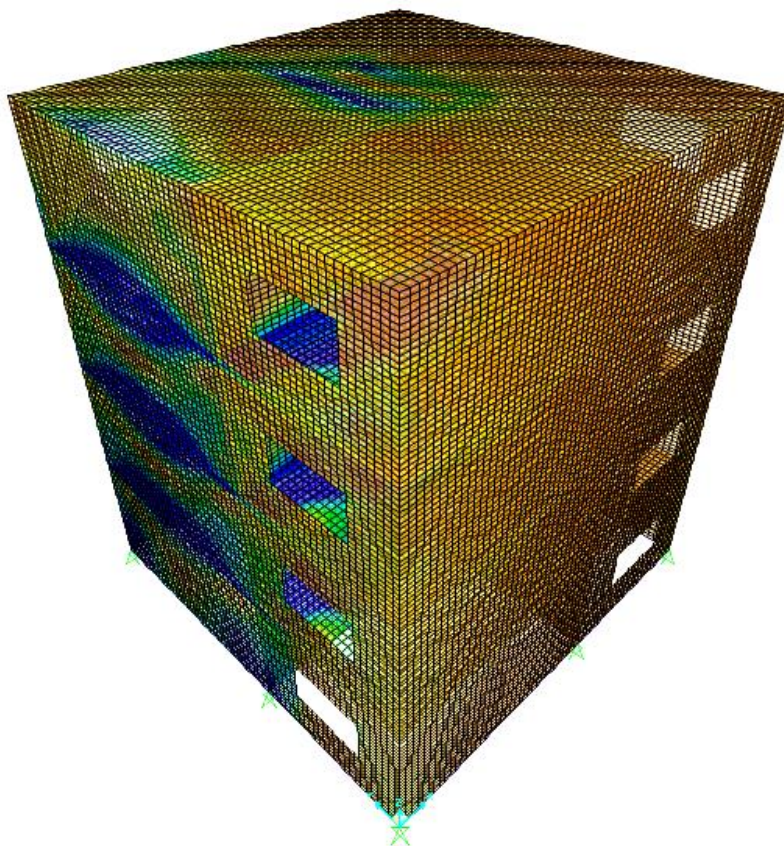
Através da modelagem por elementos finitos observa-se que os maiores valores percentuais se referem aos pontos que delimitam o ambiente carregado (P1, P2, P4, P7, e P8). O percentual destes pontos foi de **91,4%** para o carregamento do primeiro nível (A1N1), de **88,8%** para o primeiro e segundo níveis carregados (A1N1+A1N2), e de **86,9%** para todos os níveis carregados (A1N1+A1N2+A1N3); resultando na média de **89,0%**.

Esses resultados evidenciam que à medida que os carregamentos foram inseridos em níveis superiores, houve a tendência de uma melhor distribuição das ações.

Pode-se observar que os pontos internos P4 e P8, que fazem parte da região de contorno da laje carregada, tenderam à redução de reação à medida que o carregamento foi imposto em níveis superiores.

Já os pontos P3, P5, P9, e P10, que são pontos próximos ao entorno da área carregada, continuaram a aumentar. O acréscimo de reação ocorrido no ponto P5 pode ser proveniente da ação da laje, ou da redistribuição das cargas pelo sistema de grelhas da base de sustentação, visto que entre os pontos P4 e P5 não há interligação entre paredes. Já no ponto P9, que apresentou alívio de reação no carregamento do primeiro nível (A1N1), o acréscimo oriundo dos outros carregamentos em níveis superiores podem ter ocorrido pelos fatores citados acima e também pela presença da alvenaria em forma de “bandeira” sobre a abertura existente entre os pontos de apoio P8 e P9. Os pontos P6, P11, e P12, distantes da área carregada, não apresentaram diferenças significativas com o carregamento dos níveis superiores.

Figura 9.3 – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento nos Ambientes 1.



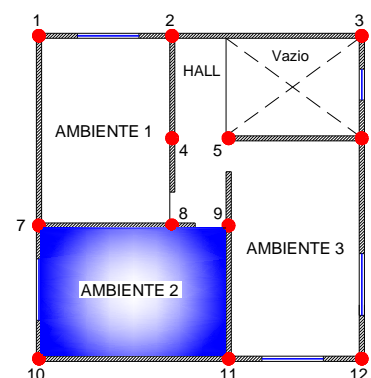
Fonte: Própria.

9.3 MODELAGEM PARA A 2ª ETAPA DE CARREGAMENTOS

Conforme já citado, nos ensaios experimentais a segunda etapa de carregamentos consistiu na inserção de cargas uniformemente distribuídas no Ambiente 2 em diferentes níveis (A2N1, A2N2, A2N3). Na tabela 9.3 são apresentados os resultados obtidos na Modelagem por Elementos Finitos. A sequência de carregamentos, bem como as notações e representações para o acréscimo e alívio de reações, não diferem da primeira etapa de carregamentos.

Tabela 9. 3 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 2ª etapa de ensaios: Carregamento no Ambiente 2.

| Pontos | MEF (%) | | | |
|--------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| | A2N1 | A2N2+A2N1 | A2N3+A2N2+A2N1 | Média |
| P1 | -1,68 | -2,10 | -2,40 | -2,06 |
| P2 | +1,16 | +1,32 | +1,33 | +1,27 |
| P3 | +2,45 | +2,91 | +3,22 | +2,86 |
| P4 | -0,04 | -1,23 | -1,93 | -1,07 |
| P5 | -0,83 | -1,05 | -1,17 | -1,02 |
| P6 | +0,36 | +0,38 | +0,39 | +0,38 |
| P7 | -21,58 | -21,62 | -21,53 | -21,58 |
| P8 | -18,79 | -16,44 | -15,05 | -16,76 |
| P9 | -9,48 | -9,33 | -9,21 | -9,34 |
| P10 | -17,51 | -16,93 | -16,69 | -17,04 |
| P11 | -23,35 | -23,21 | -23,14 | -23,23 |
| P12 | -2,77 | -3,47 | -3,93 | -3,39 |



Através da Modelagem por Elementos Finitos, pode-se observar que os maiores valores percentuais se referem aos pontos de apoio que delimitam o ambiente carregado (P7, P8, P9, P10, e P11), conforme ocorrido na primeira etapa de carregamentos. O percentual destes pontos foi de **90,7%** para o carregamento do primeiro nível (A2N1), de **87,5%** para o primeiro e segundo níveis carregados (A1N1+A1N2), e de **85,6%** para todos os níveis carregados (A2N1+A2N2+A2N3). Indicando o mesmo comportamento ocorrido para a primeira etapa de carregamentos; com média percentual de **87,9%**.

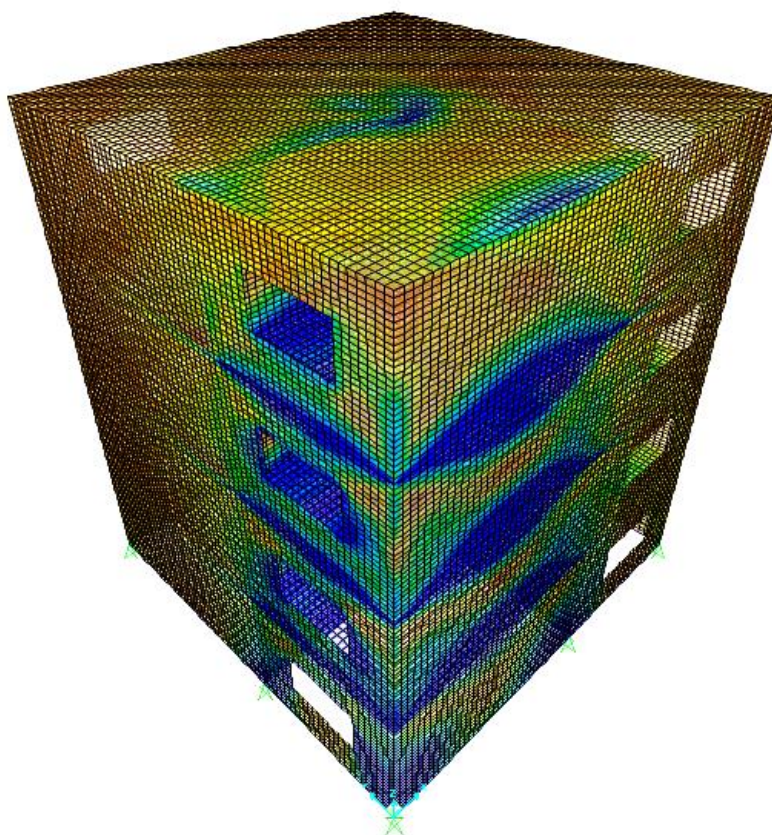
Verificou-se que os pontos P8, P9, e P10; que fazem parte da região de contorno da laje carregada tenderam à redução de reação à medida que os

carregamentos foram impostos em níveis superiores, o mesmo ocorrido com os pontos P1, P4, e P8 na primeira etapa de carregamentos.

Os pontos P1, P4, P5 e P12 tenderam a aumentar, apresentando o mesmo comportamento obtido na primeira etapa de ensaios. O acréscimo ocorrido na reação do ponto P4 e P5 podem ser provenientes da ação da laje, da redistribuição das cargas pelo sistema de grelhas da base de sustentação, ou então pela presença de alvenaria em forma de bandeira sobre as aberturas existentes entre os pontos de apoio P4 e P8, e P5 e P9.

Os pontos P2 e P6, que estão distantes da área carregada, não apresentaram diferenças significativas com o carregamento dos níveis superiores. O ponto P3, mais distante da área carregada e que não possui laje ao seu entorno, apresentou acréscimos de reações de 18,8% e 10,7% para o carregamento no segundo e terceiro níveis respectivamente.

Figura 9. 4 – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento nos Ambientes 2.



Fonte: Própria.

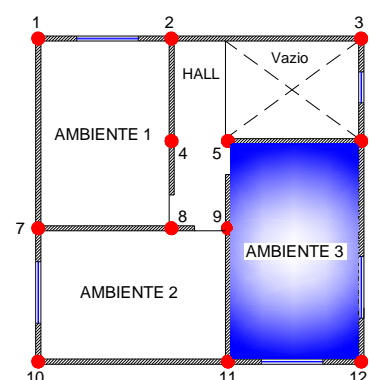
9.4 MODELAGEM PARA A 3ª ETAPA DE CARREGAMENTOS

Conforme já citado nos ensaios experimentais, a terceira etapa de carregamentos consistiu na inserção de cargas uniformemente distribuídas no Ambiente 3 e em diferentes níveis (A3N1, A3N2, A3N3). Na tabela 9.4 são apresentados os resultados obtidos na Modelagem por Elementos Finitos.

A sequência de carregamentos não difere das outras duas etapas anteriores, bem como as notações para o acréscimo e alívio de percentuais de reação.

Tabela 9. 4 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 3ª etapa de ensaios: Carregamento no Ambiente 3.

| Pontos | MEF (%) | | | |
|--------|---------|-----------|--------------------|--------|
| | A3N1 | A3N2+A3N1 | A3N3 + A3N2 + A3N1 | Média |
| P1 | +2,05 | +2,64 | +2,97 | +2,55 |
| P2 | +0,57 | +0,59 | +0,56 | +0,57 |
| P3 | -3,57 | -4,69 | -5,29 | -4,52 |
| P4 | +0,81 | +0,49 | +0,22 | 0,51 |
| P5 | -8,83 | -8,78 | -8,44 | -8,68 |
| P6 | -22,25 | -23,39 | -23,39 | -23,01 |
| P7 | +0,95 | +1,13 | +1,14 | 1,07 |
| P8 | +4,67 | -0,98 | -1,84 | +0,62 |
| P9 | -20,26 | -18,88 | -17,36 | -18,83 |
| P10 | -2,00 | -2,52 | -2,81 | -2,44 |
| P11 | -19,03 | -20,66 | -20,95 | -20,21 |
| P12 | -15,01 | -15,25 | -15,03 | -15,10 |



Através da modelagem por elementos finitos pode-se observar que os maiores valores percentuais se referem aos pontos de apoio que delimitam o ambiente carregado (P5, P6, P9, P11, e P12), o mesmo ocorrido nas outras duas etapas de carregamentos. O percentual destes pontos foi de **85,4%** para o carregamento do primeiro nível (A3N1), de **86,7%** para o primeiro e segundo níveis carregados (A3N1+A3N2), e de **85,2%** para todos os níveis carregados (A3N1+A3N2+A3N3), resultando na média de **85,8%**.

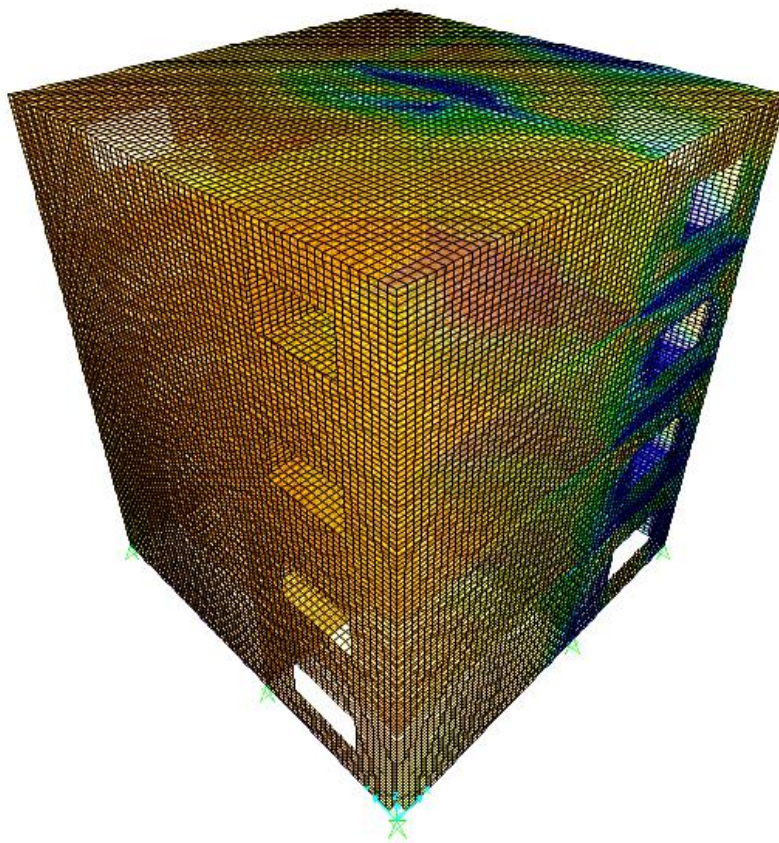
O comportamento das reações dos pontos que delimitam a área carregada (Ambiente 3) não foi o mesmo apresentado nas outras duas etapas anteriores de carregamento. O percentual de reações tendeu a se manter, à medida que foram

carregados os ambientes em níveis superiores. Salienta-se que o ambiente carregado faz divisa com a área que não possui laje.

O ponto P1, mais distante da área carregada, apresentou alívio de reação em todos os níveis de carregamento, tendendo a aumentar. No ponto P2 não foi observado diferenças de reações significativas, ressaltando-se que entre os pontos P4 e P5 não há alvenaria e interligação através de paredes. No ponto P3 as reações tenderam a aumentar à medida que foram aplicados carregamentos em níveis superiores, apesar da existência de uma pequena abertura na alvenaria entre os pontos de apoio P3 e P6 no segundo e terceiro nível.

Quando aplicado o carregamento no primeiro nível (A3N1), os pontos P4 e P8 apresentaram alívio de reação, enquanto, no carregamento dos dois outros níveis superiores (A3N2 e A3N3) estes pontos apresentaram acréscimo. O ponto interno P9 tendeu a redução da reação, enquanto, os pontos P10 e P11 tenderam ao acréscimo em todos os níveis de carregamento.

Figura 9.5 – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento nos Ambientes 3.



Fonte: Própria.

9.5 MODELAGEM PARA A 4ª ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO DOS NÍVEIS

Conforme já citado nos ensaios experimentais, a quarta etapa de ensaios consistiu na inserção de carregamentos, uniformemente distribuídos, ao nível de cada pavimento, ou seja, primeiramente foram carregados todos os ambientes do primeiro nível, posteriormente todos os ambientes do segundo nível, e por fim, todos os ambientes do terceiro nível. Na tabela 9.5 são apresentados os resultados obtidos por MEF para cada nível de carregamento, já na figura 9.5 ilustram-se os resultados percentuais.

Tabela 9. 5 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 4ª etapa de ensaios: Carregamento dos níveis.

| Apoios | Reações de Apoio (%) | | | Média (%) |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| | Nível 1 (%) Isolado | Nível 2 (%) Isolado | Nível 3 (%) Isolado | |
| P1 | -5,73 | -5,41 | -5,35 | -5,50 |
| P2 | -5,76 | -6,10 | -6,25 | -6,04 |
| P3 | -1,16 | -1,97 | -2,33 | -1,82 |
| P4 | -6,52 | -6,23 | -6,09 | -6,28 |
| P5 | -4,24 | -4,43 | -4,50 | -4,39 |
| P6 | -8,96 | -8,95 | -8,98 | -8,96 |
| P7 | -14,95 | -15,24 | -15,27 | -15,15 |
| P8 | -10,29 | -9,68 | -9,32 | -9,76 |
| P9 | -11,83 | -10,33 | -9,63 | -10,60 |
| P10 | -7,87 | -8,50 | -8,92 | -8,43 |
| P11 | -15,95 | -16,62 | -16,78 | -16,45 |
| P12 | -6,74 | -6,55 | -6,58 | -6,63 |

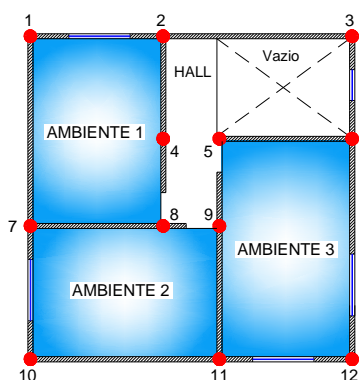
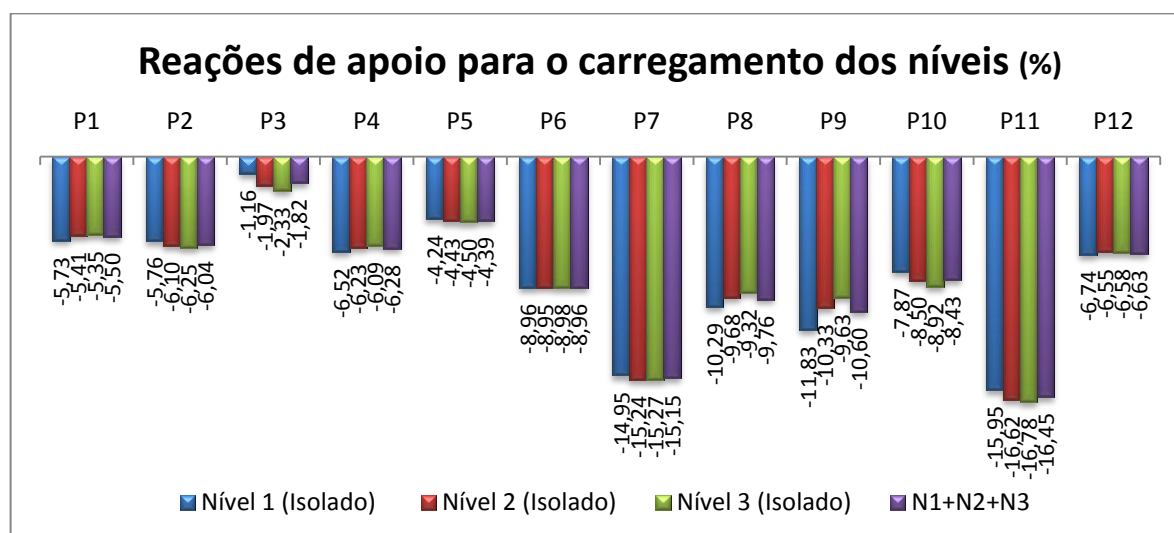


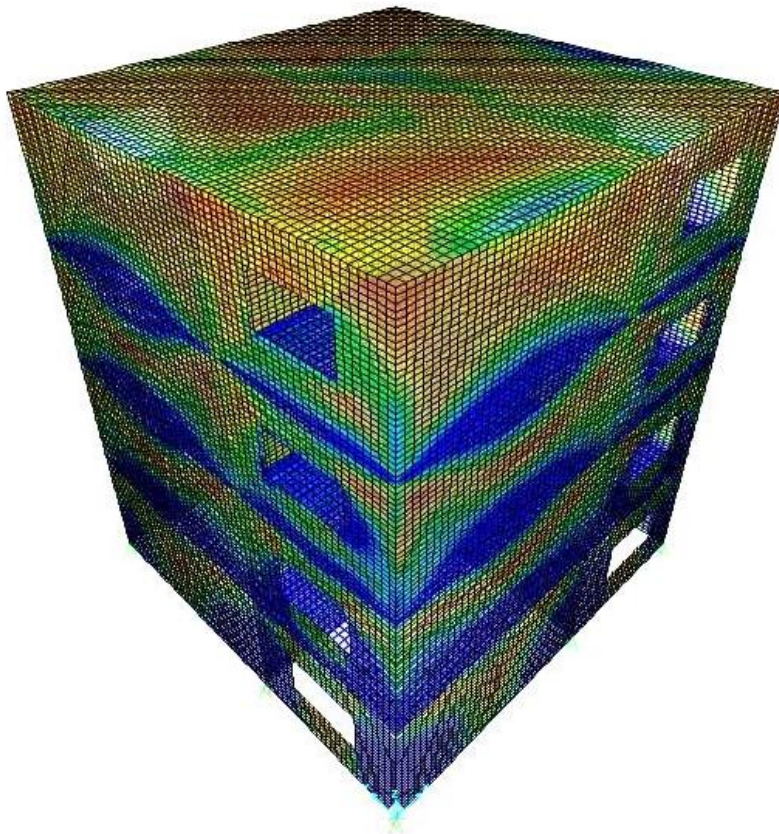
Figura 9. 6 – Reações de apoio para a quarta etapa de carregamentos (MEF).



Através dos dados apresentados na tabela 9.5, conclui-se que a aplicação dos carregamentos em todos os níveis (N1+N2+N3) corresponde à média dos resultados obtidos para cada nível isoladamente. Nota-se que os pontos de apoio da região central (P7, P8, P9, e P11) possuem maiores intensidades de reação.

Com o carregamento dos níveis, também foi possível constatar uma melhor distribuição das ações verticais, sendo que os pontos internos P8 e P9 tenderam a reduzir, enquanto os pontos P3 e P10 tenderam a aumentar com o carregamento nos níveis superiores (N2 e N3).

Figura 9.7 – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento nos níveis.



Fonte: Própria.

9.6 MODELAGEM PARA A 5ª ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO NA COBERTURA

Conforme descritos nos ensaios experimentais e teóricos, a quinta etapa de carregamentos consistiu na inserção de cargas uniformemente distribuídas na laje da cobertura do modelo físico reduzido.

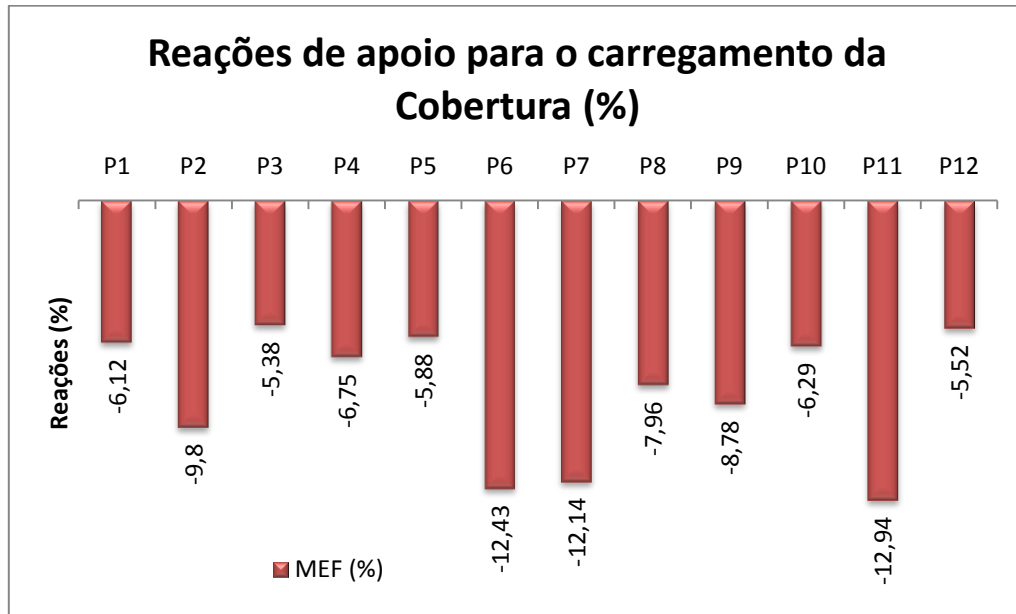
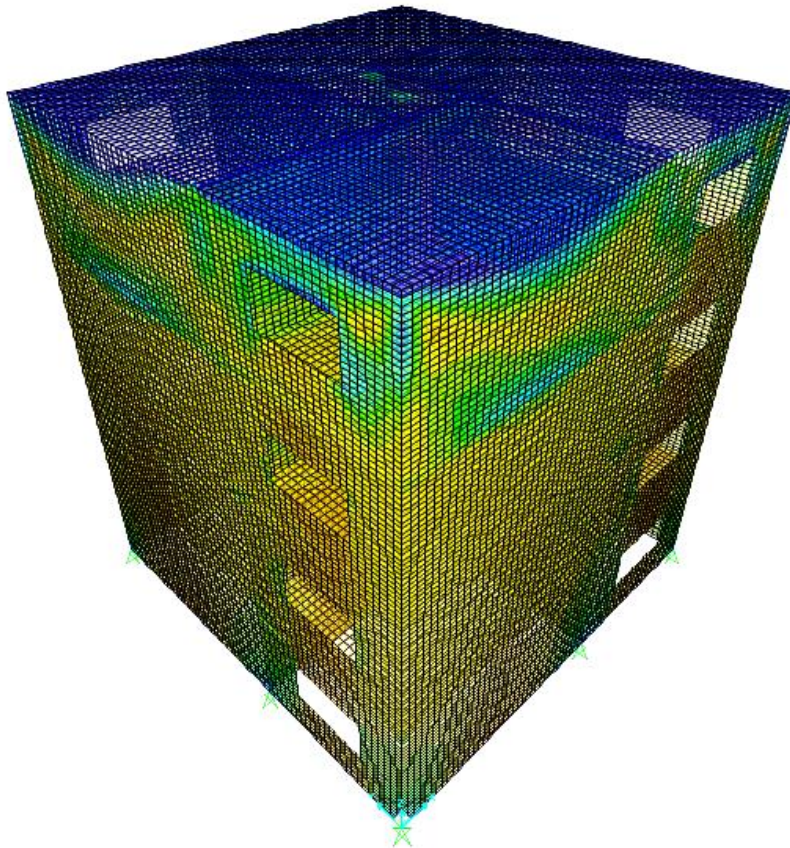
Na tabela 9.6 apresentam-se os resultados das reações de apoio para a quinta etapa de carregamentos (cobertura).

Tabela 9. 6 – Percentuais de reações de apoio em MEF para a 5ª etapa de ensaios: Carregamento na cobertura.

| Apoios | Cobertura (%) |
|--------|---------------|
| P1 | -6,12 |
| P2 | -9,80 |
| P3 | -5,38 |
| P4 | -6,75 |
| P5 | -5,88 |
| P6 | -12,43 |
| P7 | -12,14 |
| P8 | -7,96 |
| P9 | -8,78 |
| P10 | -6,29 |
| P11 | -12,94 |
| P12 | -5,52 |

Com a inserção do carregamento na laje da cobertura as reações tenderam a se uniformizar, sendo que os pontos de borda foram os mais solicitados (P2, P6, P7, e P11), responsáveis por 47,3% das reações. Os pontos de canto (P1, P3, P10, e P12) foram responsáveis por 23,3% das reações, enquanto os pontos internos (P4, P5, P8, e P9) absorveram 29,4%.

Na figura 9.7 representam-se os resultados percentuais das reações de apoio para o carregamento na laje de cobertura. Na figura 9.8 ilustra-se o carregamento inserido na laje de cobertura.

Figura 9. 8 – Representação gráfica dos resultados: Carregamento na cobertura.**Figura 9. 9** – Representação gráfica das tensões máximas (S_{max}) quando imposto carregamento na cobertura.

Fonte: Própria.

10

ANÁLISES DOS RESULTADOS

10 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se a análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, nos procedimentos teóricos de Paredes Isoladas (PI) e Grupos de Paredes (GP), no procedimento proposto de Novos Grupos de Paredes (NGP), e na Modelagem por Elementos Finitos (MEF), levando-se em consideração cada etapa de carregamento.

10.1 RESULTADOS DA 1ª ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO NO AMBIENTE 1

Na tabela 10.1 apresentam-se os resultados percentuais das reações de apoio obtidos na primeira etapa de ensaios, conforme procedimentos apresentados anteriormente. Também são apresentadas as razões entre os procedimentos teóricos e o procedimento experimental.

Tabela 10. 1 – Resultados e razões para a 1ª etapa de ensaios: Ambiente 1.

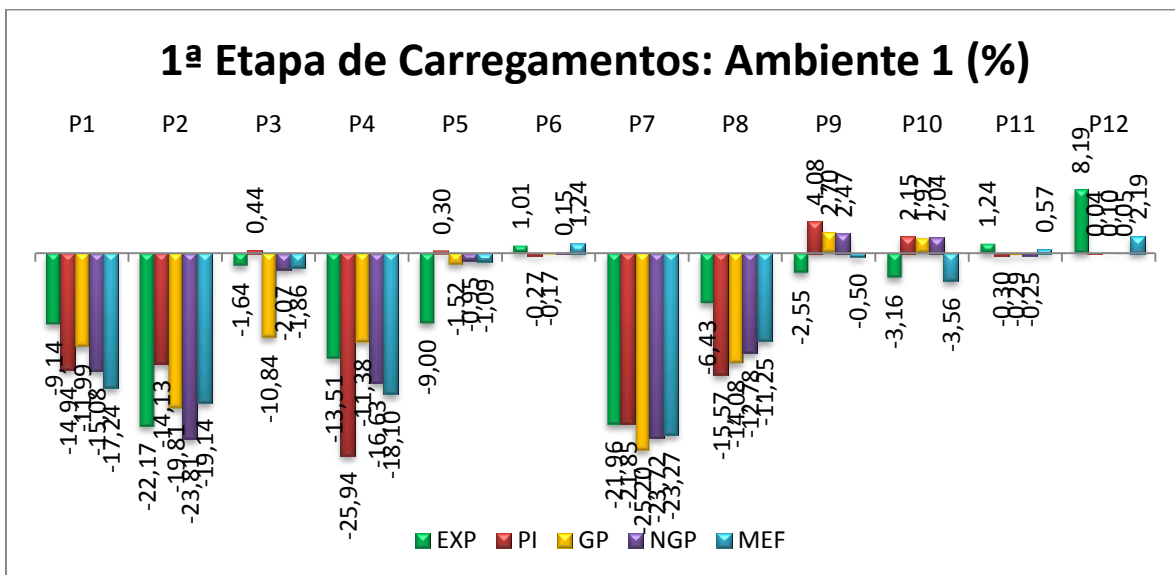
| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|
| P1 | -9,14 | -14,94 | -11,99 | -15,08 | -17,24 | 1,63 | 1,31 | 1,65 | 1,89 |
| P2 | -22,17 | -14,13 | -19,81 | -23,81 | -19,14 | 0,64 | 0,89 | 1,07 | 0,86 |
| P3 | -1,64 | +0,44 | -10,84 | -2,07 | -1,86 | -0,27 | 6,62 | 1,26 | 1,14 |
| P4 | -13,51 | -25,94 | -11,38 | -16,63 | -18,10 | 1,92 | 0,84 | 1,23 | 1,34 |
| P5 | -9,00 | +0,30 | -1,52 | -0,95 | -1,09 | -0,03 | 0,17 | 0,11 | 0,12 |
| P6 | +1,01 | -0,27 | -0,17 | +0,15 | +1,24 | -0,27 | -0,17 | 0,15 | 1,23 |
| P7 | -21,96 | -21,85 | -25,20 | -23,72 | -23,27 | 0,99 | 1,15 | 1,08 | 1,06 |
| P8 | -6,43 | -15,57 | -14,08 | -12,78 | -11,25 | 2,42 | 2,19 | 1,99 | 1,75 |
| P9 | -2,55 | +4,08 | +2,70 | +2,47 | -0,50 | -1,60 | -1,06 | -0,97 | 0,20 |
| P10 | -3,16 | +2,15 | +1,92 | +2,04 | -3,56 | -0,68 | -0,61 | -0,64 | 1,13 |
| P11 | +1,24 | -0,30 | -0,29 | -0,25 | +0,57 | -0,24 | -0,23 | -0,20 | 0,46 |
| P12 | +8,19 | +0,04 | +0,10 | +0,05 | +2,19 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,27 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 0,38 | 0,93 | 0,56 | 0,95 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 1,17 | 2,01 | 0,94 | 0,59 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 311% | 217% | 168% | 62% |

Salienta-se que, quando as razões se aproximam do valor unitário, há o indício da aproximação entre os procedimentos em análise, e que os valores negativos das razões, destacados em vermelho, indicam que as reações nos pontos apresentaram comportamentos diferentes, ou seja, que houve a inversão dos sentidos das forças se comparado com os resultados experimentais.

De acordo com o resultado das médias, apresentadas na tabela 10.1, pôde-se obter que o procedimento de Grupos de Paredes (93%), e o procedimento MEF (95%), foram os que mais se aproximaram dos resultados experimentais.

Através das razões, entre os procedimentos teóricos e o procedimento experimental (Tabela 10.1), observa-se que apenas no procedimento de Modelagem por Elementos Finitos, todos os resultados de reações, apresentaram o mesmo comportamento dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Na figura 10.1 ilustram-se os resultados percentuais das reações de apoio para a primeira etapa de carregamentos (Ambiente 1).

Figura 10. 1 – Resultados da 1ª etapa de carregamentos: Ambiente 1.

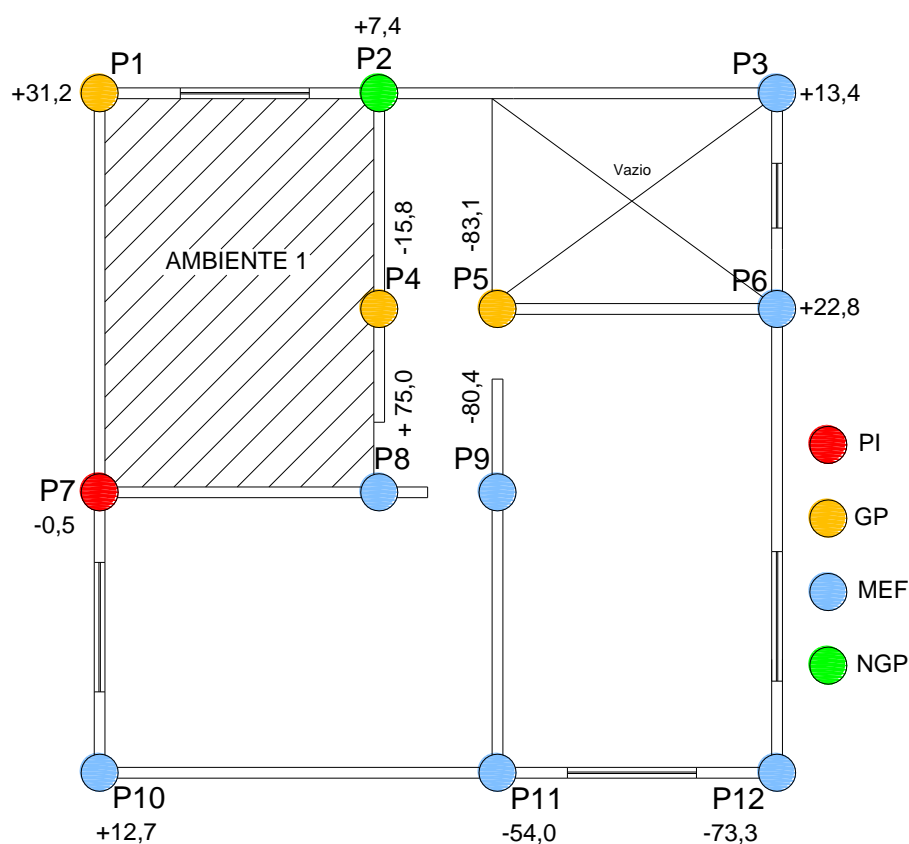


Na figura 10.2 ilustram-se, para cada ponto de apoio, os procedimentos teóricos que mais se aproximaram dos resultados experimentais. Para cada ponto foi representada a diferença percentual do procedimento em destaque com o resultado experimental. Como exemplo, cita-se o ponto P1, no qual a representação na figura 10.2 indica que o resultado obtido através do procedimento de Grupos de Paredes foi 31,2% superior ao obtido nos ensaios experimentais. Ainda como

exemplo, temos para o ponto P7, que a reação de apoio obtida através do procedimento de Paredes Isoladas foi inferior aos ensaios experimentais em 0,5%.

Ressalta-se que na representação da figura 10.2, os percentuais não indicam o acréscimo e/ou alívio, mas sim a diferença entre o procedimento teórico e o procedimento experimental.

Figura 10.2 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Ambiente 1.



Observa-se que os pontos mais distantes da região carregada (P11 e P12) apresentaram alívio quando analisados os resultados experimentais e o procedimento MEF. Vale ressaltar que no procedimento experimental e no procedimento MEF os carregamentos são inseridos uniformemente distribuídos sobre a laje maciça contínua; já nos procedimentos teóricos as ações são delimitadas aos ambientes, podendo desta forma gerar diferentes carregamentos nas paredes.

No ponto P1, todos os resultados teóricos apresentaram valores superiores aos obtidos nos ensaios experimentais. O procedimento de Grupos de Paredes foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais, apresentando percentual

superior em 31,2%. Os procedimentos de Paredes Isoladas e Novos Grupos de Paredes apresentaram valores percentuais próximos entre si, respectivamente, -14,94% e -15,08%.

Para o ponto P2, o resultado experimental (-22,17%) se aproximou do procedimento de Novos Grupos de Paredes (-23,81%), estando inferior em apenas 7,4%. Os procedimentos de Grupos de Paredes (-19,81%) e MEF (-19,14%) apresentaram valores percentuais próximos.

No ponto P3, que não possui laje em seu entorno, foi constatada a inversão de esforços quando aplicado o procedimento de Paredes Isoladas. Os resultados dos procedimentos de MEF (-1,86%) e Novos Grupos de Paredes (-2,07%) apresentaram valores próximos ao valor experimental (-1,64%), já para o procedimento de Grupos de Paredes (-10,84%) observou-se que o resultado se distanciou do resultado experimental.

Diante dos resultados obtidos nos ensaios experimentais e no procedimento MEF, pode-se concluir que o apoio P3 recebeu influência das ações inseridas no Ambiente 1, seja pelo possível espraiamento de cargas através das paredes, que não possuem aberturas entre os pontos P2 e P3, bem como pela interação entre as paredes. Assim, para o ponto P3, pode-se dizer que a ação atuante no Ambiente 1, em todos os níveis, certamente se distribuiu pelas paredes até atingir a viga de sustentação, de forma que a mesma não se limitou entre os pontos de apoio P1 e P2, mas com certeza avançou na direção do ponto em questão com acréscimos de reação à medida que as ações foram inseridas em níveis superiores.

No apoio interno P4, o resultado do procedimento de Grupos de Paredes (-11,38%) também foi o que mais se aproximou do resultado experimental (-13,51%). Pelo procedimento de Paredes Isoladas o percentual de reação foi de 25,94%, valor superior aos demais procedimentos. Os resultados obtidos pelo procedimento MEF (-18,10%) e pelo procedimento de Novos Grupos de Paredes (-16,63%) foram próximos, com diferença percentual de 1,47%. Nos ensaios experimentais e no procedimento de MEF, pode-se constatar que as reações tenderam a reduzir quando carregado os níveis superiores.

No ponto P5, a maior reação percentual foi obtida nos ensaios experimentais (-9,0%), os quais tenderam a se manter com os incrementos de carregamentos nos níveis superiores; mesmo comportamento apresentado no ponto P3. Neste ponto, com exceção do procedimento de Paredes Isoladas (inversão), todos os demais

procedimentos apresentaram resultados próximos (GP: -1,52%; NGP: -0,95%; e MEF: -1,09%).

No ponto P6, o resultado experimental (1,01%) foi próximo ao resultado do MEF (-1,24%); os procedimentos de Paredes Isoladas e de Grupos de Paredes apresentaram o acréscimo de reação (compressão), comportamento contrário ao obtido nos ensaios experimentais e no procedimento MEF.

No ponto P7, os resultados teóricos e experimentais foram próximos. O resultado obtido no procedimento de Paredes Isoladas (-21,85%) foi o que mais se aproximou do resultado experimental (-21,96%). Os procedimentos de Novos Grupos de Paredes (-23,72%) e o MEF (-23,27%) apresentaram valores próximos.

O ponto P8 apresentou o mesmo comportamento do ensaio experimental para todos os procedimentos (compressão), no entanto, o resultado experimental (-6,43%) “se distanciou” dos demais procedimentos. O resultado mais próximo foi obtido pelo procedimento do MEF (-11,25%), com diferença de 75%.

No ponto interno P9, apenas o procedimento MEF apresentou o mesmo comportamento dos ensaios experimentais (compressão), e ainda assim, a diferença percentual foi de 80,4%. No ponto P10, apenas o comportamento do procedimento MEF (-3,56%) foi semelhante ao obtido nos ensaios experimentais (-3,16%), com diferença percentual de 12,7%. No ponto P11, o comportamento obtido pelo MEF (+0,57%) foi igual ao experimental (+1,24%).

Para o ponto P12, todos os procedimentos apresentaram comportamento semelhante (alívio) ao obtido no ensaio experimental (+8,19%). O procedimento MEF foi o que apresentou resultado mais próximo (+2,19%), no entanto, com diferença percentual de 73,3%.

Diante dos resultados pontuais apresentados, e do menor coeficiente de variação obtido na razão entre os resultados do procedimento MEF e os resultados experimentais (62%), pode-se concluir que o procedimento mais indicado para a análise da distribuição das ações verticais nesta primeira etapa de ensaios foi o MEF. Na tabela 10.2 apresentam-se as razões entre os procedimentos teóricos (PI, GP, e NGP) e a Modelagem por Elementos Finitos.

Tabela 10. 2 – Resultados e razões teóricas para a 1ª etapa de ensaios: Ambiente 1.

| Apoios | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | -14,94 | -11,99 | -15,08 | -17,24 | 0,87 | 0,70 | 0,87 |
| P2 | -14,13 | -19,81 | -23,81 | -19,14 | 0,74 | 1,04 | 1,24 |
| P3 | +0,44 | -10,84 | -2,07 | -1,86 | -0,24 | 5,82 | 1,11 |
| P4 | -25,94 | -11,38 | -16,63 | -18,10 | 1,43 | 0,63 | 0,92 |
| P5 | +0,30 | -1,52 | -0,95 | -1,09 | -0,28 | 1,40 | 0,87 |
| P6 | -0,27 | -0,17 | +0,15 | +1,24 | -0,22 | -0,14 | 0,12 |
| P7 | -21,85 | -25,20 | -23,72 | -23,27 | 0,94 | 1,08 | 1,02 |
| P8 | -15,57 | -14,08 | -12,78 | -11,25 | 1,38 | 1,25 | 1,14 |
| P9 | +4,08 | +2,70 | +2,47 | -0,50 | -8,16 | -5,40 | -4,94 |
| P10 | +2,15 | +1,92 | +2,04 | -3,56 | -0,60 | -0,54 | -0,57 |
| P11 | -0,30 | -0,29 | -0,25 | +0,57 | -0,52 | -0,51 | -0,44 |
| P12 | +0,04 | +0,10 | +0,05 | +2,19 | 0,02 | 0,05 | 0,02 |
| PI: Paredes Isoladas | | | | Média: | -0,39 | 0,45 | 0,11 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | D.P.: | 2,55 | 2,48 | 1,71 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | C.V: | -661% | 554% | 1497% |

Comparando-se as razões entre os resultados teóricos (PI, GP, e NGP) e o procedimento MEF (Tabela 10.2), pode-se concluir que o procedimento proposto de Grupos de Paredes é o que mais se aproxima do MEF para esta etapa de ensaios, apesar de alguns pontos apresentarem inversão do sentido da reação.

Como forma de analisar os pontos de apoio do entorno da área carregada (P1, P2, P4, P7, e P8), apresentam-se na tabela 10.3 os percentuais obtidos para o respectivo procedimento adotado.

Tabela 10. 3 – Percentual do entorno à área carregada: Ambiente 1.

| Procedimento | Entorno (%) | Demais (%) |
|-----------------------|-------------|------------|
| Experimental | 73,21 | 26,79 |
| Paredes Isoladas | 92,78 | 7,22 |
| Grupos de Paredes | 81,87 | 18,13 |
| Novo Grupo de Paredes | 92,02 | 7,98 |
| MEF | 86,85 | 13,15 |
| Média: | 85,35 | 14,65 |

Observa-se que, nos ensaios experimentais, foi obtido o menor percentual de reação para os pontos que delimitam o ambiente carregado (73,21%); caracterizando desta forma a transferência de ações verticais, seja pelas paredes ou pelo sistema de grelha da base de sustentação. Na análise dos pontos de entorno, o

procedimento de Grupos de Paredes (81,87%) foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais (+11,83%).

10.2 RESULTADOS DA 2ª ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO NO AMBIENTE 2

Na tabela 10.4 apresentam-se os resultados percentuais das reações de apoio obtidos na segunda etapa de ensaios, conforme procedimentos apresentados anteriormente. Também são apresentadas as razões entre os procedimentos teóricos e o procedimento experimental.

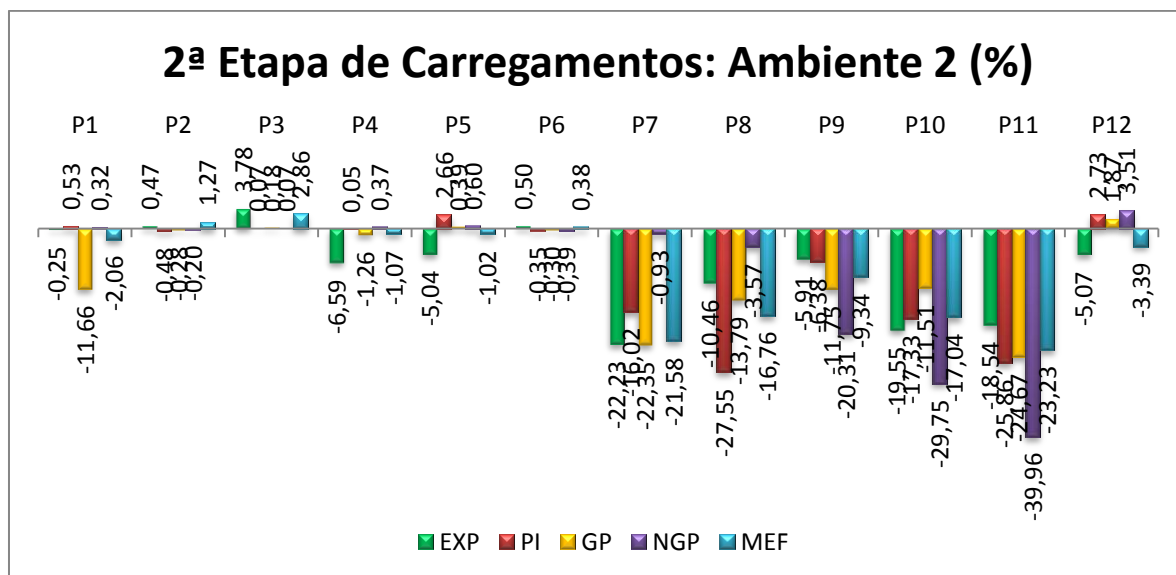
Tabela 10. 4 – Resultados e razões para a 2ª etapa de ensaios: Ambiente 2.

| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|
| P1 | -0,25 | +0,53 | -11,66 | +0,32 | -2,06 | -2,12 | 46,64 | -1,28 | 8,24 |
| P2 | +0,47 | -0,48 | -0,28 | -0,20 | +1,27 | -1,01 | -0,59 | -0,42 | 2,68 |
| P3 | +3,78 | +0,07 | +0,18 | +0,07 | +2,86 | 0,02 | 0,05 | 0,02 | 0,76 |
| P4 | -6,59 | +0,05 | -1,26 | +0,37 | -1,07 | -0,01 | 0,19 | -0,06 | 0,16 |
| P5 | -5,04 | +2,66 | +0,39 | +0,60 | -1,02 | -0,53 | -0,08 | -0,12 | 0,20 |
| P6 | +0,50 | -0,35 | -0,30 | -0,39 | +0,38 | -0,70 | -0,60 | -0,78 | 0,75 |
| P7 | -22,23 | -16,02 | -22,35 | -0,93 | -21,58 | 0,72 | 1,01 | 0,04 | 0,97 |
| P8 | -10,46 | -27,55 | -13,79 | -3,57 | -16,76 | 2,63 | 1,32 | 0,34 | 1,60 |
| P9 | -5,91 | -6,38 | -11,75 | -20,31 | -9,34 | 1,08 | 1,99 | 3,44 | 1,58 |
| P10 | -19,55 | -17,33 | -11,51 | -29,75 | -17,04 | 0,89 | 0,59 | 1,52 | 0,87 |
| P11 | -18,54 | -25,86 | -24,67 | -39,96 | -23,23 | 1,40 | 1,33 | 2,16 | 1,25 |
| P12 | -5,07 | +2,73 | +1,87 | +3,51 | -3,39 | -0,54 | -0,37 | -0,69 | 0,67 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 0,15 | 4,29 | 0,35 | 1,65 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 1,27 | 13,36 | 1,36 | 2,19 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 832% | 312% | 392% | 133% |

Através das razões, entre os procedimentos teóricos e o procedimento experimental (Tabela 10.4), observa-se que apenas o procedimento de Modelagem por Elementos Finitos (MEF) apresentou resultados que representam o mesmo comportamento, em todos os pontos, obtido nos ensaios experimentais, conforme ocorrido na primeira etapa de carregamentos (Ambiente 1).

Na figura 10.3 ilustram-se os resultados percentuais das reações de apoio para a segunda etapa de carregamentos (Ambiente 2).

Figura 10.3 – Resultados da 2ª etapa de carregamentos: Ambiente 2.



No ponto P1, o procedimento de Paredes Isoladas e o procedimento de Novos Grupos de Paredes apresentaram comportamentos contrários ao resultado experimental. O procedimento MEF (-2,06%) foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais (-0,25%). Na aplicação do procedimento de Grupos de Paredes pode-se observar um elevado valor percentual (-11,66%), se comparado com os demais procedimentos.

No ponto P2 também não houve a constatação de semelhança de comportamentos para todos os procedimentos. Apesar das “pequenas” diferenças percentuais, apenas o procedimento MEF apresentou o mesmo comportamento obtidos nos ensaios experimentais.

Para o ponto P3, todos os procedimentos apresentaram comportamentos semelhantes (alívio), sendo que o procedimento MEF (2,86%), também foi o que mais se aproximou do resultado experimental. Os demais procedimentos apresentaram valores próximos.

No ponto P4, o procedimento dos Grupos de Paredes (-1,26%) e MEF (-1,07%) apresentaram o mesmo comportamento do resultado experimental.

Nos pontos P5 e P6, apenas o procedimento MEF apresentou comportamento semelhante ao obtido nos ensaios experimentais.

No ponto P7, que faz parte do entorno da área carregada, o resultado experimental (-22,23%) foi próximo ao procedimento dos Grupos de Paredes (-22,35%) e ao MEF (-21,53%). O comportamento apresentado neste ponto de apoio foi semelhante ao da primeira etapa de carregamentos.

O resultado experimental (-10,46%), no ponto P8, foi superior apenas ao procedimento dos Novos Grupos de Paredes (-3,57%). O procedimento que mais se aproximou do valor experimental foi obtido com a aplicação do procedimento de Grupos de Paredes (-13,70%), seguido do MEF (-16,76%).

Para o ponto interno P9, o resultado do procedimento de Novos Grupos de Paredes (-20,31%) foi superior aos demais. O resultado que mais se aproximou do experimental (-5,91%) foi obtido pelo procedimento de Paredes Isoladas (-6,38%), seguido do MEF (-9,34%).

No ponto P10 o resultado do procedimento de Novos Grupos de Paredes (-29,75%) foi superior aos demais. O procedimento de Paredes Isoladas (-17,33%), e o procedimento MEF (-17,04%) foram próximos ao experimental (-19,55%).

O comportamento do ponto P11 foi semelhante ao do ponto P9 (compressão). Os procedimentos de Paredes Isoladas, MEF, e Grupos de Paredes, apresentaram valores próximos, porém, superiores ao experimental.

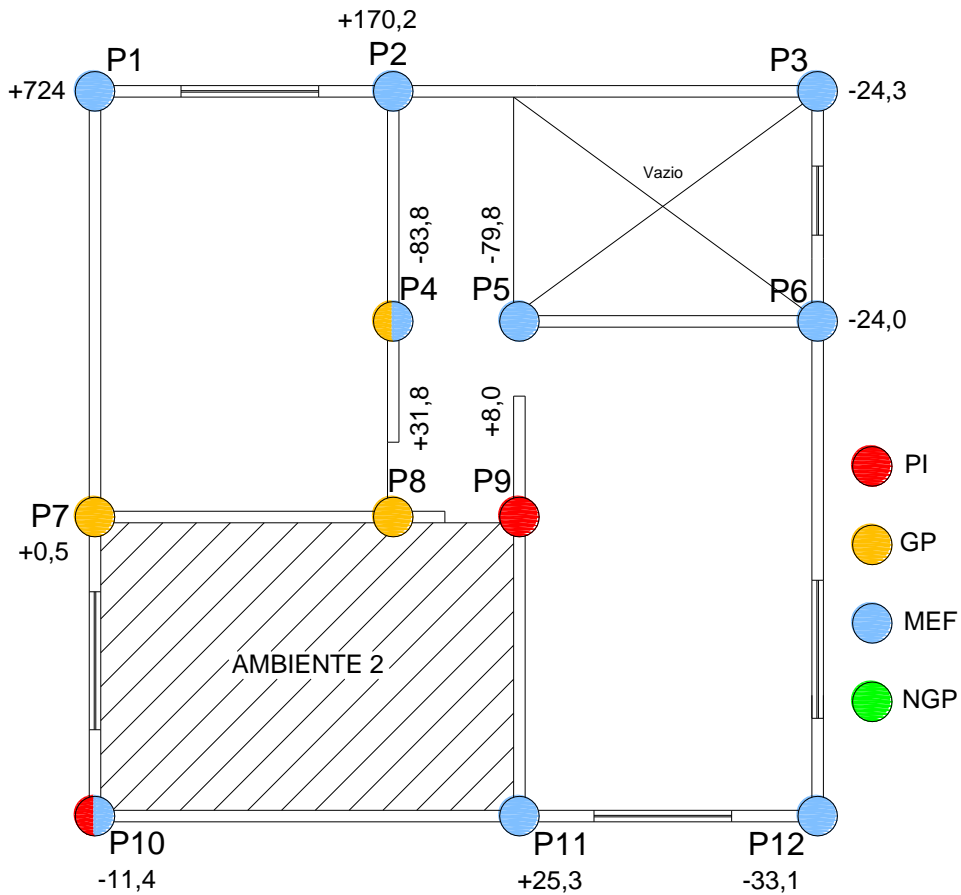
Para o ponto P12, apenas o procedimento MEF (-3,39%) apresentou comportamento semelhante ao obtido nos ensaios experimentais (-5,07%).

Conforme ocorrido na primeira etapa de carregamentos, o procedimento MEF foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais. O coeficiente de variação obtido com razão entre os resultados do MEF e os resultados experimentais, foi o menor dentre todos (133%), podendo-se concluir que o procedimento mais indicado para a análise da distribuição das ações verticais, nesta etapa de ensaios foi o MEF.

Na figura 10.4 ilustram-se, para cada ponto de apoio, os procedimentos teóricos que mais se aproximaram dos resultados experimentais. Para cada ponto foi representada a diferença percentual com o resultado experimental.

Ressalta-se, novamente, que na representação da figura 10.4, os percentuais não indicam acréscimo e/ou alívio de reações, mas sim a diferença entre o procedimento teórico e o experimental.

Figura 10. 4 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Ambiente 2.



Através da representação pontual das diferenças percentuais pôde-se obter que no ponto P1 o procedimento de MEF apresentou valores mais próximos, porém nos resultados experimentais ficou evidente a diferença nos valores obtidos.

Na tabela 10.5 apresentam-se as razões obtidas entre os procedimentos teóricos (PI, GP, e NGP) e a Modelagem por Elementos Finitos. Comparando-se as razões, pode-se concluir que o procedimento de Grupos de Paredes é o que mais se aproxima do MEF para esta etapa de ensaios, apesar de alguns apoios apresentarem comportamento contrário.

Como forma de analisar os apoios de entorno à área carregada (P1, P2, P4, P7, e P8), apresenta-se na tabela 10.6 os percentuais obtidos para o respectivo procedimento adotado.

Tabela 10. 5 – Resultados e razões teóricas para a 2ª etapa de ensaios: Ambiente 2.

| Apoios | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | +0,53 | -11,66 | +0,32 | -2,06 | -0,26 | 5,66 | -0,16 |
| P2 | -0,48 | -0,28 | -0,20 | +1,27 | -0,38 | -0,22 | -0,16 |
| P3 | +0,07 | +0,18 | +0,07 | +2,86 | 0,02 | 0,06 | 0,02 |
| P4 | +0,05 | -1,26 | +0,37 | -1,07 | -0,05 | 1,18 | -0,35 |
| P5 | +2,66 | +0,39 | +0,60 | -1,02 | -2,62 | -0,38 | -0,59 |
| P6 | -0,35 | -0,30 | -0,39 | +0,38 | -0,93 | -0,80 | -1,04 |
| P7 | -16,02 | -22,35 | -0,93 | -21,58 | 0,74 | 1,04 | 0,04 |
| P8 | -27,55 | -13,79 | -3,57 | -16,76 | 1,64 | 0,82 | 0,21 |
| P9 | -6,38 | -11,75 | -20,31 | -9,34 | 0,68 | 1,26 | 2,17 |
| P10 | -17,33 | -11,51 | -29,75 | -17,04 | 1,02 | 0,68 | 1,75 |
| P11 | -25,86 | -24,67 | -39,96 | -23,23 | 1,11 | 1,06 | 1,72 |
| P12 | +2,73 | +1,87 | +3,51 | -3,39 | -0,81 | -0,55 | -1,04 |
| PI: Paredes Isoladas | | | | Média: | 0,02 | 0,82 | 0,22 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | D.P.: | 1,15 | 1,69 | 1,08 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | C.V: | 7240% | 207% | 499% |

Tabela 10. 6 – Percentual do entorno à área carregada: Ambiente 2.

| Procedimento | Entorno (%) | Demais (%) |
|-----------------------|-------------|------------|
| Experimental | 76,69 | 23,31 |
| Paredes Isoladas | 93,69 | 6,31 |
| Grupos de Paredes | 84,05 | 15,95 |
| Novo Grupo de Paredes | 94,52 | 5,48 |
| MEF | 87,95 | 12,05 |
| Média: | 87,38 | 12,62 |

Observa-se que, nos ensaios experimentais, foi obtido o menor percentual de reação para os pontos que delimitam o ambiente carregado (76,69%); caracterizando desta forma a transferência de ações verticais, seja pelas paredes ou pelo sistema de grelha da base de sustentação. Na análise dos pontos de entorno, o procedimento de Grupos de Paredes (84,05%) foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais, conforme ocorrido na primeira etapa de ensaios (+9,6%).

10.3 RESULTADOS DA 3ª ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO DO AMBIENTE 3

Na tabela 10.7 apresentam-se os resultados percentuais das reações de apoio obtidos na terceira etapa de ensaios, conforme procedimentos apresentados anteriormente. Também são apresentadas as razões entre os procedimentos teóricos e o procedimento experimental.

Tabela 10.7 – Resultados e razões para a 3ª etapa de ensaios: Ambiente 3.

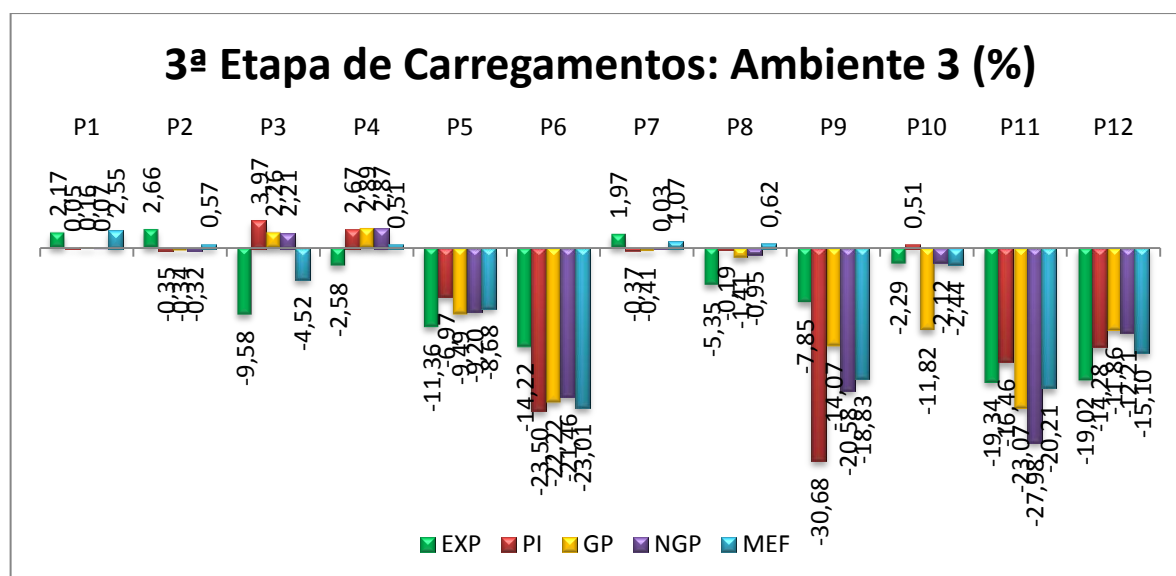
| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | +2,17 | +0,05 | +0,16 | +0,07 | +2,55 | 0,02 | 0,07 | 0,03 | 1,18 |
| P2 | +2,66 | -0,35 | -0,34 | -0,32 | +0,57 | -0,13 | -0,13 | -0,12 | 0,22 |
| P3 | -9,58 | +3,97 | +2,26 | +2,21 | -4,52 | -0,41 | -0,24 | -0,23 | 0,47 |
| P4 | -2,58 | +2,67 | +2,89 | +2,87 | +0,51 | -1,04 | -1,12 | -1,11 | -0,20 |
| P5 | -11,36 | -6,97 | -9,49 | -9,20 | -8,68 | 0,61 | 0,84 | 0,81 | 0,76 |
| P6 | -14,22 | -23,50 | -22,22 | -21,46 | -23,01 | 1,65 | 1,56 | 1,51 | 1,62 |
| P7 | +1,97 | -0,37 | -0,41 | +0,03 | +1,07 | -0,19 | -0,21 | 0,02 | 0,54 |
| P8 | -5,35 | -0,19 | -1,41 | -0,95 | +0,62 | 0,04 | 0,26 | 0,18 | -0,12 |
| P9 | -7,85 | -30,68 | -14,07 | -20,58 | -18,83 | 3,91 | 1,79 | 2,62 | 2,40 |
| P10 | -2,29 | +0,51 | -11,82 | -2,12 | -2,44 | -0,22 | 5,16 | 0,93 | 1,07 |
| P11 | -19,34 | -16,46 | -23,07 | -27,98 | -20,21 | 0,85 | 1,19 | 1,45 | 1,05 |
| P12 | -19,02 | -14,28 | -11,86 | -12,21 | -15,10 | 0,75 | 0,62 | 0,64 | 0,79 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 0,49 | 0,82 | 0,56 | 0,82 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 1,29 | 1,60 | 0,99 | 0,73 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 264% | 196% | 177% | 89% |

Através das razões, entre os procedimentos teóricos e o procedimento experimental (Tabela 10.7), observa-se que, nesta etapa de ensaios, o procedimento MEF não apresentou o mesmo comportamento dos resultados obtidos experimentalmente, contrariando o ocorrido na primeira e na segunda etapa de carregamentos. Na figura 10.5 são apresentados os resultados percentuais das reações de apoio para a terceira etapa de carregamentos (Ambiente 3).

No ponto P1, todos os procedimentos apresentaram o mesmo comportamento (alívio), sendo que o procedimento MEF (+2,55%) foi o que mais se aproximou do resultado experimental (+2,17%).

Para o ponto P2, apesar da diferença percentual, apenas o procedimento MEF apresentou o mesmo comportamento obtido no ensaio experimental (alívio).

Figura 10.5 – Resultados da 3ª etapa de carregamentos: Ambiente 3.



No ponto P3, nota-se que apenas o MEF apresentou comportamento semelhante ao obtido nos resultados experimentais. Neste ponto, os demais procedimentos apresentaram comportamento de alívio.

Para o ponto interno P4, todos os comportamentos teóricos foram contrários aos ensaios experimentais (compressão). Apesar do comportamento inverso, o procedimento MEF (+0,51%), foi o que mais se aproximou do resultado experimental (-2,58%).

No ponto P5, o resultado experimental (-11,36%) foi superior aos outros procedimentos, sendo que o procedimento de Grupos de Paredes (-9,49%) foi o que mais se aproximou do experimental. No ponto P6 foi constatado o mesmo comportamento para todos os procedimentos, porém o resultado experimental obtido foi inferior aos demais.

Para o ponto P7, apenas o procedimento MEF apresentou o mesmo comportamento do ensaio experimental. No ponto interno P8 o procedimento do MEF também apresentou comportamento contrário ao obtido nos ensaios experimentais.

O ponto P9 apresentou o mesmo comportamento do ponto P6, sendo que o procedimento de Paredes Isoladas (-30,68%) apresentou maior desvio em relação aos demais. Para o ponto P10 os procedimentos de MEF e de Novos Grupos de Paredes apresentaram resultados próximos ao experimental; apenas o procedimento de Paredes Isoladas apresentou o comportamento inverso.

No ponto P11 o comportamento foi semelhante para todos os procedimentos, sendo o procedimento MEF que mais se aproximou dos ensaios experimentais.

No ponto de canto P12, o resultado experimental (-19,02%) foi superior aos outros procedimentos. Salienta-se que as paredes sobre os apoios P11-P12, e P6-P12, próximas ao ponto P12, possuem aberturas.

Conforme ocorrido na primeira e segunda etapa de carregamentos, o procedimento MEF foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais. O coeficiente de variação obtido com a razão entre os resultados do MEF e os resultados experimentais, foi o menor dentre todos (89%), podendo-se concluir que o procedimento mais indicado para a análise da distribuição das ações verticais, nesta etapa de ensaios foi o MEF.

Na tabela 10.8 apresentam-se as razões obtidas entre os procedimentos teóricos (PI, GP, e NGP) e a Modelagem por Elementos Finitos.

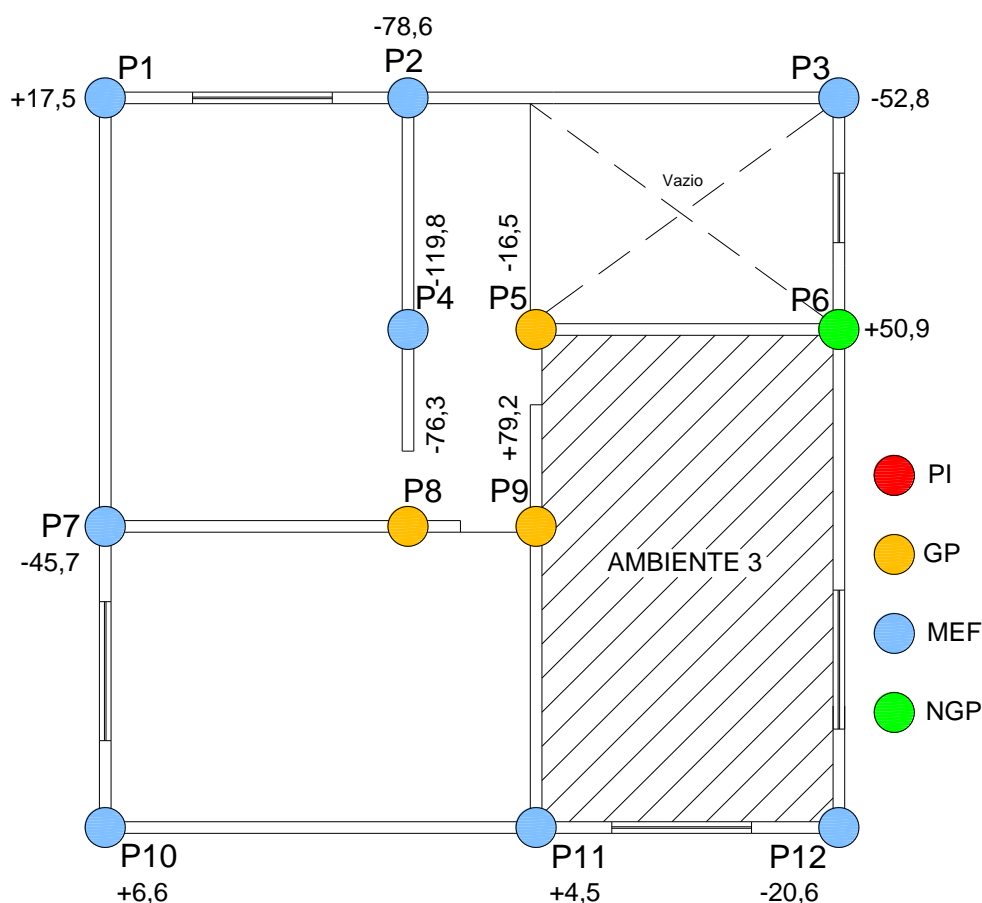
Tabela 10. 8 – Resultados e razões teóricas para a 3ª etapa de ensaios: Ambiente 3.

| Apoios | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P1 | +0,05 | +0,16 | +0,07 | +2,55 | 0,02 | 0,06 | 0,03 |
| P2 | -0,35 | -0,34 | -0,32 | +0,57 | -0,61 | -0,59 | -0,56 |
| P3 | +3,97 | +2,26 | +2,21 | -4,52 | -0,88 | -0,50 | -0,49 |
| P4 | +2,67 | +2,89 | +2,87 | +0,51 | 5,27 | 5,70 | 5,66 |
| P5 | -6,97 | -9,49 | -9,20 | -8,68 | 0,80 | 1,09 | 1,06 |
| P6 | -23,50 | -22,22 | -21,46 | -23,01 | 1,02 | 0,97 | 0,93 |
| P7 | -0,37 | -0,41 | +0,03 | +1,07 | -0,34 | -0,38 | 0,03 |
| P8 | -0,19 | -1,41 | -0,95 | +0,62 | -0,31 | -2,29 | -1,54 |
| P9 | -30,68 | -14,07 | -20,58 | -18,83 | 1,63 | 0,75 | 1,09 |
| P10 | +0,51 | -11,82 | -2,12 | -2,44 | -0,21 | 4,84 | 0,87 |
| P11 | -16,46 | -23,07 | -27,98 | -20,21 | 0,81 | 1,14 | 1,38 |
| P12 | -14,28 | -11,86 | -12,21 | -15,10 | 0,95 | 0,79 | 0,81 |
| PI: Paredes Isoladas | | | | Média: | 0,68 | 0,96 | 0,77 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | D.P.: | 1,64 | 2,24 | 1,77 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | C.V.: | 241% | 233% | 229% |

Comparando-se as razões, pode-se concluir que o procedimento de Grupos de Paredes é o que mais se aproxima do MEF nesta etapa de ensaios, apesar de alguns apoios apresentarem comportamento contrário.

Na figura 10.6 ilustram-se, para cada ponto de apoio, os procedimentos teóricos que mais se aproximaram dos resultados experimentais. Para cada ponto foi representada a diferença percentual com o resultado experimental.

Figura 10.6 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Ambiente 3.



Como forma de analisar os apoios de entorno da área carregada (P5, P6, P9, P11, e P12) apresentam-se na tabela 10.9 os percentuais obtidos de acordo com o respectivo procedimento adotado.

Pode-se obter que, nos ensaios experimentais, o percentual dos pontos que delimitam o ambiente carregado foi o menor (71,79%), caracterizando desta forma a transferência de ações verticais, seja pelas paredes ou pelo sistema de grelha da base de sustentação.

Na análise dos pontos de entorno, o procedimento de Grupos de Paredes (80,71%) foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais, conforme ocorrido na primeira e na segunda etapa de ensaios (+12,43%).

Tabela 10. 9 – Percentual do entorno à área carregada: Ambiente 3.

| Procedimento | Entorno (%) | Demais (%) |
|-----------------------|-------------|------------|
| Experimental | 71,79 | 28,21 |
| Paredes Isoladas | 91,89 | 8,11 |
| Grupos de Paredes | 80,71 | 19,29 |
| Novo Grupo de Paredes | 91,43 | 8,57 |
| MEF | 85,84 | 14,16 |
| Média: | 84,33 | 15,67 |

10.4 ANÁLISE DA 1ª, 2ª, E 3ª ETAPA DE ENSAIOS

Para as três primeiras etapas de ensaios pode-se constatar que o procedimento MEF e o procedimento de Grupos de Paredes, respectivamente, foram os que apresentaram resultados mais próximos dos obtidos nos ensaios experimentais. Com relação ao percentual dos pontos do entorno da área carregada, apresenta-se na tabela 10.10 o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 10. 10 – Resumo dos percentuais de reação de apoio no entorno das áreas carregadas.

| Ambientes | Procedimentos (%) | | | | |
|------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| | EXP | GP | NGP | PI | MEF |
| Ambiente 1 | 73,22 | 82,46 | 92,02 | 92,43 | 88,99 |
| Ambiente 2 | 76,68 | 84,07 | 94,52 | 93,14 | 87,95 |
| Ambiente 3 | 71,79 | 80,71 | 91,43 | 91,89 | 85,84 |
| Média: | 73,90 | 82,41 | 92,66 | 92,49 | 87,59 |

De acordo com os resultados apresentados na tabela 10.10 pode-se concluir que os resultados experimentais apresentaram menor percentual médio de reação (73,9%), enquanto o procedimento de Paredes Isoladas (92,49%), e de Novos Grupos de Paredes (92,66%) foram os mais conservadores. Os percentuais do entorno, de acordo com o procedimento adotado, podem servir como parâmetro para o grau de eficiência da distribuição das ações verticais ao se projetar, por serem os resultados maiores, e portanto, mais importantes para o dimensionamento das paredes.

Através dos resultados da razão entre os procedimentos de Grupos de Paredes e MEF, com os resultados experimentais, foi possível identificar que, ao carregar o ambiente 1 e o ambiente 3, a média das reações de apoio das razões citadas foram próximas, respectivamente 93% e 95% para o carregamento do ambiente 1, e 82% para o carregamento do ambiente 3, sendo que a razão dos resultados do MEF com os resultados experimentais foram os que apresentaram menor desvio padrão e coeficiente de variação, seguido da razão entre o procedimento de Grupos de Paredes com o experimental.

10.5 RESULTADOS DA 4ª ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO DOS NÍVEIS

Na tabela 10.11 apresentam-se os resultados percentuais das reações de apoio obtidos na quarta etapa de ensaios, conforme procedimentos apresentados anteriormente. Também são apresentadas as razões entre os procedimentos teóricos e o procedimento experimental.

Tabela 10. 11 – Resultados e razões para a 4ª etapa de ensaios: Carregamento dos níveis.

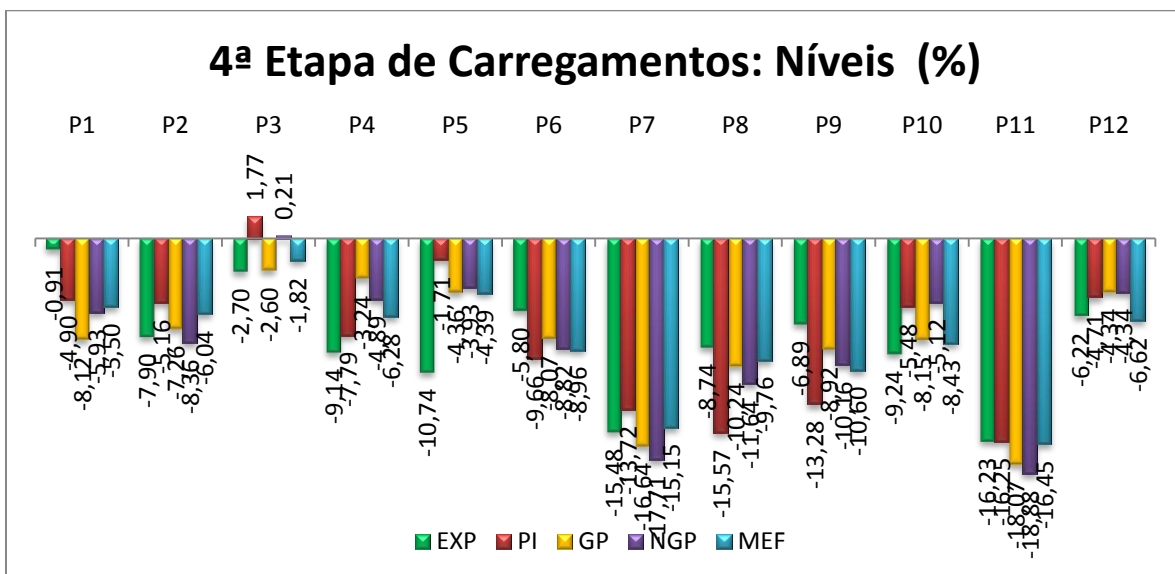
| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| P1 | -0,91 | -4,90 | -8,12 | -5,93 | -5,50 | 5,38 | 8,92 | 6,52 | 6,04 |
| P2 | -7,90 | -5,16 | -7,26 | -8,36 | -6,04 | 0,65 | 0,92 | 1,06 | 0,76 |
| P3 | -2,70 | +1,77 | -2,60 | +0,21 | -1,82 | -0,65 | 0,96 | -0,08 | 0,67 |
| P4 | -9,14 | -7,79 | -3,24 | -4,89 | -6,28 | 0,85 | 0,35 | 0,54 | 0,69 |
| P5 | -10,74 | -1,71 | -4,36 | -3,93 | -4,39 | 0,16 | 0,41 | 0,37 | 0,41 |
| P6 | -5,80 | -9,66 | -8,07 | -8,82 | -8,96 | 1,66 | 1,39 | 1,52 | 1,54 |
| P7 | -15,48 | -13,72 | -16,64 | -17,71 | -15,15 | 0,89 | 1,07 | 1,14 | 0,98 |
| P8 | -8,74 | -15,57 | -10,24 | -11,64 | -9,76 | 1,78 | 1,17 | 1,33 | 1,12 |
| P9 | -6,89 | -13,28 | -8,92 | -10,16 | -10,60 | 1,93 | 1,29 | 1,47 | 1,54 |
| P10 | -9,24 | -5,48 | -8,15 | -5,12 | -8,43 | 0,59 | 0,88 | 0,55 | 0,91 |
| P11 | -16,23 | -16,25 | -18,07 | -18,88 | -16,45 | 1,00 | 1,11 | 1,16 | 1,01 |
| P12 | -6,22 | -4,71 | -4,34 | -4,34 | -6,62 | 0,76 | 0,70 | 0,70 | 1,06 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 1,25 | 1,60 | 1,36 | 1,40 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 1,48 | 2,33 | 1,70 | 1,50 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 119% | 146% | 125% | 108% |

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que os pontos P7 e P11 apresentaram os maiores valores percentuais de reação em todos os procedimentos. O percentual dos ensaios experimentais (31,7%), para estes pontos, foi igual ao obtido no procedimento MEF (31,6%).

Nos pontos P1, P6, P8, e P9, os resultados experimentais foram inferiores aos obtidos nos demais procedimentos; já para os pontos P2, P4, P5, e P10, os resultados experimentais foram superiores. Os pontos P2, P7, e P11, apoios de borda, apresentaram comportamentos semelhantes. Para o procedimento de PI e NGP o apoio P3 apresentou a inversão dos esforços.

Na figura 10.7 representam-se os resultados percentuais das reações de apoio para a quarta etapa de ensaios.

Figura 10. 7 – Resultados da 4ª etapa de carregamentos: Níveis.



Na figura 10.8 ilustram-se, para cada apoio, os procedimentos que mais se aproximaram dos resultados experimentais, levando-se em consideração as razões de procedimentos teóricos apresentados na tabela 10.11.

De acordo com os dados obtidos, têm-se que o procedimento MEF foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais, com coeficiente de variação de 108% (PI/EXP: 119% – NGP/EXP: 125% - GP/EXP: 146%).

Na tabela 10.12 apresentam-se as razões entre os procedimentos teóricos (PI, GIP, e NGP) e a Modelagem por Elementos Finitos.

Figura 10. 8 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Carregamento dos níveis.

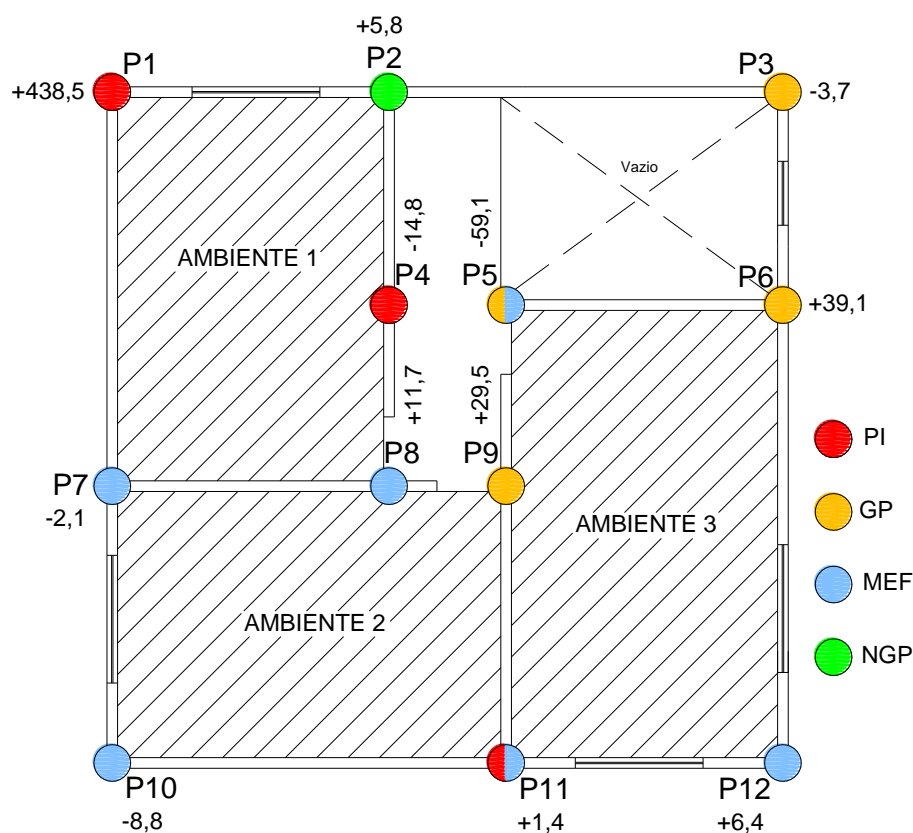


Tabela 10. 12 – Resultados e razões teóricas para a 4ª etapa de ensaios: Carregamento dos níveis.

| Apoios | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|------------------------------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|
| P1 | -4,90 | -8,12 | -5,93 | -5,50 | 0,89 | 1,48 | 1,08 |
| P2 | -5,16 | -7,26 | -8,36 | -6,04 | 0,85 | 1,20 | 1,38 |
| P3 | +1,77 | -2,60 | +0,21 | -1,82 | -0,97 | 1,43 | -0,12 |
| P4 | -7,79 | -3,24 | -4,89 | -6,28 | 1,24 | 0,52 | 0,78 |
| P5 | -1,71 | -4,36 | -3,93 | -4,39 | 0,39 | 0,99 | 0,90 |
| P6 | -9,66 | -8,07 | -8,82 | -8,96 | 1,08 | 0,90 | 0,98 |
| P7 | -13,72 | -16,64 | -17,71 | -15,15 | 0,91 | 1,10 | 1,17 |
| P8 | -15,57 | -10,24 | -11,64 | -9,76 | 1,59 | 1,05 | 1,19 |
| P9 | -13,28 | -8,92 | -10,16 | -10,60 | 1,25 | 0,84 | 0,96 |
| P10 | -5,48 | -8,15 | -5,12 | -8,43 | 0,65 | 0,97 | 0,61 |
| P11 | -16,25 | -18,07 | -18,88 | -16,45 | 0,99 | 1,10 | 1,15 |
| P12 | -4,71 | -4,34 | -4,34 | -6,62 | 0,71 | 0,66 | 0,66 |
| PI: Paredes Isoladas | | | | Média: | 0,80 | 1,02 | 0,89 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | D.P.: | 0,64 | 0,28 | 0,39 |
| NGP: Novos Grupos de Paredes | | | | C.V: | 80% | 27% | 44% |

Comparando-se as razões teóricas e o comportamento, pode-se concluir que o procedimento dos Grupos de Paredes é o que mais se aproxima do procedimento da Modelagem por Elementos Finitos, com coeficiente de variação igual a 27%.

Com a análise percentual dos pontos de apoio que delimitam os ambientes carregados, conclui-se que o procedimento da Modelagem por Elementos Finitos e o dos Grupos de Paredes, são os que mais se aproximam dos resultados experimentais (Tabela 10.13).

Apenas no Ambiente 3 o procedimento de Grupos de Paredes (43,76%) foi inferior aos ensaios experimentais (45,89%). Em média, os ensaios experimentais indicam que as reações de entorno foram de 48,21% para o carregamento dos níveis, já para o procedimento da Modelagem por Elementos Finitos o percentual obtido foi de 50,05% (Tabela 10.13).

Tabela 10. 13 – Percentual do entorno à área carregada: Níveis.

| Procedimento | Ambientes (%) | | | Média (%) |
|---------------------------------|---------------|------------|------------|-----------|
| | Ambiente 1 | Ambiente 2 | Ambiente 3 | |
| Experimental | 42,17 | 56,58 | 45,89 | 48,21 |
| Paredes Isoladas | 47,14 | 64,30 | 45,61 | 52,35 |
| Grupos de Paredes | 45,50 | 62,02 | 43,76 | 50,43 |
| Novo Grupo de Paredes | 48,53 | 63,51 | 46,13 | 52,72 |
| Modelagem por Elementos Finitos | 42,73 | 60,39 | 47,02 | 50,05 |

10.6 RESULTADOS DA 5ª ETAPA DE ENSAIOS: CARREGAMENTO DA COBERTURA

Na tabela 10.14 apresentam-se os resultados percentuais das reações de apoio obtidos na quinta etapa de ensaios, conforme procedimentos apresentados anteriormente. Também são apresentadas as razões entre os procedimentos teóricos e o procedimento experimental.

Tabela 10. 14 – Resultados e razões para a 5ª etapa de ensaios: Carregamento da cobertura.

| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| P1 | -3,88 | -3,53 | -6,12 | -4,18 | -6,12 | 0,91 | 1,58 | 1,08 | 1,58 |
| P2 | -11,18 | -8,86 | -10,69 | -11,85 | -9,80 | 0,79 | 0,96 | 1,06 | 0,88 |
| P3 | -6,89 | -1,80 | -3,74 | -2,41 | -5,38 | 0,26 | 0,54 | 0,35 | 0,78 |
| P4 | -9,78 | -7,51 | -3,81 | -5,49 | -6,75 | 0,77 | 0,39 | 0,56 | 0,69 |
| P5 | -12,75 | -10,97 | -8,06 | -6,75 | -5,88 | 0,86 | 0,63 | 0,53 | 0,46 |
| P6 | -7,87 | -13,34 | -14,00 | -13,80 | -12,43 | 1,70 | 1,78 | 1,75 | 1,58 |
| P7 | -8,36 | -11,04 | -13,34 | -14,15 | -12,14 | 1,32 | 1,60 | 1,69 | 1,45 |
| P8 | -7,73 | -13,02 | -8,21 | -9,35 | -7,96 | 1,69 | 1,06 | 1,21 | 1,03 |
| P9 | -7,80 | -11,61 | -7,38 | -8,70 | -8,78 | 1,49 | 0,95 | 1,12 | 1,13 |
| P10 | -7,45 | -3,37 | -6,36 | -3,97 | -6,29 | 0,45 | 0,85 | 0,53 | 0,84 |
| P11 | -7,88 | -11,13 | -14,12 | -15,43 | -12,94 | 1,41 | 1,79 | 1,96 | 1,64 |
| P12 | -8,45 | -3,80 | -4,19 | -3,90 | -5,52 | 0,45 | 0,50 | 0,46 | 0,65 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 1,01 | 1,05 | 1,03 | 1,06 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 0,50 | 0,51 | 0,55 | 0,41 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 49% | 49% | 54% | 39% |

Na figura 10.9 apresentam-se os resultados percentuais das reações de apoio para a quinta etapa de carregamentos. Na figura 10.10 ilustram-se, para cada apoio, os procedimentos que mais se aproximaram dos resultados experimentais, levando-se em consideração as razões de procedimentos teóricos apresentados na tabela 10.14.

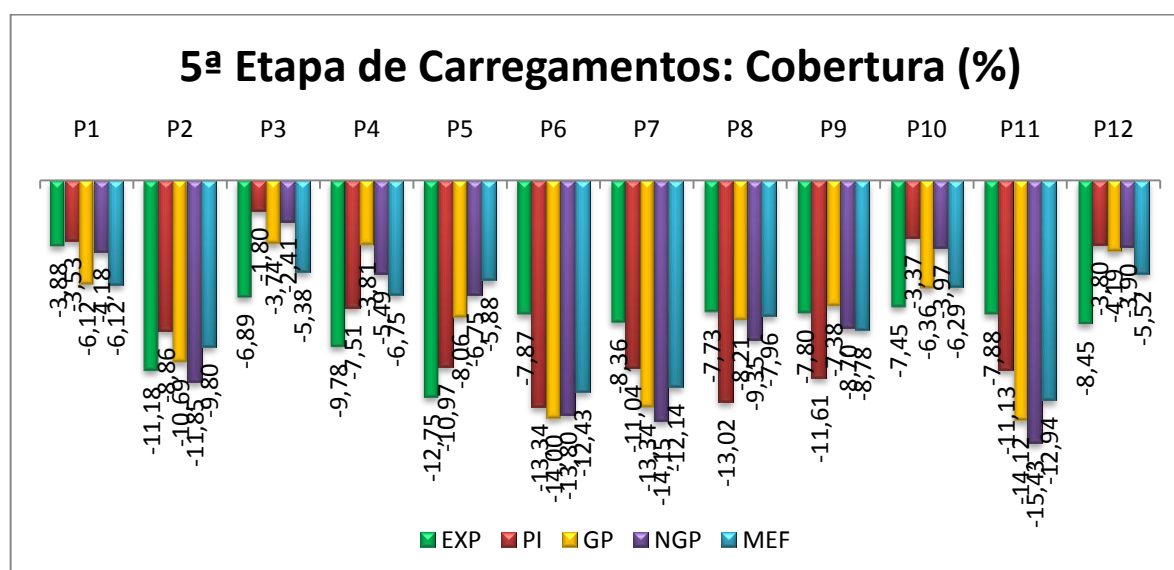
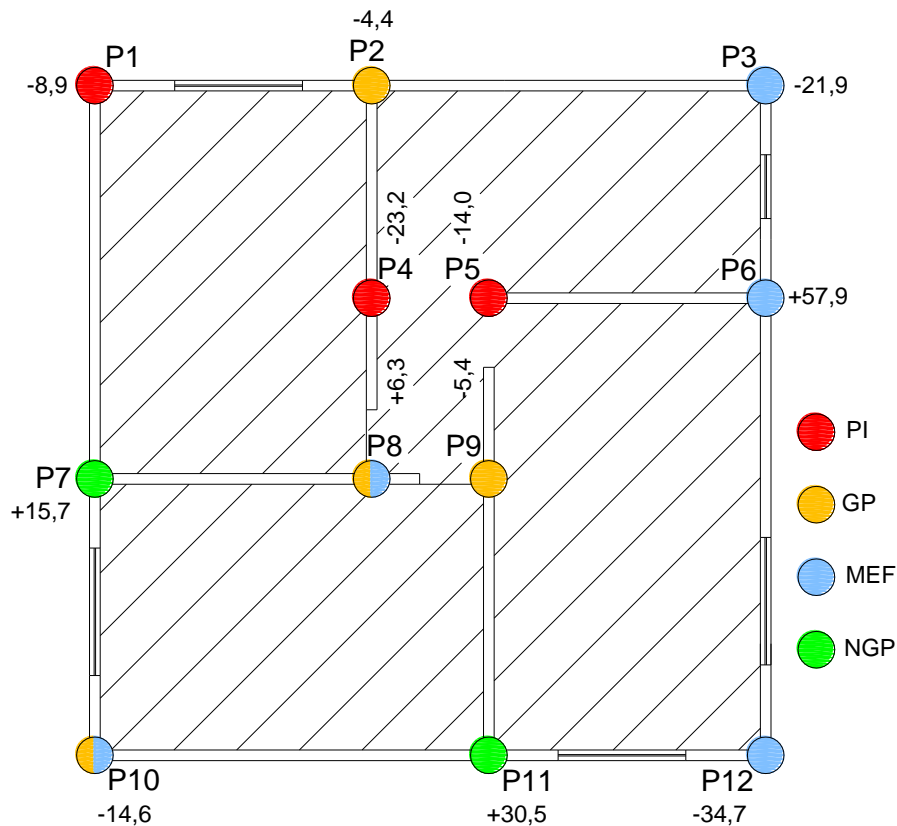
Figura 10. 9 – Resultados da 5ª etapa de carregamentos: Cobertura.

Figura 10. 10 – Representação pontual das diferenças percentuais entre o procedimento experimental e os teóricos: Carregamento da cobertura.



Quando carregada a laje de cobertura observou-se que as reações de apoio se apresentaram mais uniformes, ou seja, houve uma melhor distribuição das ações impostas. Tal fato era esperado, devido à possibilidade de espraçamento ao longo da altura da edificação e devido à distribuição uniforme do carregamento imposto sobre a projeção dos pontos de apoio.

Os resultados experimentais foram superiores aos demais procedimentos nos pontos de canto P3, P10, e P12, e nos pontos internos P4 e P5. Já para os pontos de borda P6, P7, e P11, e para o ponto interno P8, os resultados experimentais foram inferiores aos procedimentos utilizados.

De acordo com os dados obtidos têm-se que o procedimento da Modelagem por Elementos Finitos é o que mais se aproximou dos resultados experimentais, com coeficiente de variação de 39%.

Na tabela 10.15 apresentam-se as razões entre os procedimentos teóricos (PI, GP, e NGP) e a Modelagem por Elementos Finitos. Através das razões pôde-se afirmar que o procedimento de Grupos de Paredes é o que mais se aproxima dos

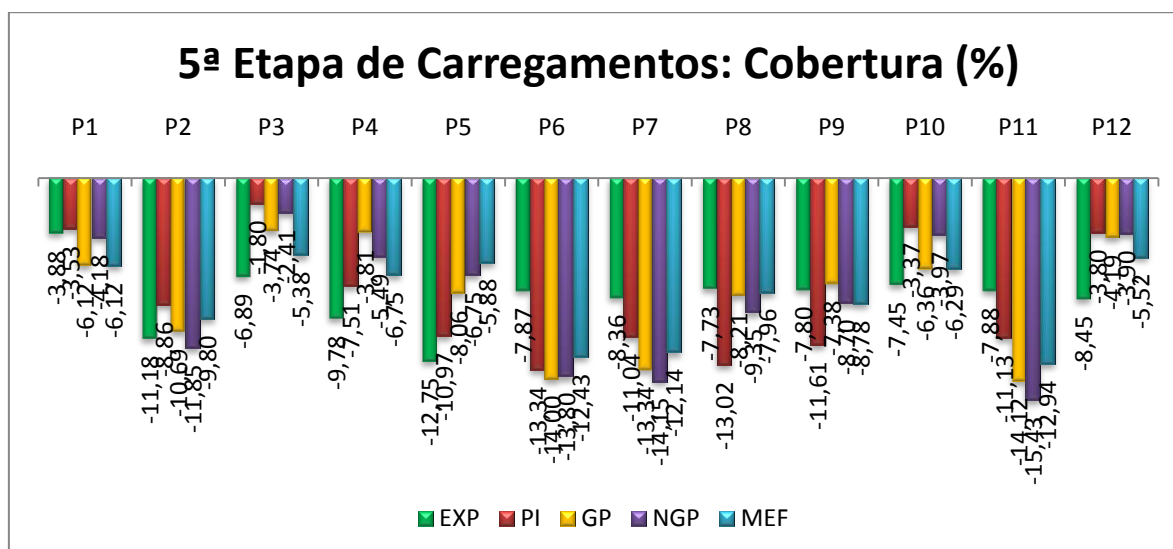
resultados obtidos com o procedimento da Modelagem por Elementos Finitos, com coeficiente de variação igual a 23%.

Tabela 10. 15 – Resultados e razões teóricas para a 5ª etapa de ensaios: Carregamento da cobertura.

| Apoios | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| P1 | -3,53 | -6,12 | -4,18 | -6,12 | 0,58 | 1,00 | 0,68 |
| P2 | -8,86 | -10,69 | -11,85 | -9,80 | 0,90 | 1,09 | 1,21 |
| P3 | -1,80 | -3,74 | -2,41 | -5,38 | 0,33 | 0,70 | 0,45 |
| P4 | -7,51 | -3,81 | -5,49 | -6,75 | 1,11 | 0,56 | 0,81 |
| P5 | -10,97 | -8,06 | -6,75 | -5,88 | 1,87 | 1,37 | 1,15 |
| P6 | -13,34 | -14,00 | -13,80 | -12,43 | 1,07 | 1,13 | 1,11 |
| P7 | -11,04 | -13,34 | -14,15 | -12,14 | 0,91 | 1,10 | 1,17 |
| P8 | -13,02 | -8,21 | -9,35 | -7,96 | 1,64 | 1,03 | 1,17 |
| P9 | -11,61 | -7,38 | -8,70 | -8,78 | 1,32 | 0,84 | 0,99 |
| P10 | -3,37 | -6,36 | -3,97 | -6,29 | 0,54 | 1,01 | 0,63 |
| P11 | -11,13 | -14,12 | -15,43 | -12,94 | 0,86 | 1,09 | 1,19 |
| P12 | -3,80 | -4,19 | -3,90 | -5,52 | 0,69 | 0,76 | 0,71 |
| PI: Paredes Isoladas | | | | Média: | 0,98 | 0,97 | 0,94 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | D.P.: | 0,45 | 0,22 | 0,27 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | C.V: | 46% | 23% | 29% |

Na figura 10.11 ilustram-se as reações de apoio para o carregamento da laje de cobertura, de acordo com os procedimentos adotados.

Figura 10. 11 – Resultados da 5ª etapa de carregamentos: Cobertura.



Conforme ilustrado na figura 10.11; os pontos de canto (P1, P3, P10, e P12) para o procedimento de Modelagem por Elementos Finitos e para o procedimento dos Grupos de Paredes, foram os que apresentaram resultados mais próximos de uma distribuição uniforme.

10.7 VALIDAÇÃO DA ANÁLISE ELÁSTICO LINEAR NA MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Na análise da Modelagem por Elementos Finitos (**MEF**) foi considerado o regime elástico linear. Com o intuito de verificar e validar o modelo adotado fez-se a análise das tensões máximas obtidas com as ações totais, ou seja, com a aplicação de todos os carregamentos uniformemente distribuídos (Níveis e Ambientes), e também a consideração do peso próprio (Alvenaria e Laje), desta forma, foi possível obter as tensões máximas na base do primeiro pavimento, conforme representado na figura 10.12.

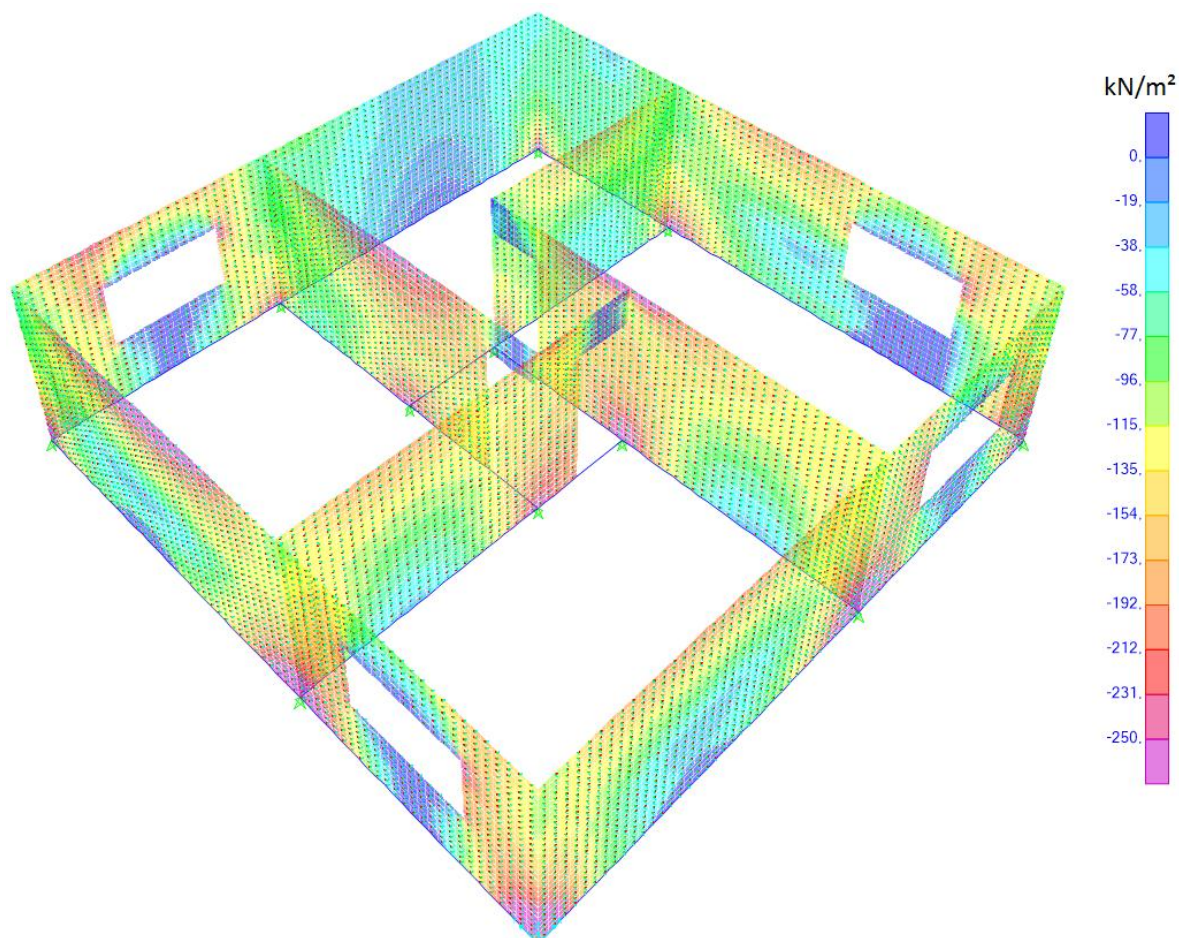
Ficou evidente, graficamente, que as maiores tensões, na base do modelo, estão localizadas junto aos apoios, e que houve o alívio de tensões nos vãos. Na tabela 10.16 apresentam-se as tensões máximas obtidas pelo procedimento MEF e as tensões obtidas na caracterização experimental da alvenaria.

Tabela 10. 16 – Tensões obtidas nos ensaios experimentais e no procedimento MEF.

| Elemento | Resistência Média à Compressão (MPa) |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Bloco | 18,10 |
| Prisma (PR3B) | 7,14 |
| Painel (PAI3B5F) | 6,38 |
| Prisma (PR2B) | 5,97 |
| Prisma Contrafiado (PRM3F) | 4,91 |
| Paredes (PAR3B12F) | 4,02 |
| MEF - Tensão Máxima | 0,25 |

De acordo com os resultados pode-se comprovar que a tensão máxima (MEF) é inferior às tensões obtidas na caracterização da alvenaria; 6,2% dos ensaios em paredes, indicando o trecho linear no diagrama tensão deformação e justificando assim o tipo de modelo utilizado.

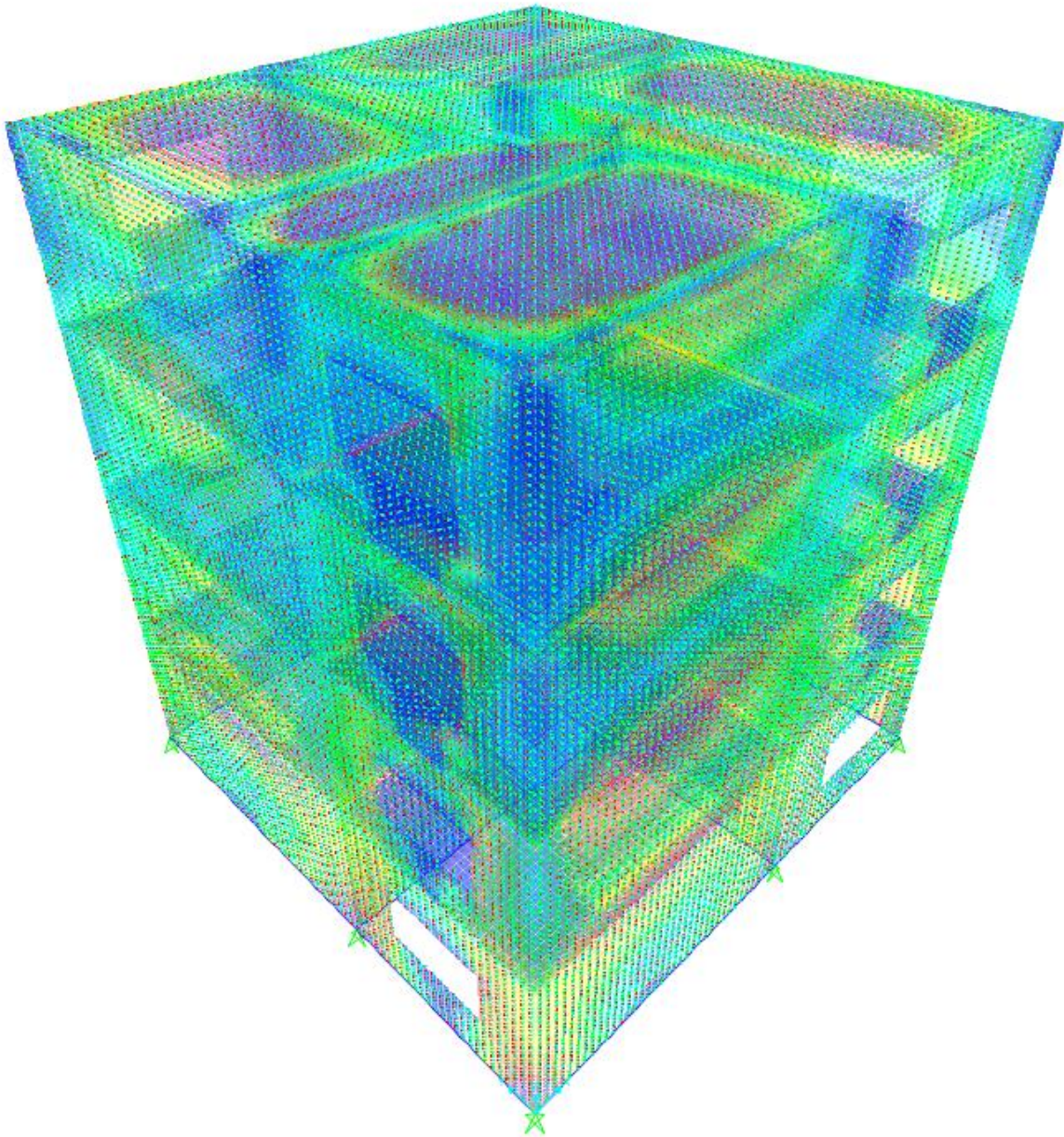
Figura 10. 12 – Representação das tensões máximas, no primeiro pavimento, com o carregamento total no modelo.



Fonte: Própria.

Na figura 10.13 ilustra-se a distribuição das tensões no modelo físico reduzido, com a aplicação do procedimento do Método dos elementos finitos, quando aplicado o carregamento total.

Figura 10. 13 – Representação das tensões obtidas no procedimento MEF com o carregamento total.



Fonte: Própria.

1 1

CONCLUSÕES

11 CONCLUSÕES

11.1 PROCEDIMENTOS ADOTADOS

- A rigidez da estrutura de sustentação do modelo físico reduzido foi propícia para a análise em questão.
- As células de cargas, fabricadas e utilizadas para a obtenção das reações de apoio, mostraram-se apropriadas para o objetivo proposto.
- De acordo com os resultados experimentais, obtidos na referida pesquisa, o uso de extensômetros elétricos na obtenção do módulo de deformação longitudinal das unidades (blocos) se mostrou inadequado.
- Devido a sensibilidade da instrumentação adotada os ensaios experimentais devem ser realizados sem interferência externa, como: Temperatura, vibrações e ações de vento.

11.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

- Nas três primeiras etapas de ensaios experimentais, carregamento dos ambientes em diferentes níveis, foi possível confirmar a existência de uma melhor distribuição das ações verticais ao longo da altura da edificação; ou seja, as reações de apoio tenderam a uma melhor distribuição quando se aumentou a distância vertical de aplicação das ações em relação à base do modelo físico reduzido.

- Foi possível confirmar, através dos resultados experimentais, que as aberturas existentes nas paredes são limitadoras da eficiência na distribuição das ações verticais.
- Os pontos de apoio sob paredes, mais distantes da área carregada, quando realizada as três primeiras etapas de ensaios, apresentaram reações de tração (alívio), fato este que está diretamente ligado às vinculações existentes, bem como a rigidez da laje em questão.

11.3 PROCEDIMENTOS TEÓRICOS

- Procedimento de **Paredes Isoladas**: Os maiores percentuais de reações foram obtidos nos apoios pertencentes ao entorno da área carregada, evidenciando um procedimento com tendência conservadora na distribuição das ações verticais e que diferem significativamente dos resultados experimentais.
- Procedimento de **Grupos de Paredes e Novos Grupos de Paredes**: Através da aplicação dos procedimentos, os resultados indicam que as ações não se delimitam somente nos pontos de apoios no entorno do ambiente carregado. Entretanto, em comparação com os resultados experimentais, estes pontos são os que mais se aproximam percentualmente. Pode-se observar que, com o acréscimo de carregamentos, em níveis superiores e na cobertura, houve uma aproximação dos resultados teóricos com os resultados experimentais. O procedimento de Novos Grupos de Paredes mostrou-se com tendência conservadora em comparação com o procedimento de Grupos de Paredes. Salienta-se que a escolha dos grupos de paredes é de extrema importância na análise do procedimento, e que a grande dificuldade em criar novos grupos de paredes está na análise da interface entre dois grupos em uma mesma parede.

- Procedimento da **Modelagem por Elementos Finitos**: Em todas as etapas de ensaios, o procedimento se mostrou mais confiável, gerando resultados mais próximos dos experimentais, tanto em comportamento, quanto numericamente (menor coeficiente de variação entre as razões com o procedimento experimental).

De modo geral, pode-se verificar que, com o incremento de ações, através do carregamento de diferentes níveis, combinada com uma melhor distribuição na área de aplicação, os resultados experimentais obtidos tendem a se aproximar dos resultados quando aplicado o procedimento da Modelagem por Elementos Finitos e o procedimento de Grupos de Paredes.

Com os resultados experimentais obtidos comprova-se a existência da interação entre paredes pertencentes a um mesmo grupo, que podem ser definidos em função das interseções existentes no arranjo estrutural e nas aberturas existentes. Também foi possível constatar, através das reações de apoio, a influência das aberturas existentes nas paredes e a influência das lajes na redistribuição dos esforços.

11.4 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Instrumentação das paredes do modelo físico reduzido para análise comparativa das tensões com o procedimento da Modelagem por Elementos Finitos.
- Análise da influência da continuidade e da rigidez das lajes na distribuição das ações verticais.
- Inserção de maiores taxas de carregamentos no modelo físico reduzido.
- Análise da distribuição das ações verticais com a utilização de *radier* como fundação.
- Análise da distribuição das ações verticais quando houver grauteamento.
- Utilizar outras discretizações na Modelagem por Elementos Finitos.
- Aplicar análise estatística na avaliação dos resultados obtidos nos ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS

ACCETTI, Kristiane Mattar. **Contribuições ao projeto estrutural de edifícios em alvenaria.** (1998). 247f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 1979. **ACI 444** - Models of concrete structures: State of the art. Detroit, Michigan. 19p.

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. **Desenvolvimento das técnicas de produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural na escala (1:4).** (2002). 110f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1998). **NBR NM 76:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

_____. (2003). **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. (2003). **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. (2007). **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

_____. (2000). **NBR 6120:** Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2000. 5p.

_____. (2009). **NBR 7211:** Agregado para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9p.

_____. (1985). **NBR 8949:** Paredes de alvenaria estrutural - Ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro, 1985. 7p.

_____. (2005). **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 11p.

_____. (2005). **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos - Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 11p.

_____. (2005). **NBR 15270-3**: Componentes cerâmicos - Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005. 27p.

_____. (2010). **NBR 15812-1**: Alvenaria Estrutural - Blocos Cerâmicos - Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010. 41p.

_____. (2010). **NBR 15812-2**: Alvenaria Estrutural - Blocos Cerâmicos - Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010. 28 p.

BARRETO, Adriano Siebra Paes; OLIVEIRA, Romilde Almeida de. **Análise de Tensões em um Painel de Alvenaria Estrutural Utilizando Técnica de Homogeneização**. (2002). 14f. Instituto Brasileiro do concreto (IBRACON). 44º Congresso Brasileiro. Belo Horizonte – MG.

BRASIL. Portal Brasil. **Número de casas vazias supera déficit habitacional do País, indica censo 2010**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/arquivos/2010/12/13/numero-de-casas-vazias-Supera-deficit-habitacional-do-pais-indica-censo-2010>>. Acesso em: 13 dez. 2010.

CALÇADA, Luciana Maltez Lengler. **Avaliação do comportamento de prismas grauteados e não grauteados de blocos de concreto**. (1998). 167f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

CALIL JUNIOR, Carlito; DIAS, Antônio Alves. (2003) **Experimentação em estruturas de madeira**. 194f. Edição eletrônica de Pós-graduação, Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LAMEN), São Carlos, 2003.

CAMACHO, Jefferson Sidney. **Alvenaria estrutural não armada: parâmetros básicos a serem considerados no dimensionamento dos elementos resistentes**. (1987). 161f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1987.

CAMACHO, Jefferson Sidney. **Contribuição ao estudo de modelos físicos reduzidos de alvenaria estrutural cerâmica**. (1995). 157f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

CAMACHO, Jefferson Sidney; MAURÍCIO, Rodrigo Menossi. **Investigação experimental da influência do capeamento na resistência de blocos de concreto para alvenaria estrutural.** (2003) – Relatório de pesquisa FAPESP. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS). 2003, 51p.

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

CAPUZZO NETO, Valentim. **Interação de paredes em Alvenaria Estrutural sob ações verticais.** (2005). 321f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005

CARNEIRO, Fernando Lobo. **Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos.** 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1996. 258p.

CORRÊA, Márcio Roberto Silva; RAMALHO, Márcio Antônio. (1990-1992). Relatórios sobre o comportamento de paredes estruturais de alvenaria: modelos em elementos finitos. Brasília. / Relatório técnico para a ENCOL S/A.

CORRÊA, Márcio Roberto Silva; RAMALHO, Márcio Antônio. **Efeitos de aberturas em painéis de alvenaria estrutural.** (1994). In: 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, Florianopolis, Brasil, p. 295-304.

CORRÊA, Márcio Roberto Silva. **Fluxo de forças em edifícios de alvenaria estrutural.** (2003). 156f. Texto apresentado para o concurso de Professor Livre Docente do departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CUNHA, E. H. **Análise experimental do comportamento de prismas grauteados em alvenaria estrutural.** (2001). 149f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Goiás, Goiânia, 2001.

CURTIN, W.G.; SHAW, Gerry; BEEK, J.K.; PARKISON, G.I. **Structural masonry detailing.** Granada Publishing, London, England, 1984.

CURTIN, W.G.; SHAW, Gerry; BEEK, J.K.; BRAY, W.A. **Structural masonry designer's Manual.** 1992. 2 ed. 400p.

FRANCO, Luis Sérgio. **Desempenho estrutural do elemento parede de alvenaria empregado na alvenaria estrutural não armada, quando submetido a esforços de compressão.** (1987). Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987, 136p.

GARCIA, Patrícia Dominguês. **Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos.** (2000). 115f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GROHMANN, Leandro Zampieri. **Análise do comportamento de prismas grauteados de alvenaria estrutural cerâmica.** (2006). 160f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Área de concentração em Construção Civil e Preservação ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

HENDRY, A.W.; SINHA, B.P.; DAVIES, S.R. **An introduction to load bearing brickwork design.** New York: Ellis Horwood, 1981. 34p.

HENDRY, A.W.; SINHA, B.P.; DAVIES, S.R. **Design of Masonry Structures.** 3 ed. London: Taylor & Francis e-library, 2004. 279p.

HOLANDA JUNIOR, Osvaldo Gomes de. **Influência de recalques em edifícios de alvenaria estrutural.** (2002). 224f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

KLEIN, D. L. **Apostila de aula da disciplina teoria de modelos.** Porto Alegre: UFRS, 1988. 22p.

LINDNER, Gerson. **Uso de modelo reduzido para pesquisa e desenvolvimento de blocos cerâmicos estruturais.** (2001). 95f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MAURÍCIO, Rodrigo Menossi. **Estudo teórico e experimental das ligações diretas contra-fiadas entre paredes de blocos de concreto em escala real e reduzida 1:4.** (2005). 209f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2005.

MAURÍCIO, Rodrigo Menossi; CAMACHO, Jefferson Sidney; ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. **Resistência à Compressão Axial de Blocos de Concreto Capeados com Diferentes Materiais.** In: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2004, Florianópolis. 46º Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis: Ivo J. Padaratz e Túlio N. Bittencourt, 2004. v. VI, p. 1271-1280.

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

NASCIMENTO NETO, Joel Araújo. **Estudo de painéis com abertura constituídos por alvenaria estrutural de blocos.** (2003). 320f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

OLIVEIRA, JR.; PINHEIRO, L. M. **Análise de paredes de alvenaria estrutural calculadas no estado limite último.** (1994). In: 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, Florianópolis, Brasil, p. 295-304.

OLIVEIRA, JR.; PINHEIRO, L. M. **Método prático para a distribuição das ações verticais em paredes de alvenaria.** In: 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, Florianópolis., Brasil, p. 315-322.

PARSEKIAN, Guilherme Aris. FRANCO, Luís Sérgio. Método para distribuição de esforços verticais entre paredes de edifícios de alvenaria estrutural. **Revista de Tecnologia e Negócios da Construção (téchne).** São Paulo, v.61, 2002, p. 48-53.

PARSEKIAN, Guilherme Aris. A nova norma brasileira de projeto e execução de alvenaria estrutural de bloco de concreto. **Revista Prisma.** São Paulo: Mandarim, V.9, n. 36, nov. 2010. Trimestral, p. 44-46.

PRUDÊNCIO JUNIOR, Luiz Roberto. **Resistência à compressão da alvenaria e correlação entre resistência de unidades, prismas e paredes.** (1986). 123f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986, 123p.

PRUDÊNCIO JUNIOR, Luiz Roberto. **Métodos estatísticos.** (1999). 82f. Apostila do Núcleo de Pesquisa em Construção - Universidade Federal de Santa Catarina.

PRUDÊNCIO JUNIOR, Luiz Roberto; OLIVEIRA, Alexandre Lima de; BEDIN, Carlos Augusto. **Alvenaria Estrutural de blocos de concreto.** 1 ed. Florianópolis: Pallotti, 2002. 208p.

RAMALHO, Márcio Antônio; CORRÊA, Márcio Roberto Silva. **Projeto de edifícios de Alvenaria Estrutural.** 1 ed. São Paulo: Pini Ltda., 2003. 174p.

ROMAN, Humberto Ramos; MUTTI, Cristine do Nascimento; ARAÚJO, Hércules Nunes de. **Construindo em Alvenaria Estrutural.** Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção - NPC, 1996. 35 p. Universidade Federal de Santa Catarina.

SANTOS, Flávio Antônio Dos. **Efeito do não-preenchimento de juntas verticais no desempenho de edifícios em alvenaria estrutural.** (2001). 154f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SIGNOR, Régis. **Ensaio de transferência de cargas verticais entre paredes ortogonais.** (2000). 17f. Disciplina de materiais de construção civil. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2000, 17p.

SILVA, Wilson José da. **Estudo experimental de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos sujeitas a ações verticais.** (2003). 144f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2003.

SILVA, Rodrigo Francisco da. **Estudo Teórico-experimental da distribuição das ações verticais entre paredes de edifício de alvenaria estrutural cerâmica em escala reduzida.** (2011). 182f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2011.

SINHA, B. P.; HENDRY, A. W. **Compressive strength of axially loaded brick walls stiffened along their vertical edges.** In: 5th International Brick Masonry Conference, Washington, 1979. p. 254-261.

SUTHERLAND, R.J.M. **Design engineer's approach to masonry construction.** In: JOHNSON, F.B. (Ed.) Designing, engineering and constructing with masonry products. Houston: Gulf, 1969. p.375-385.

THOMAZ, Ércio; HELENE, Paulo. **Qualidade no projeto e na execução de alvenaria estrutural e de alvenarias de vedação em edifícios.** (2000). Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo: EPUSP, 2000, 31p.

VILLAR, Carlos Eduardo de França. **Caracterização e comportamento da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.** (2005). 107f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

ZAIDAN, Eduardo. **Construção civil precisa crescer três vezes mais para sanar déficit habitacional.** Disponível em: <<http://economia.uol.com.br/ultimas-Noticias/infomoney/2011/03/14/construcao-civil-precisa-crescer-tres-vezes-mais-para-sanar-deficit-habitacional.htm>>. Acesso em: 31 jul. 2011.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

ARAÚJO, F. E. **Técnicas construtivas de edifícios residenciais em alvenaria estrutural não armada de blocos vazados de concreto.** (2001). 180f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 180p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2002). **NBR 6023:** Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002. 24p.

_____. (2012). **NBR 6024:** Informação e documentação – Numeração progressiva das seções de um documento – Apresentação. Rio de Janeiro, 2012. 4p.

_____. (2012). **NBR 6027:** Informação e documentação – Sumário – Apresentação. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

_____. (2003). **NBR 6028:** Informação e documentação – Resumo – Apresentação. Rio de Janeiro, 2003. 2p.

_____. (2002). **NBR 10520:** Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2002. 7p.

_____. (2011). **NBR 12118:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2011. 13p.

_____. (2004). **NBR 12225:** Informação e documentação – Lombada – Apresentação. Rio de Janeiro, 2004. 3p.

_____. (2011). **NBR 14724:** Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2011. 11p.

_____. (2011). **NBR 15961-1:** Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2011. 35p

_____. (2011). **NBR 15961-2:** Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011. 35p.

CAMACHO, J.S. **Fatores que afetam a resistência à compressão da alvenaria.** In: 6 th Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção: o uso da alvenaria como estrutura, 1987, São Paulo. 10p.

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

DRYSDALE, R.G. *et al.* **Masonry structures behavior and design**. New Jersey, Prentice-Hall & Inc., 1993.

FARIA, M.S. **Alvenaria estrutural: Implantação de processo construtivo**. (1998). Curso internacional de alvenaria estrutural (ABCP). São Paulo, 1998.

FOSTER, P.K.; BRIDGEMAN, D.O. **Prism tests for the design and control of brick masonry**. New Zeland Pottery and Ceramics Research Association, 1973. 22p.

FRANCIS, J.A *et al.* **The efect of joint thickness and others factors on the compressive strenght of brickwork**. International conference on masonry structural systems. Universidade do Texas, publicação nº 5, Austin, 1967.

FRASSON, A. J. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. (2000). 146f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. 146p.

GOMES, N.S. **A resistência das paredes de alvenaria**. (1974). 191f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1974. 191p.

HENDRY, A.W.; SINHA, B.P.; DAVIES, S.R. (1997). **An introduction to load bearing brickwork desing**. Chichester, England, Ellis Horwood Ltd.

ISBERNER, A.W. **Properties of masonry cement mortars**. In: Designing engineering and constructing with masonry products. Houston, Gulf, 1969. p. 42-50.

MENDES, Ricardo José Kuerten. **Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos**. (1998). 200f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 1998, 200p.

MULLER, M.S.K. **Estudo das correlações entre resistências à compressão de paredes e prismas de alvenaria estrutural cerâmica não armada submetidos a esforços de compressão axial**. (1989). 246f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. 246p.

PELETEIRO, S.C. **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural.** (2001). 143f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001, 143p.

ROMAN, H.R. **Determinação das características físicas e análise estatística da capacidade resistente de tijolos cerâmicos maciços.** (1983). 102f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983, 102p.

ROMAN, H.R. & MOHAMAD, G. **Alvenaria estrutural – Classificação e materiais.** (1999). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

SABBATINI, F.H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária.** (1984). 298f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984, 298p.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente.** (1986). 26f. Boletim técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil (EPUSP), São Paulo, 1986.

SABBATINI, F. H. **Requisitos e critérios mínimos a serem atendidos para solicitação de financiamento de edifícios em alvenaria estrutural junto à caixa econômica federal.** Brasília, 2002. Capturado em 05 Mar. 2003. Online. Disponível na Internet <http://www.geocities.com/alvenariaestrutural/tese.htm>.

SANCHEZ, E. **Histórico sobre pesquisas e elaboração de novas normas no Brasil sobre alvenaria estrutural.** In: 5th International seminar on structural masonry for developing countries, Proceedings. Florianópolis, 1994.

TAUIL, Carlos Alberto; NESSE, Flávio José Martins. **Alvenaria Estrutural.** 1 ed. São Paulo: Pini Ltda., 2010. 188p.

VILATÓ, R.R. **Estudo da metodologia do projeto para edifícios em alvenaria estrutural não armada.** (1998). 175f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 175p.

APÊNDICE

APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DE VALORES ESPÚRIOS

Para a verificação da existência de valores espúrios deve-se primeiramente calcular a média aritmética da amostra e o seu desvio padrão.

Média:
$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Desvio padrão:
$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Posteriormente determina-se o resíduo e compara-se com o valor máximo admitido para o nível de significância desejado em relação à quantidade de amostras (Tabela de valores extremos). Caso o valor do resíduo seja superior ao valor máximo tabelado deve-se desprezar a amostra.

Resíduo:
$$r_i = \left| \frac{V_s - \bar{x}}{S} \right|$$
 Vs: Valor suspeito r_i : Resíduo

| TABELA DE VALORES EXTREMOS | | | | | | | |
|----------------------------|---------------|------|------|----------|---------------|------|------|
| Amostras | Significância | | | Amostras | Significância | | |
| | 5,0% | 2,5% | 1,0% | | 5,0% | 2,5% | 1,0% |
| 3 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 21 | 2,58 | 2,73 | 2,91 |
| 4 | 1,46 | 1,48 | 1,49 | 22 | 2,60 | 2,76 | 2,94 |
| 5 | 1,67 | 1,71 | 1,75 | 23 | 2,62 | 2,78 | 2,96 |
| 6 | 1,82 | 1,89 | 1,94 | 24 | 2,64 | 2,80 | 2,99 |
| 7 | 1,94 | 2,02 | 2,10 | 25 | 2,66 | 2,82 | 3,01 |
| 8 | 2,03 | 2,13 | 2,22 | 30 | 2,75 | 2,91 | - |
| 9 | 2,11 | 2,21 | 2,32 | 35 | 2,82 | 2,98 | - |
| 10 | 2,18 | 2,29 | 2,41 | 40 | 2,87 | 3,04 | - |
| 11 | 2,23 | 2,36 | 2,48 | 45 | 2,92 | 3,09 | - |
| 12 | 2,29 | 2,41 | 2,55 | 50 | 2,96 | 3,13 | - |
| 13 | 2,33 | 2,46 | 2,61 | 60 | 3,03 | 3,20 | - |
| 14 | 2,37 | 2,51 | 2,66 | 70 | 3,09 | 3,26 | - |
| 15 | 2,41 | 2,55 | 2,71 | 80 | 3,14 | 3,31 | - |
| 16 | 2,44 | 2,59 | 2,75 | 90 | 3,18 | 3,35 | - |
| 17 | 2,47 | 2,62 | 2,79 | 100 | 3,21 | 3,38 | - |
| 18 | 2,50 | 2,65 | 2,82 | | | | |
| 19 | 2,53 | 2,68 | 2,85 | | | | |
| 20 | 2,56 | 2,71 | 2,88 | | | | |

APÊNDICE B – CADERNO DE FIADAS

Figura 12. 1 – Modulação da 1ª fiada: Modelo físico reduzido.

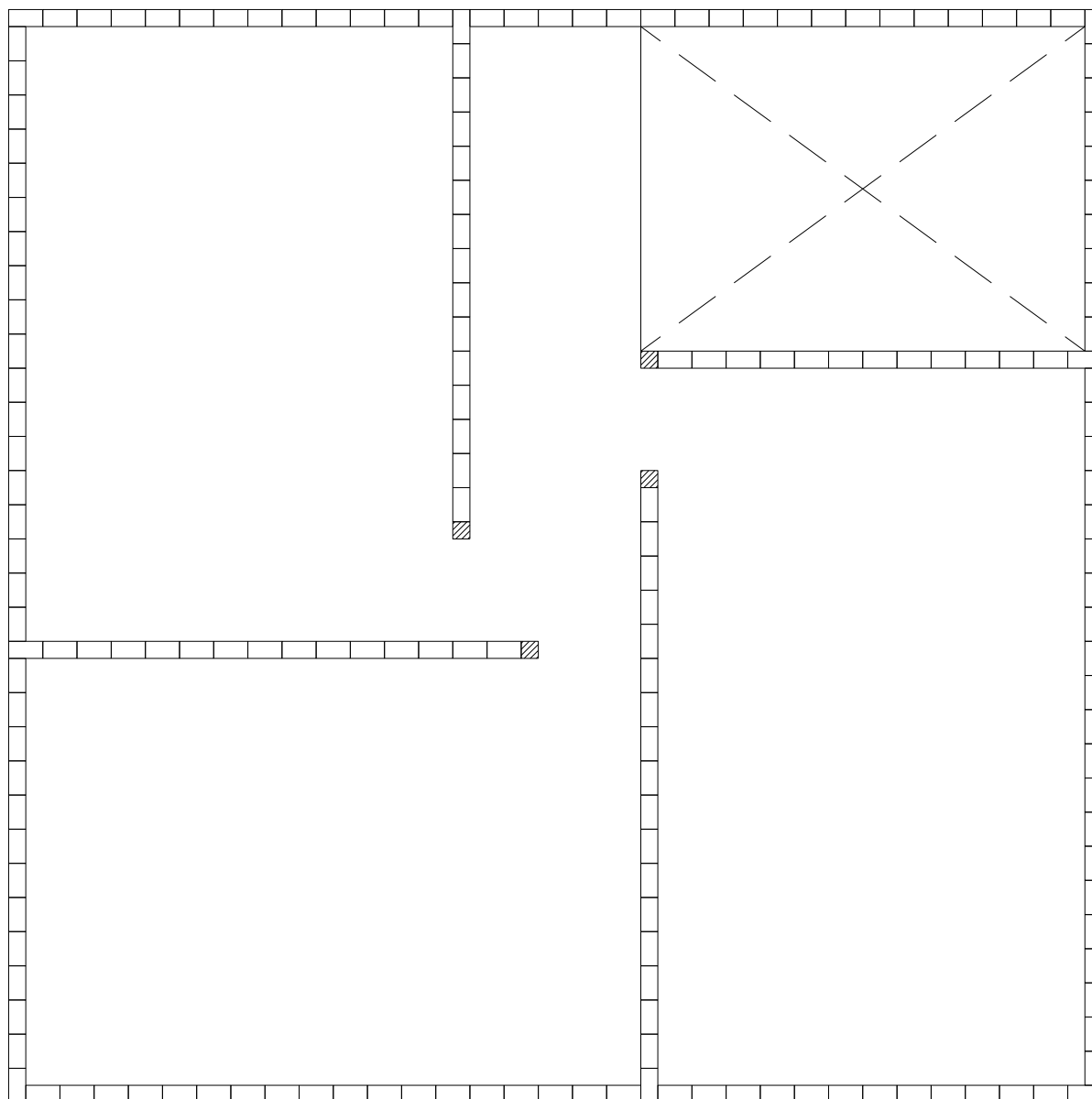


Figura 12. 2 – Legenda dos blocos utilizados na modulação do modelo físico reduzido

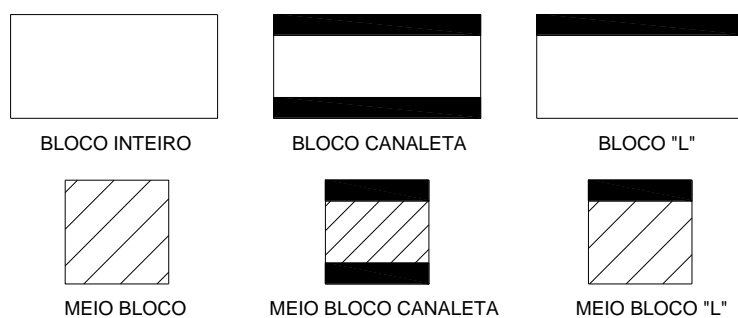


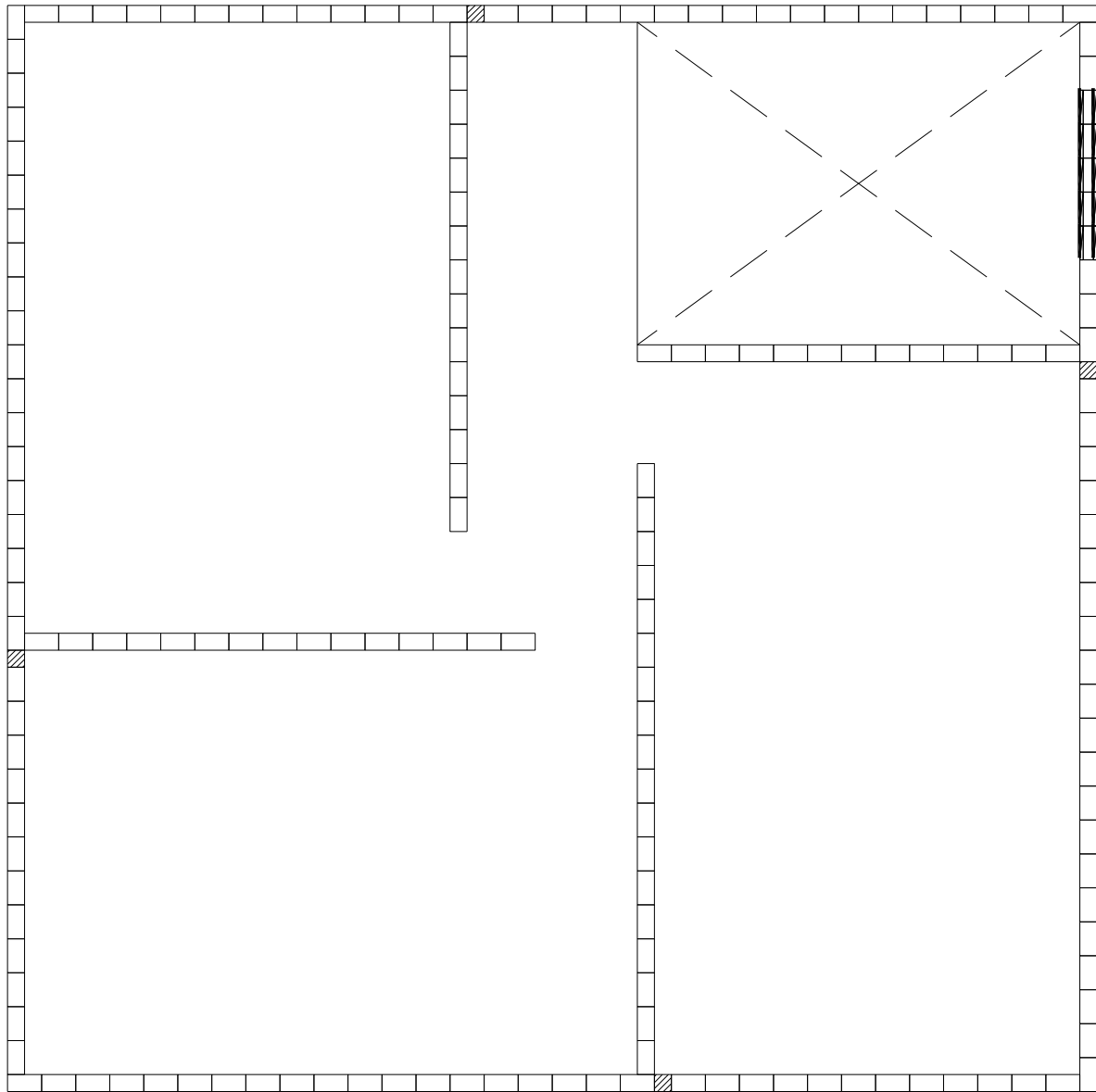
Figura 12.3 – Modulação da 2ª fiada: Modelo físico reduzido.

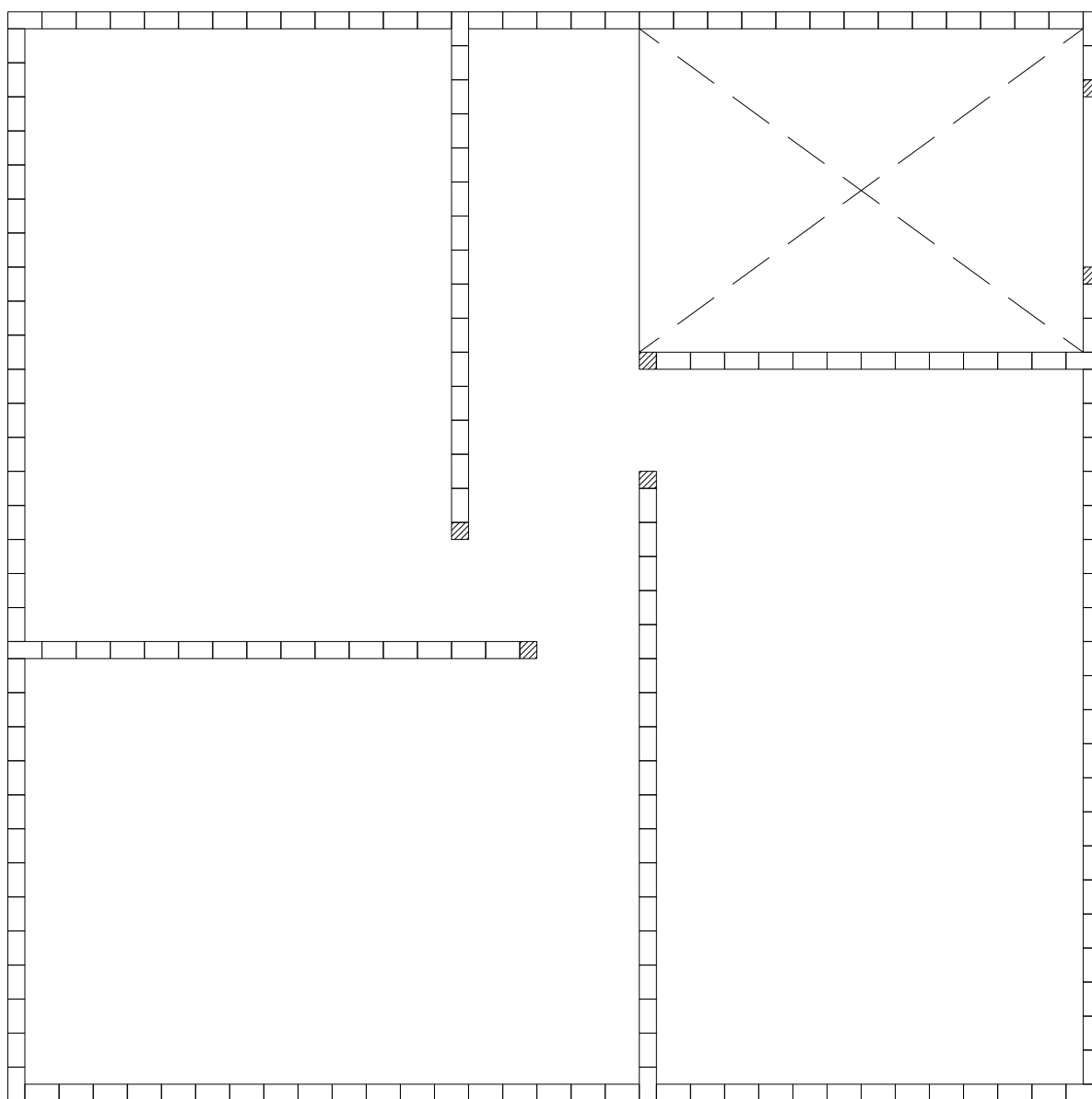
Figura 12. 4 – Modulação da 3ª fiada: Modelo físico reduzido.

Figura 12. 5 – Modulação da 4ª fiada: Modelo físico reduzido.

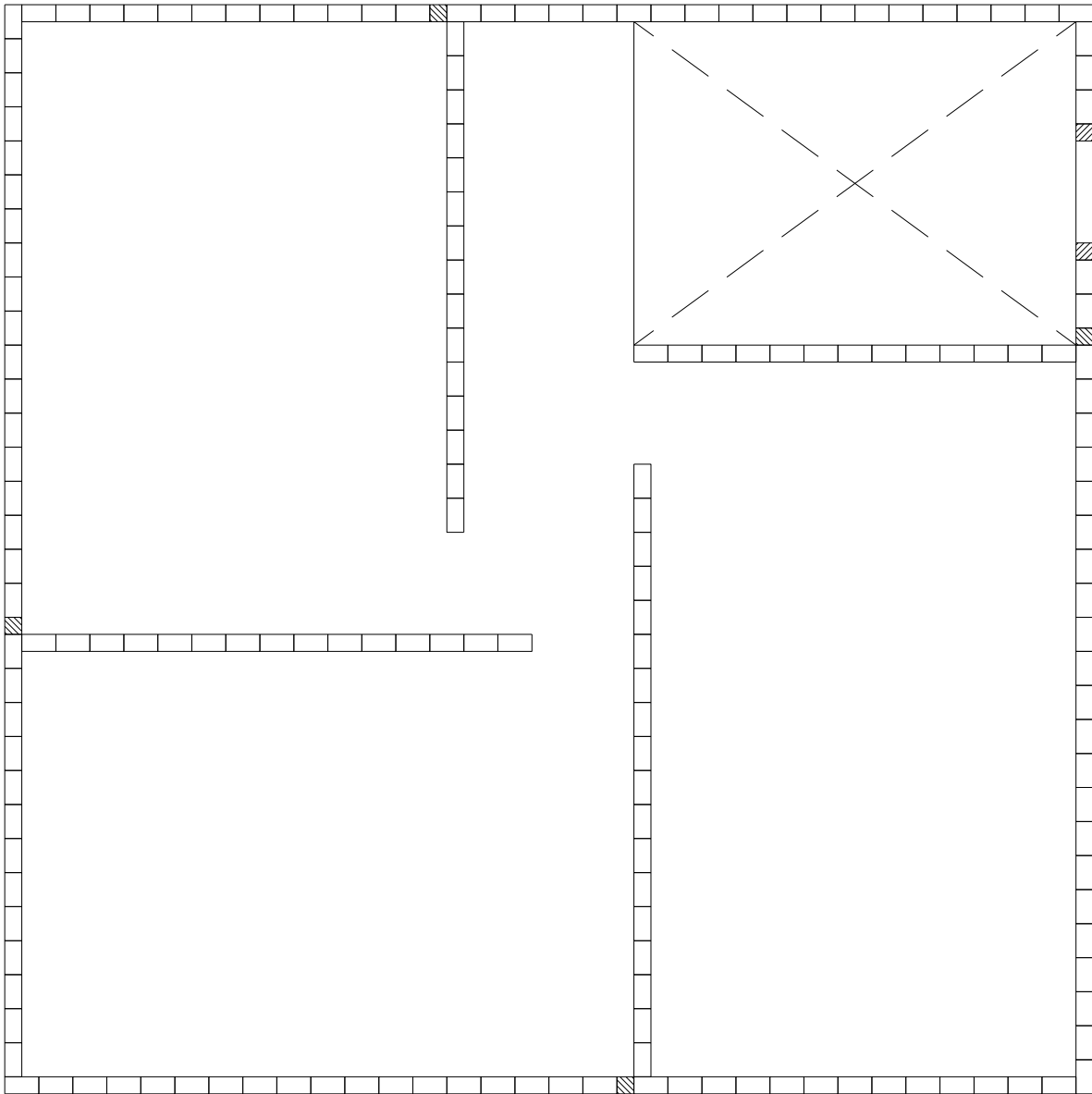


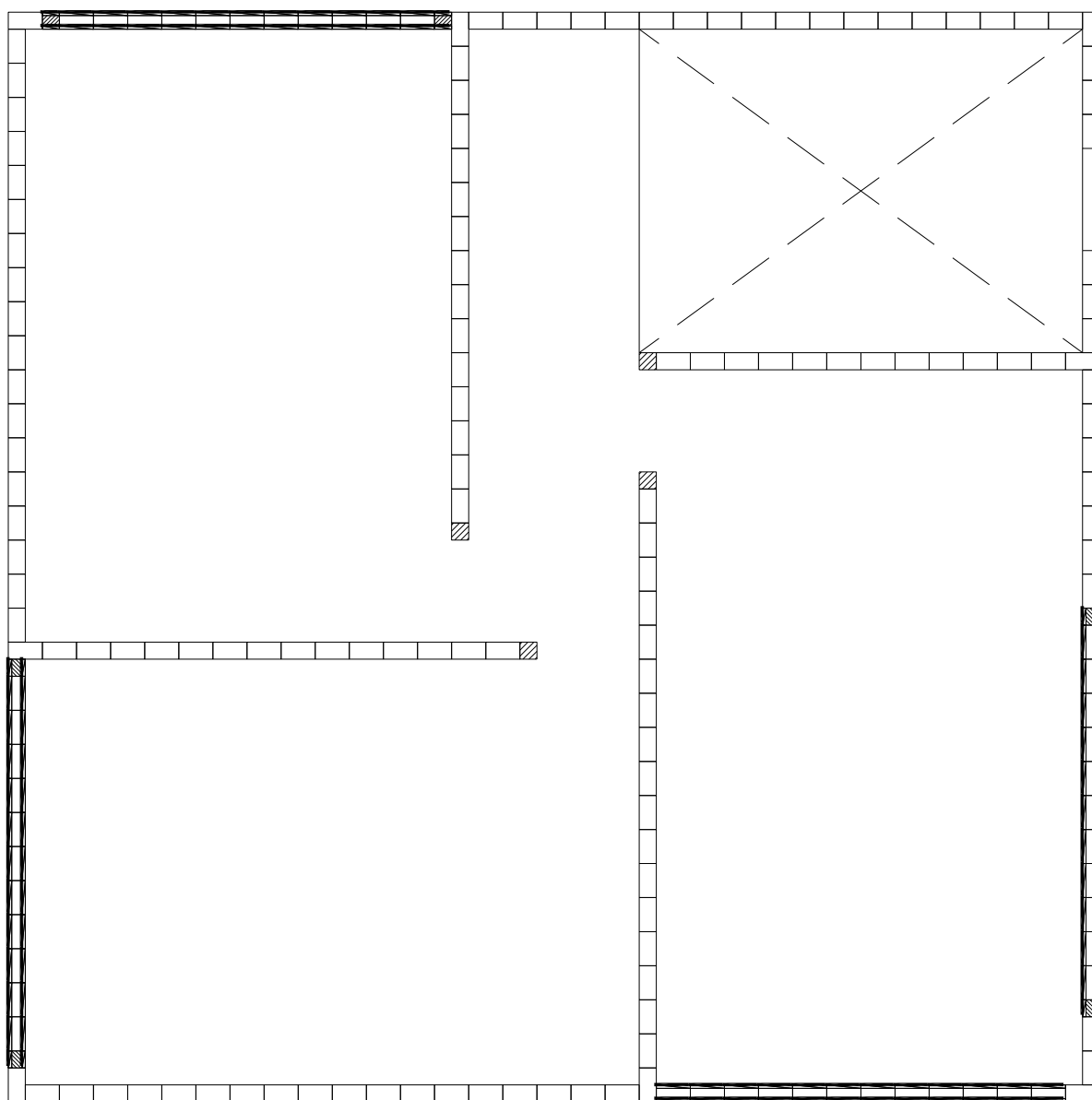
Figura 12. 6 – Modulação da 5ª fiada: Modelo físico reduzido.

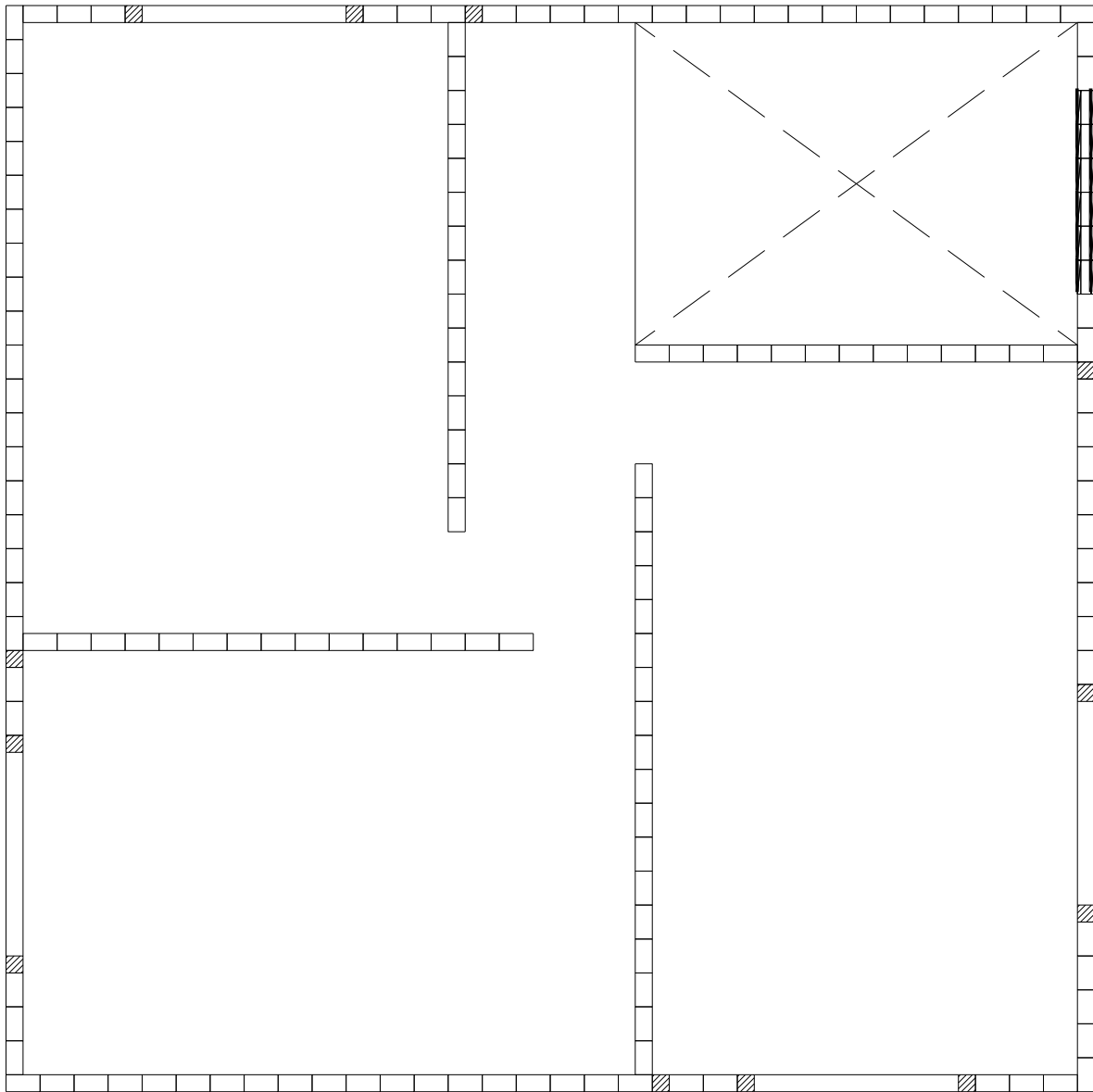
Figura 12.7 – Modulação da 6ª fiada: Modelo físico reduzido.

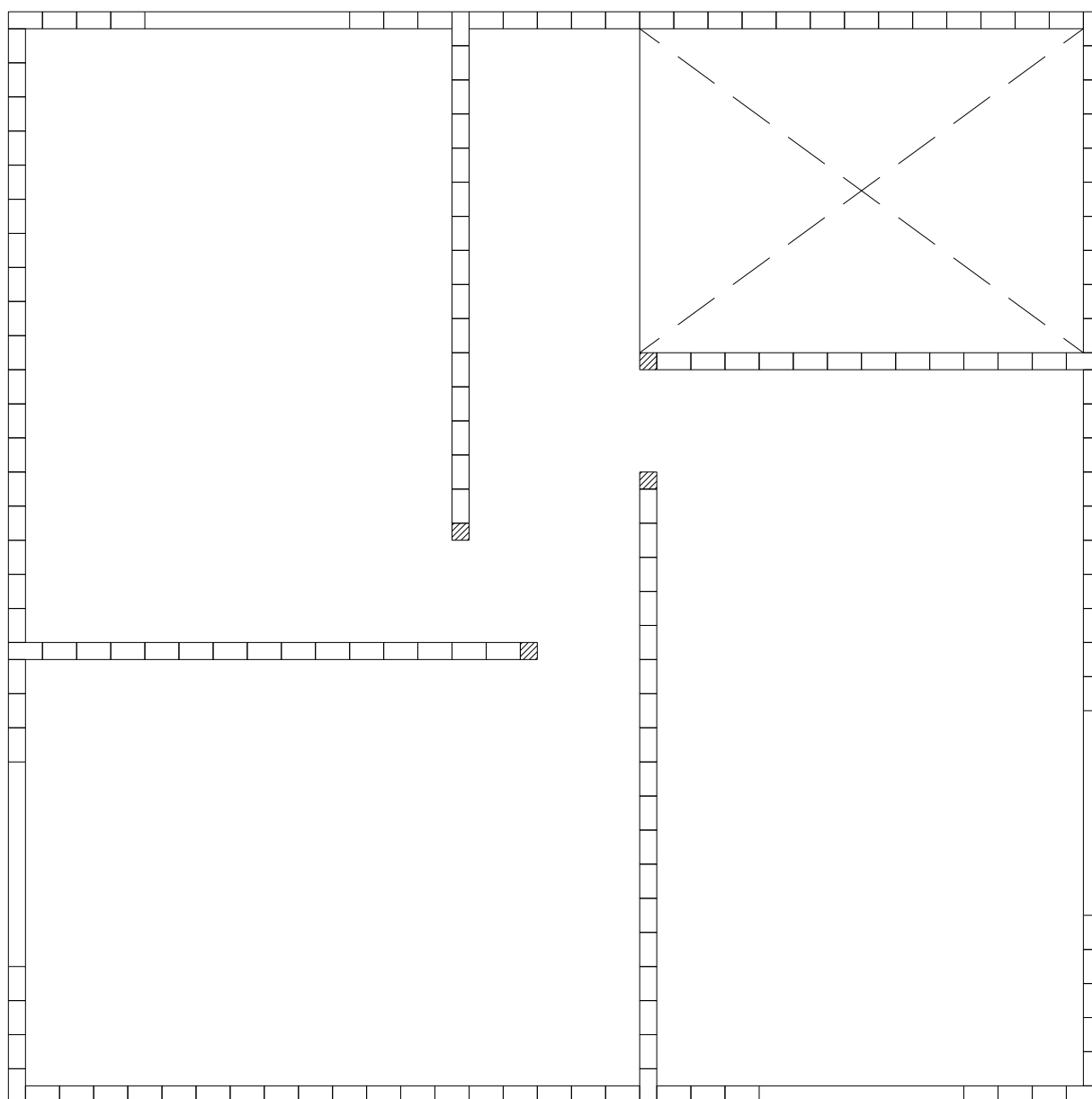
Figura 12. 8 – Modulação de 7ª e 9ª fiadas: Modelo físico reduzido.

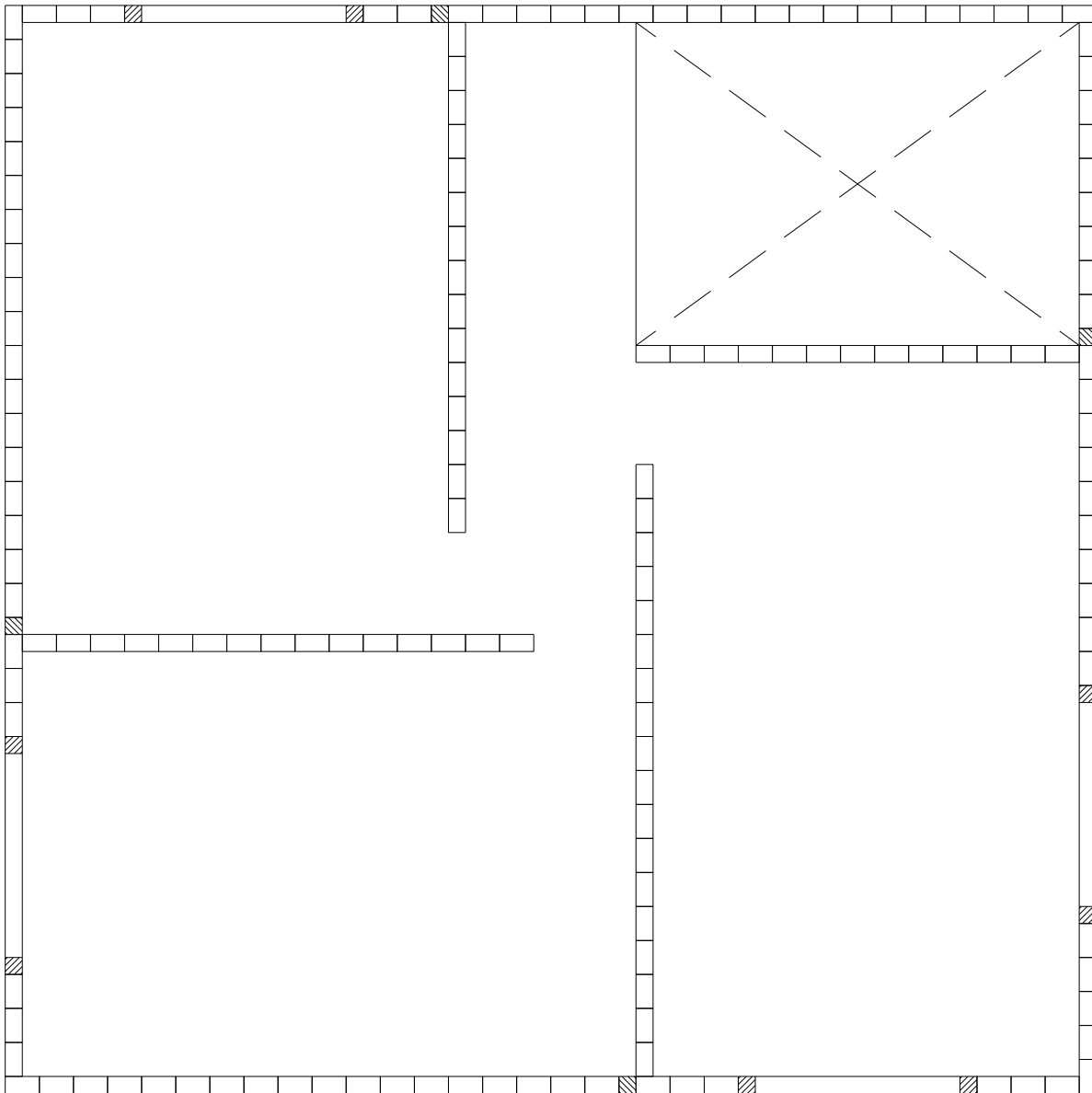
Figura 12.9 – Modulação da 8ª fiada: Modelo físico reduzido.

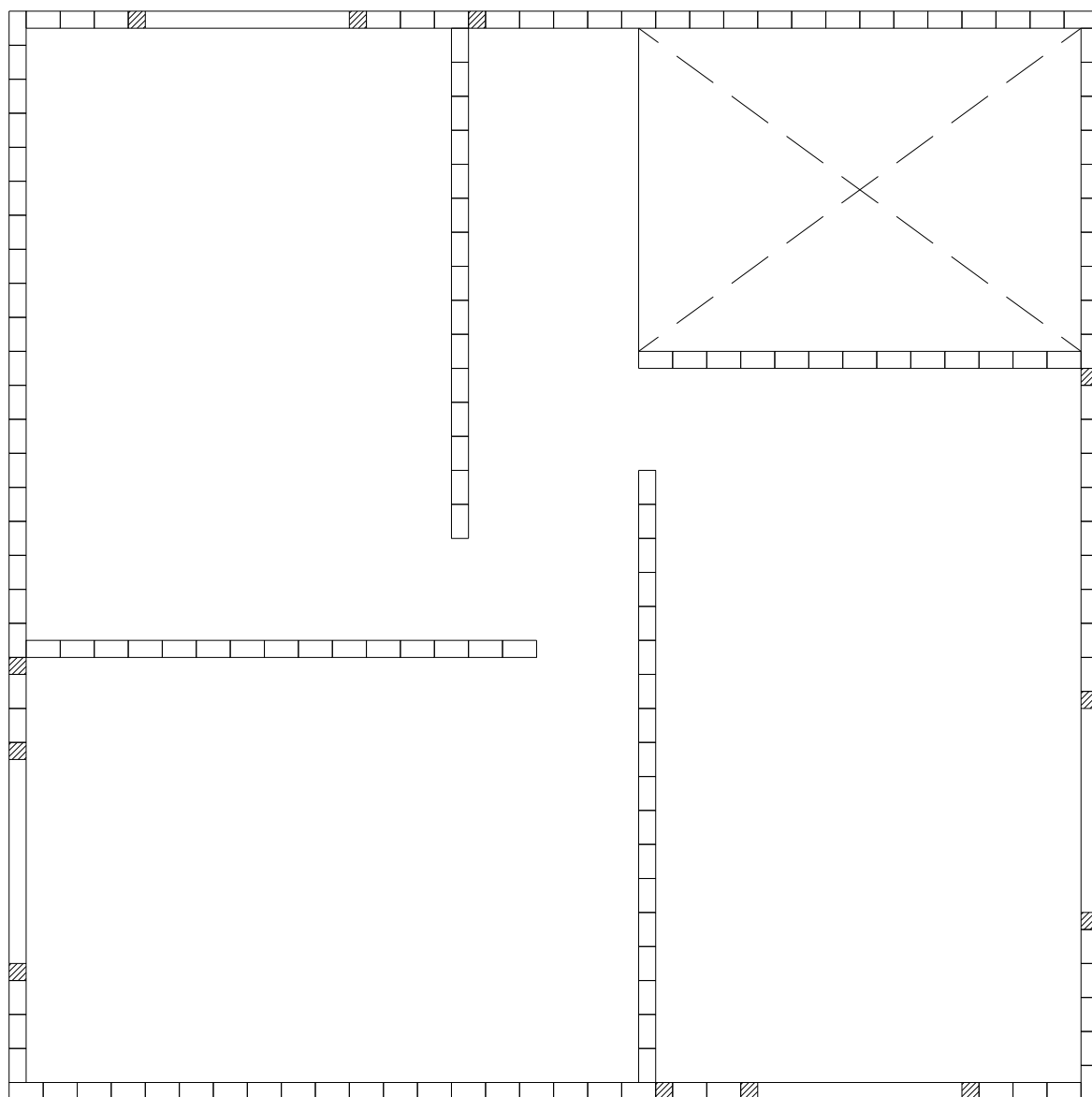
Figura 12. 10 – Modulação da 10ª fiada: Modelo físico reduzido.

Figura 12. 11 – Modulação da 11ª fiada: Modelo físico reduzido.

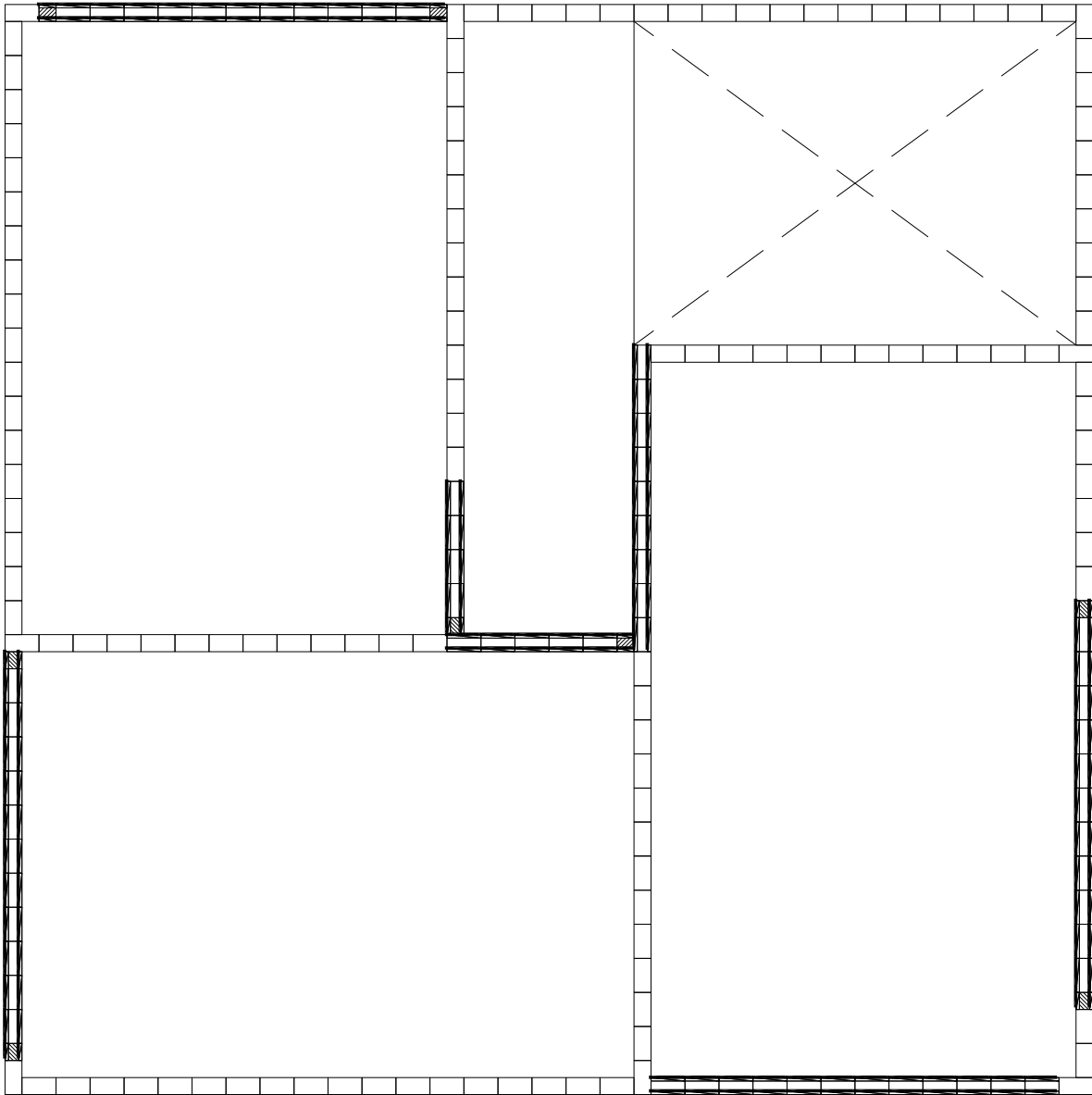


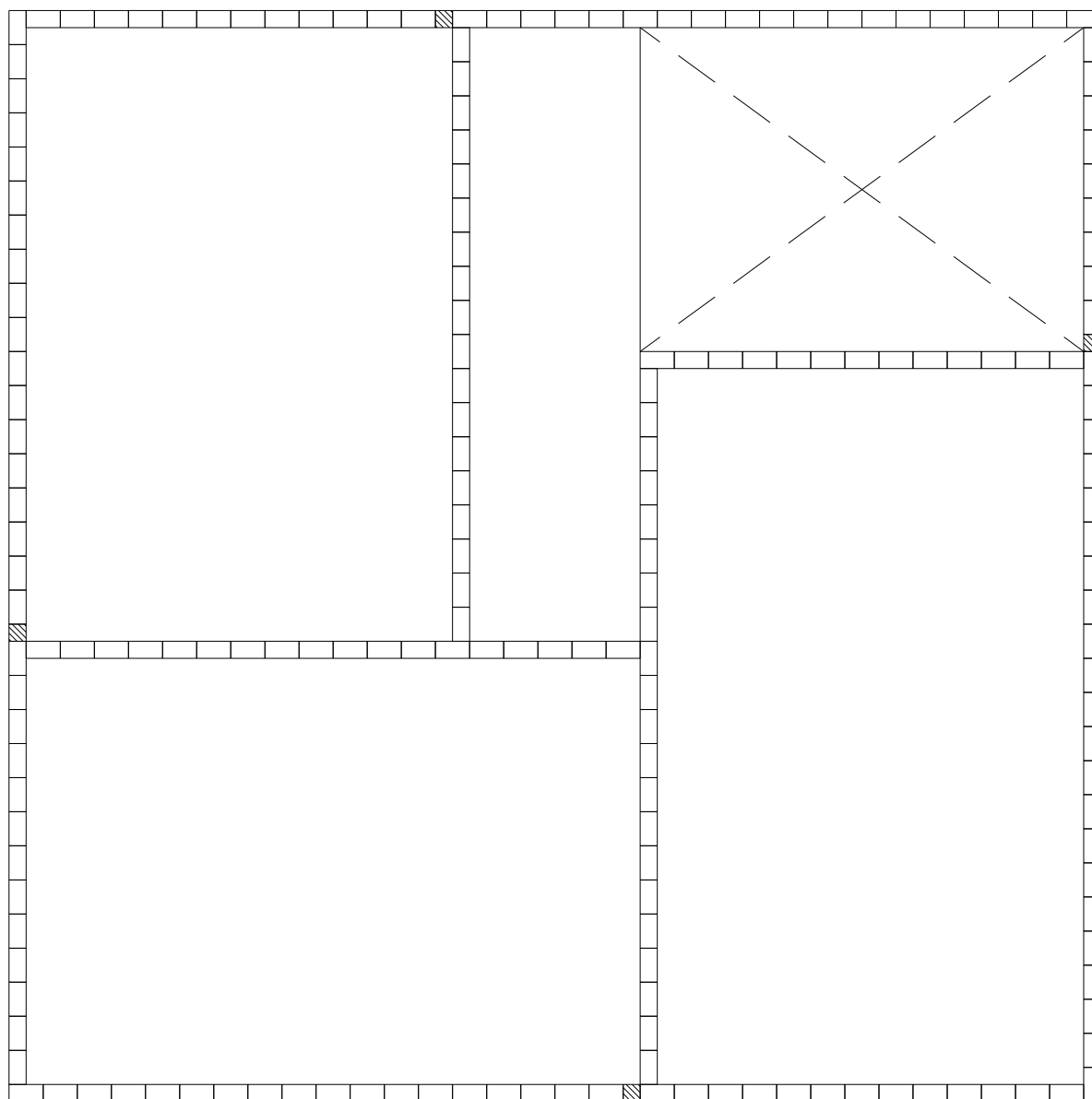
Figura 12. 12 – Modulação da 12ª fiada: Modelo físico reduzido.

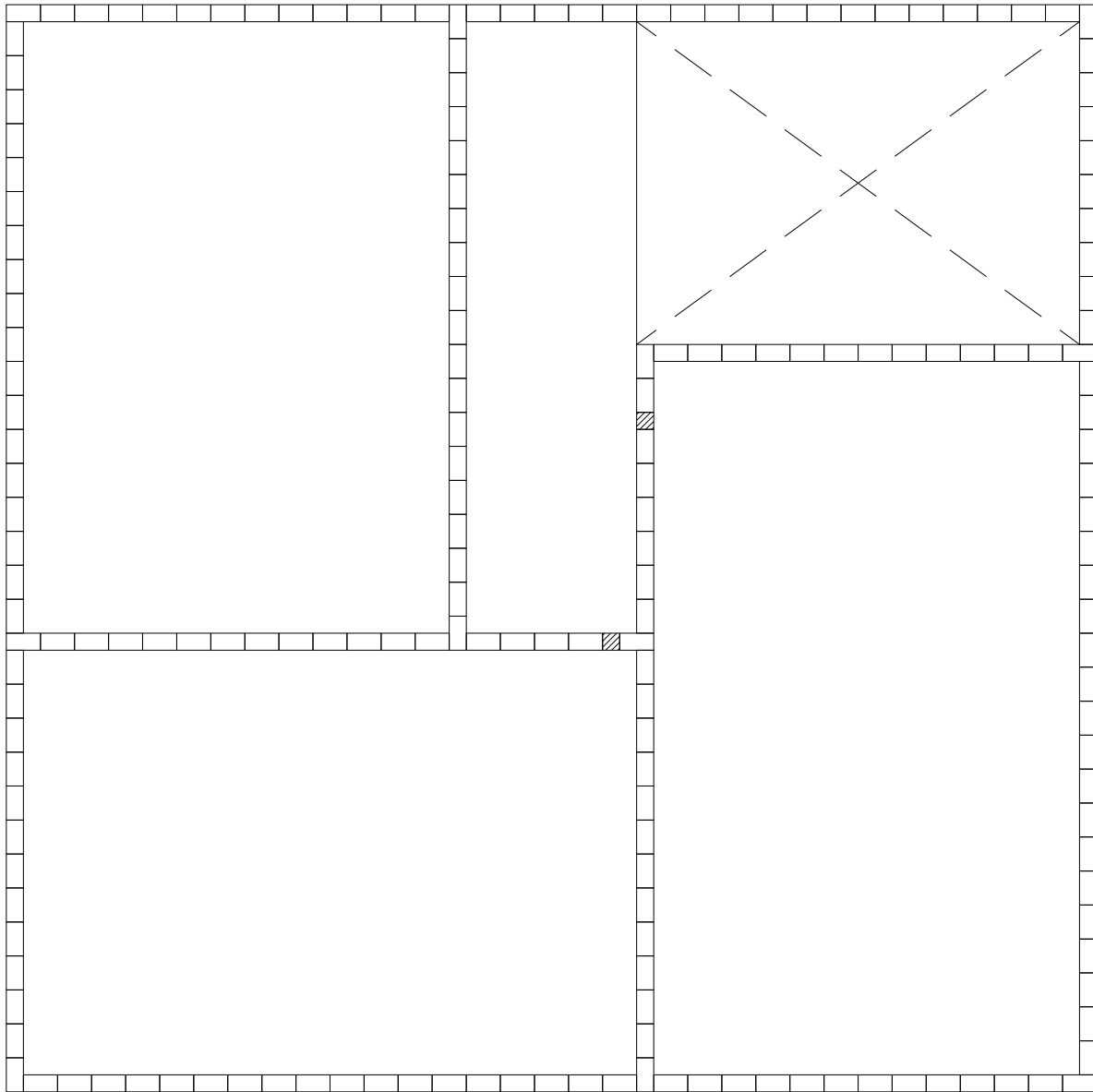
Figura 12. 13 – Modulação da 13ª fiada: Modelo físico reduzido.

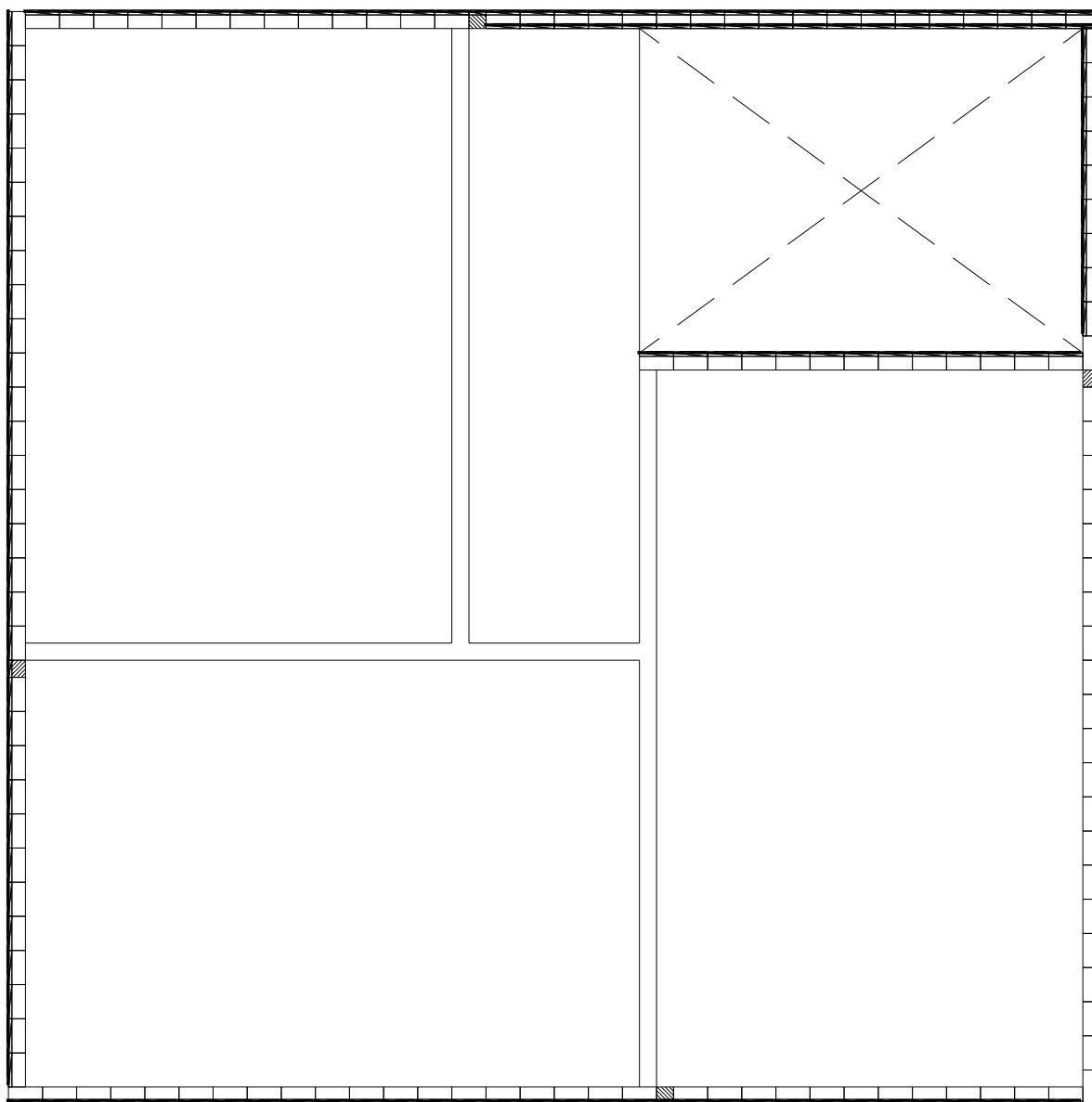
Figura 12. 14 – Modulação da 14ª fiada: Modelo físico reduzido.

Figura 12. 15 – Modulação da 1ª, 3ª, e 5ª fiadas da platibanda: Modelo físico reduzido.

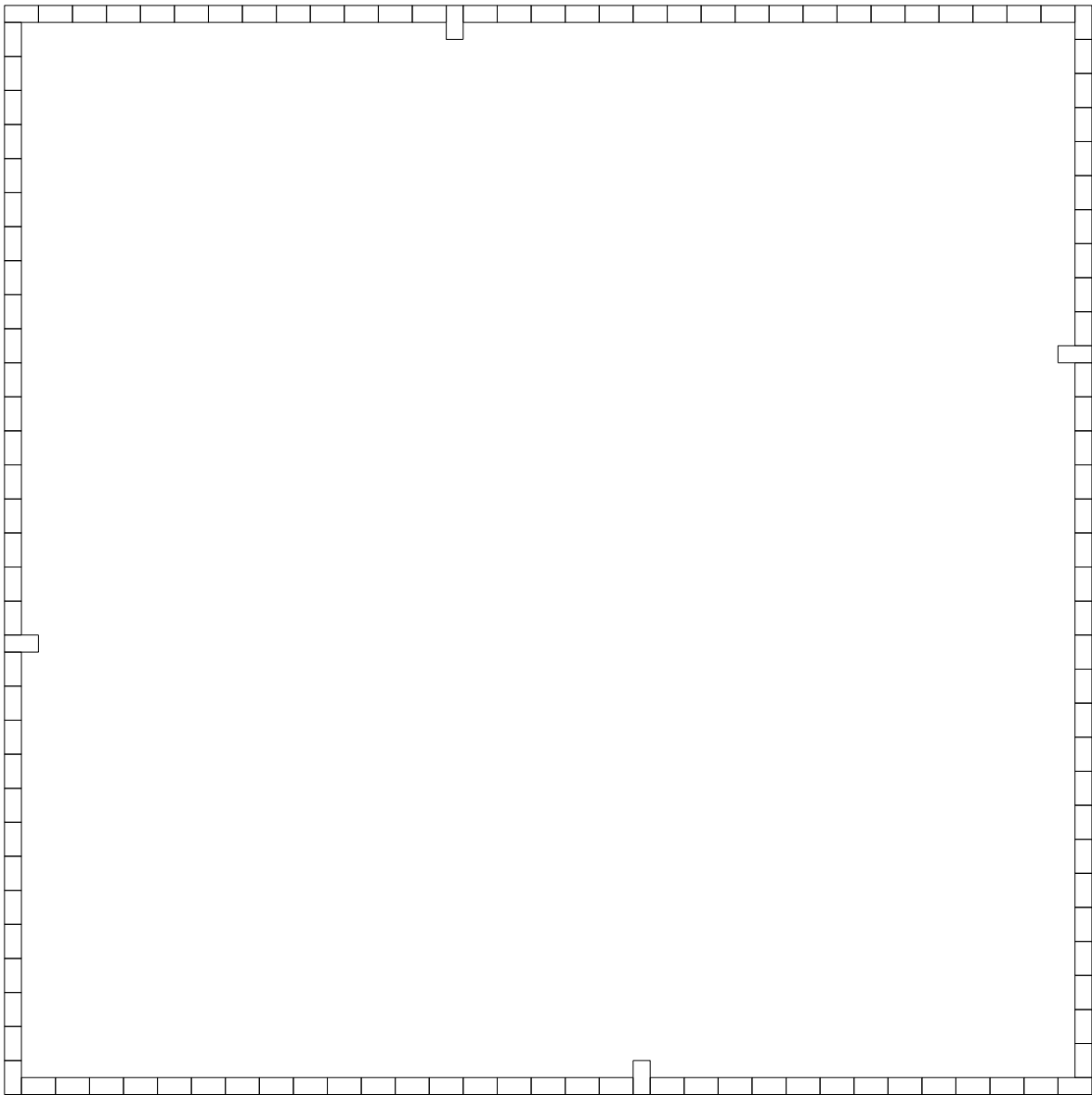


Figura 12. 16 – Modulação da 2ª e 6ª fiadas da platibanda: Modelo físico reduzido.

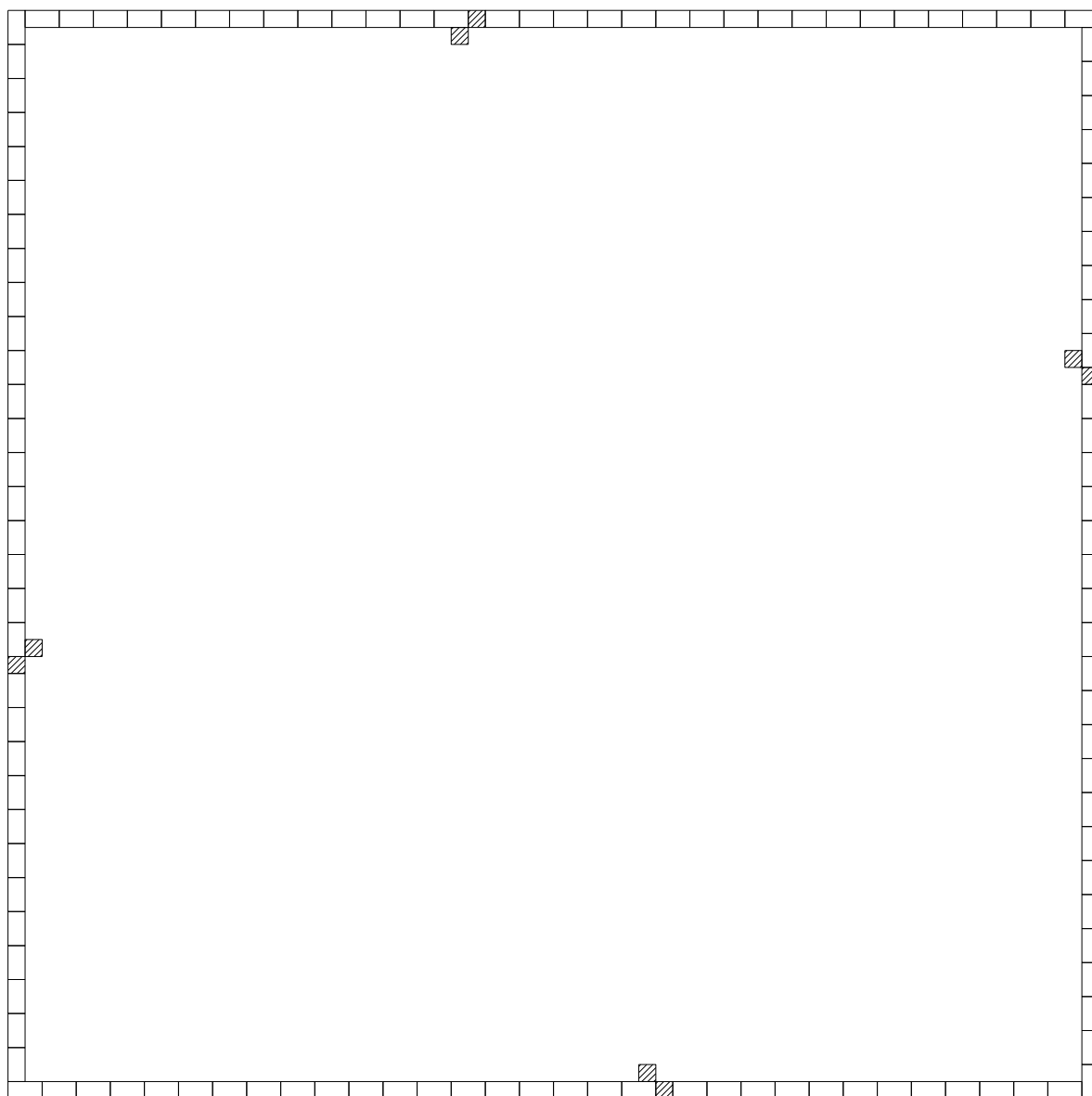
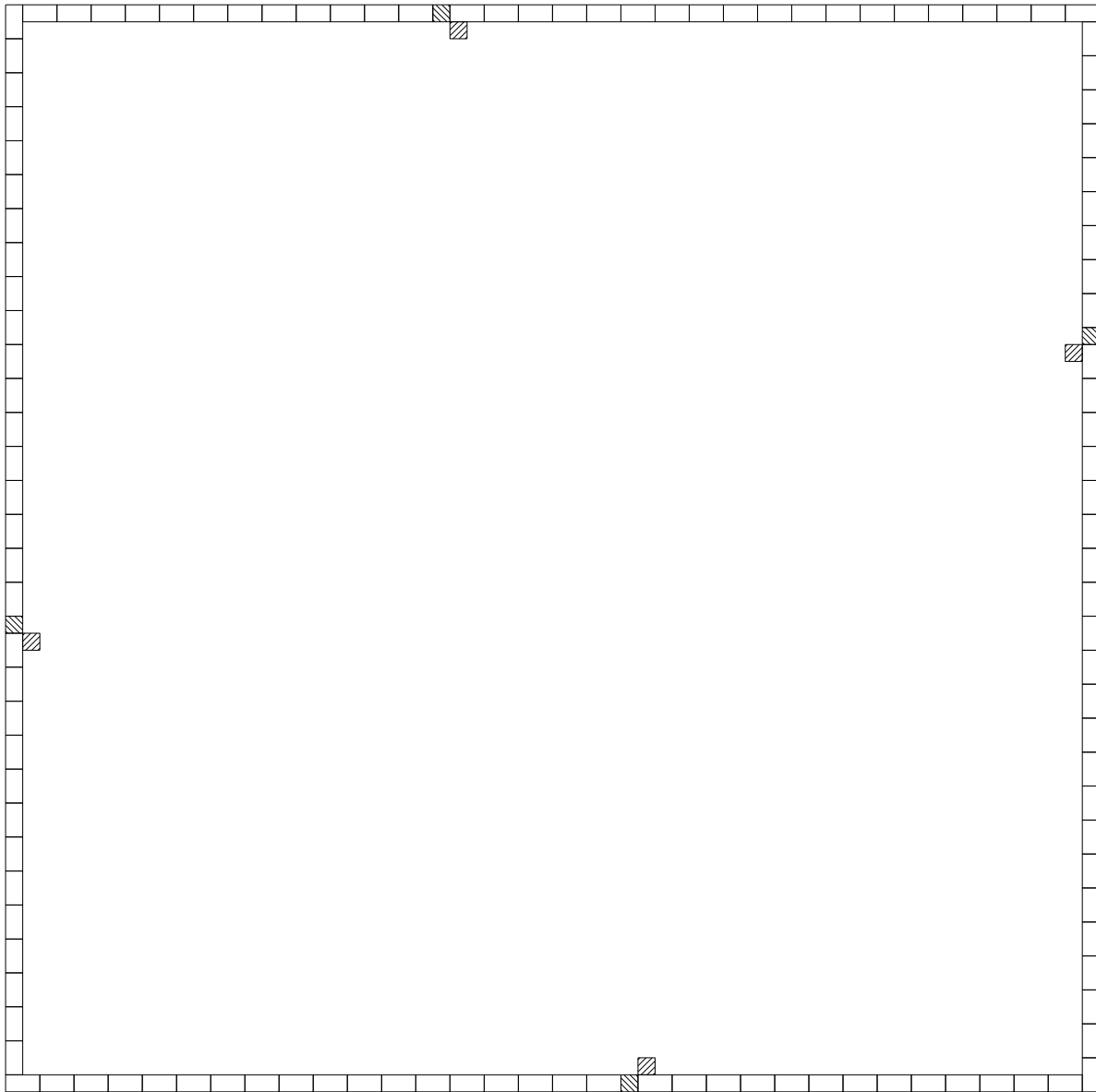


Figura 12. 17 – Modulação da 4ª fiada da platibanda: Modelo físico reduzido.

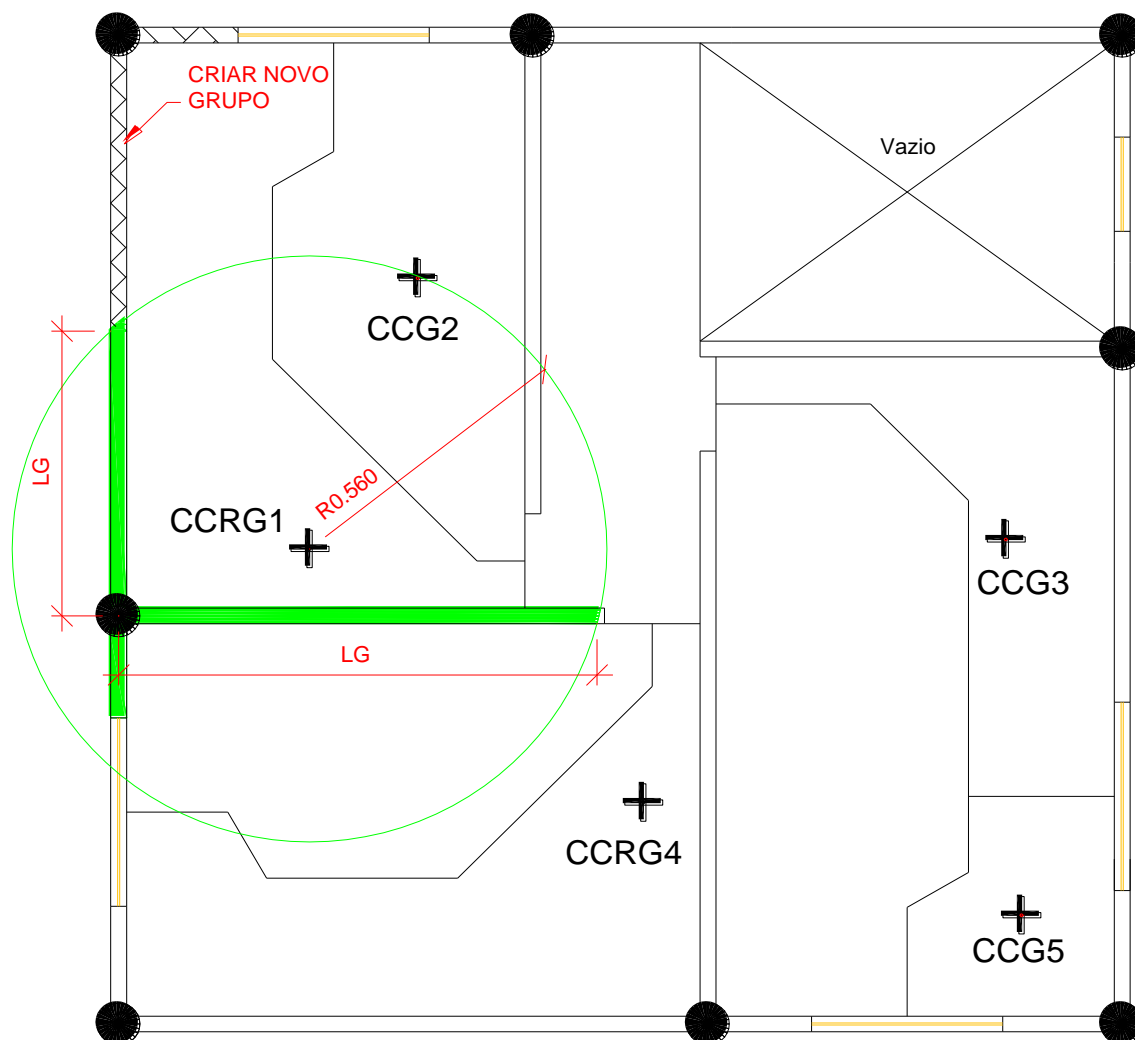
APÊNDICE C – APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE NOVOS GRUPOS DE PAREDES.**Figura 12. 18 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 1.**

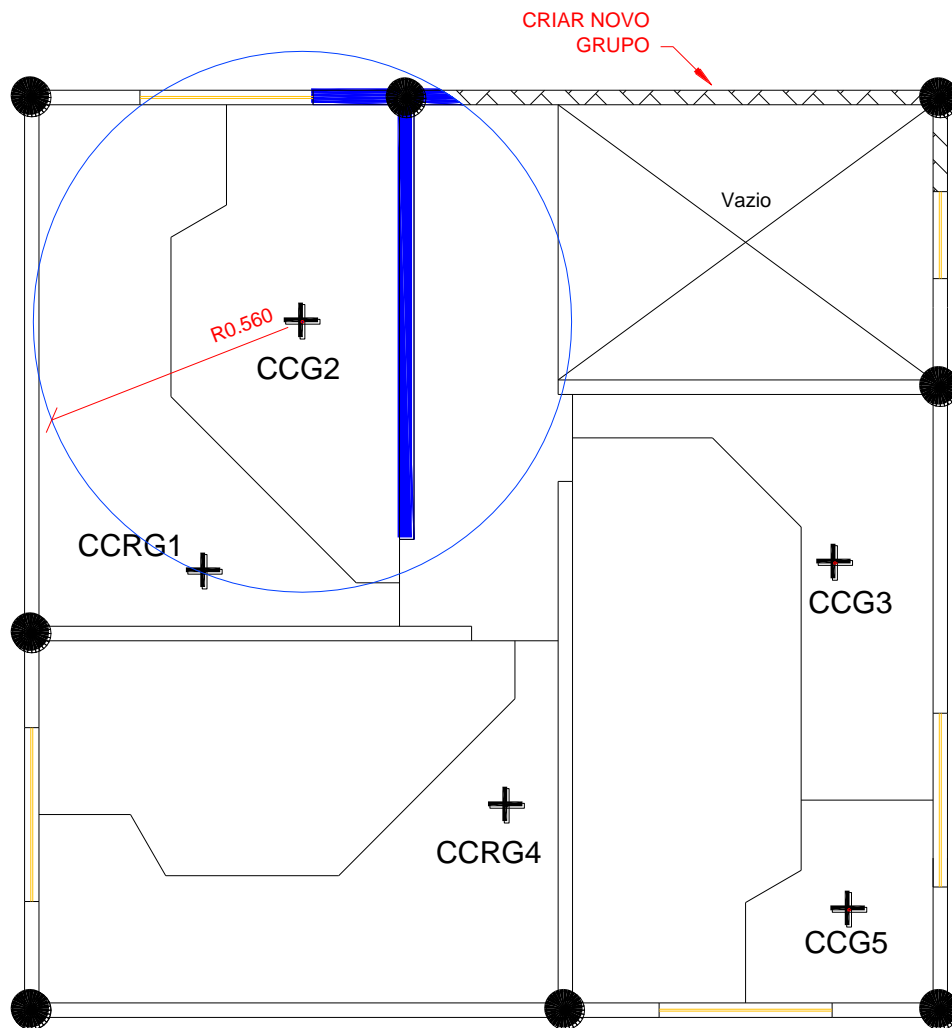
Figura 12. 19 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 2.

Figura 12. 20 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 3.

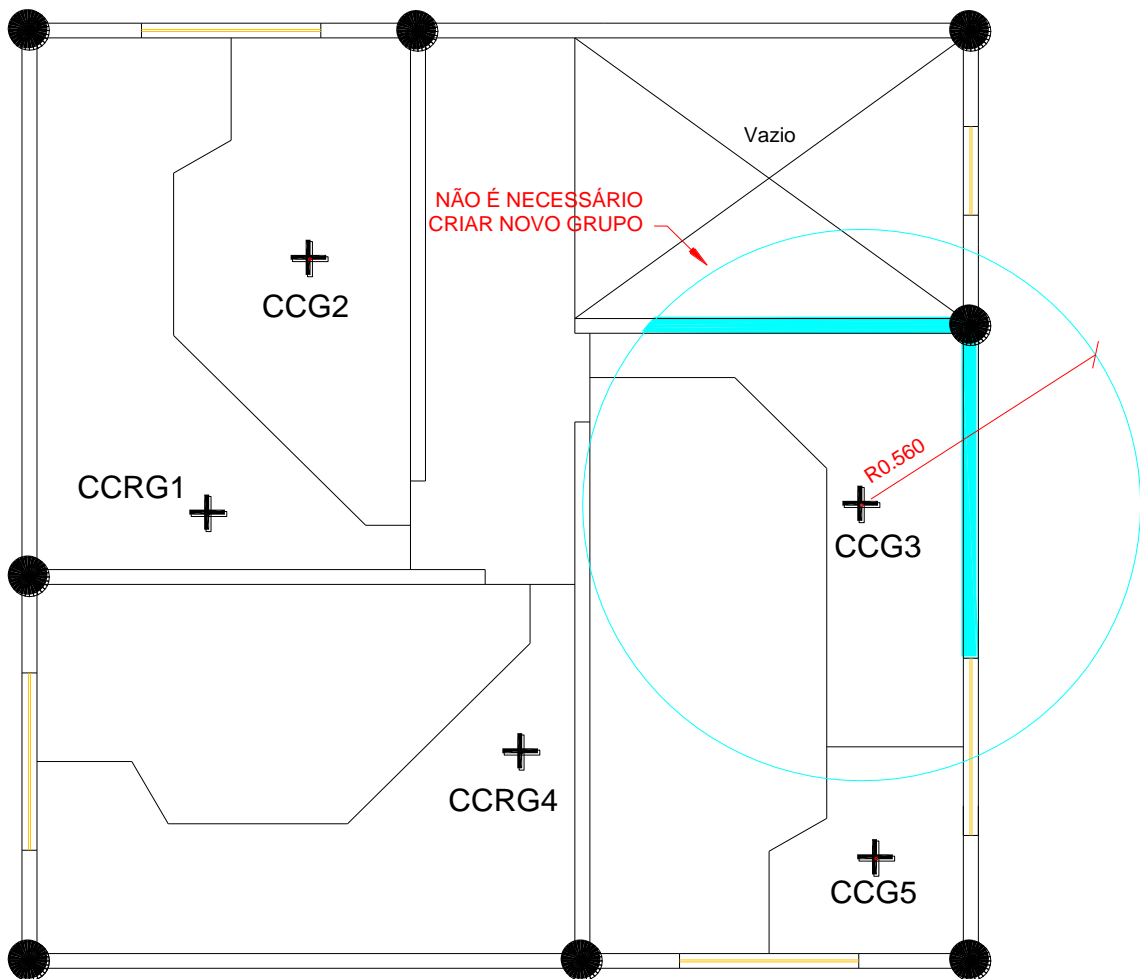


Figura 12. 21 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 4.

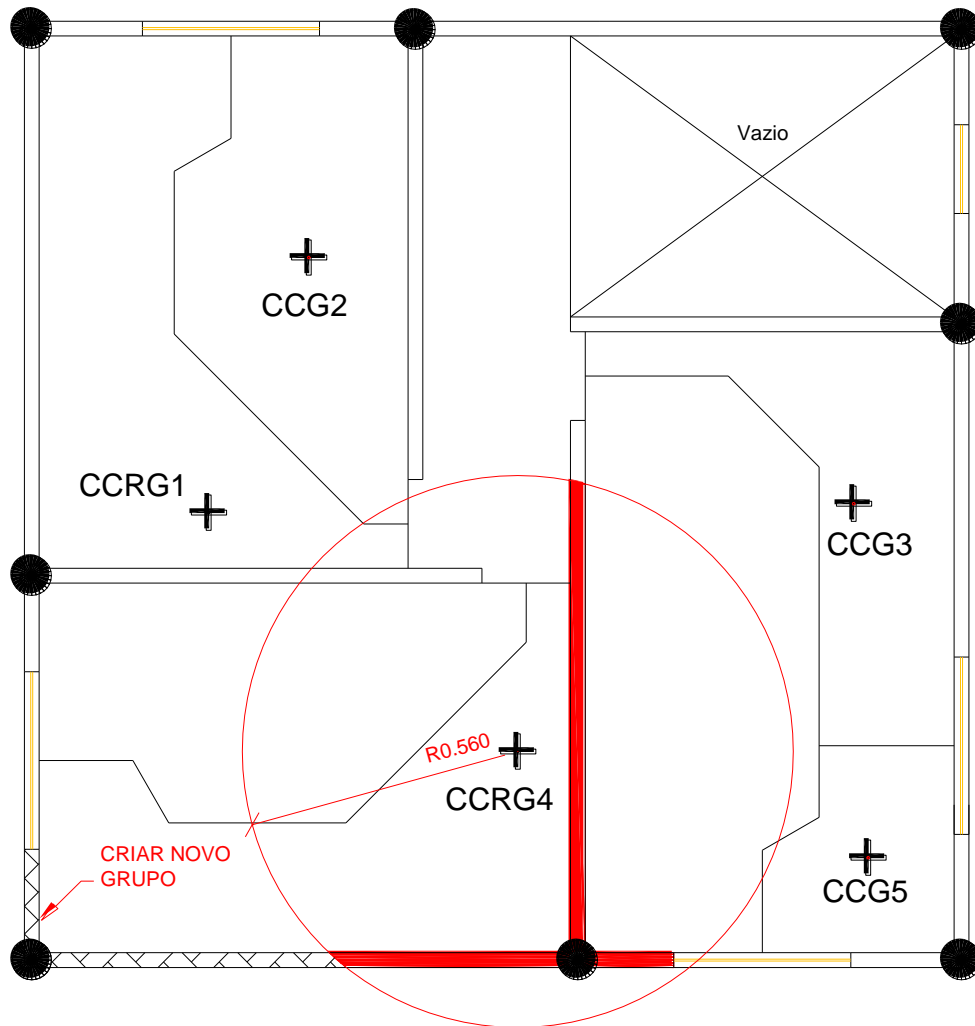
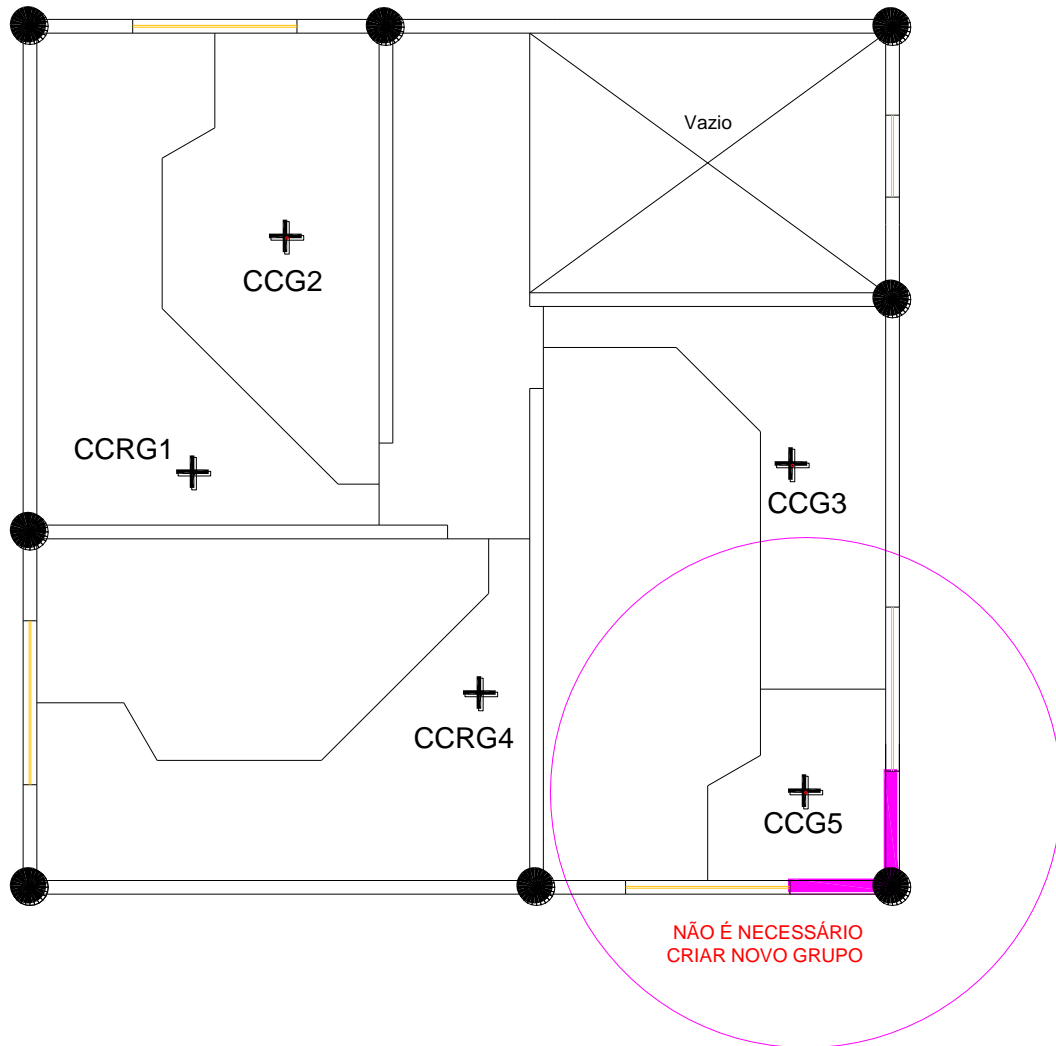


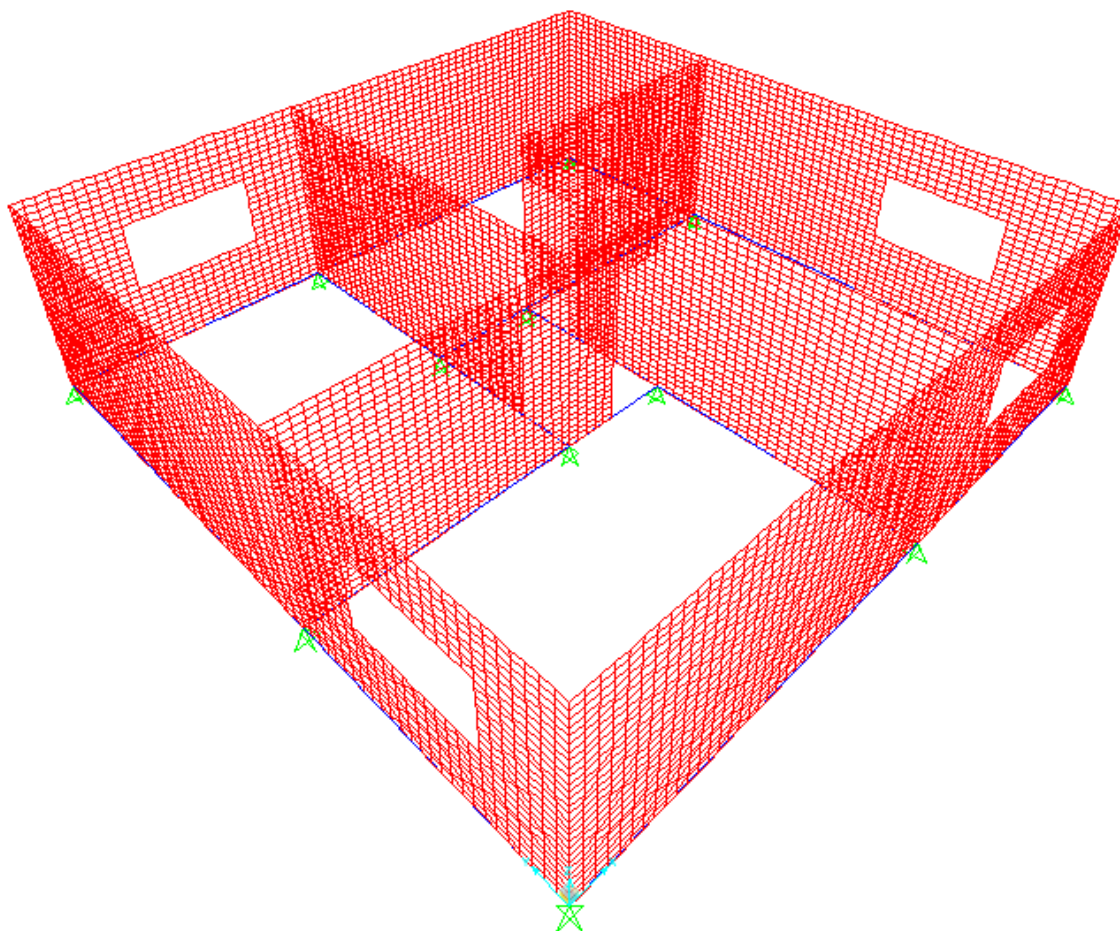
Figura 12.22 – Aplicação do NGP para verificação dos comprimentos do grupo 5.

APÊNDICE D – RESULTADOS DAS REAÇÕES DE APOIO COM A APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO NO TOPO DO PRIMEIRO PAVIMENTO.

Os resultados das reações de apoio para os procedimentos teóricos apresentados nas análises foram obtidos com a inserção de carregamentos uniformemente distribuídos na grelha de sustentação do modelo físico reduzido. Após a realização das análises e de posse dos resultados obtidos foram realizados novos carregamentos, para os procedimentos teóricos, com a aplicação das ações no topo do primeiro pavimento, ou seja, utilizando-se a discretização do primeiro pavimento (Figura 12.23).

Apesar desta nova análise os resultados obtidos não foram discutidos devido à aproximação com os resultados já apresentados.

Figura 12.23 – Representação da discretização do primeiro pavimento.



Fonte: Própria.

Nas tabelas 12.1 a 12.10 são apresentados os resultados obtidos para cada caso de carregamento. Pode-se obter que os resultados não apresentaram alterações significativas com relação ao carregamento imposto diretamente sobre a grelha de sustentação do modelo físico reduzido.

Tabela 12. 1 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 1 (Razões experimentais).

| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| P1 | -9,14 | -17,45 | -14,87 | -18,99 | -17,24 | 1,91 | 1,63 | 2,08 | 1,89 |
| P2 | -22,17 | -16,73 | -20,52 | -24,68 | -19,14 | 0,75 | 0,93 | 1,11 | 0,86 |
| P3 | -1,64 | 0,39 | -11,16 | -2,51 | -1,86 | -0,24 | 6,81 | 1,53 | 1,13 |
| P4 | -13,51 | -25,09 | -11,60 | -16,06 | -18,10 | 1,86 | 0,86 | 1,19 | 1,34 |
| P5 | -9,00 | 0,11 | -0,30 | -0,14 | -1,09 | -0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,12 |
| P6 | 1,01 | -0,05 | -1,81 | -0,24 | 1,24 | -0,05 | -1,79 | -0,23 | 1,23 |
| P7 | -21,96 | -23,15 | -25,63 | -24,01 | -23,27 | 1,05 | 1,17 | 1,09 | 1,06 |
| P8 | -6,43 | -15,42 | -13,19 | -12,48 | -11,25 | 2,40 | 2,05 | 1,94 | 1,75 |
| P9 | -2,55 | 0,79 | 0,37 | 0,34 | -0,35 | -0,31 | -0,15 | -0,13 | 0,14 |
| P10 | -3,16 | 0,76 | 0,18 | 0,49 | -3,56 | -0,24 | -0,06 | -0,15 | 1,13 |
| P11 | 1,24 | 0,04 | 0,00 | -0,01 | 0,57 | 0,03 | 0,00 | -0,01 | 0,46 |
| P12 | 8,19 | -0,03 | 0,37 | 0,06 | 2,19 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,27 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 0,60 | 0,96 | 0,70 | 0,95 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 0,98 | 2,10 | 0,88 | 0,59 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 163,94% | 218,34% | 124,50% | 62,70% |

Tabela 12. 2 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 1 (Razões teóricas).

| Apoios | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|--------|---------|---------|---------|
| P1 | 1,01 | 0,86 | 1,10 |
| P2 | 0,87 | 1,07 | 1,29 |
| P3 | -0,21 | 6,00 | 1,35 |
| P4 | 1,39 | 0,64 | 0,89 |
| P5 | -0,10 | 0,27 | 0,13 |
| P6 | -0,04 | -1,46 | -0,19 |
| P7 | 0,99 | 1,10 | 1,03 |
| P8 | 1,37 | 1,17 | 1,11 |
| P9 | -2,25 | -1,07 | -0,96 |
| P10 | -0,21 | -0,05 | -0,14 |
| P11 | 0,06 | 0,00 | -0,01 |
| P12 | -0,01 | 0,17 | 0,03 |
| Média: | 0,24 | 0,73 | 0,47 |
| D.P.: | 1,00 | 1,86 | 0,75 |
| C.V.: | 419,09% | 255,89% | 159,61% |

Tabela 12. 3 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 2 (Razões experimentais).

| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| P1 | -0,25 | 0,61 | -12,17 | -2,25 | -2,06 | -2,43 | 48,67 | 9,00 | 8,24 |
| P2 | 0,47 | 0,27 | -1,38 | 0,00 | 1,27 | 0,57 | -2,94 | 0,00 | 2,70 |
| P3 | 3,78 | -0,09 | 0,38 | 0,06 | 2,86 | -0,02 | 0,10 | 0,02 | 0,76 |
| P4 | -6,59 | -0,81 | -0,63 | -0,48 | -1,07 | 0,12 | 0,10 | 0,07 | 0,16 |
| P5 | -5,04 | 0,54 | -1,29 | -1,18 | -1,02 | -0,11 | 0,26 | 0,23 | 0,20 |
| P6 | 0,50 | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,38 | 0,08 | 0,00 | 0,04 | 0,76 |
| P7 | -22,23 | -23,71 | -22,83 | -24,61 | -21,58 | 1,07 | 1,03 | 1,11 | 0,97 |
| P8 | -10,46 | -26,65 | -11,04 | -13,58 | -16,76 | 2,55 | 1,06 | 1,30 | 1,60 |
| P9 | -5,91 | -11,81 | -13,39 | -12,62 | -9,34 | 2,00 | 2,27 | 2,14 | 1,58 |
| P10 | -19,55 | -2,45 | -13,27 | -20,26 | -17,04 | 0,13 | 0,68 | 1,04 | 0,87 |
| P11 | -18,54 | -31,84 | -23,49 | -24,43 | -23,23 | 1,72 | 1,27 | 1,32 | 1,25 |
| P12 | -5,07 | 1,18 | 0,15 | 0,52 | -3,39 | -0,23 | -0,03 | -0,10 | 0,67 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 0,45 | 4,37 | 1,35 | 1,65 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 1,29 | 14,01 | 2,52 | 2,19 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 286,08% | 320,44% | 187,01% | 132,77% |

Tabela 12. 4 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 2 (Razões teóricas).

| Apoios | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|--------|---------|---------|---------|
| P1 | -0,29 | 5,91 | 1,09 |
| P2 | 0,21 | -1,09 | 0,00 |
| P3 | -0,03 | 0,13 | 0,02 |
| P4 | 0,76 | 0,59 | 0,45 |
| P5 | -0,53 | 1,26 | 1,16 |
| P6 | 0,10 | 0,00 | 0,05 |
| P7 | 1,10 | 1,06 | 1,14 |
| P8 | 1,59 | 0,66 | 0,81 |
| P9 | 1,26 | 1,43 | 1,35 |
| P10 | 0,14 | 0,78 | 1,19 |
| P11 | 1,37 | 1,01 | 1,05 |
| P12 | -0,35 | -0,04 | -0,15 |
| Média: | 0,44 | 0,97 | 0,68 |
| D.P.: | 0,74 | 1,70 | 0,57 |
| C.V.: | 165,95% | 174,66% | 83,26% |

Tabela 12. 5 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 3 (Razões experimentais).

| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| P1 | 2,17 | -0,08 | 0,35 | 0,08 | 2,55 | -0,04 | 0,16 | 0,04 | 1,18 |
| P2 | 2,66 | 0,12 | 0,04 | 0,03 | 0,57 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,21 |
| P3 | -9,58 | 2,87 | 1,09 | 1,00 | -4,52 | -0,30 | -0,11 | -0,10 | 0,47 |
| P4 | -2,58 | 1,28 | 1,52 | 1,54 | 0,51 | -0,49 | -0,59 | -0,60 | -0,20 |
| P5 | -11,36 | -9,67 | -9,86 | -10,76 | -8,68 | 0,85 | 0,87 | 0,95 | 0,76 |
| P6 | -14,22 | -23,27 | -22,10 | -18,51 | -23,01 | 1,64 | 1,55 | 1,30 | 1,62 |
| P7 | 1,97 | 0,15 | -1,37 | -0,13 | 1,07 | 0,08 | -0,69 | -0,07 | 0,54 |
| P8 | -5,35 | -0,79 | -0,58 | -0,70 | 0,62 | 0,15 | 0,11 | 0,13 | -0,12 |
| P9 | -7,85 | -26,93 | -13,48 | -20,16 | -18,83 | 3,43 | 1,72 | 2,57 | 2,40 |
| P10 | -2,39 | 0,44 | -12,06 | -3,08 | -2,44 | -0,18 | 5,05 | 1,29 | 1,02 |
| P11 | -19,34 | -18,90 | -23,72 | -29,38 | -20,21 | 0,98 | 1,23 | 1,52 | 1,04 |
| P12 | -19,02 | -15,49 | -13,81 | -14,62 | -15,10 | 0,81 | 0,73 | 0,77 | 0,79 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 0,58 | 0,84 | 0,65 | 0,81 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 1,09 | 1,54 | 0,91 | 0,73 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 188,40% | 184,43% | 139,50% | 89,74% |

Tabela 12. 6 – Carregamento no primeiro pavimento: Ambiente 3 (Razões teóricas).

| Apoios | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|--------|---------|---------|---------|
| P1 | -0,03 | 0,14 | 0,03 |
| P2 | 0,20 | 0,06 | 0,04 |
| P3 | -0,64 | -0,24 | -0,22 |
| P4 | 2,50 | 2,98 | 3,02 |
| P5 | 1,11 | 1,14 | 1,24 |
| P6 | 1,01 | 0,96 | 0,80 |
| P7 | 0,14 | -1,28 | -0,12 |
| P8 | -1,27 | -0,94 | -1,13 |
| P9 | 1,43 | 0,72 | 1,07 |
| P10 | -0,18 | 4,94 | 1,26 |
| P11 | 0,94 | 1,17 | 1,45 |
| P12 | 1,03 | 0,91 | 0,97 |
| Média: | 0,52 | 0,88 | 0,70 |
| D.P.: | 1,02 | 1,69 | 1,07 |
| C.V.: | 194,94% | 192,34% | 152,11% |

Tabela 12. 7 – Carregamento no primeiro pavimento: Níveis (Razões experimentais).

| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| P1 | -0,91 | -10,46 | -17,73 | -13,78 | -5,50 | 11,49 | 19,48 | 15,15 | 6,04 |
| P2 | -7,90 | -1,30 | -4,87 | -1,58 | -6,04 | 0,16 | 0,62 | 0,20 | 0,76 |
| P3 | -2,70 | 2,33 | 0,82 | 1,20 | -1,82 | -0,86 | -0,30 | -0,45 | 0,67 |
| P4 | -9,14 | -0,09 | -7,42 | -0,09 | -6,28 | 0,01 | 0,81 | 0,01 | 0,69 |
| P5 | -10,74 | -2,37 | -2,39 | -3,19 | -4,39 | 0,22 | 0,22 | 0,30 | 0,41 |
| P6 | -5,80 | -13,69 | -12,07 | -13,62 | -8,96 | 2,36 | 2,08 | 2,35 | 1,54 |
| P7 | -15,48 | -10,60 | -21,08 | -15,95 | -15,15 | 0,68 | 1,36 | 1,03 | 0,98 |
| P8 | -8,74 | -4,20 | -3,25 | -1,23 | -9,76 | 0,48 | 0,37 | 0,14 | 1,12 |
| P9 | -6,89 | -26,25 | -18,12 | -24,48 | -10,60 | 3,81 | 2,63 | 3,55 | 1,54 |
| P10 | -9,24 | -3,39 | 0,41 | -3,09 | -8,43 | 0,37 | -0,04 | 0,33 | 0,91 |
| P11 | -16,23 | -17,79 | -9,81 | -13,83 | -16,45 | 1,10 | 0,60 | 0,85 | 1,01 |
| P12 | -6,22 | -7,52 | -2,04 | -7,95 | -6,63 | 1,21 | 0,33 | 1,28 | 1,07 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 1,75 | 2,35 | 2,06 | 1,40 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 3,30 | 5,46 | 4,27 | 1,50 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 188,12% | 232,82% | 207,00% | 107,54% |

Tabela 12. 8 – Carregamento no primeiro pavimento: Níveis (Razões Teóricas).

| Apoios | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|--------|---------|---------|---------|
| P1 | 1,90 | 3,22 | 2,51 |
| P2 | 0,22 | 0,81 | 0,26 |
| P3 | -1,28 | -0,45 | -0,66 |
| P4 | 0,02 | 1,18 | 0,01 |
| P5 | 0,54 | 0,54 | 0,73 |
| P6 | 1,53 | 1,35 | 1,52 |
| P7 | 0,70 | 1,39 | 1,05 |
| P8 | 0,43 | 0,33 | 0,13 |
| P9 | 2,48 | 1,71 | 2,31 |
| P10 | 0,40 | -0,05 | 0,37 |
| P11 | 1,08 | 0,60 | 0,84 |
| P12 | 1,13 | 0,31 | 1,20 |
| Média: | 0,76 | 0,91 | 0,86 |
| D.P.: | 0,97 | 0,96 | 0,93 |
| C.V.: | 127,50% | 105,64% | 109,15% |

Tabela 12. 9 – Carregamento no primeiro pavimento: Cobertura (Razões experimentais).

| Apoios | EXP(%) | PI(%) | GP(%) | NGP(%) | MEF(%) | PI/EXP | GP/EXP | NGP/EXP | MEF/EXP |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| P1 | -3,88 | -3,23 | -14,05 | -5,16 | -6,12 | 0,83 | 3,62 | 1,33 | 1,58 |
| P2 | -11,18 | -8,86 | -6,33 | -6,22 | -9,80 | 0,79 | 0,57 | 0,56 | 0,88 |
| P3 | -6,88 | -0,20 | -1,34 | -0,25 | -5,38 | 0,03 | 0,19 | 0,04 | 0,78 |
| P4 | -9,78 | -17,50 | -10,21 | -11,95 | -6,75 | 1,79 | 1,04 | 1,22 | 0,69 |
| P5 | -12,75 | -3,01 | -1,89 | -2,29 | -5,88 | 0,24 | 0,15 | 0,18 | 0,46 |
| P6 | -7,87 | -11,96 | -21,54 | -17,77 | -12,43 | 1,52 | 2,74 | 2,26 | 1,58 |
| P7 | -8,36 | -2,70 | -17,01 | -14,77 | -12,14 | 0,32 | 2,03 | 1,77 | 1,45 |
| P8 | -7,73 | -3,81 | -2,50 | -2,95 | -7,96 | 0,49 | 0,32 | 0,38 | 1,03 |
| P9 | -7,80 | -22,77 | -13,63 | -16,85 | -8,78 | 2,92 | 1,75 | 2,16 | 1,13 |
| P10 | -7,45 | -3,59 | 0,45 | -2,25 | -6,29 | 0,48 | -0,06 | 0,30 | 0,84 |
| P11 | -7,88 | -13,29 | -7,58 | -10,23 | -12,94 | 1,69 | 0,96 | 1,30 | 1,64 |
| P12 | -8,45 | -9,08 | -3,47 | -9,30 | -5,52 | 1,07 | 0,41 | 1,10 | 0,65 |
| EXP: Experimental PI: Paredes Isoladas | | | | | Média: | 1,01 | 1,14 | 1,05 | 1,06 |
| GP: Grupos de Paredes | | | | | D.P.: | 0,83 | 1,16 | 0,76 | 0,41 |
| NGP: Novo Grupo de Paredes | | | | | C.V.: | 82,08% | 101,25% | 72,76% | 38,74% |

Tabela 12. 10 – Carregamento no primeiro pavimento: Cobertura (Razões Teóricas).

| Apoios | PI/MEF | GP/MEF | NGP/MEF |
|--------|--------|--------|---------|
| P1 | 0,53 | 2,30 | 0,84 |
| P2 | 0,90 | 0,65 | 0,63 |
| P3 | 0,04 | 0,25 | 0,05 |
| P4 | 2,59 | 1,51 | 1,77 |
| P5 | 0,51 | 0,32 | 0,39 |
| P6 | 0,96 | 1,73 | 1,43 |
| P7 | 0,22 | 1,40 | 1,22 |
| P8 | 0,48 | 0,31 | 0,37 |
| P9 | 2,59 | 1,55 | 1,92 |
| P10 | 0,57 | -0,07 | 0,36 |
| P11 | 1,03 | 0,59 | 0,79 |
| P12 | 1,65 | 0,63 | 1,69 |
| Média: | 1,01 | 0,93 | 0,95 |
| D.P.: | 0,85 | 0,74 | 0,63 |
| C.V.: | 84,50% | 79,11% | 66,31% |