

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DEFORMAÇÕES E CONSUMO
EM ESTRUTURAS DE PEQUENO PORTE**

Estêvão Bicalho Pinto Rodrigues

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ESTRUTURAS

**“ANÁLISE COMPARATIVA DE DEFORMAÇÕES E CONSUMO EM
ESTRUTURAS DE PEQUENO PORTE”**

ESTÊVÃO BICALHO PINTO RODRIGUES

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Ney Amorim Silva
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Alcebiades de Vasconcellos Filho
DEES - UFMG

Prof. Dr. Luiz Sérgio Franco
Escola Politécnica – Universidade de São Paulo

Belo Horizonte, 17 de outubro de 2003.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, à Santuzza e aos meus filhos,
Ricardo, Marcelo, Gustavo e Joanna

AGRADECIMENTOS

- A DEUS, que em sua infinita bondade, deu-me saúde, determinação e forças para chegar ao fim desta jornada.
- Ao professor Alcebíades que, desde os anos de 1978/1979, plantou na minha mente a idéia de fazer um mestrado, pelo exemplo de dedicação ao seu trabalho que o tornaram meu paradigma em todos esses anos e pelas orientações que me deu ao longo desta dissertação.
- Ao meu avô, Prof. Adhemar Rodrigues, e ao meu pai, Prof. Estêvão Pinto Rodrigues, pela referência de excelência que me passaram com seus exemplos ao longo de sua vida.
- À Santuzza e aos meus filhos, por terem suportado a minha ausência nos programas familiares, durante esta caminhada.
- Ao professor, colega e amigo Ney Amorim Silva, por ter acreditado nesta “dissertação tecnológica”, por sua compreensão, por sua imensa dedicação e pela enorme contribuição que deu a este trabalho.
- Ao professor, colega e amigo Gabriel de Oliveira Ribeiro, pelo grande incentivo no início desta caminhada e pela enorme disponibilidade que demonstrou em me

atender quando solicitado.

- À engenheira Luciana Sampaio Camara, pela inestimável ajuda que me deu no processamento dos exemplos desta dissertação.
- Ao engenheiro Edson Dener Leonel, pelo processamento dos modelos no programa ANSYS, que em muito ajudaram a complementar este trabalho.
- À Viviane, pela cuidadosa e paciente digitação deste texto.
- À Dayene, ao Fabiano, ao Claydson, ao Marcelo e ao Sérgio, que também me ajudaram no desenvolvimento dos desenhos ilustrativos e exemplos deste trabalho.
- Ao professor, colega e amigo Roberto Márcio da Silva, pela ajuda na fase da pesquisa bibliográfica e pelas orientações passadas quando da defesa do meu projeto de dissertação.
- Aos companheiros de caminhada, Antônio Carlos, Márcio Dario e Ronaldo, cujo apoio e incentivo foram fundamentais não só ao longo desta caminhada, mas ao longo desses anos de convívio na UFMG.
- Ao colega e amigo Roberto de Araújo Coelho, pelas contribuições e sugestões que deu a este trabalho.
- Ao engenheiro João Bagno, da PLANOR – Planejamento e Orçamentos de Obras, pela importante contribuição.
- Ao engenheiro Fernando Diniz Queirós, meu ex-aluno e colega de mestrado, pelas importantes trocas de informações que em muito me ajudaram nas disciplinas de Elasticidade e Método dos Elementos Finitos.
- À Vera Simoni, pela cuidadosa revisão deste texto.

- Para terminar, a todos os meus amigos que, brindando a minha ausência nos encontros de quinta-feira à noite e nos jogos de tênis aos domingos pela manhã, mantiveram acesa a lembrança do amigo-estudante que poderá, agora, voltar ao convívio dessas agradáveis e inesquecíveis reuniões.

RESUMO

Neste trabalho, realizou-se um estudo comparativo de deformações e de consumo de material nas estruturas-suporte das alvenarias estruturais em três prédios de pequeno porte. Em cada um desses prédios, foram adotadas soluções estruturais variadas. Inicialmente, estudaram-se três soluções convencionais com lajes, vigas e pilares (com vigas colocadas sob quase todas as paredes), sendo uma delas sem balanço, outra com balanço da ordem de 1,0 metro, e a terceira com balanço da ordem de 2,0 metros. A seguir, adotou-se a solução com pouquíssimas vigas e lajes de grandes dimensões, que receberam diretamente a alvenaria e, para terminar, uma solução com vigas apenas no perímetro (lajes apoiadas diretamente sobre os pilares). Em todas essas soluções, foi mantido, para cada prédio, o número de pilares, para que as comparações de consumo e deformações fossem adequadas. Em função dos resultados obtidos, foi feita uma análise comparativa da deformação e do consumo do material, procurando justificar as diferenças encontradas. No final do trabalho, foi escolhida a estrutura que apresentou a deformação mais representativa e sobre ela foram colocados quatro andares de alvenaria, para uma análise por elementos finitos através do programa ANSYS, com o objetivo de avaliar a influência sobre essas paredes da deformação da estrutura.

Palavras chave: alvenaria estrutural, estruturas-suporte, deformação, consumo de material.

ABSTRACT

In the present work, a comparative study of deflections and material consumption was carried out in the supporting structures of the load-bearing wall of three small buildings. In each of these buildings different structural solutions were adopted. Initially, three conventional solutions using slabs, beams and columns were studied in which the beams supported almost all the masonry. The first had no cantilever, the second had a one-meter long cantilever approximately, and the third had a two-meter long cantilever approximately. Then, a solution using a few beams and large slabs supporting directly the masonry was adopted. Finally, a solution in which beams were used only along the perimeter was adopted – the slabs were supported directly by the columns. In all solutions, the number of columns in each building was kept constant in order to compare appropriately the deflections and material consumption. Based on the results, a comparative analysis of the deflection and material consumption was performed and explanations were given to justify the differences among the results. Additionally, by the end of the work, the structure with the most significant deflection was selected and then, four stories of masonry were added to it in order to perform a finite element analysis using the commercial software ANSYS, aiming to evaluate the influence of the structure's deflection on the walls.

Keywords: load-bearing wall, supporting structures, deflection, material consumption.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| Resumo | I |
| Abstract | II |
| Lista de figuras | VI |
| Lista de tabelas | XIV |
| Lista de abreviaturas, siglas e símbolos | XVI |
| | |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| | |
| 1.1 Histórico | 1 |
| 1.2 Objetivo | 4 |
| 1.3 Estado atual da arte | 4 |
| 1.3.1 Comentários iniciais..... | 4 |
| 1.3.2 Pavimento de concreto armado, constituído pelas lajes, vigas e pilares de apoio..... | 7 |
| 1.3.2.1 Carregamento..... | 7 |
| 1.3.2.2 Software a ser utilizado na análise..... | 7 |
| 1.3.3 Interação parede-viga..... | 8 |
| 1.3.4 Deformações nas estruturas de concreto armado..... | 13 |
| 1.4 Descrição sumária do trabalho | 15 |
| | |
| 2 METODOLOGIA | 16 |

| | |
|--|-----|
| 2.1 Pavimento de concreto armado, constituído pelas lajes, vigas e pilares de apoio | 16 |
| 2.1.1 Carregamento..... | 16 |
| 2.1.2 CAD/TQS [®] | 18 |
| 2.1.3 Exemplos processados..... | 19 |
| 2.1.4 Modelos estruturais adotados na análise..... | 20 |
| 2.1.5 Parametrização..... | 21 |
| 2.1.6 Detalhamento das lajes, vigas e pilares..... | 29 |
| 2.2 Análise do acréscimo das tensões na parede em função da deformação da estrutura-suporte | 29 |
| 3 APLICAÇÕES | 31 |
| 3.1 Introdução | 31 |
| 3.2 Primeiro exemplo – prédio “C” | 33 |
| 3.2.1 Opção 1 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 33 |
| 3.2.2 Opção 2 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 41 |
| 3.2.3 Opção 3 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 48 |
| 3.2.4 Opção 4 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 58 |
| 3.2.5 Opção 5 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 61 |
| 3.2.6 Opções com lajes nervuradas..... | 64 |
| 3.2.7 Gráficos e tabelas comparativos..... | 64 |
| 3.2.8 Comentários sobre o prédio “C” | 75 |
| 3.3 Segundo exemplo – prédio “A” | 77 |
| 3.3.1 Opção 1 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 78 |
| 3.3.2 Opção 2 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 86 |
| 3.3.3 Opção 3 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 92 |
| 3.3.4 Opção 4 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 99 |
| 3.3.5 Opção 5 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 103 |
| 3.3.6 Gráficos e tabelas comparativos..... | 106 |
| 3.3.7 Comentários sobre o prédio “A” | 111 |

| | |
|---|-----|
| 3.4 Terceiro exemplo – prédio “M” | 113 |
| 3.4.1 Opção 1 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 113 |
| 3.4.2 Opção 2 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 124 |
| 3.4.3 Opção 3 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 129 |
| 3.4.4 Opção 4 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 136 |
| 3.4.5 Opção 5 para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 140 |
| 3.4.6 Gráficos e tabelas comparativos..... | 143 |
| 3.4.7 Comentários sobre o prédio “M”..... | 147 |
| 3.5 Análise da alvenaria sobre a estrutura do prédio “M” | 150 |
| 3.5.1 Introdução..... | 150 |
| 3.5.2 Deslocamentos verticais..... | 154 |
| 3.5.3 Tensões verticais..... | 166 |
| 3.5.4 Tensões horizontais..... | 178 |
| | |
| 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 181 |
| | |
| 4.1 Comentários | 181 |
| 4.2 Conclusões | 182 |
| 4.3 Sugestões | 184 |
| | |
| 5 REFERÊNCIAS | 185 |
| | |
| 6 ANEXOS | 188 |
| | |
| Anexo A | 189 |
| Anexo B | 200 |
| Anexo C | 222 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| 1.1 – Dois sistemas parede-viga com carregamento equivalente..... | 9 |
| 2.1 – Apoio elástico contínuo..... | 23 |
| 2.2 – Apoio elástico independente..... | 23 |
| 2.3 – Exemplo de plastificação sobre pilar interno..... | 25 |
| 2.4 – Esquema para estudo da seção transversal fletida..... | 28 |
| 3.1 – Prédio “C” - planta com a arquitetura do pavimento tipo..... | 34 |
| 3.2 – Prédio “C” - corte esquemático longitudinal A-A..... | 35 |
| 3.3 – Prédio “C” - esquema das paredes sem revestimento..... | 36 |
| 3.4 – Prédio “C” - Opção 1 - planta da garagem..... | 37 |
| 3.5 – Prédio “C” - Opção 1 - esquema da estrutura..... | 38 |
| 3.6 – Prédio “C” - Opção 1 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 39 |
| 3.7 – Prédio “C” - fôrma da Opção 1 | 40 |
| 3.8 – Prédio “C” - Opção 1 - deslocamentos das vigas (cm)..... | 42 |
| 3.9 – Prédio “C” - Opção 1 - deslocamentos das vigas e lajes (cm)..... | 43 |
| 3.10 – Prédio “C” - Opção 2 - planta da garagem..... | 44 |
| 3.11 – Prédio “C” - Opção 2 - esquema da estrutura..... | 45 |
| 3.12 – Prédio “C” - Opção 2 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 46 |
| 3.13 – Prédio “C” - fôrma da Opção 2 | 47 |
| 3.14 - Prédio “C” - Opção 2 - deslocamentos das vigas (cm)..... | 49 |
| 3.15 - Prédio “C” - Opção 2 - deslocamentos das vigas e lajes (cm)..... | 50 |
| 3.16 - Prédio “C” - Opção 3 - planta da garagem..... | 51 |
| 3.17 – Prédio “C” - Opção 3 – esquema da estrutura..... | 52 |

| | |
|--|----|
| 3.18 – Prédio “C” - Opção 3 – superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 53 |
| 3.19 – Prédio “C” - fôrma da Opção 3 | 55 |
| 3.20 – Prédio “C” - Opção 3 - deslocamentos das vigas (cm)..... | 56 |
| 3.21 – Prédio “C” - Opção 3 - deslocamentos das vigas e lajes (cm)..... | 57 |
| 3.22 – Prédio “C” - fôrma da Opção 4 | 59 |
| 3.23 – Prédio “C” - Opção 4 - deslocamentos das lajes e vigas (cm)..... | 60 |
| 3.24 – Prédio “C” - fôrma da Opção 5 | 62 |
| 3.25 – Prédio “C” - Opção 5 - deslocamentos das lajes e vigas (cm)..... | 63 |
| 3.26 – Prédio “C” - fôrma da Opção 6 | 65 |
| 3.27 – Prédio “C” - Opção 6 - deslocamentos das lajes e vigas (cm)..... | 66 |
| 3.28 – Prédio “C” - Opção 6 - regiões onde se precisa armar a laje para cisalhamento..... | 67 |
| 3.29 – Prédio “C” - fôrma da Opção 7 | 68 |
| 3.30 – Prédio “C” - Opção 7 - deslocamentos das lajes e vigas com a consideração de rótula sobre a viga central V2 (cm)..... | 69 |
| 3.31 – Prédio “C” - Opção 7 - regiões onde se precisa armar a laje para cisalhamento com a consideração de rótula sobre a viga central V2..... | 70 |
| 3.32 – Prédio “C” - Opção 7 - deslocamentos das lajes e vigas sem a consideração de rótula sobre a viga central V2 (cm)..... | 71 |
| 3.33 – Prédio “C” - Opção 7 - regiões onde se precisa armar a laje para cisalhamento sem a consideração de rótula sobre a viga central V2..... | 72 |
| 3.34 – Prédio “C” - consumo de fôrma das várias opções..... | 73 |
| 3.35 – Prédio “C” - consumo de concreto das várias opções..... | 73 |
| 3.36 – Prédio “C” - consumo de aço das várias opções..... | 74 |
| 3.37 – Prédio “C” - deslocamentos máximos para as várias opções..... | 75 |
| 3.38 – Prédio “A” - planta com a arquitetura do pavimento tipo..... | 79 |
| 3.39 – Prédio “A” - corte esquemático longitudinal A-A..... | 80 |
| 3.40 – Prédio “A” - esquema das paredes sem revestimento..... | 81 |
| 3.41 – Prédio “A” – Opção 1 - planta da garagem..... | 82 |
| 3.42 – Prédio “A” - Opção 1 - esquema da estrutura..... | 83 |

| | |
|--|-----|
| 3.43 – Prédio “A” - Opção 1 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 84 |
| 3.44 – Prédio “A” - fôrma da Opção 1 | 85 |
| 3.45 – Prédio “A” - Opção 1 - deslocamentos das vigas (cm)..... | 87 |
| 3.46 – Prédio “A” - Opção 1 - deslocamentos das vigas e lajes (cm)..... | 88 |
| 3.47 – Prédio “A” - Opção 2 - planta da garagem..... | 89 |
| 3.48 – Prédio “A” - Opção 2 - esquema da estrutura..... | 90 |
| 3.49 – Prédio “A” - Opção 2 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 91 |
| 3.50 – Prédio “A” - fôrma da Opção 2 | 93 |
| 3.51 – Prédio “A” - Opção 2 - deslocamentos das vigas (cm)..... | 94 |
| 3.52 – Prédio “A” - Opção 2 - deslocamentos das vigas e lajes (cm)..... | 95 |
| 3.53 – Prédio “A” - Opção 3 - planta da garagem..... | 96 |
| 3.54 – Prédio “A” - Opção 3 - esquema da estrutura..... | 97 |
| 3.55 – Prédio “A” - Opção 3 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 98 |
| 3.56 – Prédio “A” - fôrma da Opção 3 | 100 |
| 3.57 – Prédio “A” - Opção 3 - deslocamentos das vigas (cm)..... | 101 |
| 3.58 – Prédio “A” - Opção 3 - deslocamentos das vigas e lajes (cm)..... | 102 |
| 3.59 – Prédio “A” - fôrma da Opção 4 | 104 |
| 3.60 – Prédio “A” - Opção 4 - deslocamentos das lajes e vigas (cm)..... | 105 |
| 3.61 – Prédio “A” - fôrma da Opção 5 | 107 |
| 3.62 – Prédio “A” - Opção 5 - deslocamentos das lajes e vigas (cm)..... | 108 |
| 3.63 – Prédio “A” - consumo de fôrma das várias opções..... | 109 |
| 3.64 – Prédio “A” - consumo de concreto das várias opções..... | 109 |
| 3.65 – Prédio “A” - consumo de aço das várias opções..... | 110 |
| 3.66 – Prédio “A” – deslocamentos máximos para as várias opções..... | 111 |
| 3.67 – Prédio “M” - planta com a arquitetura do pavimento tipo..... | 114 |
| 3.68 – Prédio “M” - corte esquemático longitudinal A-A..... | 115 |
| 3.69 – Prédio “M” - esquema das paredes sem revestimento..... | 116 |
| 3.70 – Prédio “M” - Opção 1 - planta da garagem..... | 117 |
| 3.71 – Prédio “M” - Opção 1 - esquema da estrutura..... | 118 |

| | |
|--|-----|
| 3.72 – Prédio “M” - Opção 1 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 119 |
| 3.73 – Prédio “M” - fôrma da Opção 1 | 120 |
| 3.74 – Prédio “M” - Opção 1 - deslocamentos das vigas (cm)..... | 122 |
| 3.75 – Prédio “M” - Opção 1 - deslocamentos das vigas e lajes (cm)..... | 123 |
| 3.76 – Prédio “M” - Opção 2 - planta da garagem..... | 125 |
| 3.77 – Prédio “M” - Opção 2 - esquema da estrutura..... | 126 |
| 3.78 – Prédio “M” - Opção 2 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 127 |
| 3.79 – Prédio “M” - fôrma da Opção 2 | 128 |
| 3.80 – Prédio “M” - Opção 2 - deslocamentos das vigas (cm)..... | 130 |
| 3.81 – Prédio “M” - Opção 2 - deslocamentos das vigas e lajes (cm)..... | 131 |
| 3.82 – Prédio “M” - Opção 3 - planta da garagem..... | 132 |
| 3.83 – Prédio “M” - Opção 3 - esquema da estrutura..... | 133 |
| 3.84 – Prédio “M” - Opção 3 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 134 |
| 3.85 – Prédio “M” - fôrma da Opção 3 | 135 |
| 3.86 – Prédio “M” - Opção 3 - deslocamentos das vigas (cm)..... | 137 |
| 3.87 – Prédio “M” - Opção 3 - deslocamentos das vigas e lajes (cm)..... | 138 |
| 3.88 – Prédio “M” - fôrma da Opção 4 | 139 |
| 3.89 – Prédio “M” - Opção 4 - deslocamentos das lajes e vigas (cm)..... | 141 |
| 3.90 – Prédio “M” - fôrma da Opção 5 | 142 |
| 3.91 – Prédio “M” - Opção 5 - deslocamentos das lajes e vigas (cm)..... | 144 |
| 3.92 – Prédio “M” - consumo de fôrma das várias opções..... | 145 |
| 3.93 – Prédio “M” - consumo de concreto das várias opções..... | 145 |
| 3.94 – Prédio “M” - consumo de aço das várias opções..... | 146 |
| 3.95 – Prédio “M” - deslocamentos máximos para as várias opções..... | 147 |
| 3.96 – Visualização em 3D da modelagem do prédio “M” no ANSYS..... | 151 |
| 3.97 – Prédio “M” - cargas acumuladas consideradas sobre a estrutura-suporte no modelo 2..... | 152 |
| 3.98 – Prédio “M” - numeração das paredes a serem analisadas no ANSYS..... | 153 |
| 3.99 – Parede 1 - deslocamentos verticais no Modelo 1..... | 156 |

| | |
|--|-----|
| 3.100 – Parede 1 - deslocamentos verticais no Modelo 2..... | 157 |
| 3.101 – Parede 2 (esquerda) e parede 3 (direita) – deslocamentos verticais no Modelo 1..... | 158 |
| 3.102 – Parede 2 (esquerda) e parede 3 (direita) – deslocamentos verticais no Modelo 2..... | 159 |
| 3.103 – Parede 7 (esquerda) e parede 9 (direita) – deslocamentos verticais no Modelo 1..... | 160 |
| 3.104 – Parede 7 (esquerda) e parede 9 (direita) – deslocamentos verticais no Modelo 2..... | 161 |
| 3.105 – Parede 16 - deslocamentos verticais no Modelo 1..... | 162 |
| 3.106 – Parede 16 - deslocamentos verticais no Modelo 2..... | 163 |
| 3.107 – Parede 33 - deslocamentos verticais no Modelo 1..... | 164 |
| 3.108 – Parede 33 - deslocamentos verticais no Modelo 2..... | 165 |
| 3.109 – Parede 1 - tensões verticais no Modelo 1..... | 168 |
| 3.110 – Parede 1 - tensões verticais no Modelo 2..... | 169 |
| 3.111 – Parede 2 (esquerda) e parede 3 (direita) - tensões verticais no Modelo 1.. | 170 |
| 3.112 – Parede 2 (esquerda) e parede 3 (direita) - tensões verticais no Modelo 2.. | 171 |
| 3.113 – Parede 7 (esquerda) e parede 9 (direita) - tensões verticais no Modelo 1.. | 172 |
| 3.114 – Parede 7 (esquerda) e parede 9 (direita) - tensões verticais no Modelo 2.. | 173 |
| 3.115 – Parede 16 - tensões verticais no Modelo 1..... | 174 |
| 3.116 – Parede 16 - tensões verticais no Modelo 2..... | 175 |
| 3.117 – Parede 33 - tensões verticais no Modelo 1..... | 176 |
| 3.118 – Parede 33 - tensões verticais no Modelo 2..... | 177 |
| 3.119 – Parede 1 - tensões horizontais no Modelo 1..... | 179 |
| 3.120 – Parede 1 - tensões horizontais no Modelo 2..... | 180 |
| A.1 – Residencial “SF”- pavimento tipo..... | 190 |
| A.2 – Residencial “SF”- garagem..... | 191 |
| A.3 – Residencial “SF” - projeção do pavimento tipo sobre as garagens..... | 192 |
| A.4 – Residencial “SF”- esquema do vigamento do pilotis..... | 193 |
| A.5 – Residencial “SF”- superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 194 |
| A.6 – Residencial “G”- pavimento tipo..... | 195 |

| | |
|---|-----|
| A.7 – Residencial “G”- garagem..... | 196 |
| A.8 – Residencial “G” - projeção do pavimento tipo sobre as garagens..... | 197 |
| A.9 – Residencial “G”- esquema do vigamento do pilotis..... | 198 |
| A.10 – Residencial “G”- superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura..... | 199 |
| B.1 – Residencial “S”- pavimento tipo..... | 201 |
| B.2 – Residencial “S”- garagem..... | 202 |
| B.3 – Residencial “S” - projeção do pavimento tipo sobre as garagens..... | 203 |
| B.4 – Residencial “S”- primeira solução de vigamento do pilotis..... | 204 |
| B.5 – Residencial “S”- superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a primeira solução de vigamento do pilotis..... | 205 |
| B.6 – Residencial “S”- segunda solução de vigamento do pilotis..... | 206 |
| B.7 – Residencial “S”- superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a segunda solução de vigamento do pilotis..... | 207 |
| B.8 – Residencial “J”- Bloco 5 - pavimento tipo..... | 208 |
| B.9 – Residencial “J”- Bloco 5 - garagem..... | 209 |
| B.10 – Residencial “J”- Bloco 5 - projeção do pavimento tipo sobre as garagens..... | 210 |
| B.11 – Residencial “J”- Bloco 5 - primeira solução de vigamento do pilotis..... | 211 |
| B.12 – Residencial “J”- Bloco 5 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a primeira solução de vigamento do pilotis..... | 212 |
| B.13 – Residencial “J”- Bloco 5 - segunda solução de vigamento do pilotis..... | 213 |
| B.14 – Residencial “J”- Bloco 5 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a segunda solução de vigamento do pilotis..... | 214 |
| B.15 – Residencial “J”- Bloco 4 - pavimento tipo..... | 215 |
| B.16 – Residencial “J”- Bloco 4 - garagem..... | 216 |
| B.17 – Residencial “J”- Bloco 4 - projeção do pavimento tipo sobre as garagens.. | 217 |
| B.18 – Residencial “J”- Bloco 4 - primeira solução de vigamento do pilotis..... | 218 |
| B.19 – Residencial “J”- Bloco 4 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a primeira solução de vigamento do pilotis..... | 219 |
| B.20 – Residencial “J”- Bloco 4 - segunda solução de vigamento do pilotis..... | 220 |

| | |
|--|-----|
| B.21 – Residencial “J”- Bloco 4 - superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a segunda solução de vigamento do pilotis..... | 221 |
| C.1 – Prédio “C” - Opção 1 – armação positiva das lajes..... | 223 |
| C.2 – Prédio “C” - Opção 1 – armação negativa das lajes..... | 224 |
| C.3 – Prédio “C” - Opção 1 – armação das vigas V1, V2, V3 e V4..... | 225 |
| C.4 – Prédio “C” - Opção 1 – armação das vigas V5, V6, V7 e V8..... | 226 |
| C.5 – Prédio “C” - Opção 1 – armação das vigas V9, V10, V11 e V12..... | 227 |
| C.6 – Prédio “C” - Opção 1 – armação das vigas V13, V14 e V15..... | 228 |
| C.7 – Prédio “C” - Opção 1 – armação dos pilares P1 a P6..... | 229 |
| C.8 – Prédio “C” - Opção 1 – armação dos pilares P7 a P12..... | 230 |
| C.9 – Prédio “C” - Opção 2 – armação positiva das lajes..... | 231 |
| C.10 – Prédio “C” - Opção 2 – armação negativa das lajes..... | 232 |
| C.11 – Prédio “C” - Opção 2 – armação das vigas V1, V2, V3 e V4..... | 233 |
| C.12 – Prédio “C” - Opção 2 – armação das vigas V5, V6, V7 e V8..... | 234 |
| C.13 – Prédio “C” - Opção 2 – armação das vigas V9, V10, V11 e V12..... | 235 |
| C.14 – Prédio “C” - Opção 2 – armação das vigas V13, V14 e V15..... | 236 |
| C.15 – Prédio “C” - Opção 2 – armação dos pilares P1 a P6..... | 237 |
| C.16 – Prédio “C” - Opção 2 – armação dos pilares P7 a P12..... | 238 |
| C.17 – Prédio “C” - Opção 3 – armação positiva das lajes..... | 239 |
| C.18 – Prédio “C” - Opção 3 – armação negativa das lajes..... | 240 |
| C.19 – Prédio “C” - Opção 3 – armação das vigas V1, V2, V3 e V4..... | 241 |
| C.20 – Prédio “C” - Opção 3 – armação das vigas V5, V6, V7 e V8..... | 242 |
| C.21 – Prédio “C” - Opção 3 – armação das vigas V9, V10, V11 e V12..... | 243 |
| C.22 – Prédio “C” - Opção 3 – armação das vigas V13, V14 e V15..... | 244 |
| C.23 – Prédio “C” - Opção 3 – armação dos pilares P1 a P6..... | 245 |
| C.24 – Prédio “C” - Opção 3 – armação dos pilares P7 a P12..... | 246 |
| C.25 – Prédio “C” - Opção 4 – armação positiva das lajes..... | 247 |
| C.26 – Prédio “C” - Opção 4 – armação negativa das lajes..... | 248 |
| C.27 – Prédio “C” - Opção 4 – armação das vigas V1 e V2..... | 249 |
| C.28 – Prédio “C” - Opção 4 – armação das vigas V3 e V4..... | 250 |
| C.29 – Prédio “C” - Opção 4 – armação dos pilares P1 a P6..... | 251 |
| C.30 – Prédio “C” - Opção 4 – armação dos pilares P7 a P12..... | 252 |

| | |
|--|-----|
| C.31 – Prédio “C” - Opção 5 – armação positiva das lajes..... | 253 |
| C.32 – Prédio “C” - Opção 5 – armação negativa das lajes..... | 254 |
| C.33 – Prédio “C” - Opção 5 – armação das vigas V1 e V2..... | 255 |
| C.34 – Prédio “C” - Opção 5 – armação das vigas V3, V4 e V5..... | 256 |
| C.35 – Prédio “C” - Opção 5 – armação dos pilares P1 a P6..... | 257 |
| C.36 – Prédio “C” - Opção 5 – armação dos pilares P7 a P12..... | 258 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| 1.1 – Características dos elementos utilizados por BARBOSA (2000), na modelagem numérica da parede apoiada sobre uma viga..... | 12 |
| 1.2 – Flechas máximas admitidas pelo CSTC (1980), após a instalação do componente..... | 14 |
| 3.1 – Prédio “C” – Opção 1 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 33 |
| 3.2 – Prédio “C” – Opção 2 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 48 |
| 3.3 – Prédio “C” – Opção 3 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 54 |
| 3.4 – Prédio “C” – Opção 4 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 58 |
| 3.5 – Prédio “C” – Opção 5 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 61 |
| 3.6 – Prédio “C” – Resumo dos quantitativos das várias opções..... | 73 |
| 3.7 – Prédio “C” – Quantitativos por m ² para um pavimento tipo com área de 130,80 m ² | 74 |
| 3.8 – Prédio “C” – Deslocamentos máximos para as várias opções (cm)..... | 74 |
| 3.9 – Prédio “C” – Opção 2 – Relação entre os deslocamentos verticais e os vãos das vigas da região do balanço de 2,0 metros..... | 77 |
| 3.10 – Prédio “A” – Opção 1 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 78 |
| 3.11 – Prédio “A” – Opção 2 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 92 |

| | |
|---|-----|
| 3.12 – Prédio “A” – Opção 3 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 99 |
| 3.13 – Prédio “A” – Opção 4 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 103 |
| 3.14 – Prédio “A” – Opção 5 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 106 |
| 3.15 – Prédio “A” – Resumo dos quantitativos das várias opções..... | 106 |
| 3.16 – Prédio “A” – Quantitativos por m ² para um pavimento tipo com área de 205,5 m ² | 110 |
| 3.17 – Prédio “A” – Deslocamentos máximos para as várias opções (cm)..... | 110 |
| 3.18 – Prédio “A” – Opção 2 – Relação entre os deslocamentos verticais e os vãos das vigas da região do balanço de 1,74 metros..... | 112 |
| 3.19 – Prédio “M” – Opção 1 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 121 |
| 3.20 – Prédio “M” – Opção 2 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 124 |
| 3.21 – Prédio “M” – Opção 3 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 129 |
| 3.22 – Prédio “M” – Opção 4 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 140 |
| 3.23 – Prédio “M” – Opção 5 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias..... | 143 |
| 3.24 – Prédio “M” – Resumo dos quantitativos das várias opções..... | 143 |
| 3.25 – Prédio “M” – Quantitativos por m ² para um pavimento tipo com área de 195,53 m ² | 146 |
| 3.26 – Prédio “M” – Deslocamentos máximos para as várias opções (cm)..... | 146 |
| 3.27 – Prédio “M” – Opção 2 – Relação entre os deslocamentos verticais e os vãos das vigas da região do balanço de 1,98 metros..... | 149 |
| 3.28 – Prédio “M” – Deslocamentos verticais das paredes, na região de apoio na estrutura de concreto armado..... | 155 |
| 3.29 – Prédio “M” – Tensões verticais das paredes, na região de apoio na estrutura de concreto armado..... | 167 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A – área da seção transversal do pilar

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSYS - Programa de cálculo de estruturas para elementos finitos

CAD/TQS® - *Software* para cálculo de estruturas de concreto armado

CEF – Caixa Econômica Federal

CSTC – Centre Scientifique et Technique de la Construction

d – altura útil de uma seção

DEES – Departamento de Engenharia de Estruturas

E – módulo de elasticidade do concreto

E_c – módulo de elasticidade do concreto

ELU – estado limite último

ENGVIG – fator de engastamento parcial das vigas nos pilares

E_p – Módulo de elasticidade longitudinal da parede

E_{pa} – Módulo de elasticidade longitudinal da parede

EPD – estado plano de deformação

EPT – estado plano de tensão

E_v – Módulo de elasticidade longitudinal da viga

f_{ck} – resistência característica do concreto

f_p – Resistência de prisma

f_b – flecha em uma parede, pelo CST

g – carga permanente de uma laje

G_{pa} – Módulo de elasticidade transversal da parede

h – Altura de formação do “efeito arco” na parede

H – altura da parede de alvenaria

I - momento de inércia em um pilar

I_v - Momento de inércia de uma viga

K - Rigidez relativa do sistema parede-viga segundo RIDDINGTON & STAFFORD SMITH

l - Distância entre os apoios de uma viga

L - pé-direito de um andar

L - distância entre os apoios de uma viga

PBH - Prefeitura de Belo Horizonte

p - carga total em uma laje

PAR - Programa de Arrendamento Residencial da CEF

R - Rigidez relativa do sistema parede-viga segundo DAVIES & AHMED

REDMOL - redutor do coeficiente de mola nas direções X e Y

REDMOZ - redutor do coeficiente de mola na direção Z

REDTOR - redutor de inércia à torção das barras de viga

q - carga acidental de uma laje

t_p - espessura da parede da alvenaria

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

VEC - coeficiente de correção do E da laje

x_{II} - profundidade da linha neutra no Estádio II

x_{III} - profundidade da linha neutra no Estádio III

y - flecha de uma viga

z - braço de alavanca

Δ - deslocamento diferencial das extremidades de um vão de uma viga ou parede

σ_{adm} - tensão admissível na alvenaria

1

INTRODUÇÃO

1.1 - Histórico

Tem-se observado nos últimos anos, nos escritórios de projeto, uma mudança radical nas estruturas-suporte das alvenarias estruturais dos prédios de pequeno porte, quando essas estruturas não estão situadas ao nível da fundação, mas ao nível do piso do primeiro andar.

Na década de 1980, era possível colocar pilares nas posições adequadas, de modo a se obter uma estrutura econômica e pouco deformável. Os dois prédios cujas arquiteturas estão no ANEXO A são bons exemplos disso.

No prédio chamado “SF” (FIG.A.1 a A.5), tem-se 12 vagas cobertas, circulação e manobra de veículos pelo afastamento lateral descoberto e distância relativa entre pilares variando de 2,5 a 3,0 metros. Além disso, apenas duas paredes de cada apartamento não se apóiam diretamente sobre as vigas, conforme pode ser visto no esquema do pavimento tipo com a solução de vigamento do pilotis (FIG.A.5). Tudo isso contribui para uma estrutura bastante econômica e muito pouco deformável.

No prédio chamado “G” (FIG.A.6 a A.10), tem-se também 12 vagas cobertas, com circulação e manobra de veículos pelo afastamento lateral descoberto e sob um balanço de 1,0 metro deixado na projeção de edifício. Os pilares têm distância relativa que varia de 2,5 a 3,5 metros e todas as paredes se apóiam sobre vigas. Portanto, a estrutura desse prédio é também econômica e pouco deformável, apesar da existência do balanço.

Nos últimos anos, entretanto, tem-se notado uma mudança radical nessas estruturas, em função das exigências cada vez maiores com relação às vagas de garagem. Os pilares, agora, são em número bem reduzido, apresentando grandes distâncias relativas, e raramente estão na projeção de alguma parede ou no cruzamento de vigas. Como consequência disso, várias paredes acabam tendo de se apoiar diretamente sobre as lajes, e as vigas precisam ser projetadas com seções de concreto bem superiores às que eram anteriormente utilizadas. Além disso, em muitos casos, a estrutura não fica bem distribuída, com a posição das vigas sendo determinada pela tentativa de se “buscar” o apoio dos pilares, cuja posição está totalmente condicionada pela disposição das vagas de garagem e, raramente, é adequada sob o ponto de vista estrutural. Os três prédios, cuja arquitetura está no ANEXO B, são bons exemplos disso.

No prédio chamado S-Bloco 1 (FIG.B.1 a B.7), têm-se 6,5 vagas cobertas (metade da vaga 16 está sob o Bloco 2) e a existência de vagas descobertas na região do afastamento gerou a necessidade de criar um balanço de 1,80 metros para a circulação/manobra dos carros atingir os 5,00 metros de largura mínima exigidos. Nota-se também que os pilares apresentam distâncias relativas de 4,0 a 5,0 metros. Além disso, as duas vigas transversais centrais não estão sob nenhuma parede, mas com sua posição condicionada apenas pela posição dos pilares na garagem. Conseqüentemente, ou tem-se uma estrutura com várias paredes que se apóiam diretamente sobre a laje (ver a “Primeira Solução de Vigamento do Pilotis” - FIG.B.4 e B.5) ou será necessário criar um grande número de vigas secundárias (conforme indicado na “Segunda Solução de Vigamento do Pilotis” - FIG.B.6 e B.7).

No prédio chamado J-Bloco 5 (FIG.B.8 a B.14), onde existe um pilotis completo, têm-se 15 vagas situadas sob a área do prédio (apesar das vagas 9 a 15 serem parcialmente

descobertas) e uma vaga externa (vaga 16), que está situada ao lado das vagas dos apartamentos do Bloco 6. Para não se criar um balanço de 4,0 metros (do alinhamento frontal das vagas 9 a 15 até à projeção do prédio próxima às vagas 16 a 23), que seria estruturalmente impossível, foi adotada a solução de um pergolado, colocando-se pilares entre as vagas descobertas da região do afastamento lateral para receber as vigas do prédio (ver FIG.B.9 e B.10). Percebe-se que a circulação/manobra ocorre quase totalmente sob a área coberta e vários carros acabam ficando em áreas descobertas.

Nota-se também que, nesse prédio, os pilares apresentam distâncias relativas entre 5,5 a 7,0 metros. Além disso, novamente, as duas vigas transversais centrais não estão sob nenhuma parede, mas com sua posição condicionada unicamente pela posição dos pilares na garagem (ver FIG.B.12 e B.14). Tem-se, novamente, ou uma solução com um grande número de paredes apoiando-se diretamente sobre as lajes (chamada de “Primeira solução de vigamento do pilotis” - FIG.B.11 e B.12), ou será necessário criar um grande número de vigas secundárias (conforme indicado na “Segunda solução de vigamento do pilotis” - FIG.B.13 e B.14). Percebe-se ainda que, mesmo nesta segunda hipótese, um número razoável de paredes continua a apoiar-se diretamente sobre a laje.

No prédio chamado J-Bloco 4 (FIG.B.15 a B.21), a solução é semelhante à do Bloco 5 anteriormente citado. E se nele a projeção das vigas para fora do prédio (pergolado) é menor, existe o agravante de uma enorme força cortante nas vigas transversais, logo junto a esses pilares, fruto da carga concentrada da viga externa longitudinal). Nota-se, também, que, para se criar as vagas 1, 9 e 15, o pilar frontal teve de ser recuado, o que acarretou a criação de duas vigas paralelas muito próximas (ver FIG.B.17 e B.18).

Nota-se, nesses dois prédios (J-Bloco 5 e J-Bloco 4), que as vigas transversais têm apenas um vão, o que constitui um agravante estrutural, uma vez que não se pode contar com os efeitos benéficos da continuidade para a redução do momento fletor positivo no meio do vão.

Fica bastante claro, portanto, que, em função dessas novas exigências de vagas, as estruturas hoje estão bem mais deformáveis, além de terem um custo bem maior, em

conseqüência do acréscimo no consumo de concreto e aço.

1.2 - Objetivo

Diante do exposto no item I.1, fica claro que seria de grande importância uma “Análise comparativa de deformações e consumo em estruturas de pequeno porte” como as apresentadas anteriormente. O objetivo deste trabalho, que é na linha tecnológica, consiste em analisar numericamente a estrutura-suporte das alvenarias estruturais de alguns prédios de pequeno porte com várias alternativas para o vigamento (poucas vigas, muitas vigas, sem balanços, com balanços pequenos, médios e grandes) e também uma solução sem vigamento, com as lajes apoiando-se diretamente sobre os pilares.

Para esta análise, foram escolhidos três prédios, com pavimentos tipo bem diferentes (um em forma de I, outro em forma de H e ainda outro retangular com escada enclausurada) que foram denominados como “prédio C”, “prédio A” e “prédio M”, respectivamente. O teto da garagem desses prédios, que é o pavimento suporte das alvenarias estruturais, foi analisado com as várias alternativas estruturais, empregando-se como ferramenta o CAD/TQS[®], que é um *software* utilizado nacionalmente em escritórios de projeto. Com base nos resultados obtidos, foram desenvolvidos gráficos para comparar as deformações e o consumo de material nas várias soluções de cada prédio.

Ao final, encontrada a mais deformável entre as estruturas com vigamento desses três prédios, criou-se um modelo espacial no programa ANSYS para se avaliar o efeito dos deslocamentos da estrutura-suporte sobre as tensões atuantes nas paredes que sobre ela se apóiam.

1.3 - Estado atual da arte

1.3.1 - Comentários iniciais

Como se trata de um trabalho na linha tecnológica, existe muito pouca bibliografia sobre o assunto. Optou-se por iniciar-se a revisão bibliográfica, procurando as causas

que levaram a tão grande modificação na arquitetura desses prédios de pequeno porte.

Após entrevistar alguns engenheiros e arquitetos que trabalham exclusivamente com prédios desse tipo, e analisar as orientações da Caixa Econômica Federal (CEF) em 2002, no seu Caderno de Orientações do Empreendimento - Manual Técnico de Engenharia, concluiu-se que os motivos principais foram:

- a) recessão econômica e achatamento salarial que obrigaram uma grande parte da classe média (que tem um grau de exigência muito maior) a morar nesse tipo de prédio;
- b) maiores exigências das prefeituras de várias cidades;
- c) exigências da Caixa Econômica Federal (CEF), que é o principal órgão financiador do setor.
- d) Prédios com áreas cada vez menores

O item “a” não necessita de maiores comentários, já que faz parte do dia a dia do povo brasileiro.

No item “b”, pode-se citar, como exemplo, a Prefeitura de Belo Horizonte (PBH). Nos anos 1980, ela exigia nos prédios apenas um percentual da área do terreno para ser destinado a estacionamento, sem se preocupar se essa área era adequada e tampouco com a disposição dos automóveis sobre ela. Em 1997, com o novo plano diretor, a PBH limitou o número de vagas enclausuradas a duas unidades, e passou a exigir que, nos prédios com apartamentos de até 40 m² de área, houvesse vaga para, no mínimo, 1/3 desses apartamentos; nos prédios com apartamentos entre 40 m² e 60 m² de área, teria de haver vaga para, pelo menos, 2/3 dos apartamentos; nos prédios com apartamentos com área superior a 60 m², teria de haver, pelo menos, uma vaga para cada apartamento.

Quanto ao item “c”, no Manual Técnico de Engenharia da CEF (2002), item 3.8.5.4, consta que “vagas enclausuradas deverão ser evitadas, e que sua aceitação será em função do padrão construtivo e da localização do empreendimento, permitindo-se, no máximo, o enclausuramento de uma vaga, desde que seus proprietários residam no

mesmo pavimento. Para o programa PAR*, somente serão aceitas vagas livres”. Além disso, no ANEXO V desse mesmo Manual, no item “Vagas de Garagem”, está escrito:

a) Quantidade

- Admite-se 50% do número de vagas, quando a área privativa real da unidade habitacional for de até 40,0 m²; entre 40,0 m² e 60,0 m², deve ser previsto 2/3 do número de vagas.
- Acima de 60,0 m², é necessário 1 vaga por unidade autônoma, sendo que a aceitação de vagas presas será em função do padrão construtivo e da localização do empreendimento.
- No caso do PAR, somente serão aceitas vagas livres.

b) Dimensões

- Mínima de 2,30 m x 4,50 m = 10,35 m².
- As vagas devem estar demarcadas com afastamento mínimo de 0,50 m das edificações (paredes sem aberturas) e 0,90 m (paredes com abertura). Deverá ser garantida circulação livre, mínima de 1,20 m, para acesso de pedestres aos blocos e equipamentos comuns.

c) Enclausuramento

- Máximo de 1 vaga, desde que seus proprietários residam no mesmo pavimento.
- Para o programa PAR, exige-se vagas livres.

d) Acessos

- As vagas dos apartamentos do 4º pavimento devem estar localizadas no nível do pavimento térreo.

e) Vagas de garagem / Áreas de manobras

- Larguras mínimas:
 - 5,00 m, quando o estacionamento for a 90 graus.
 - 4,00 m, quando o estacionamento for a 60 graus.
 - 3,50 m, quando o estacionamento for a 45 graus.
 - 3,00 m, quando o estacionamento for a 30 graus ou menos.

*Programa PAR é o “Programa de Arrendamento Residencial” da Caixa Econômica Federal (CEF), lançado para atender, exclusivamente, à necessidade de moradia da

população de baixa renda dos grandes centros urbanos.

Pode-se concluir, pelo anteriormente exposto, que essas novas condições tendem a permanecer; portanto, é importante avaliar as conseqüências delas sobre as estruturas dos prédios em questão.

1.3.2 - Pavimento de concreto armado, constituído pelas lajes, vigas e pilares de apoio

1.3.2.1 - Carregamento

Serão adotadas as cargas permanentes e acidentais da NBR-6120 (1980) da ABNT.

1.3.2.2 - *Software* a ser utilizado na análise

Optou-se por utilizar nas análises os Sistemas Computacionais de Engenharia Estrutural CAD/TQS[®] (2000), que são um conjunto de ferramentas para cálculo, dimensionamento, detalhamento e desenho de estruturas de concreto armado e protendido. A escolha recaiu sobre esse sistema por vários motivos, podendo-se destacar entre eles:

- Trata-se de sistemas utilizados por vários escritórios de projeto há mais de 15 anos. Sua confiabilidade, portanto, é garantida através das milhares de instalações dos sistemas que, diariamente, estão sendo utilizados na tarefa de elaboração de projetos estruturais.
- Esse *software* permite que os dados de entrada, relativos à geometria e ao carregamento do pavimento, sejam fornecidos graficamente. Com esses dados, já se pode fazer uma distribuição de ações das lajes para as vigas e destas para os pilares.
- Os sistemas CAD/TQS[®] são produtos feitos de acordo com as técnicas e os procedimentos usuais da engenharia estrutural brasileira, por terem sido desenvolvidos no Brasil, e possuem uma equipe técnica de alta qualidade para dar suporte técnico aos usuários do *software*.
- Estão disponíveis no Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES), da Escola de Engenharia da UFMG, para serem utilizados em dissertações de mestrado.

1.3.3 - Interação parede-viga

Para orientar a análise das deformações da alvenaria apoiada na estrutura-suporte, estudou-se a dissertação “Ação conjunta parede-viga na alvenaria estrutural”, de TOMAZELA (1995) e a dissertação “Estudo da interação de paredes de alvenaria com vigas de concreto armado”, de BARBOSA (2000), que tratam com profundidade do assunto.

TOMAZELA (1995) considera que, no desenvolvimento dos projetos, é razoável considerar que a alvenaria se comporta como um material elástico-linear, e afirma que os módulos de elasticidade longitudinal e transversal dependem das características do bloco e da argamassa. Sugere que, como estimativa, se adote os valores da NBR-10837 (1989), referente a blocos vazados de concreto, representados nas equações abaixo:

$$E_{pa} = 800 f_p \quad (1.1)$$

$$G_{pa} = 400 f_p \quad (1.2)$$

sendo, f_p a resistência do prisma

E_{pa} – Módulo de elasticidade longitudinal da parede

G_{pa} – Módulo de elasticidade transversal da parede.

Ainda segundo o mesmo autor, o “efeito arco” nas paredes fica evidente e esse arco, para uma parede colocada sobre uma viga bi-apoiada de vão “ ℓ ”, forma-se na região inferior de altura $h = 0,70 \ell$. Toda a carga aplicada ou peso próprio que estiver acima da região de formação do arco pode ser considerada simplesmente como uma carga uniformemente distribuída, atuando sobre o trecho inferior de altura $h = 0,7 \ell$ (ver FIG. 1.1 que foi retirada de BARBOSA (2000)). Comenta ainda TOMAZELA (1995) que o efeito arco produz uma concentração de tensões que pode chegar a seis vezes a tensão normal vertical média, e também uma redução do momento fletor na viga que pode ser de até dez vezes. Esses valores dependem da rigidez relativa entre a parede e a viga. Deve-se notar também que, em virtude do efeito arco, a viga é solicitada por uma força

normal de tração e que um aumento substancial da rigidez da viga provoca uma significativa alteração nesses valores.

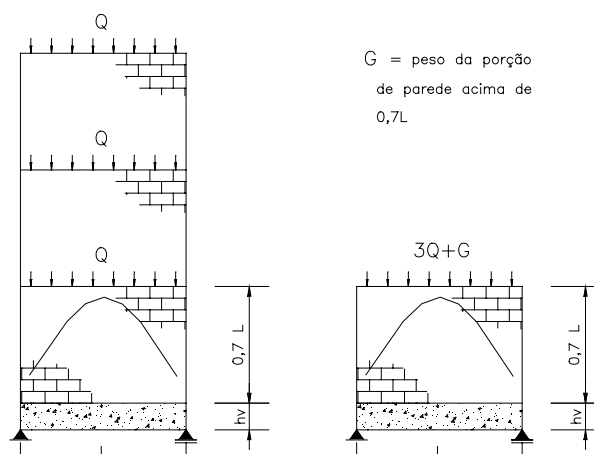


FIGURA 1.1 – Dois sistemas parede-viga com carregamento equivalente

Com o aumento da rigidez da viga de apoio, tem-se ainda um aumento do comprimento de contato para as tensões normais verticais e cisalhantes na interface parede-viga, alterando os valores dos esforços solicitantes na viga e das tensões na base da parede.

BARBOSA (2000), em seu trabalho, dá grande ênfase à não linearidade de contato na interface parede-viga. Nele é citado um parâmetro chamado “rigidez relativa”, que, apesar de não possuir um valor exato e de ter um conceito bem mais qualitativo do que quantitativo, é fundamental para fornecer indicações sobre a configuração deformada do sistema parede-viga.

Segundo RIDDINGTON & STAFFORD SMITH (1978) *apud* BARBOSA (2000) e DAVIES & AHMED (1977) *apud* BARBOSA (2000), essa rigidez relativa é dada, respectivamente, pelas EQ.1.1 e EQ.1.2 abaixo:

$$K = \sqrt[4]{\frac{E_p \cdot t_p \cdot L^3}{E_v \cdot I_v}} \quad (1.3)$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p \cdot t_p \cdot H^3}{E_v \cdot I_v}} \quad (1.4)$$

Nessas equações:

- E_p e E_v são os módulos de elasticidade longitudinais da parede e da viga, respectivamente;
- I_v é o momento de inércia da viga de apoio;
- H e t_p são, respectivamente, a altura e a espessura da parede;
- L é a distância entre apoios.

Apesar de não serem idênticos, os valores obtidos através desses dois conceitos de rigidez relativa têm a mesma função: fornecer indicações sobre a configuração deformada do sistema parede-viga. Observa-se que valores de rigidez relativa altos implicam vigas flexíveis em relação às paredes. Assim temos que, nos sistemas que apresentam vigas flexíveis, as zonas de separação entre a alvenaria e a viga são maiores. Finalmente, quanto maior a zona de separação, mais acentuado será o efeito arco, maiores serão as concentrações de tensões na parede e menor será a parcela de carga vertical transmitida para a viga no meio do vão.

Ao contrário, menores valores de rigidez relativa resultam em vigas rígidas em relação às paredes. Nesses casos, as zonas de separação são pequenas e resultam em menores concentrações de tensões nos apoios. Observa-se que, quanto menor a rigidez relativa, maior será o valor do momento máximo no meio do vão. Em certos casos, esse valor pode estar bem próximo daquele que seria obtido, caso a carga estivesse uniformemente aplicada sobre a viga.

BARBOSA (2000) desenvolveu seus estudos baseado no comportamento não linear, provocado pela não linearidade de contato, no qual esse comportamento, em virtude das mudanças nas condições de contorno durante o carregamento. Essas mudanças podem ocorrer em duas situações:

a) quando duas superfícies perdem contato entre elas (o que ocorre na região central da

superfície de contato viga-parede).

- b)** quando duas superfícies deslizam uma em relação à outra (o que pode ocorrer em pontos das regiões extremas da superfície contato viga-parede, próximo aos apoios).

Em sua modelagem numérica, a alvenaria é considerada como material homogêneo, ou seja, não há discretização diferenciada para blocos e argamassas. A alvenaria e o concreto armado são considerados como material isotrópico, na utilização do programa ANSYS 5.5, que fornece várias opções de elementos para discretização da parede e da viga, além de uma série de elementos de contato.

BARBOSA (2000), na sua modelagem numérica para as estruturas planas, definiu cinco modelos que utilizavam os elementos PLANE42 e SOLID45 para a discretização da parede e os elementos BEAM3, PLANE42 e SOLID45 para a discretização da viga, além dos elementos que foram utilizados para representar o contato e que não se pretende citar aqui, em função das conclusões que serão apresentadas mais à frente. As características desses elementos estão indicadas na TAB.1.1

Foram estudadas, também, três malhas com discretizações diferentes, sendo uma delas mais refinada na região inferior da parede e na região próxima ao apoio da viga. Em vista da pouca diferença observada nos resultados dos modelos com essas três malhas, BARBOSA (2000) definiu pela adoção da malha mais simples, que continha um número menor de elementos e, portanto, tornou mais simples a geração dos modelos. Comparando os modelos processados para a primeira parede, constatou-se que o modelo numérico que utilizava elemento de chapa para a parede e elemento de barra para a viga apresentou bons resultados. Conseqüentemente, esse foi o modelo utilizado para as demais paredes, sendo que foram consideradas duas hipóteses: uma com elementos de contato; outra, sem elementos de contato.

TABELA 1.1 - Características dos elementos utilizados por BARBOSA (2000), na modelagem numérica da parede apoiada sobre uma viga

| ELEMENTO | CARACTERÍSTICAS |
|----------|--|
| BEAM3 | <ul style="list-style-type: none"> a) Elemento de barra 2D b) Tem resistência à tração, compressão e flexão. c) Possui dois nós com três graus de liberdade cada um: U_x, U_y e R_z. d) Tensões são determinadas para linha neutra localizada na metade da altura do elemento |
| PLANE42 | <ul style="list-style-type: none"> a) Elemento de chapa 2D b) Pode ser utilizado como elemento plano (EPT ou EPD) ou elemento axissimétrico c) Possui quatro nós com dois graus de liberdade cada um: U_x e U_y. |
| SOLID45 | <ul style="list-style-type: none"> a) Elemento sólido 3D b) Possui oito nós com três graus de liberdade cada um: U_x, U_y e U_z. c) As direções das tensões e das deformações são paralelas às direções do sistema local de coordenadas |

BARBOSA (2000) analisou também em seu trabalho o comportamento de “Paredes sobre pavimentos de concreto”, estudando casos completos de edifícios de alvenaria estrutural sobre pavimentos de concreto armado. Dessa forma, pôde comparar, para casos reais de edificações, os resultados obtidos por meio de um procedimento tradicional e mediante técnicas de modelagem mais sofisticada no programa ANSYS. Foram estudados dois modelos para cada edifício: no Modelo 1, o carregamento foi aplicado no topo da parede, para se analisar os efeitos da estrutura considerando o efeito arco; no Modelo 2, o carregamento foi aplicado diretamente sobre a viga, como é o procedimento tradicional.

Nesses estudos, não foram utilizados elementos de contato, uma vez que, “nos capítulos anteriores, os modelos numéricos que não utilizaram elementos de contato apresentaram

resultados semelhantes àqueles nos quais foram inseridos elementos de contato”. Os elementos do programa ANSYS, utilizados na modelagem, foram SHELL63 para as paredes e BEAM4 para as vigas. O SHELL63 é um elemento de casca destinado às estruturas tridimensionais, e é definido por quatro nós com seis graus de liberdade por nó (translações nas direções X, Y e Z e rotações em torno dos eixos X, Y e Z). O BEAM4 é semelhante ao BEAM3, já mencionado anteriormente, e destina-se a estruturas tridimensionais, enquanto o elemento BEAM3 é utilizado para modelar estruturas bidimensionais. O BEAM4 possui dois nós com seis graus de liberdade por nó (translações nas direções X, Y e Z e rotações em torno dos eixos X, Y e Z).

No final de seu trabalho, BARBOSA (2000) concluiu:

Do que se encontra mencionado nos parágrafos anteriores, pode-se concluir que este procedimento é bastante interessante para ser utilizado na análise de pavimentos de pilotis de concreto armado sob estruturas de alvenaria estrutural. Trata-se de um processo relativamente seguro, pois todas as particularidades do sistema estrutural resultante são consideradas e, ao mesmo tempo, acaba produzindo alguns resultados que podem levar a uma economia significativa de materiais para a estrutura.

Entretanto, é importante ressaltar que não são apenas os esforços solicitantes nas peças de concreto, bem menores que os obtidos pelo procedimento tradicional, que devem ser levados em conta. Também a concentração de tensões sobre a parede precisa ser considerada, ou então este procedimento perde a consistência. Obviamente, o alívio produzido sobre as vigas vem de uma sobrecarga sobre as paredes, e os dois aspectos da questão devem ser levados em consideração no dimensionamento.

1.3.4 - Deformações nas estruturas de concreto armado

Uma vez que serão analisadas as deformações nas vigas e nas lajes do andar que suporta as alvenarias estruturais, estudaram-se as limitações para essas deformações.

THOMAZ (1989) cita que “os efeitos mais nefastos de deformações da estrutura de concreto são aqueles advindos da deflexão de vigas e lajes. Tais deflexões poderão assumir valores bastante significativos, principalmente pela deformação lenta e pela fissuração do concreto na região tracionada da peça. Para prevenir tais efeitos, as flechas dos componentes estruturais devem ser limitadas”. Afirma ainda que “em termos de limitação das deflexões, o Centre Scientifique et technique de la Construction - CSTC (1980) faz exigências distintas em função da natureza do componente apoiado

sobre viga ou laje, considerando a flecha “ f_b ” que se manifesta após a instalação do componente (montagem da parede, assentamento do piso etc.)”. O mesmo autor apresenta uma tabela com as flechas máximas “ f_b ” estipuladas pelo CSTC (1980), considerando inclusive a parcela resultante da deformação lenta do concreto, que é transcrita neste trabalho como TAB.1.2. Nessa tabela, essas flechas estão indicadas na coluna $f_{b,max}$ em frações do vão da parede.

Tabela 1.2 - Flechas máximas admitidas pelo CSTC (1980), após a instalação do componente

| Natureza do componente | | $f_{b,max}$ |
|--|---|-------------|
| Alvenaria ou painéis pré-fabricados, apoiados sobre viga ou laje | Parede com aberturas | 1/1000 |
| | Parede sem aberturas | 1/500 |
| | Paredes com aberturas, com detalhes apropriados | 1/500 |
| Caixilhos envidraçados sob viga ou laje | sem possibilidade de movimento | 1/1000 |
| | com possibilidade de movimento | 1/500 |
| Revestimento de piso, assentado sobre laje | piso rígido (cerâmica etc.) | 1/500 |
| | piso flexível (carpete etc.) | 1/250 |
| Revestimento de forro | Argamassa rígida | 1/350 |
| | Revestimento flexível, forro falso | 1/250 |
| Lajes de cobertura | | 1/250 |
| Vigas que suportam pontes rolantes | | 1/500 |

Essa tabela, que é indicada para alvenarias não estruturais e somente para as cargas colocadas após a sua construção, pode ser considerada neste caso uma vez que, sendo a alvenaria estrutural, praticamente todas as cargas ocorrem após a sua execução.

1.4 - Descrição sumária do trabalho

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos: introdução, metodologia, aplicações e considerações finais.

No primeiro capítulo, têm-se um histórico, os objetivos, a revisão bibliográfica para a definição do estado atual da arte e esta descrição sumária do trabalho.

No segundo capítulo, apresenta-se a metodologia do trabalho, com uma breve descrição do *software* CAD/TQS[®] (2000), e a descrição de alguns critérios e parâmetros adotados no processamento dos exemplos.

No terceiro capítulo, são apresentados os três prédios com as várias soluções estruturais consideradas, e tabelas e gráficos com as análises das deformações e do consumo de material. É também exibido, para a estrutura com vigamento que apresentou maior deformação, o modelo espacial completo, com paredes de alvenaria e pavimentos de concreto armado. Nesse modelo, são analisados os deslocamentos e as tensões na alvenaria.

No quarto capítulo, são apresentadas as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros.

Nos ANEXOS “A” e “B”, têm-se, respectivamente, modelos de prédios da década de 1980 e modelos de prédios dos anos 2000/2001.

No anexo “C”, têm-se as armações das vigas, lajes e pilares do prédio “C”. Para não tornar este trabalho muito extenso, as armações dos prédios “A” e “M” não foram nele anexadas.

2

METODOLOGIA

2.1 - Pavimento de concreto armado, constituído pelas lajes, vigas e pilares de apoio

2.1.1 - Carregamento

Na análise do pavimento de concreto armado, o carregamento utilizado foi baseado na NBR-6120 (1980), a saber:

a) Cargas permanentes

a.1) Concreto armado

Para o concreto armado foi utilizado o peso específico de 25 kN/m^3 , que é o valor sugerido na TAB.1 - Peso Específico dos Materiais da referida Norma, que deverá ser utilizado, conforme o item 2.1.3 da NBR 6120 (1980) “na falta de determinação experimental”.

a.2) Alvenaria

Para os blocos da parede de alvenaria, foram utilizados valores obtidos experimentalmente com blocos de 14 cm x 19 cm x 39 cm de três cerâmicas diferentes, que serão chamadas aqui de cerâmicas 1, 2 e 3, que pesaram em média, respectivamente, 0,088 kN, 0,0625 kN e 0,07 kN (peso médio = 0,0735 kN). Admitindo-se um revestimento médio de 1,5 cm em cada face, e uma espessura de 1,5 cm para a argamassa de assentamento nas juntas verticais, tem-se:

- Volume externo do elemento de parede = $0,17 \times 0,205 \times 0,39 = 0,013592 m^3$
- Volume do bloco cerâmico = $0,14 \times 0,19 \times 0,39 = 0,010374 m^3$
- Volume de argamassa de revestimento + assentamento = $0,003218 m^3$

Adotando-se 20 kN/m^3 para o peso específico da argamassa, que é um valor médio entre os pesos específicos indicados na TAB.1 da NBR-6120 (1980) para a argamassa de cal, cimento e areia (19 kN/m^3) e para a argamassa de cimento e areia (21 kN/m^3), tem-se então um peso de argamassa do elemento de parede de $0,003218 \text{ m}^3 \times 20 \text{ kN/m}^3 = 0,06435 \text{ kN}$. Somando-se esse valor ao peso médio do bloco cerâmico de 0,0735 kN, tem-se o peso médio do elemento da parede de 0,1379 kN, num volume de $0,013592 \text{ m}^3$, resultando um peso específico médio para a parede de $10,14 \text{ kN/m}^3$. Entretanto, se, em vez do peso médio do bloco das três cerâmicas, fosse utilizado o peso do bloco da cerâmica 1 (0,088 kN), que foi o mais pesado entre os pesquisados, o peso da unidade seria de 0,15235 kN, resultando num peso específico para a parede de $11,21 \text{ kN/m}^3$.

Estudos similares, feitos para diferentes blocos de concreto, resultaram em valores próximos aos encontrados para os blocos cerâmicos. Dessa forma, optou-se então por adotar o peso específico de 13 kN/m^3 para as alvenarias, que é o indicado na TAB.1 da NBR-6120 (1980), é utilizado pela maioria dos escritórios de projeto e é superior aos valores obtidos experimentalmente.

a.3) Revestimento do piso

Na prática, adota-se um valor entre $0,5 \text{ kN/m}^2$ e 1 kN/m^2 para peso do revestimento sobre as lajes de piso.

Tanto ALBUQUERQUE (1999) quanto SILVA (2002) adotaram em suas dissertações esse mesmo valor de 1 kN/m^2 para o peso do revestimento sobre as lajes de piso. Optou-se, portanto, por utilizar este valor.

b) Cargas acidentais

Para as cargas acidentais verticais, a NBR-6120 (1980), em sua TAB.2, item 2.2.1.2, indica o valor de 2 kN/m^2 para alguns cômodos e $1,5 \text{ kN/m}^2$ para outros. Para simplificar a descida de cargas, foi utilizado o valor de $2,0 \text{ KN/m}^2$ para todos os cômodos. Os prédios não foram analisados para a carga acidental do vento, visto que ela, normalmente, não é representativa na análise dessas edificações, em função de sua pequena altura (quatro pavimentos), de sua forma e dimensões em planta, e, ainda, do grande número de paredes internas.

c) Outras ações

Não foram consideradas, nesta análise, as chamadas “ações permanentes indiretas”, que são constituídas pelas deformações impostas por:

- retração do concreto
- fluência do concreto
- deslocamentos de apoio
- imperfeições geométricas

2.1.2 - CAD/TQS[®]

“Os sistemas CAD/TQS são um conjunto de ferramentas para cálculo, dimensionamento, detalhamento e desenho de estruturas de concreto armado”, conforme manuais CAD/TQS[®] (2000). Eles permitem que o projetista controle, por

meio de uma parametrização, vários critérios de cálculo, dimensionamento, detalhamento e desenho. Neste trabalho, será utilizada a versão CAD/TQS 8.5.11, Plataforma WINDOWS.

Antes de iniciar-se o processamento dos exemplos desta dissertação, foi criada uma “pasta de critérios de projeto”, parametrizando o *software* de acordo com as diretrizes que se pretendeu tomar. Algumas dessas diretrizes estão citadas neste capítulo, a título de exemplo.

2.1.3 - Exemplos processados

Foram criados três prédios - denominados prédio “C”, prédio “A” e prédio “M”- para serem analisados como exemplos deste trabalho. Em cada um deles, foram criadas três soluções de garagem. Na primeira, algumas vigas têm balanços da ordem de 1,0 metro; na segunda, algumas vigas têm balanços da ordem de 2,0 metros, e, na terceira, as vigas não têm balanços. Para cada um dos prédios, foi mantido o número de pilares nas três soluções, de modo a possibilitar uma avaliação comparativa entre elas.

Foram então processadas, para cada prédio, cinco opções estruturais, a saber:

- **Opção 1** - Uma solução estrutural convencional com vigamento com balanços da ordem de 1 metro.
- **Opção 2** - Uma solução estrutural convencional com vigamento com balanços da ordem de 2 metros.
- **Opção 3** - Uma solução estrutural convencional com vigamento sem balanços.
- **Opção 4** - Uma solução estrutural com vigas apenas no perímetro, lajes lisas maciças e paredes que descarregam diretamente sobre essas lajes.
- **Opção 5** - Uma solução estrutural com poucas vigas centrais ou intermediárias e ainda com vigas no perímetro, lajes maciças e paredes que descarregam diretamente sobre essas lajes.

Para o prédio “C”, que foi o primeiro a ser analisado, foram processadas ainda outras duas opções, chamadas de “Opção 6” e “Opção 7”, que são análogas à “Opção 4” e à “Opção 5”, respectivamente, mas com laje nervurada com forma de polipropileno.

Nestas opções, todas as paredes foram consideradas estruturais, por ser essa a solução mais adotada na prática quando se procura velocidade e facilidade no controle da execução da obra. Considerando-se eventualmente algumas paredes não estruturais, isto acarretaria um aumento das tensões verticais nas outras paredes, além de exigir um cuidado maior na sua execução para garantir que elas realmente não recebam cargas.

2.1.4 - Modelos estruturais adotados na análise

Em todas as análises feitas, foi considerado o comportamento elástico linear da estrutura do pavimento.

a) Modelo convencional ou simplificado

É o modelo mais utilizado no cálculo de edificações nos escritórios de projeto. Neste modelo, considera-se que as lajes se apóiam nas vigas, que são consideradas como apoios rígidos. Essas vigas, por sua vez, apóiam-se em outras vigas e/ou pilares. As cargas das lajes são distribuídas para o contorno, dividindo-se a laje em áreas delimitadas por linhas de ruptura semelhantes a um diagrama de telhado. As cargas distribuídas na laje vão para o trecho da viga ou pilar do contorno da laje proporcionalmente à área associada ao trecho. Admite-se que essas reações estejam uniformemente distribuídas ao longo dos respectivos apoios.

b) Modelo de grelha

Foram utilizados dois modelos de grelha. O primeiro (Modelo b.1) foi de uma grelha constituída apenas pelas vigas, sem as lajes, apoiadas em pilares indeformáveis. As cargas das lajes sobre as vigas foram obtidas pelo processo simplificado citado no item da alínea a) (Modelo convencional ou simplificado). Este modelo foi utilizado nas

Opções 1 a 3 de cada um dos três exemplos analisados, para obter os deslocamentos das vigas trabalhando isoladamente.

O segundo modelo (Modelo b.2) foi de uma grelha de vigas e lajes planas discretizadas em barras, com a placa sendo substituída por uma malha equivalente de barras. Este modelo foi utilizado nas Opções 1 a 5 de cada um dos três exemplos analisados, para se obter os isovalores dos deslocamentos para as lajes e vigas trabalhando em conjunto. Foram adotadas, nas discretizações, as malhas com as dimensões abaixo relacionadas:

- Prédio “C” - Opções 1 a 5 - 50 cm.
- Prédio “A” - Opções 1 a 3 - 50 cm.
Opções 4 e 5 - 35 cm.
- Prédio “M” - Opções 1 a 3 - 50 cm.
Opção 4 - 35 cm.
Opção 5 - 60 cm.

Este segundo modelo de grelha foi também utilizado nas Opções 6 e 7 do prédio C, nas quais foi adotada uma laje nervurada com fôrma de polipropileno. Nesse caso, o espaçamento das nervuras, que era de 90 cm, determinou a discretização da laje.

Nas análises de todas essas grelhas, foi considerado apenas o modelo “grelha eixo”, no qual se considera o apoio das barras da grelha nos eixos dos pilares, uma vez que PEREZ (1999), após vários estudos e análises, concluiu que “em edifícios de menor porte, onde os pilares possuem dimensões menores, o modelo grelha-eixo conduzirá a resultados muito próximos dos obtidos no modelo grelha-face”.

Alguns dos critérios utilizados na parametrização desses modelos estão citados no item 2.1.5.

2.1.5 - Parametrização

Os sistemas CAD/TQS[®] permitem que se defina, por meio de uma parametrização, critérios de cálculo, dimensionamento e detalhamento da estrutura. Com isso, consegue-

se que os modelos adotados sejam controlados pelo engenheiro, de modo a representar mais facilmente a situação que ele imagina ser a ideal. Serão citados a seguir alguns desses critérios adotados, a título de exemplo.

a) Rigidez dos apoios

a.1) Direções X e Y

Os coeficientes de mola do pilar nas direções X e Y, que ficam no plano do pavimento, são calculados pelo CAD/TQS[®] (2000), conforme GRELHA-TQS - Manual de Critérios

de Projeto, folha 7, item 2.2.1, através da expressão $\frac{4xE_xI}{L_xREDMOL}$, em que:

- E é o módulo de elasticidade do concreto.
- I é o momento de inércia do pilar na direção considerada.
- L é o pé-direito do piso
- REDMOL é o redutor do coeficiente de mola, a ser definido.

Por *default*, o *software* assume REDMOL=4. Entretanto, após algumas análises e seguindo a recomendação de SILVA (2002), adotou-se o valor de 10, já que, ao se adotar REDMOL=4, obtém-se momentos exagerados entre vigas e pilares.

a.2) Direção Z

O coeficiente de mola do pilar na direção Z, que é a direção vertical, é calculado no item 2.2.2, folha 8, do mesmo Manual citado acima, através da expressão

$\frac{E_xA}{L_xREDMOZ}$, em que:

- E é o módulo de elasticidade do concreto
- A é a área da seção do pilar
- L é o pé-direito do piso
- REDMOZ é o redutor do coeficiente de mola na direção Z.

Foi adotado o valor de $REDMOZ = 0$, para que os pilares ficassem indeslocáveis axialmente e conseqüentemente se obtivessem, nos exemplos, os valores dos deslocamentos provocados apenas pela deformação do pavimento.

b) Tipo de apoio

Dos quatro tipos de apoio que o *software* admite, conforme CAD/TQS[®] (2000) - GRELHA/TQS - Manual de Critérios de Projeto, item 2.2.4, página 8, optou-se pelo “Apoio Elástico Independente”, no qual cada viga tem um apoio independente no pilar, definido com um coeficiente de mola. Isso fica melhor esclarecido no item 2.6.4, página 21 do CAD/TQS[®] - FORMAS - Interface e processamento de grelhas, em que se mostra a diferença do apoio elástico contínuo (FIG.2.1) para o apoio elástico independente (FIG.2.2).

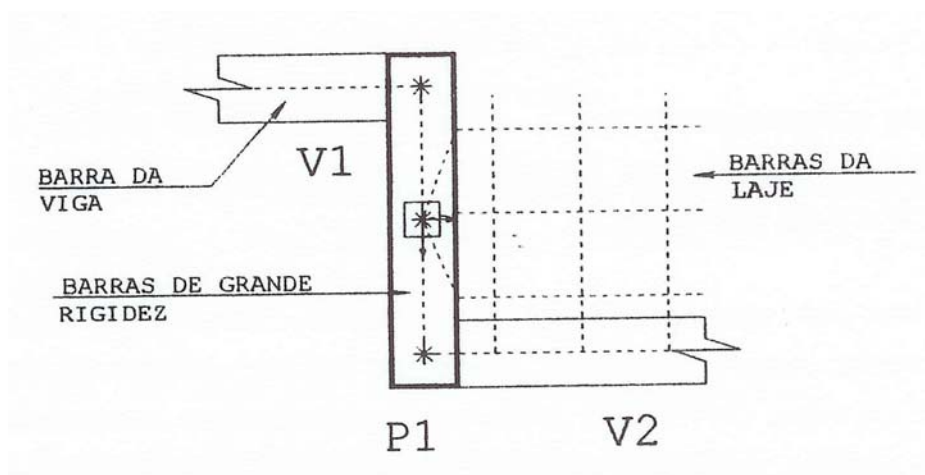


FIGURA 2.1 – Apoio elástico contínuo

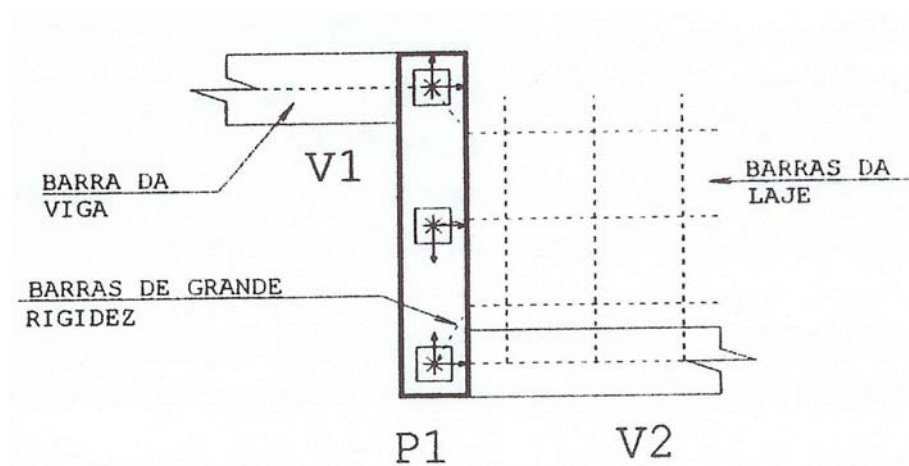


FIGURA 2.2 – Apoio elástico independente

Enquanto no apoio elástico contínuo o momento da Viga V1 se equilibrará com o da Viga V2, em virtude da ligação rígida de ambos com o centro de gravidade do pilar P1, no apoio elástico independente cada viga terá a sua própria restrição de apoio, com o sistema local do nó na mesma direção da viga e com o momento de inércia IY calculado como se as vigas fossem apoiadas em pilares independentes.

c) Inércia das vigas

- As vigas, quando possível, foram consideradas como vigas T, para o cálculo dos deslocamentos.
- CAD/TQS[®] (2000), GRELHA-TQS - Manual de Critérios de Projeto, em sua folha 9, item 2.3.3, define o fator ENGVIG como sendo um fator de engastamento parcial para todos os apoios de vigas não contíguas a balanços. Esse fator varia de zero (articulação) a 1 (engastamento) e por ele é multiplicado o momento negativo no apoio. Após alguns testes, optou-se por utilizar ENGVIG=1, o que significa que não será plastificado o momento negativo no apoio.
- O mesmo Manual, no item 2.3.2, folha 9, define REDTOR como sendo um redutor de inércia à torção das barras de viga. Essas barras têm a sua inércia à torção teórica dividida pelo fator REDTOR. Após alguns testes, optou-se por considerar REDTOR=3, que é um valor normalmente utilizado para se reduzir a rigidez à torção de barras de concreto armado fissuradas.

d) Plastificações

d.1) Divisor de torção

Quando se substitui a placa da laje por uma malha de vigas equivalentes, tem-se de definir o “divisor de torção”, pelo qual a inércia à torção teórica das barras de laje é dividida. O Manual de Critérios de Projeto do CAD/TQS[®], citado nos itens anteriores, em sua página 35, item 5.3.1, informa que, por *default*, a inércia à torção teórica das barras é dividida por 100. Cita, também, que se pode conseguir resultados mais próximos do modelo de elementos finitos, adotando-se para esse divisor valores entre 2

e 4. Após alguns testes, optou-se por adotar esse divisor igual a 3, que é o mesmo valor adotado para as vigas.

d.2) Plastificação sobre pilares internos

Para os modelos da Opção 4 de cada prédio, nos quais a laje se apóia diretamente sobre os pilares internos, utilizou-se uma plastificação sobre esses pilares. Este é um procedimento muito utilizado na prática para se reduzir os momentos negativos que ocorrem sobre tais pilares.

O mesmo Manual de Critério de Projeto, em sua página 36, item 5.3.3, informa que dois tipos de controle são possíveis: a diminuição da rigidez do capitel e a plastificação das barras que chegam ao pilar interno. Cita ainda, que “somente a plastificação do encontro com o pilar não é suficiente no apoio, pois, dependendo da discretização, poucas barras encontrarão o pilar; plastificando-se também a região do capitel, teremos uma diminuição de momentos mais uniforme”, e também que “a determinação dos coeficientes para obter uma porcentagem exata de plastificação não é possível. Assim, o engenheiro deverá obter sensibilidade da diminuição através de tentativas”.

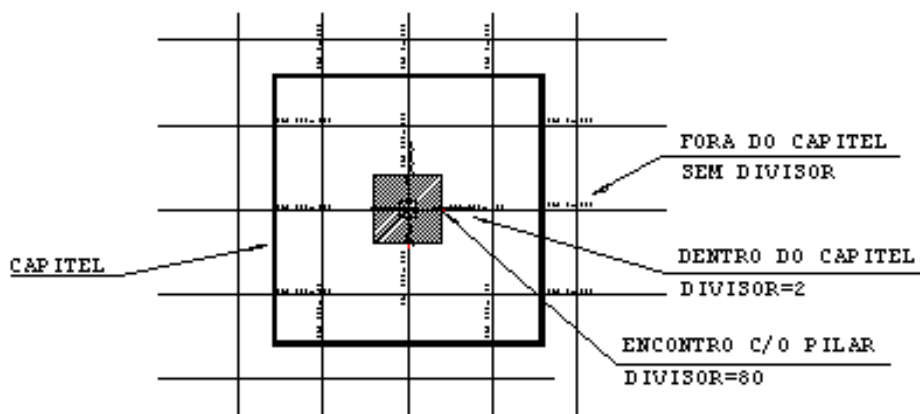


FIGURA 2.3 – Exemplo de plastificação sobre pilar interno

Na FIG.2.3 tem-se um exemplo desse tipo de plastificação. Neste exemplo, o divisor de inércia à flexão das barras do capitel foi considerado igual a 2, e o divisor da inércia à flexão no apoio sobre pilar intermediário foi considerado igual a 40. Como a plastificação no encontro do pilar é multiplicada pela plastificação do capitel, o divisor

final no encontro com o pilar foi de 80. Nos exemplos processados neste trabalho, optou-se, após vários testes, por adotar o divisor de inércia à flexão das barras internas do capitel igual a 15 e o divisor de inércia à flexão no apoio sobre o pilar intermediário igual a 40.

e) Módulo de elasticidade

Utilizando-se a parametrização permitida pelo CAD/TQS[®] (2000) para as grelhas, é possível simular a deformação lenta por meio de combinações adequadas dos carregamentos.

e.1) Lajes

Para as lajes, SILVA (2002) demonstra em sua dissertação que, conforme a NBR-6118 (1980), as flechas das lajes, no tempo infinito, podem ser calculadas, utilizando-se um carregamento

$$p_{\infty} = 2g + 0,7q, \quad (2.1)$$

em que g é a carga permanente e q a carga acidental. Em vez de trabalhar com esse carregamento, o artifício que se usa é dividir o valor do módulo de deformação longitudinal do concreto pela expressão:

$$\frac{2g + 0,7q}{g + q} \quad (2.2)$$

Com lajes de 10 cm de espessura (peso próprio de 2 kN/m²), revestimento de 1,0 kN/m² e sobrecarga de 2,0 kN/m², tem-se, então, $g = 3$ kN/m², $p = 2$ kN/m² e, conseqüentemente, a equação 2.2 dá como resultado o valor 1,48.

Usando-se o módulo de elasticidade secante do concreto como 0,9 do módulo na origem, conforme NBR-6118 (1980), obtém-se para $f_{ck} = 20$ MPa um $E = 28795$ MPa, que, dividido pelo valor de 1,48 encontrado acima, resulta no E_c a ser adotado de 19456,23 MPa.

O coeficiente VEC, definido no CAD/TQS[®] (2000) - Manual de Critérios de Projeto do CAD/Lajes, no item 1.33, para corrigir o E da laje, é:

$$VEC = \frac{E}{\sqrt{f_{cj}}}, \text{ em kgf/cm}^2, \quad (2.3)$$

em que f_{cj} , para efeito do cálculo das deformações, pode ser adotado como sendo $f_{ck} + 35 \text{ kgf/cm}^2$. Logo, transformando-se o E encontrado para a unidade acima, tem-se:

$$VEC = 12692$$

e.2) Vigas

Calculando-se os deslocamentos nas vigas, conforme item 4.2.3.1 da NBR-6118 (1980), que considera o Estádio II e as ações aplicadas logo após o término da construção, tem-se, segundo SILVA (2002), a flecha final dada por

$$y_{\infty} = y_{\infty}^s + y_{\infty}^q = \left(1 + 2 \frac{x_{II}}{d}\right) y_{\infty}^s + 0.7 y_{\infty}^q, \quad (2.4)$$

em que:

y_{∞} é a flecha total no tempo infinito

y_{∞}^s é a flecha no tempo infinito, provocada pela parcela permanente do carregamento

y_{∞}^q é a flecha no tempo infinito, provocada pela parcela acidental do carregamento

y_{∞}^s é a flecha imediata, provocada pela parcela permanente do carregamento

y_{∞}^q é a flecha imediata, provocada pela parcela acidental do carregamento

x_{II} é a profundidade da linha neutra no Estádio II, para a seção de maior momento em valor absoluto da barra considerada

Na FIG.2.4, são mostrados os diagramas de deformações e de tensões simplificados, para uma seção transversal de uma viga no Estado Limite Último (ELU), em que x_{III} representa a profundidade da linha neutra no Estádio III. Percebe-se, também, que o braço de alavanca é dado por:

$$z = d - 0,4x_{III}, \quad (2.5)$$

em que d é a altura útil da seção.

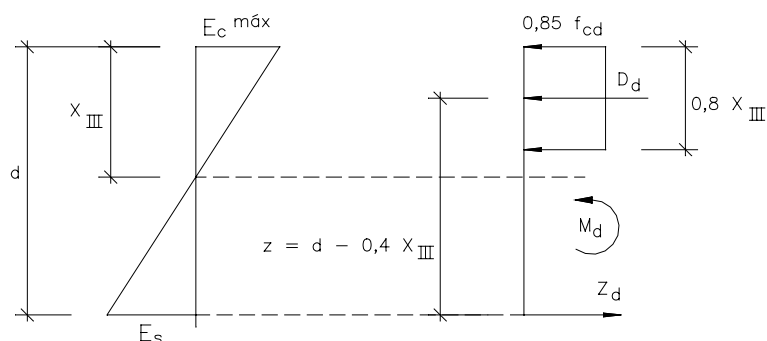


FIGURA 2.4 – Esquema para estudo da seção transversal fletida

Conforme SÜSSEKIND (1980), pode ser adotado um valor médio para z dado por $0,85d$, o que implicará, de acordo com Eq.2.5, um valor médio para d dado por $d = 2,67x_{III}$.

De acordo com TEPEDINO (1986), pode-se adotar $x_{II} \cong 0,75x_{III}$. Tem-se, então, para o coeficiente multiplicador de y^g da Eq.2.4, o valor de 1,56.

Foi considerado, para efeito dessa parametrização, que a carga acidental das vigas é da ordem de 25% da carga permanente. Tem-se, então, pela equação 2.4, que $y_{\infty} = 1,74y^g$, o que, matematicamente, equivale a dividir o E das vigas por esse valor.

No CAD/TQS[®] (2000) - Manual de Critérios de Projeto do CAD/Vigas, no item 3.4 página 8, consta que o *default* para o multiplicador do módulo de elasticidade para o cálculo de vigas é 0.9, conforme a expressão:

$$E = 0.9 \times 21000 \sqrt{f_{ck} + 35}, \text{ em kgf/cm}^2 \quad (2.6)$$

Logo, para o valor de 1,74, encontrado anteriormente, o multiplicador será o inverso desse número, que é 0,6.

2.1.6 – Detalhamento das vigas, lajes e pilares

No detalhamento, utilizaram-se os cobrimentos abaixo relacionados:

- Lajes.....1 cm.
- Vigas.....1,5 cm (de cada lado).
- Pilares.....1,5 cm (de cada lado).

2.2 - Análise do acréscimo das tensões na parede em função da deformação da estrutura-suporte

Entre os três prédios estudados, foi encontrada solução com vigamento que apresentou a maior deformação; essa foi utilizada para uma análise dos deslocamentos e das tensões de algumas paredes com um modelo espacial, no qual se conectou lajes, vigas, pilares e paredes, para melhor representar o comportamento da estrutura.

Seguindo a orientação das bibliografias analisadas, principalmente BARBOSA (2000), foi utilizado o programa ANSYS com as seguintes parametrizações e definições:

- Alvenaria considerada como material homogêneo, isotrópico, de comportamento linear
- Coeficiente de Poisson das paredes e vigas igual a 0,2
- Módulo de elasticidade longitudinal (E) para a parede de $288 \text{ kN/cm}^2 = 28.800 \text{ kgf/cm}^2 = 2880 \text{ MPa}$, correspondendo a um f_p de 3,6 MPa, conforme Eq. (1.1)
- Módulo de elasticidade longitudinal (E) para as lajes e vigas de concreto de 19456,23 MPa, conforme item 2.1.5.e.1) desta dissertação
- Cargas conforme item 2.1.1 desta dissertação
- Espessura da parede = 14 cm
- Altura da parede = 270 cm
- Resistência do concreto = 20 MPa

Nos modelos utilizados, foram considerados quatro pavimentos com lajes e paredes que se apoiavam sobre a estrutura-suporte de concreto armado, que é constituída pelas lajes, vigas e pilares. No Modelo 1, as cargas foram colocadas sobre as lajes e foi definido o

peso específico para as paredes e as vigas, de modo a avaliar as tensões e os deslocamentos, considerando o efeito arco. No Modelo 2, todo o carregamento foi aplicado diretamente sobre a viga, como é o procedimento tradicional. Neste último modelo, o peso específico da parede foi considerado nulo. Portanto, as tensões resultantes nas paredes desse modelo representam o acréscimo de tensões, em virtude da deformação da estrutura-suporte de concreto.

Para as lajes e paredes, foi utilizado no programa ANSYS o elemento SHELL63 e, para as vigas, o elemento BEAM4, os mesmos utilizados por BARBOSA (2000), após uma série de testes.

Processados os dois modelos, foram feitas as análises de deslocamentos, tensões e acréscimo de tensões nas paredes.

3

APLICAÇÕES

3.1 - Introdução

Foram criados três prédios de pequeno porte, com plantas de forma distinta, como exemplos para serem processados e analisados. O primeiro - prédio “C” - tem a planta em forma de “I”; o segundo - prédio “A” - tem a planta em forma de H; o terceiro - prédio “M” - tem a planta retangular, com a escada enclausurada (sem janelas). Para cada um deles, foram processadas cinco opções diferentes para a estrutura-suporte dos níveis não estruturados, a saber:

- **Opção 1** - Estrutura convencional de lajes, vigas e pilares com as vigas principais com balanços da ordem de 1,0 metro, nas duas extremidades.
- **Opção 2** - Estrutura convencional de lajes, vigas e pilares com as vigas principais com balanços da ordem de 2,0 metros em uma extremidade e sem balanço na outra extremidade.
- **Opção 3** - Estrutura convencional de lajes, vigas e pilares com as vigas principais sem balanços nas extremidades.

- **Opção 4** - Estrutura com a mesma disposição de pilares da Opção 3, mas com vigas apenas no perímetro e lajes de grandes dimensões, que recebem diretamente as paredes se apóiam sobre os pilares centrais.
- **Opção 5** - Estrutura semelhante à da Opção 4, com vigas no perímetro, mas com uma viga central. As lajes continuam com grandes dimensões e recebem diretamente as paredes.

Para o prédio “C”, que foi o primeiro a ser analisado, foram processadas ainda as Opções 6 e 7, que são análogas às Opções 4 e 5, mas com laje nervurada com fôrma de polipropileno, em vez de lajes lisas maciças.

Os três prédios foram processados com as premissas descritas no capítulo 2, a saber:

a) Cargas

- peso do concreto: 25 kN/m^3 .
- peso da alvenaria: 13 kN/m^3 , resultando em uma carga por metro linear de $0,15 \times 2,62 \times 13 = 5,11 \text{ kN/m}$, para uma parede de $2,70 - 0,08 = 2,62 \text{ m}$ de altura (ver FIG.3.2),
- revestimento do piso = $1,0 \text{ kN/m}^2$.
- sobrecarga: $2,0 \text{ kN/m}^2$.

b) Demais parâmetros

- $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$
- $E = 19456,23 \text{ MPa}$ (conforme item 2.1.5.e)
- Pé-direito da garagem = $2,90 \text{ m}$.

É importante ressaltar que o CAD/TQS[®] trabalha com as unidades “tf” e “m” e que, portanto, os valores acima foram transformados para essas unidades, quando da entrada de dados no *software*.

3.2 - Primeiro exemplo - prédio “C”

A planta com a arquitetura do pavimento tipo do prédio “C” está mostrada na FIG.3.1, e um corte esquemático dessa arquitetura está na FIG.3.2. Na FIG.3.3, apresenta-se um esquema das paredes sem revestimento, que será usado no desenvolvimento de todas as opções que serão aqui analisadas.

3.2.1 - Opção 1 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A planta com a arquitetura da garagem da Opção 1 está na FIG.3.4 e o esquema da estrutura na FIG.3.5. Percebe-se nessas figuras que as vigas principais, que, no caso, são transversais, apresentam balanços nas duas extremidades de 1,0 metro. Para se ter uma idéia precisa da posição das paredes sobre as vigas dessa estrutura, apresenta-se na FIG.3.6 a superposição dessas paredes sobre a estrutura-suporte da Opção 1.

b) Processamento para avaliação dos quantitativos

Para avaliação dos quantitativos, esta Opção 1 foi então processada com a fôrma indicada na FIG.3.7, utilizando-se o modelo convencional ou simplificado citado no item 2.1.4.a) deste trabalho. As armações das lajes, vigas e pilares estão no ANEXO C, FIG.C.1 a C.8. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.1.

TABELA 3.1 – Prédio “C” – Opção 1 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------|----------|---------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 104,00 | 142,98 | 36,98 | 283,96 |
| CONCRETO (m³) | 8,30 | 15,88 | 2,40 | 26,58 |
| AÇO (kgf) | 436,00 | 2.633,00 | 233,00 | 3.302,00 |

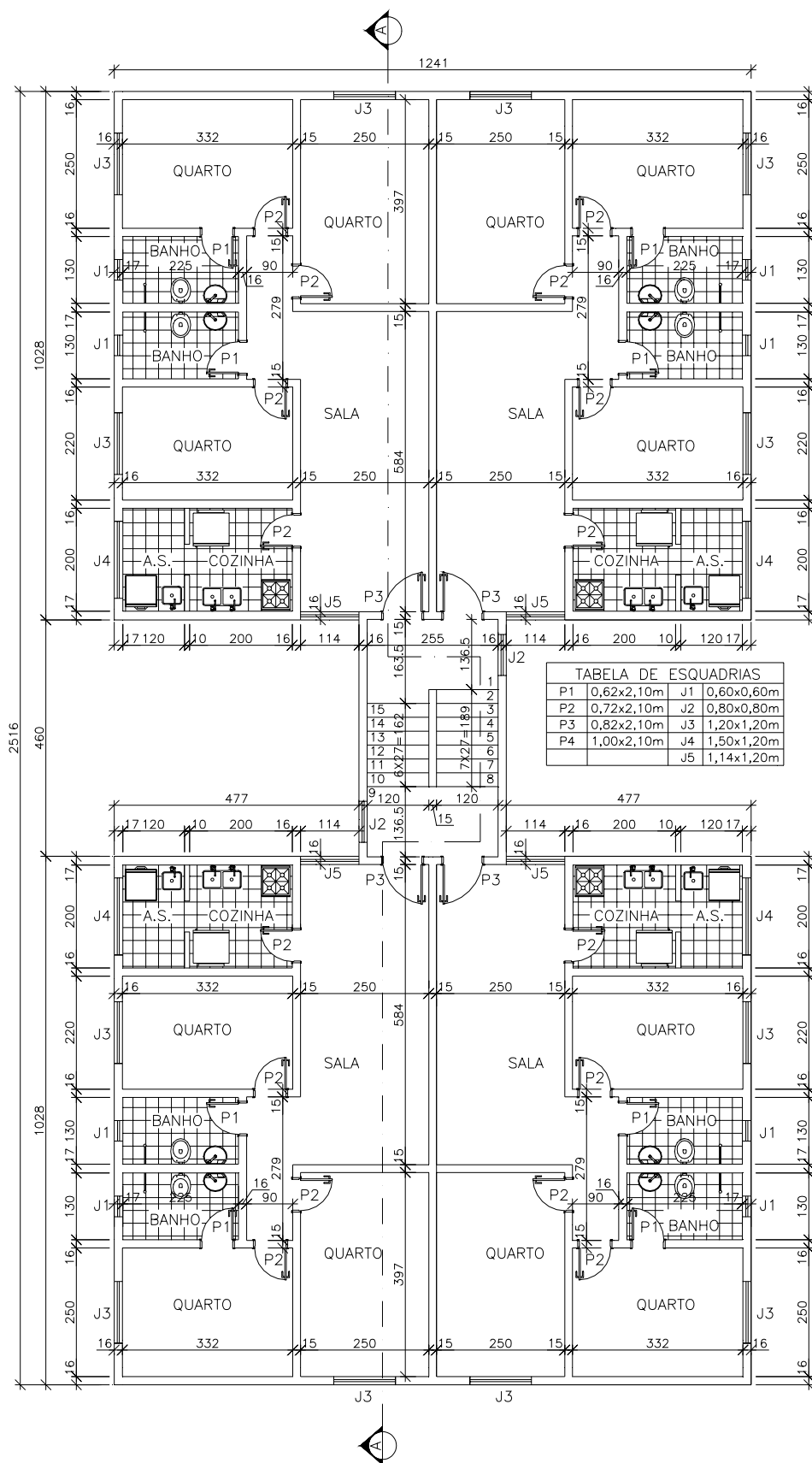


FIGURA 3.1 – Prédio “C” – Planta com a arquitetura do pavimento tipo

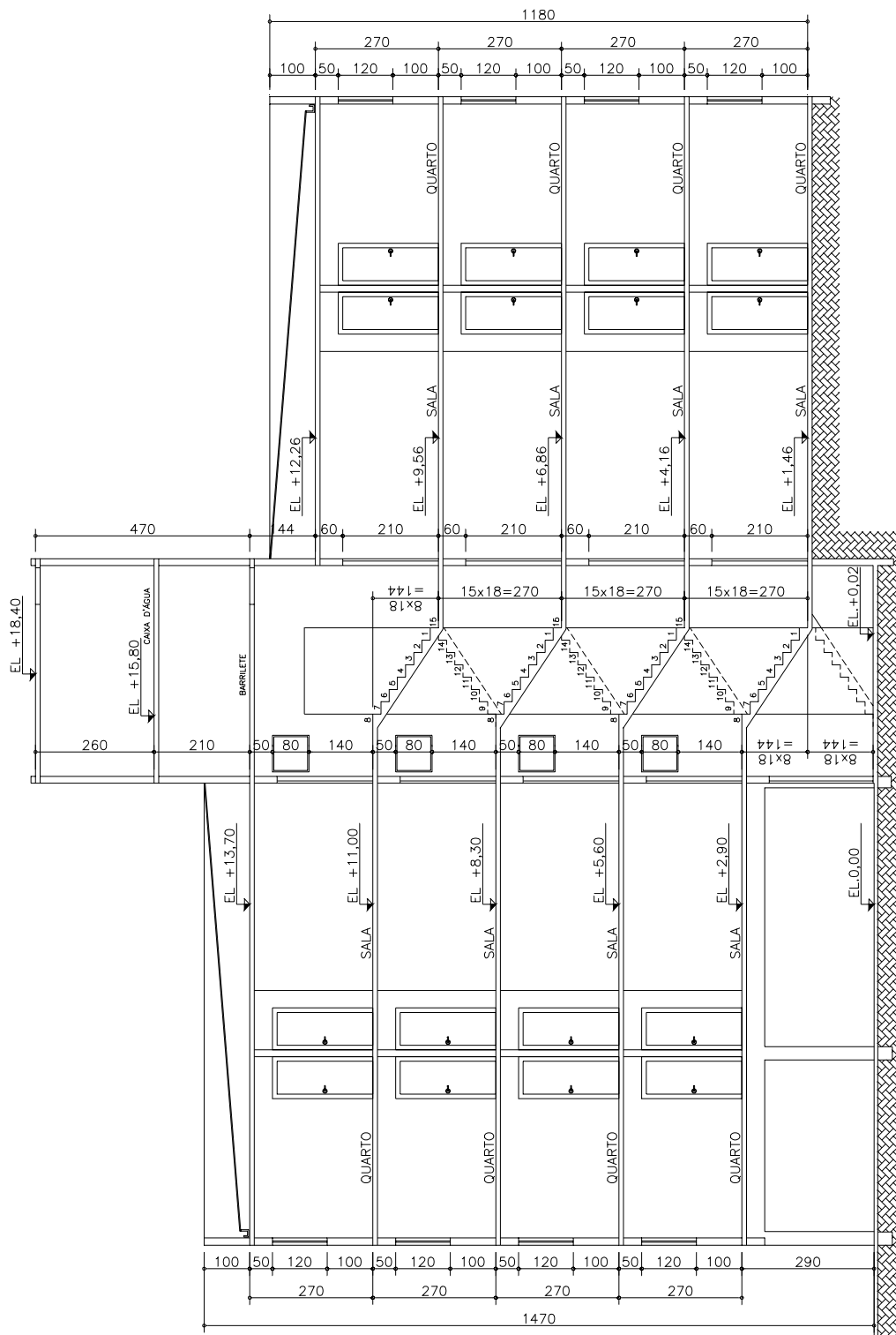


FIGURA 3.2 – Prédio “C” – Corte esquemático longitudinal A-A

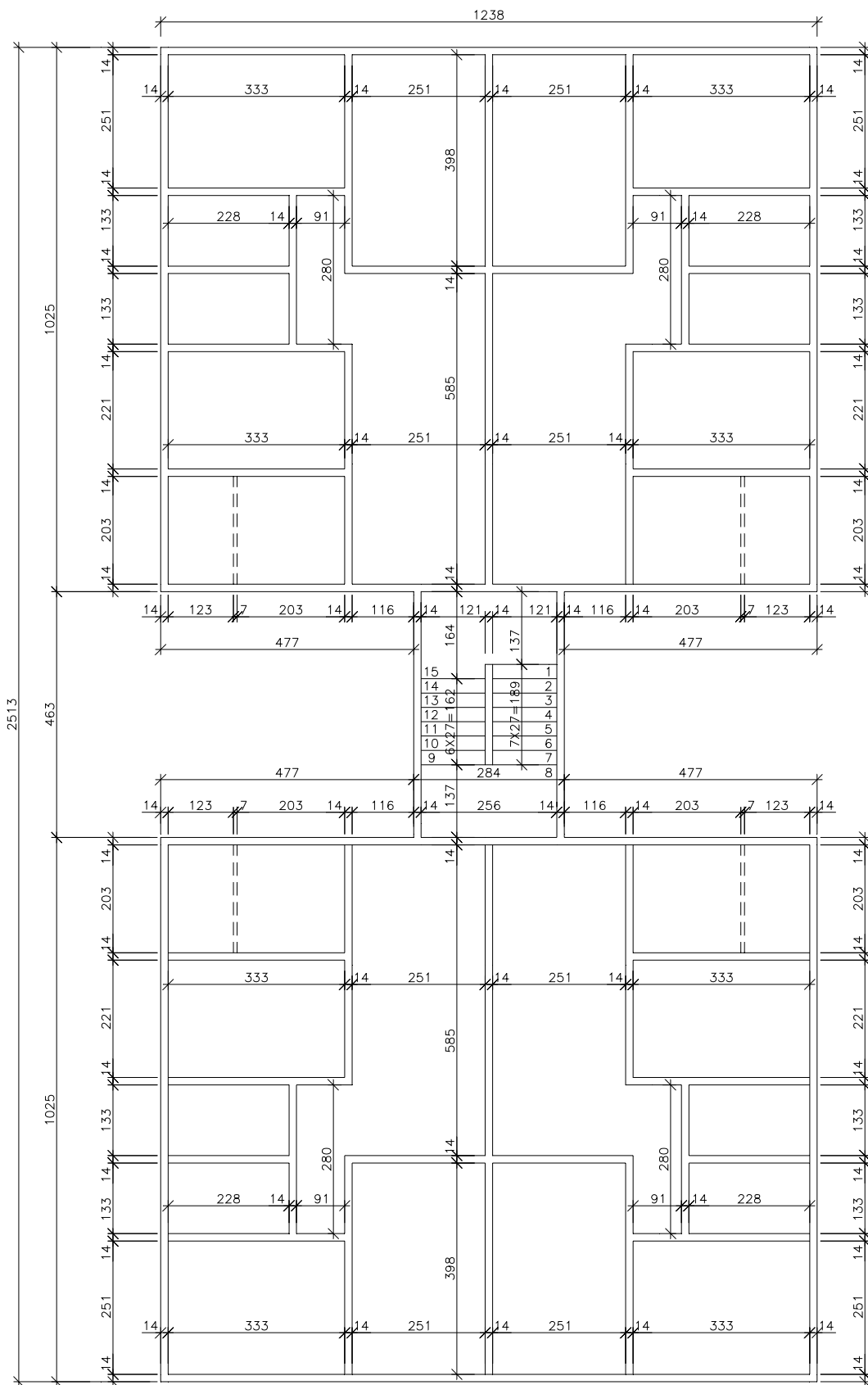


FIGURA 3.3 – Prédio “C” – Esquema das paredes sem revestimento

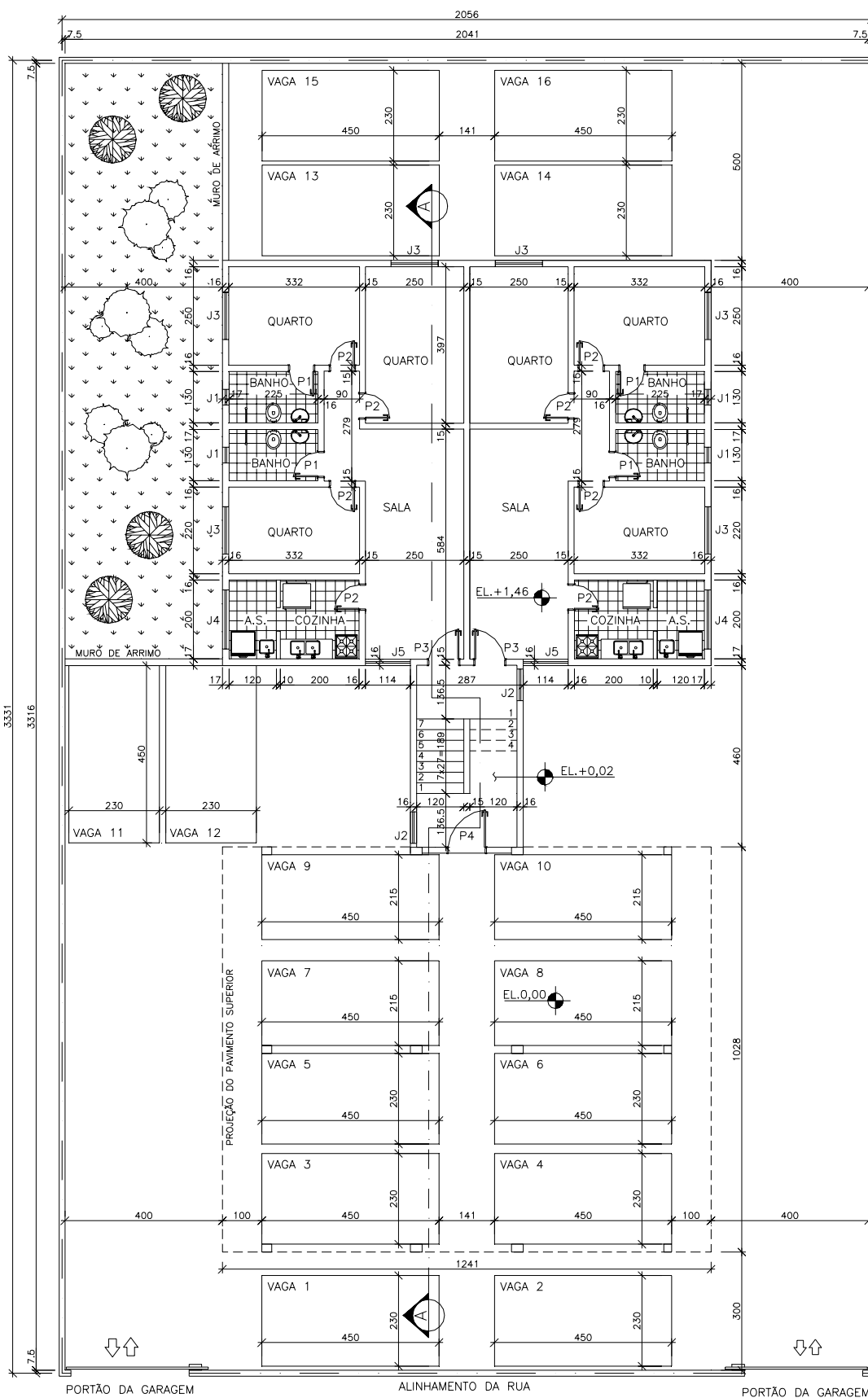


FIGURA 3.4 – Prédio “C” – Opção 1 – Planta da Garagem

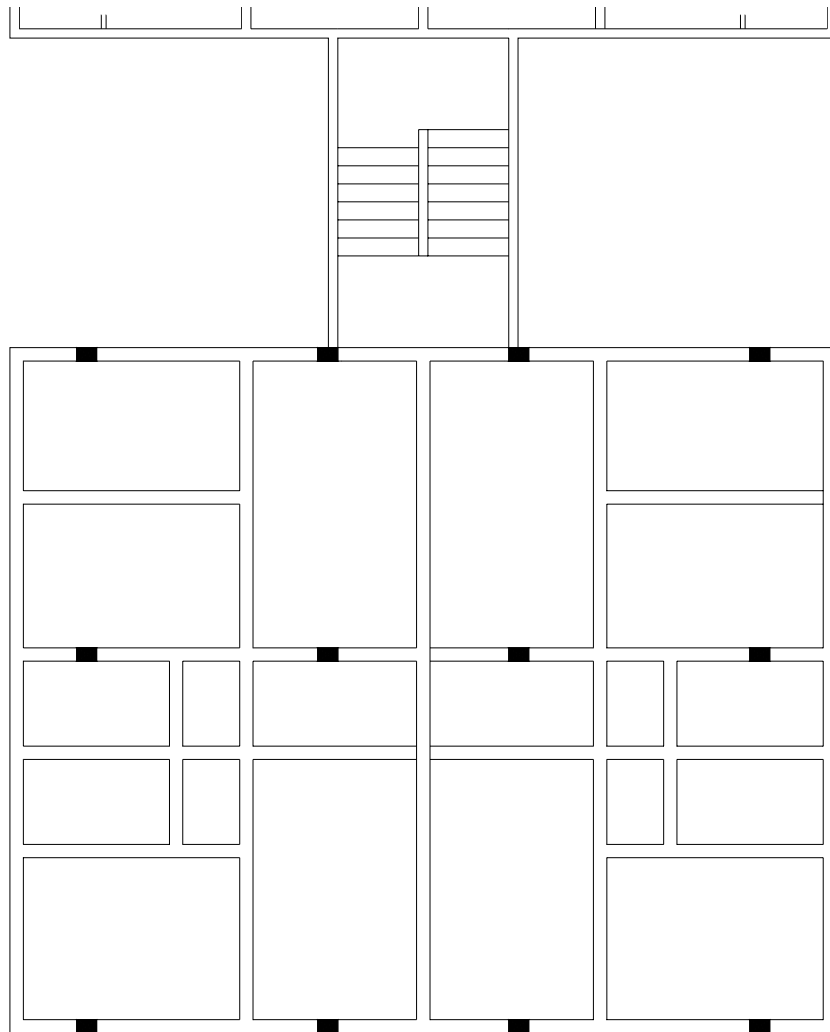


FIGURA 3.5 – Prédio “C” – Opção 1 - Esquema da estrutura

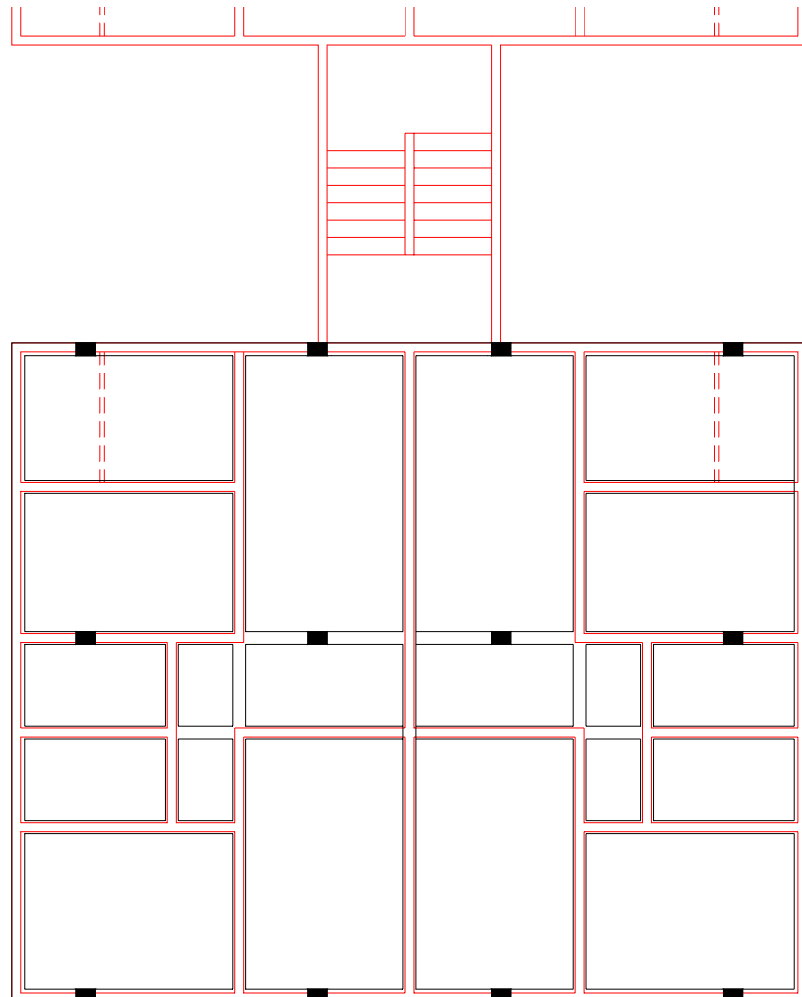


FIGURA 3.6 – Prédio “C” – Opção 1 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

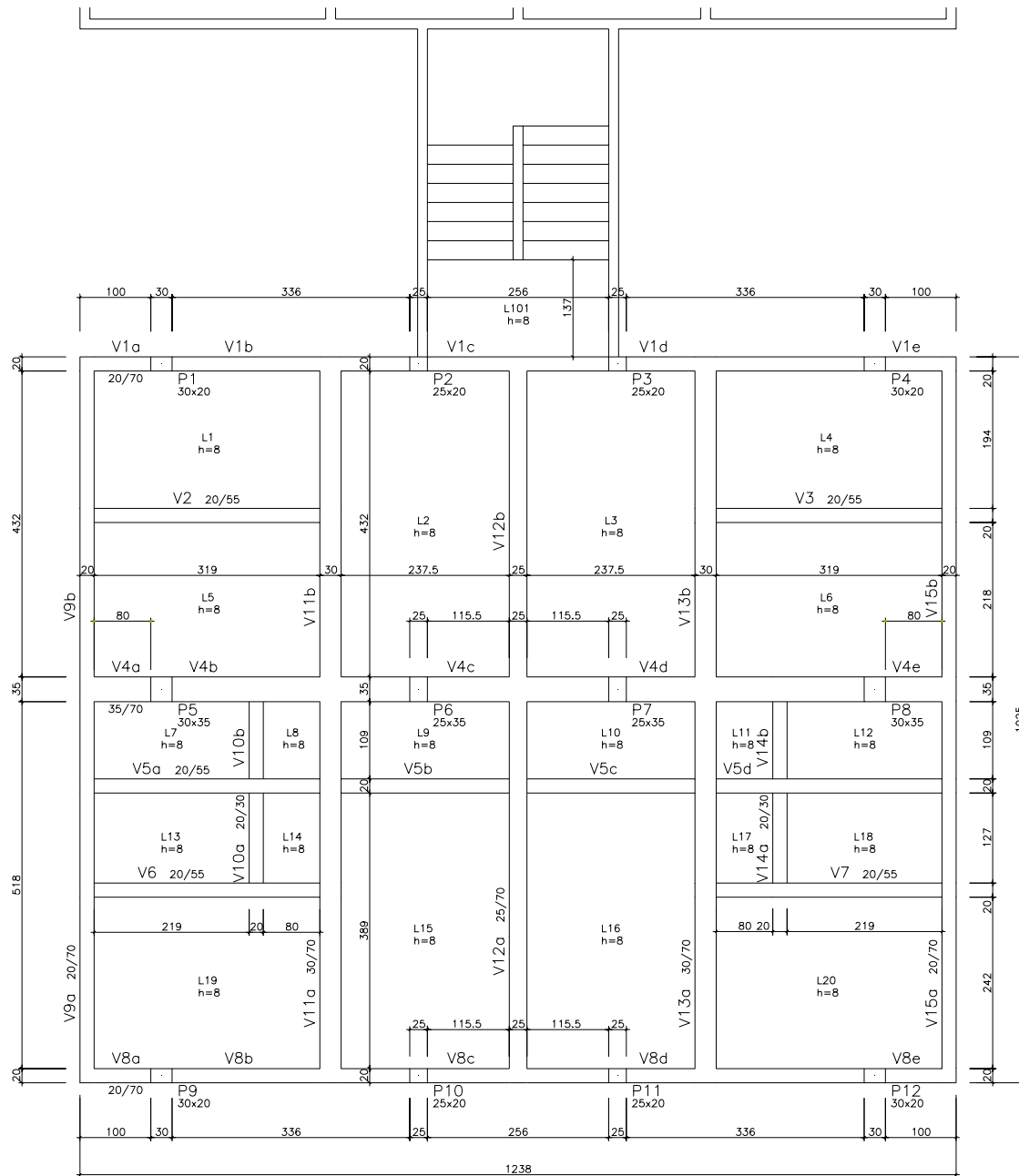


FIGURA 3.7 – Prédio “C” – Fôrma da Opção 1

Como a área dessa estrutura-suporte é de $130,8 \text{ m}^2$, constata-se pelos dados da TAB.3.1 uma taxa de fôrma de $(283,96 \text{ m}^2 / 130,8 \text{ m}^2) = 2,17 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(26,58 \text{ m}^3/130,8 \text{ m}^2) = 0,203 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(3302 \text{ kgf} / 26,58 \text{ m}^3) = 124,53 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

c) Processamento para avaliação das deformações

Para uma melhor avaliação das deformações, esta Opção 1 foi processada com os dois modelos citados no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.1 estão mostrados na FIG.3.8, para cada uma das vigas. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.2 estão na FIG.3.9, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes em centímetros.

3.2.2 - Opção 2 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A planta com a arquitetura da garagem da Opção 2 está na FIG.3.10, e o esquema da estrutura na FIG.3.11. Percebe-se nessas figuras que as vigas principais, que, no caso, são transversais, apresentam balanços na extremidade esquerda de 2,0 metros e a outra extremidade não tem balanços. Para se ter uma idéia precisa da posição das paredes sobre as vigas dessa estrutura, apresenta-se na FIG.3.12 a superposição dessas paredes sobre a estrutura-suporte da Opção 2.

b) Processamento para avaliação dos quantitativos

Para avaliação dos quantitativos, esta Opção 2 foi então processada com a fôrma indicada na FIG.3.13, utilizando-se o modelo convencional ou simplificado citado no item 2.1.4.a) deste trabalho. As armações das lajes, vigas e pilares estão no ANEXO C, FIG. C.9 a C.16. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.2.

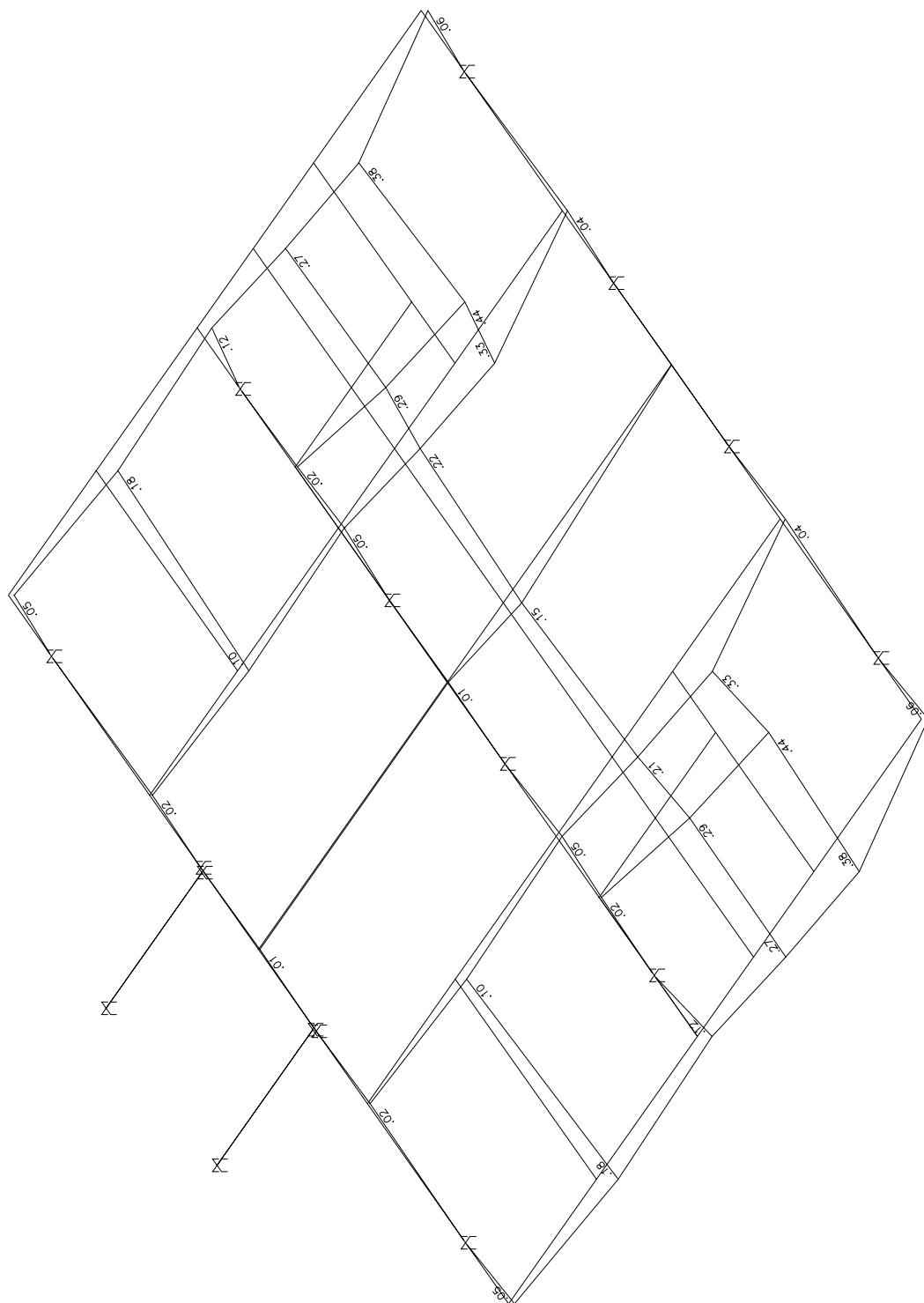


FIGURA 3.8 – Prédio “C” – Opção 1 – Deslocamentos das vigas (cm)

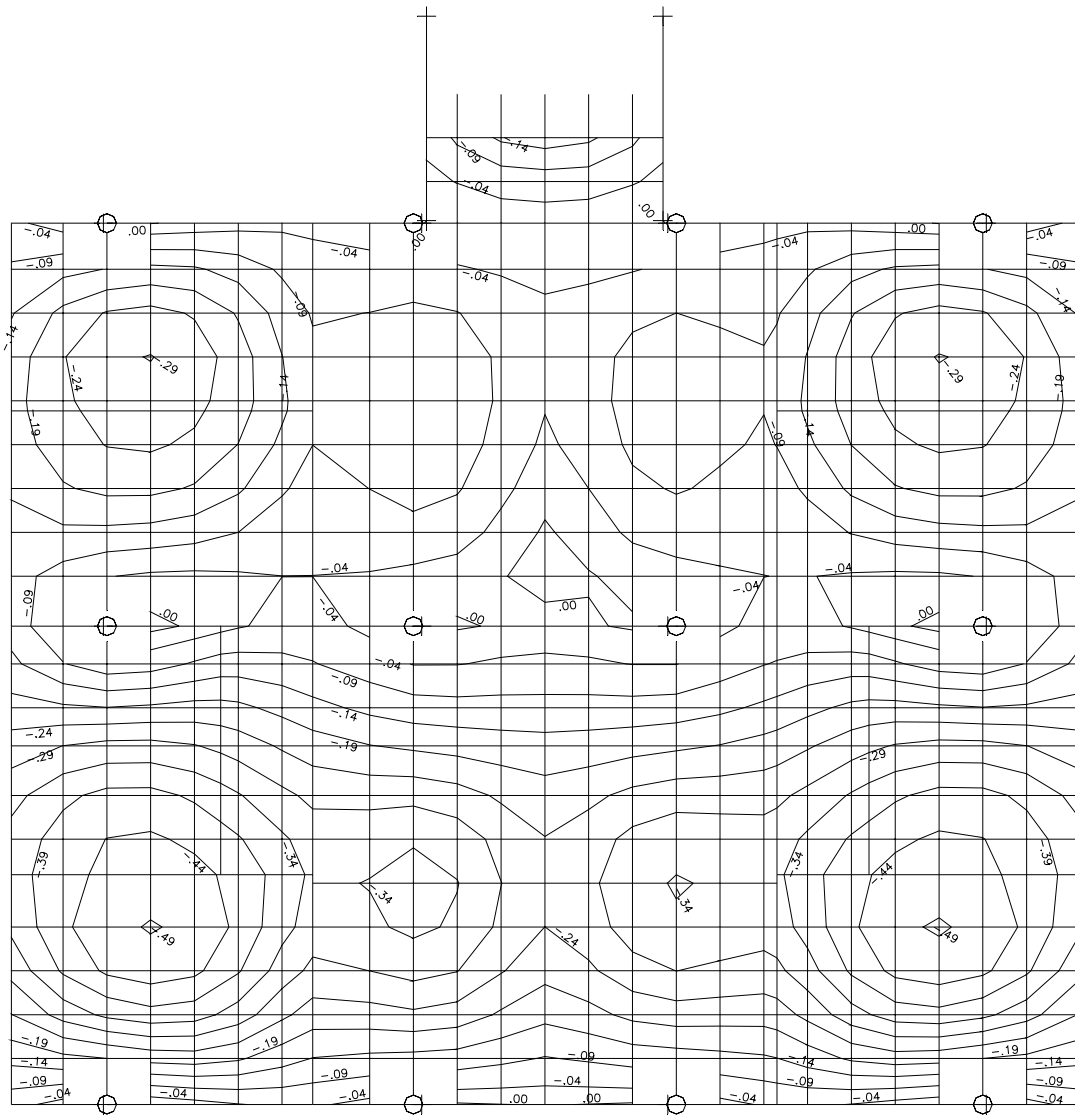


FIGURA 3.9 – Prédio “C” – Opção 1 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

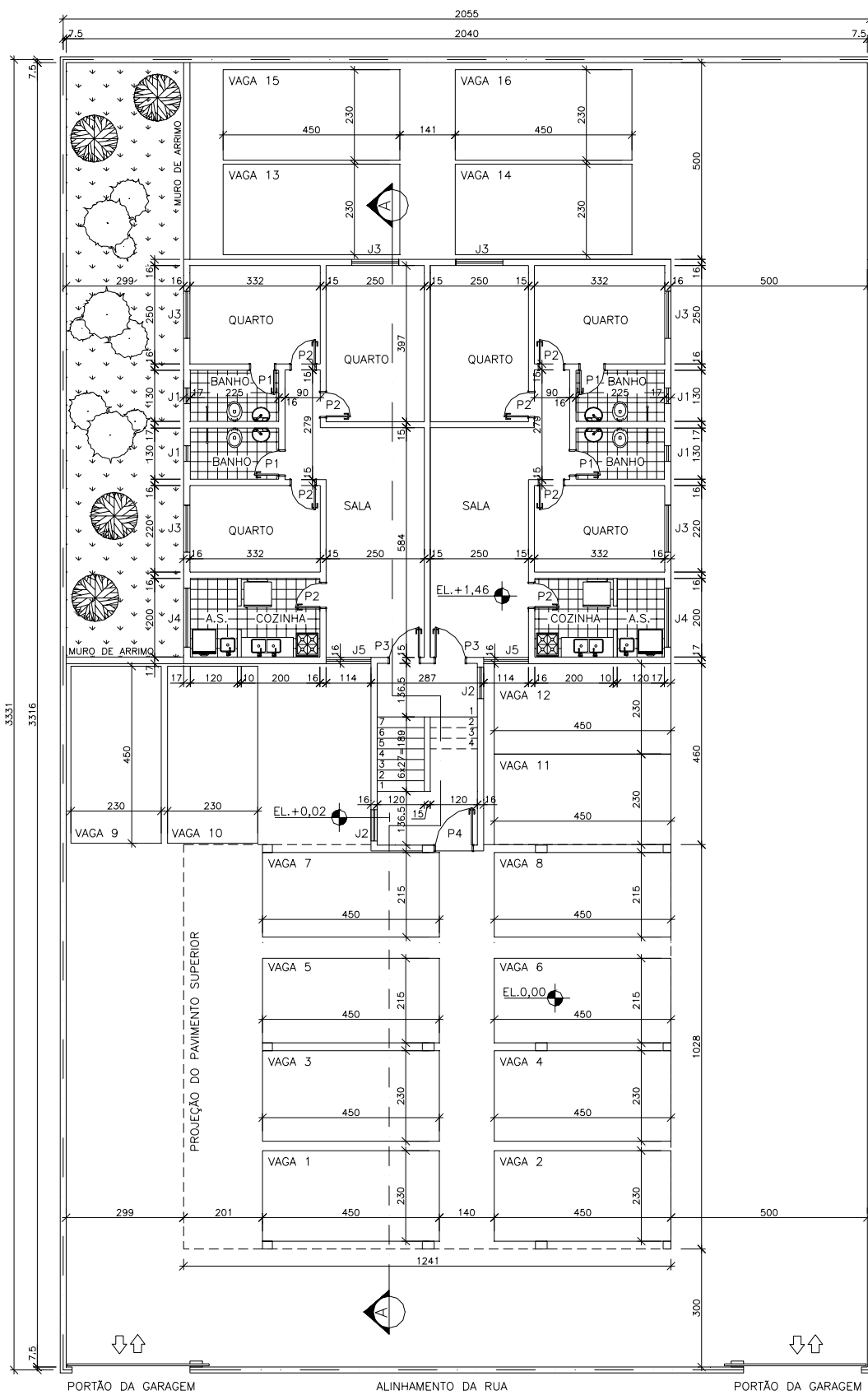


FIGURA 3.10 – Prédio “C” – Opção 2 – Planta da garagem

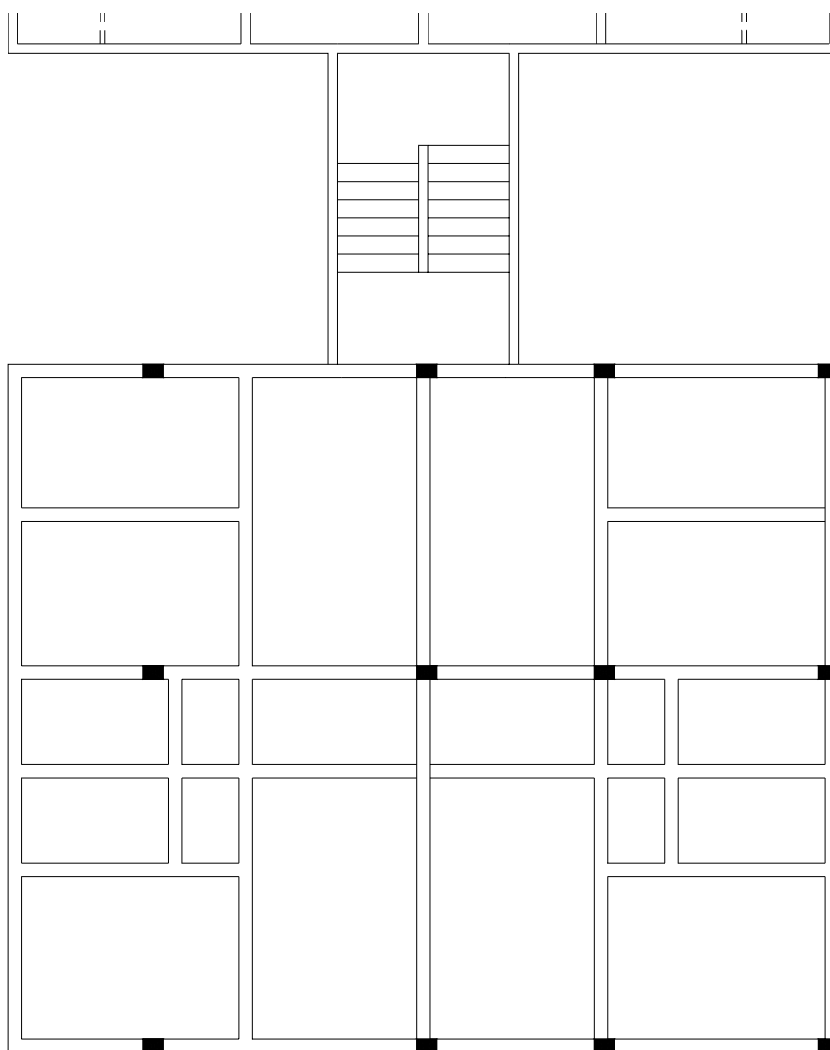


FIGURA 3.11 – Prédio “C” – Opção 2 – Esquema da estrutura

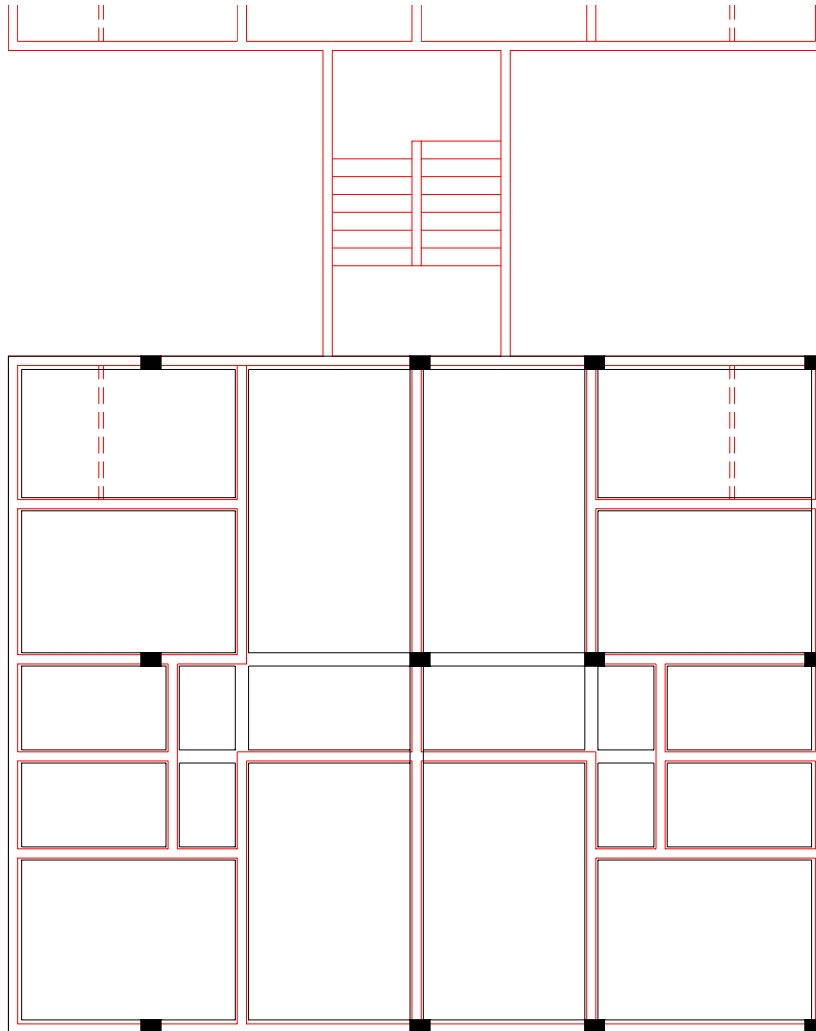


FIGURA 3.12 – Prédio “C” – Opção 2 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

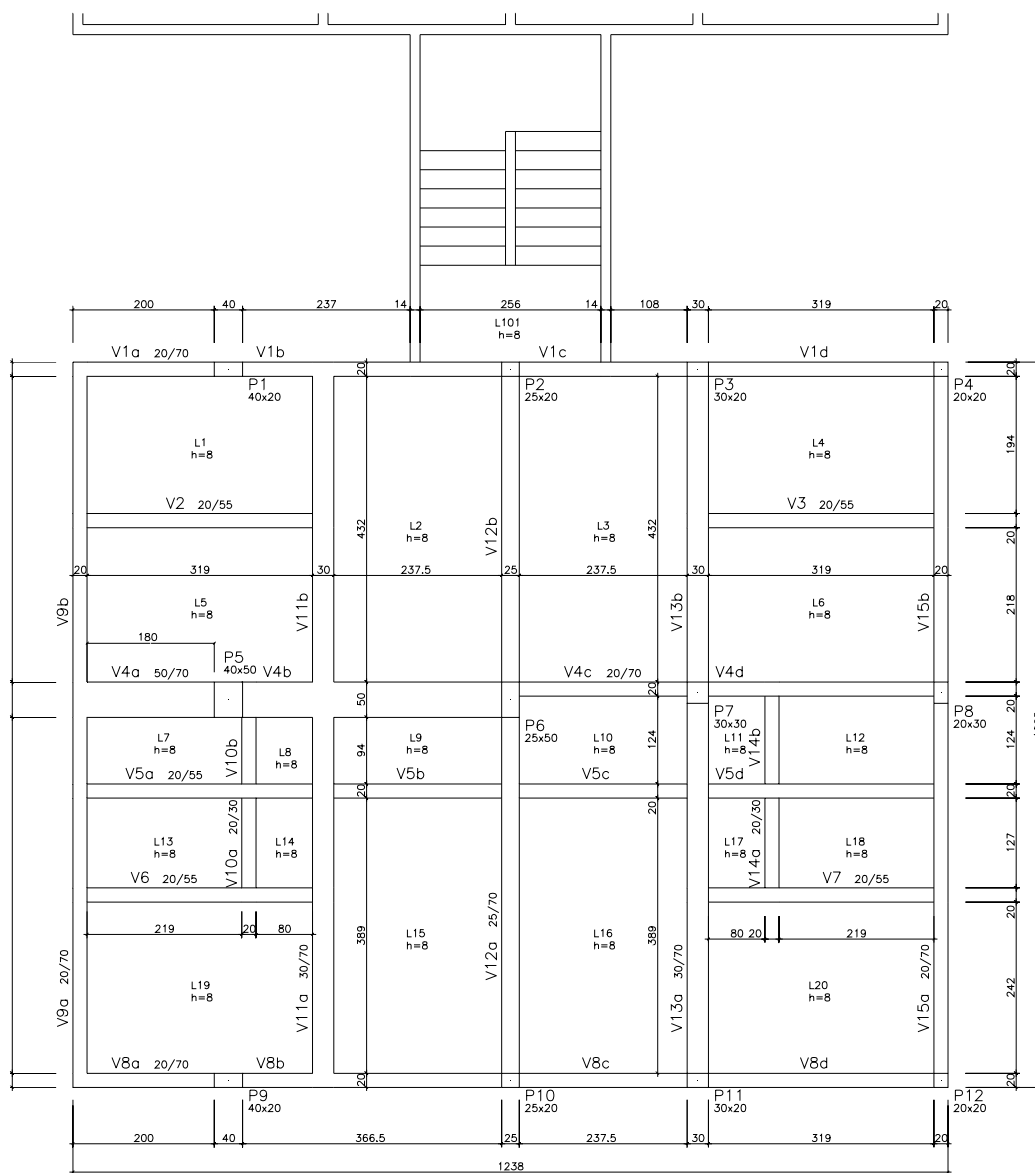


FIGURA 3.13 – Prédio “C” – Fôrma da Opção 2

TABELA 3.2 – Prédio “C” – Opção 2 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------|----------|---------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 104,00 | 145,98 | 38,98 | 288,96 |
| CONCRETO (m³) | 8,30 | 16,08 | 2,70 | 27,08 |
| AÇO (kgf) | 438,00 | 2.631,00 | 257,00 | 3.326,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 130,8 m², constata-se pelos dados da TAB.3.2 uma taxa de fôrma de $(288,96 \text{ m}^2 / 130,8 \text{ m}^2) = 2,21 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(27,08 \text{ m}^3 / 130,8 \text{ m}^2) = 0,207 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(3326 \text{ kgf} / 27,08 \text{ m}^3) = 122,82 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

c) Processamento para avaliação das deformações

Para uma melhor avaliação das deformações, esta Opção 2 foi processada com os dois modelos citados no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.1 estão mostrados na FIG.3.14, para cada uma das vigas. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.2 estão na FIG.3.15, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes em centímetros.

3.2.3 - Opção 3 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A planta com a arquitetura da garagem da Opção 3 está na FIG.3.16, e o esquema da estrutura na FIG.3.17. Percebe-se nessas figuras que as vigas principais, que, no caso, são transversais, não apresentam balanços nas extremidades. Para se ter uma idéia precisa da posição das paredes sobre as vigas dessa estrutura, apresenta-se na FIG.3.18 a superposição dessas paredes sobre a estrutura-suporte da Opção 3.

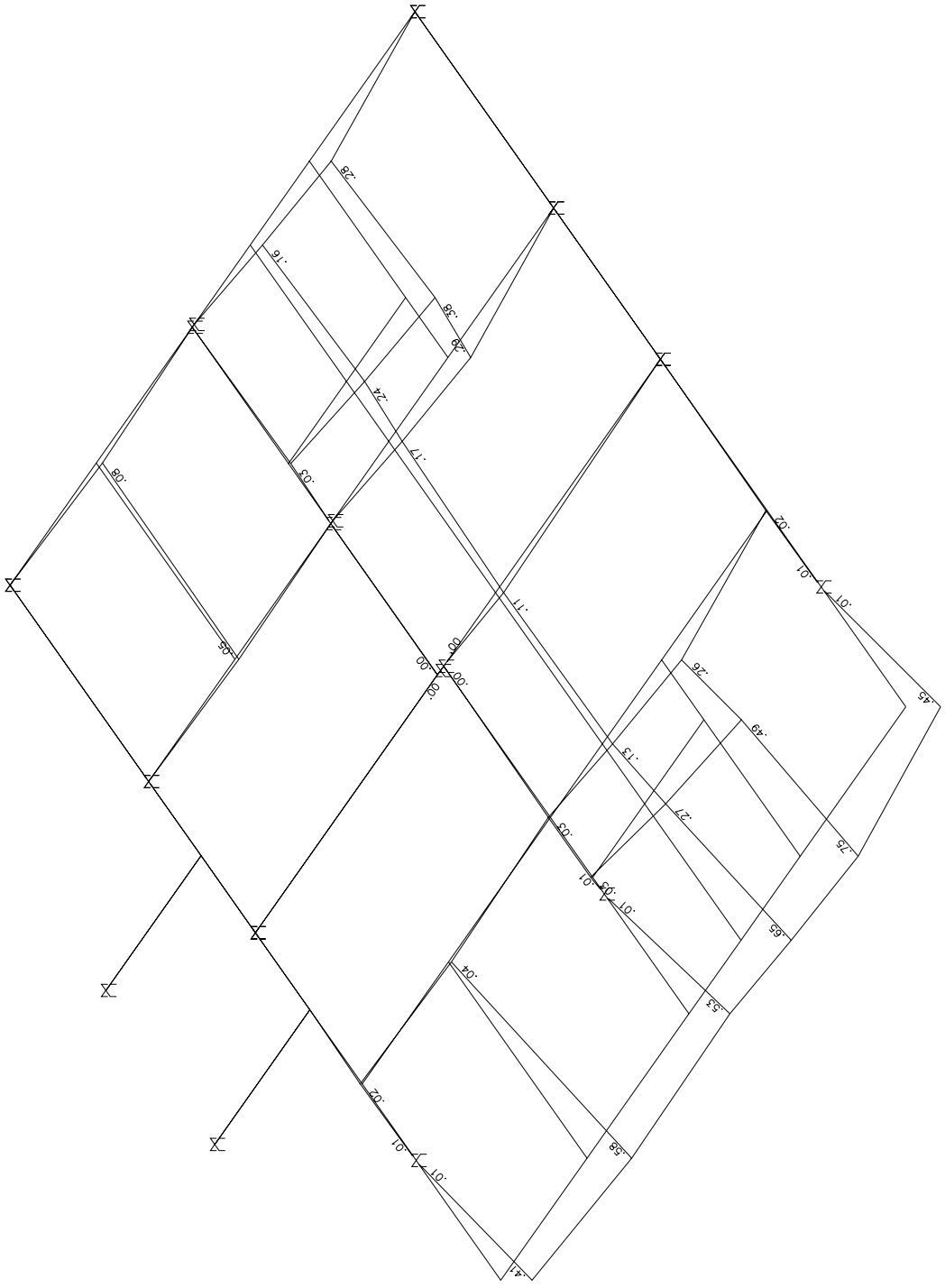


FIGURA 3.14 – Prédio “C” – Opção 2 – Deslocamentos das vigas (cm)

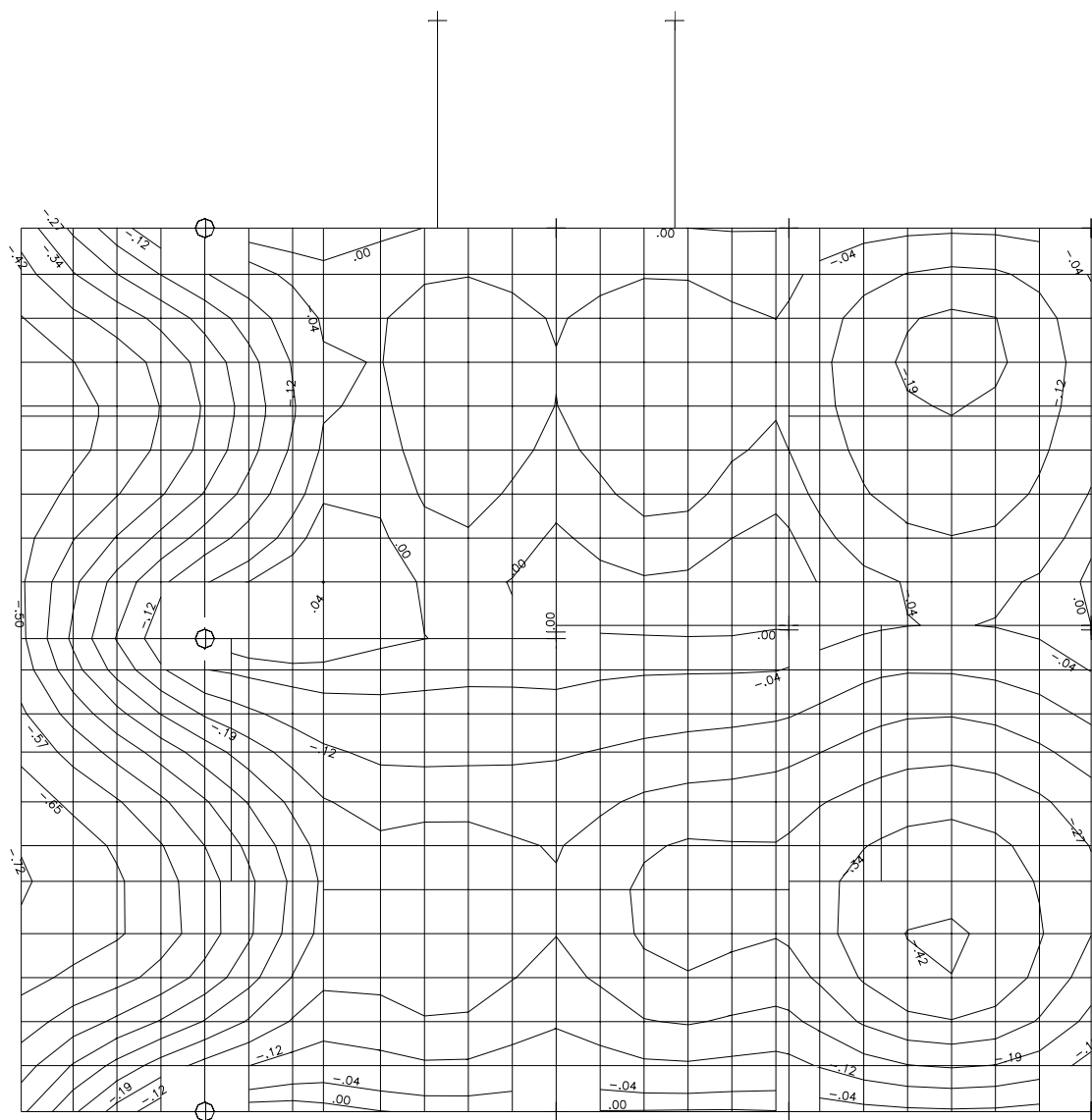


FIGURA 3.15 – Prédio “C” – Opção 2 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

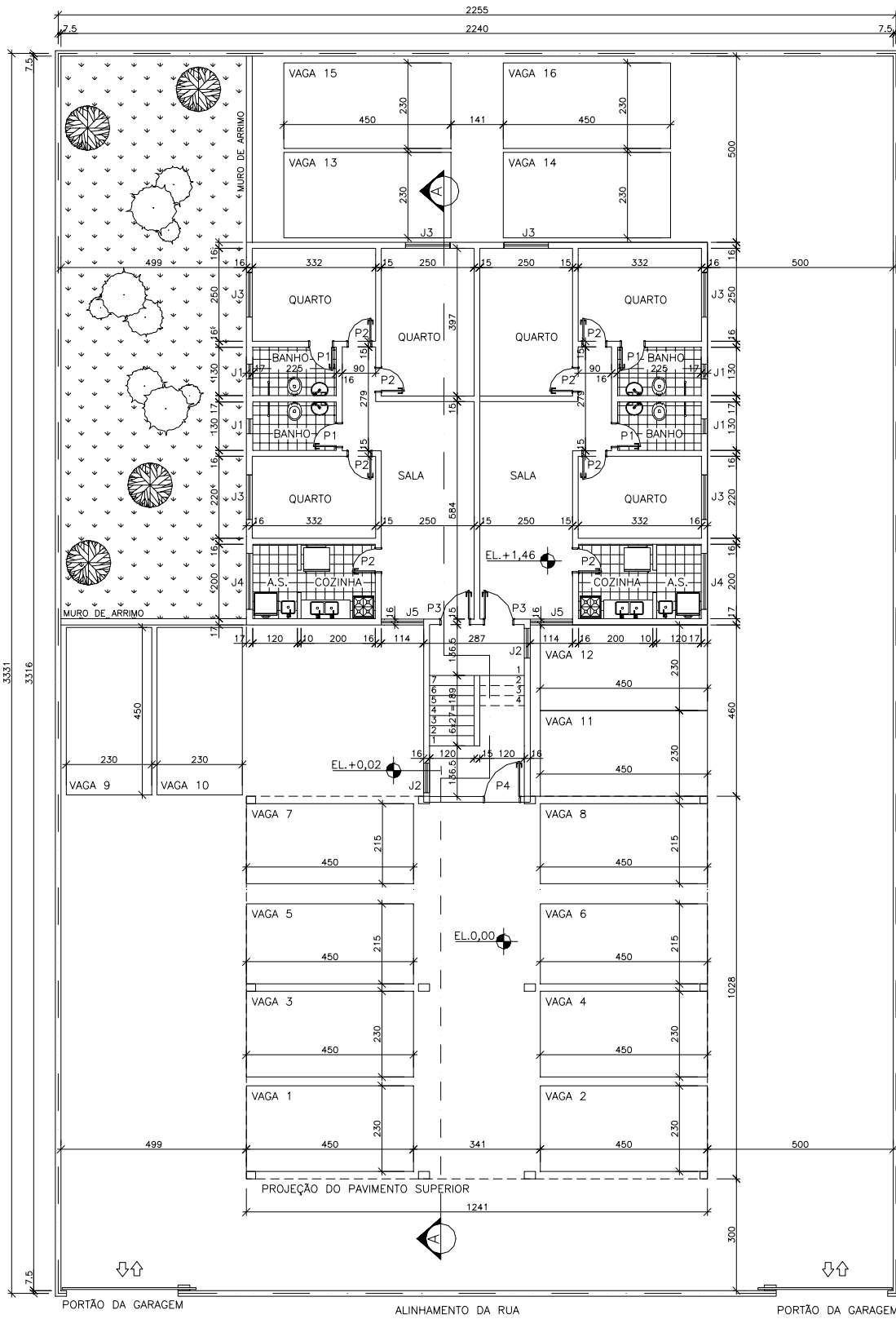


FIGURA 3.16 – Prédio “C” – Opção 3 – Planta da Garagem

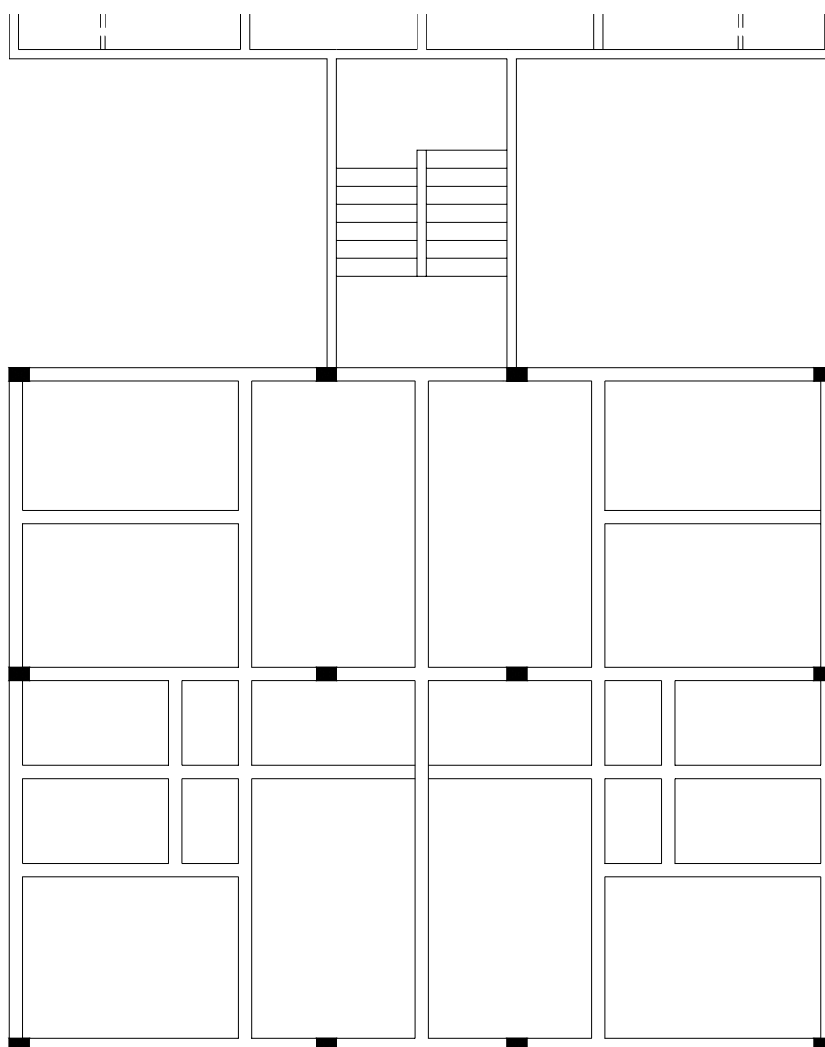


FIGURA 3.17 – Prédio “C” – Opção 3 – Esquema da estrutura

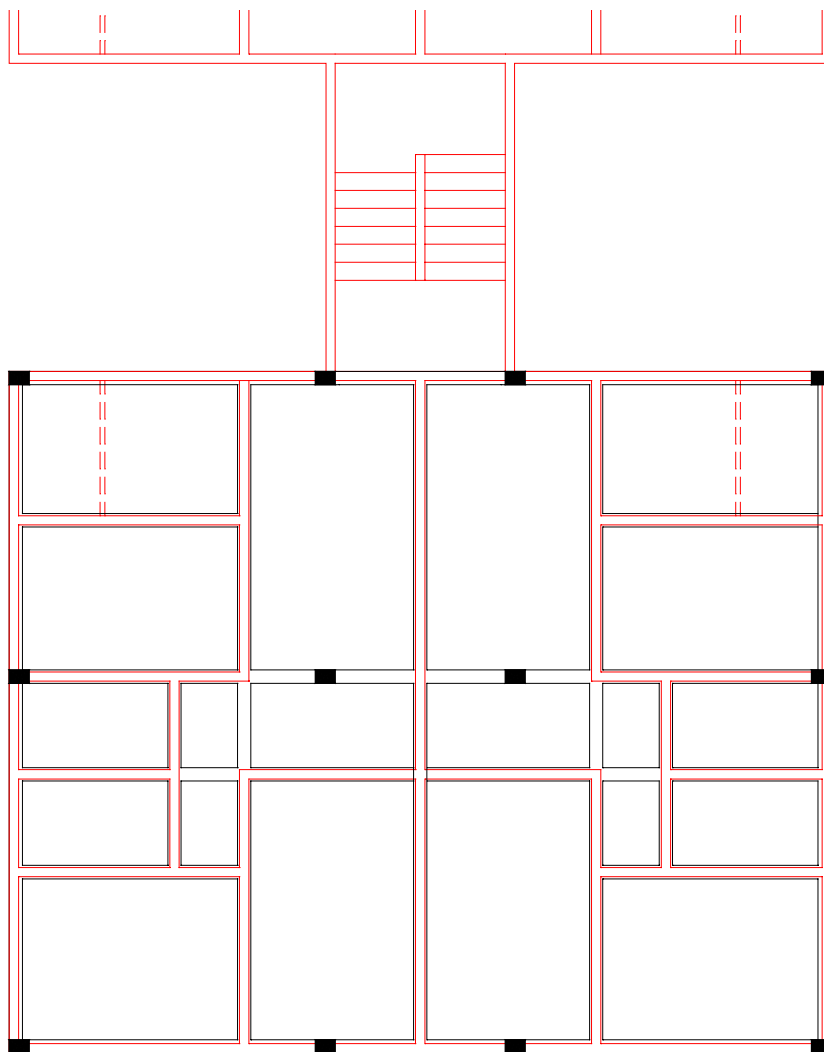


FIGURA 3.18 – Prédio “C” – Opção 3 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

b) Processamento para avaliação dos quantitativos

Para avaliação dos quantitativos, esta Opção 3 foi então processada com a fôrma indicada na FIG.3.19, utilizando-se o modelo convencional ou simplificado citado no item 2.1.4.a) deste trabalho. As armações das lajes, vigas e pilares estão no ANEXO C, FIG. C.17 a C.24. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.3.

TABELA 3.3 – Prédio “C” – Opção 3 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 103,00 | 145,98 | 33,98 | 282,96 |
| CONCRETO (m³) | 8,20 | 16,48 | 2,10 | 26,78 |
| AÇO (kgf) | 436,00 | 2.571,00 | 262,00 | 3.269,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 130,8 m², constata-se pelos dados da TAB.3.3 uma taxa de fôrma de $(282,96 \text{ m}^2/130,8 \text{ m}^2) = 2,16 \text{ m}^2 / \text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(26,78 \text{ m}^3/130,8 \text{ m}^2) = 0,205 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(3269 \text{ kgf}/26,78 \text{ m}^3) = 122,07 \text{ kgf}/ \text{m}^3$.

c) Processamento para avaliação das deformações

Para uma melhor avaliação das deformações, esta Opção 2 foi processada com os dois modelos citados no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.1 estão mostrados na FIG.3.20, para cada uma das vigas. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.2 estão na FIG.3.21, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes em centímetros.

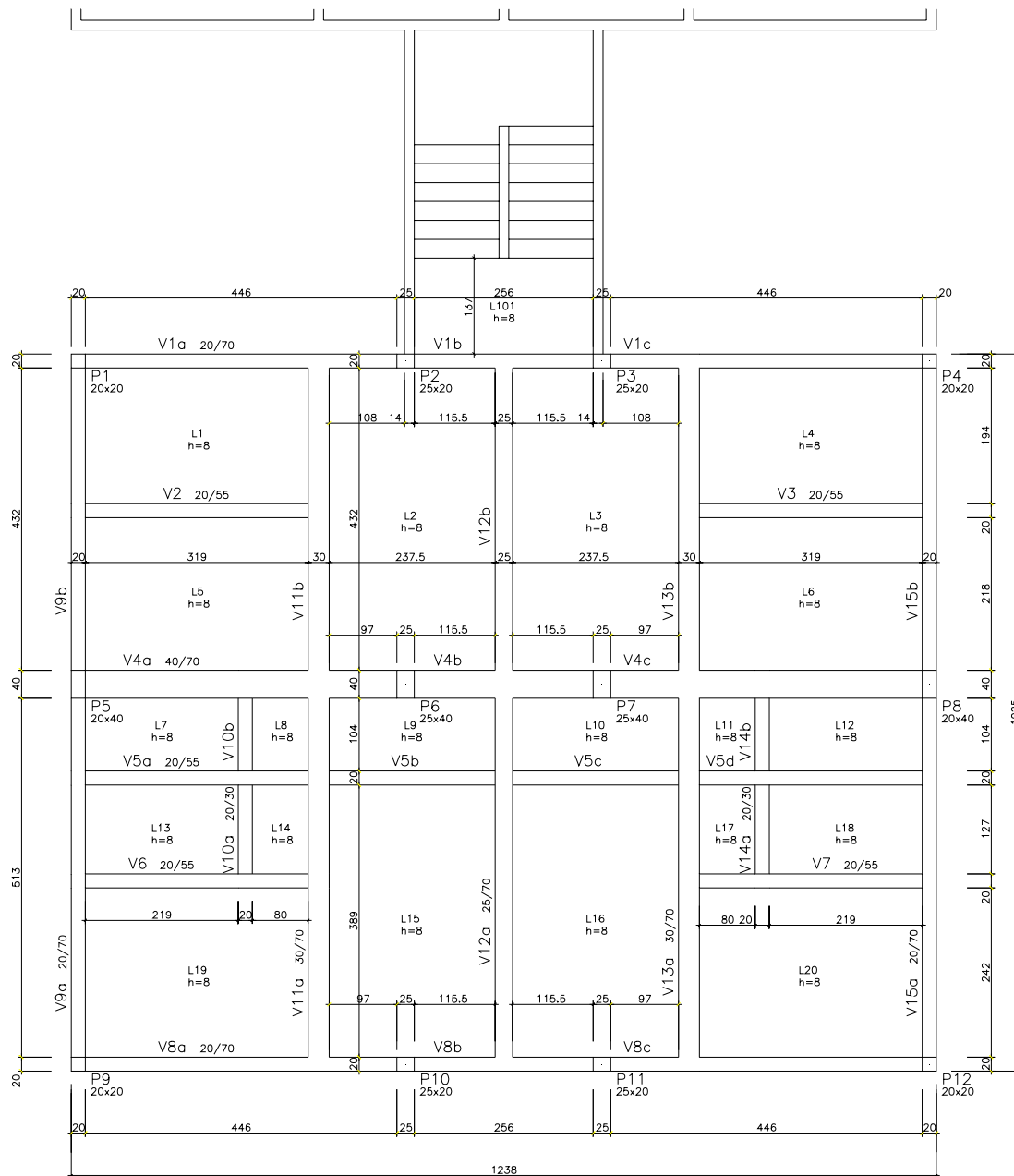


FIGURA 3.19 – Prédio “C” – Fôrma da Opção 3

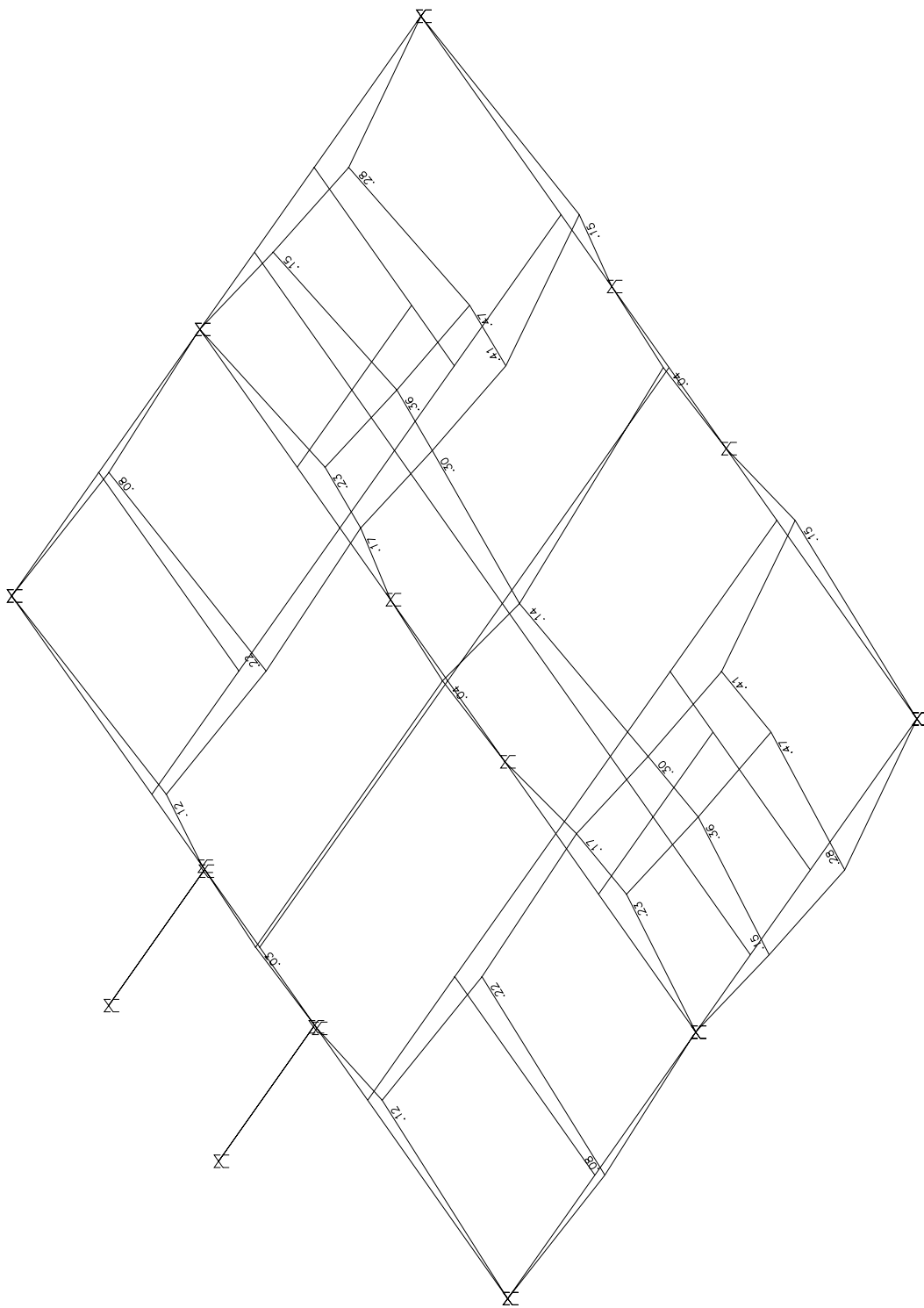


FIGURA 3.20 – Prédio “C” - Opção 3 - Deslocamentos das vigas (cm)

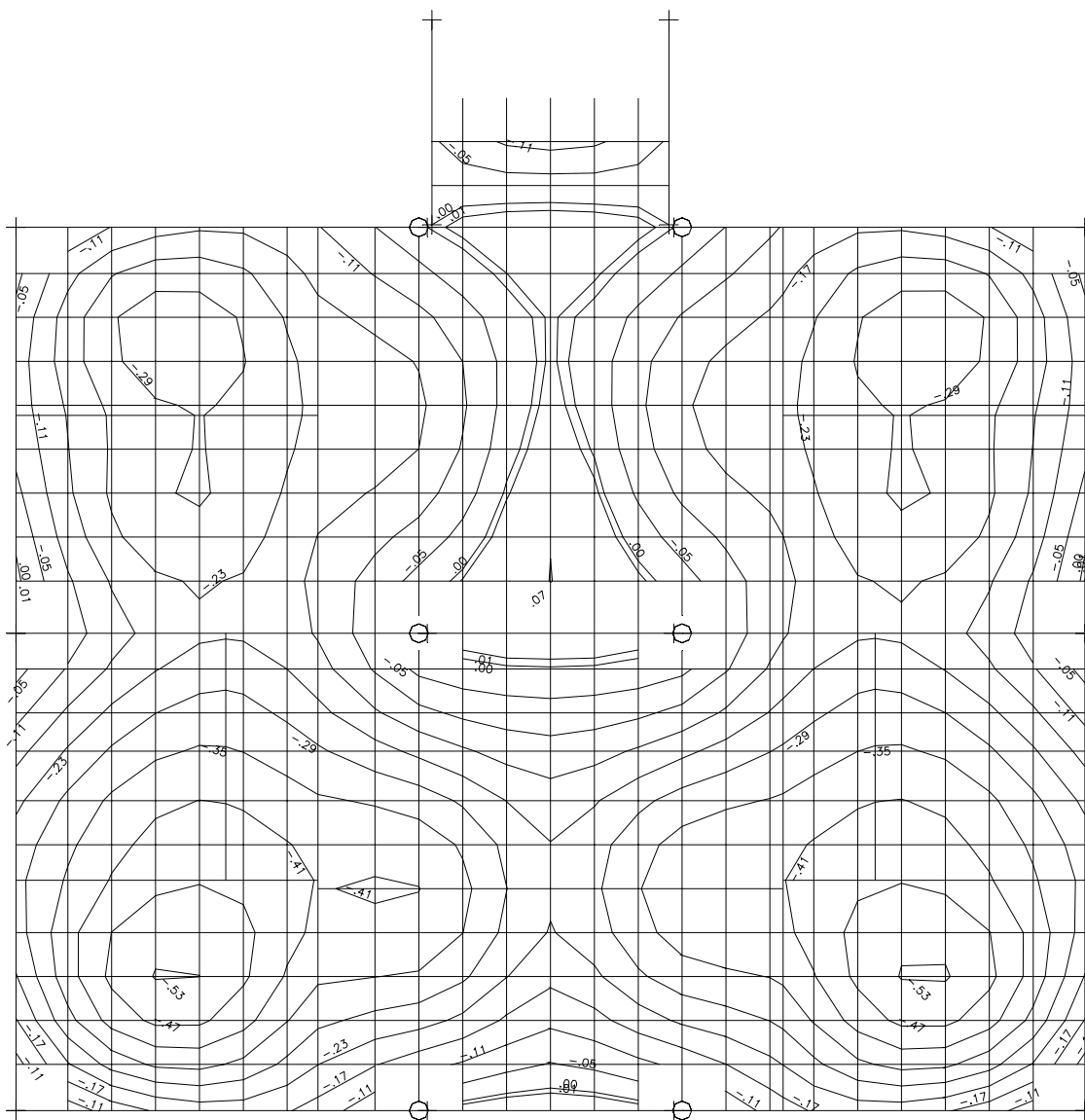


FIGURA 3.21 – Prédio “C” – Opção 3 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

3.2.4 - Opção 4 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A Opção 4 tem a mesma distribuição de pilares da Opção 3 (planta da garagem da FIG.3.16), mas possui vigas apenas no perímetro. Sua fôrma está na FIG.3.22 e nela se percebe que a laje, que tem 25 cm de espessura, apóia-se nas vigas do perímetro e nos dois pilares centrais (P6 e P7) que têm um capitel de 150 x 150/50 centímetros para evitar o puncionamento da laje.

b) Processamento

Esta opção foi processada no Modelo b.2, citado no item 2.1.4.b) deste trabalho (grelha de vigas e lajes planas discretizadas em barras). As armações das lajes, vigas e pilares estão no ANEXO C, FIG. C.25 a C.30. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.4.

TABELA 3.4 – Prédio “C” – Opção 4 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 121,00 | 63,06 | 32,94 | 217,00 |
| CONCRETO (m³) | 29,50 | 7,21 | 2,08 | 38,79 |
| AÇO (kgf) | 4.420,00 | 1.094,00 | 319,00 | 5.833,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 130,8 m², constata-se pelos dados da TAB.3.4 uma taxa de fôrma de $(217,0 \text{ m}^2 / 130,8 \text{ m}^2) = 1,66 \text{ m}^2 / \text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(38,79 \text{ m}^3 / 130,8 \text{ m}^2) = 0,297 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(5833 \text{ kgf} / 38,79 \text{ m}^3) = 150,37 \text{ kgf} / \text{m}^3$.

Os deslocamentos obtidos estão na FIG.3.23, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes, em centímetros.

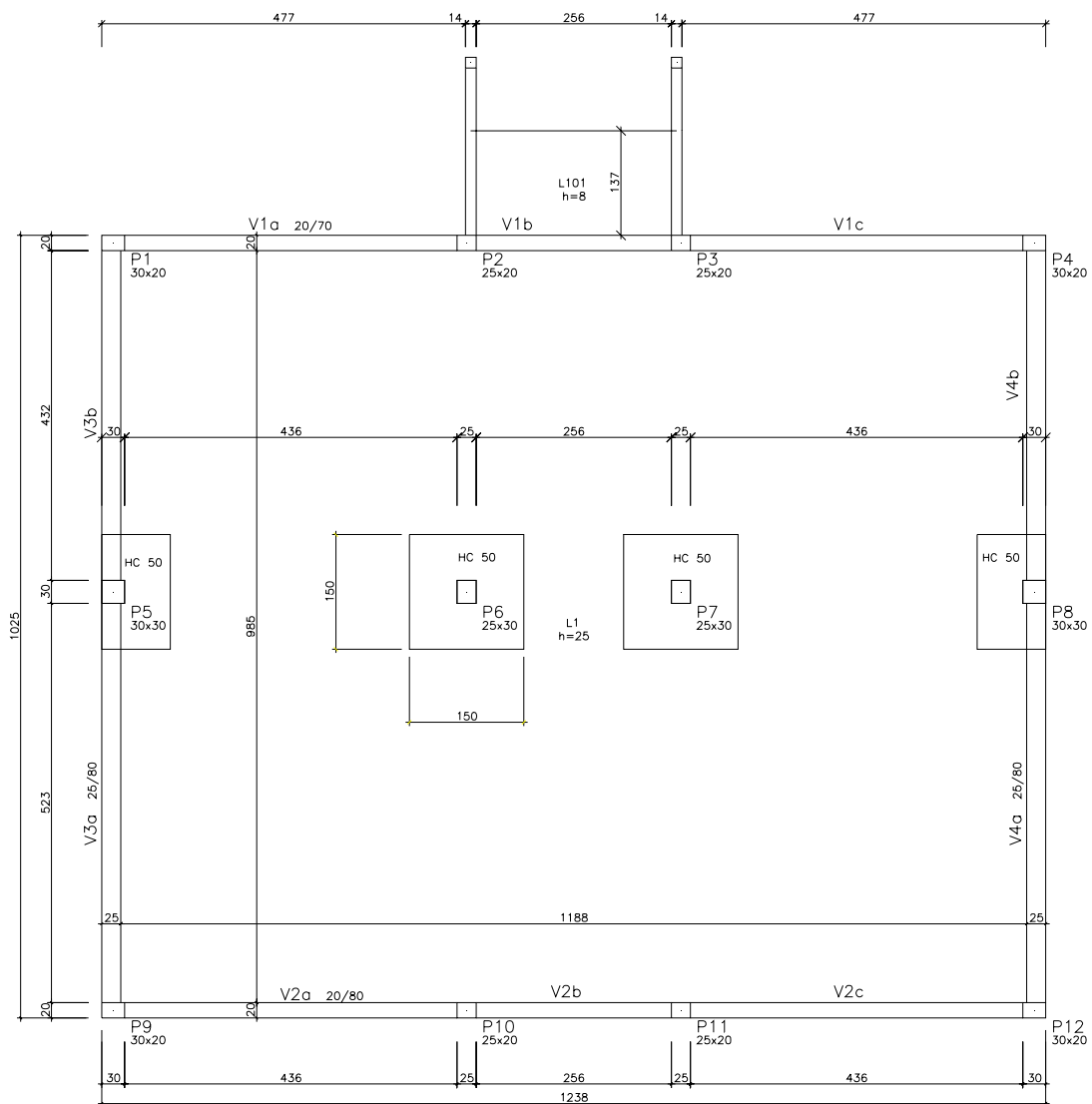


FIGURA 3.22 – Prédio “C” – Fôrma da Opção 4

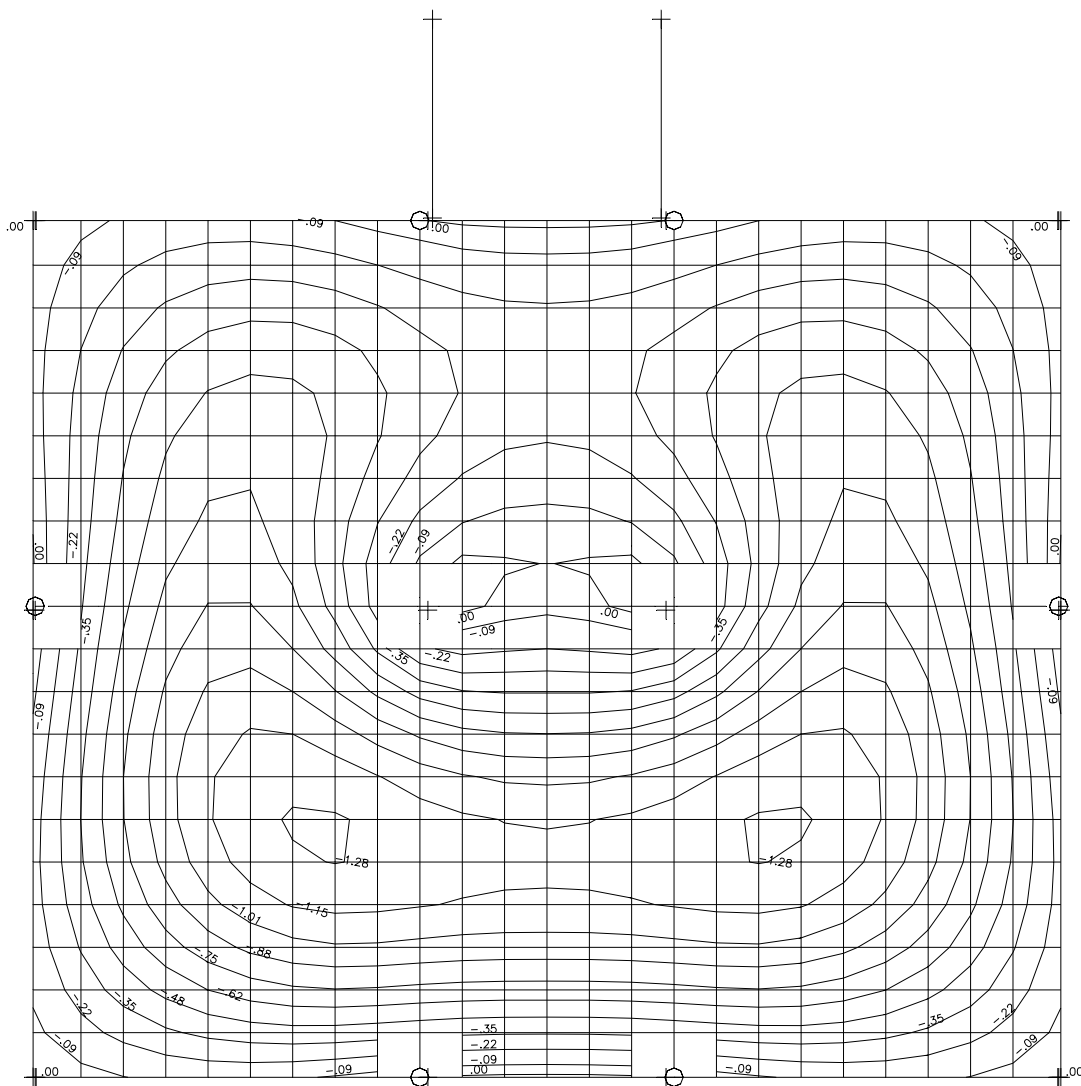


FIGURA 3.23 – Prédio “C” – Opção 4 – Deslocamentos das Vigas e Lajes (cm)

3.2.5 - Opção 5 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A Opção 5 é a Opção 4 com acréscimo de uma viga central sobre os pilares P5 a P8. Sua fôrma está na FIG.3.24 e nela se percebe que a espessura das lajes é de 20 cm (L1) e de 25 cm (L2).

b) Processamento

Esta opção foi processada no Modelo b.2, citado no item 2.1.4.b) deste trabalho (grelha de vigas e lajes planas discretizadas em barras). As armações das lajes, vigas e pilares estão no ANEXO C, FIG. C.31 a C.36. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.5.

TABELA 3.5 – Prédio “C” – Opção 5 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|----------|----------|---------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 116,00 | 82,98 | 34,98 | 233,96 |
| CONCRETO (m³) | 25,80 | 10,98 | 2,40 | 39,18 |
| AÇO (kgf) | 3.538,00 | 1.436,00 | 326,00 | 5.300,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 130,8 m², constata-se pelos dados da TAB.3.5 uma taxa de fôrma de $(233,96 \text{ m}^2/130,8 \text{ m}^2) = 1,79 \text{ m}^2 / \text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(39,18 \text{ m}^3/130,8 \text{ m}^2)=0,30 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(5300 \text{ kgf}/39,18 \text{ m}^3) = 135,27 \text{ kgf}/ \text{m}^3$.

Os deslocamentos obtidos estão na FIG.3.25, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes, em centímetros.

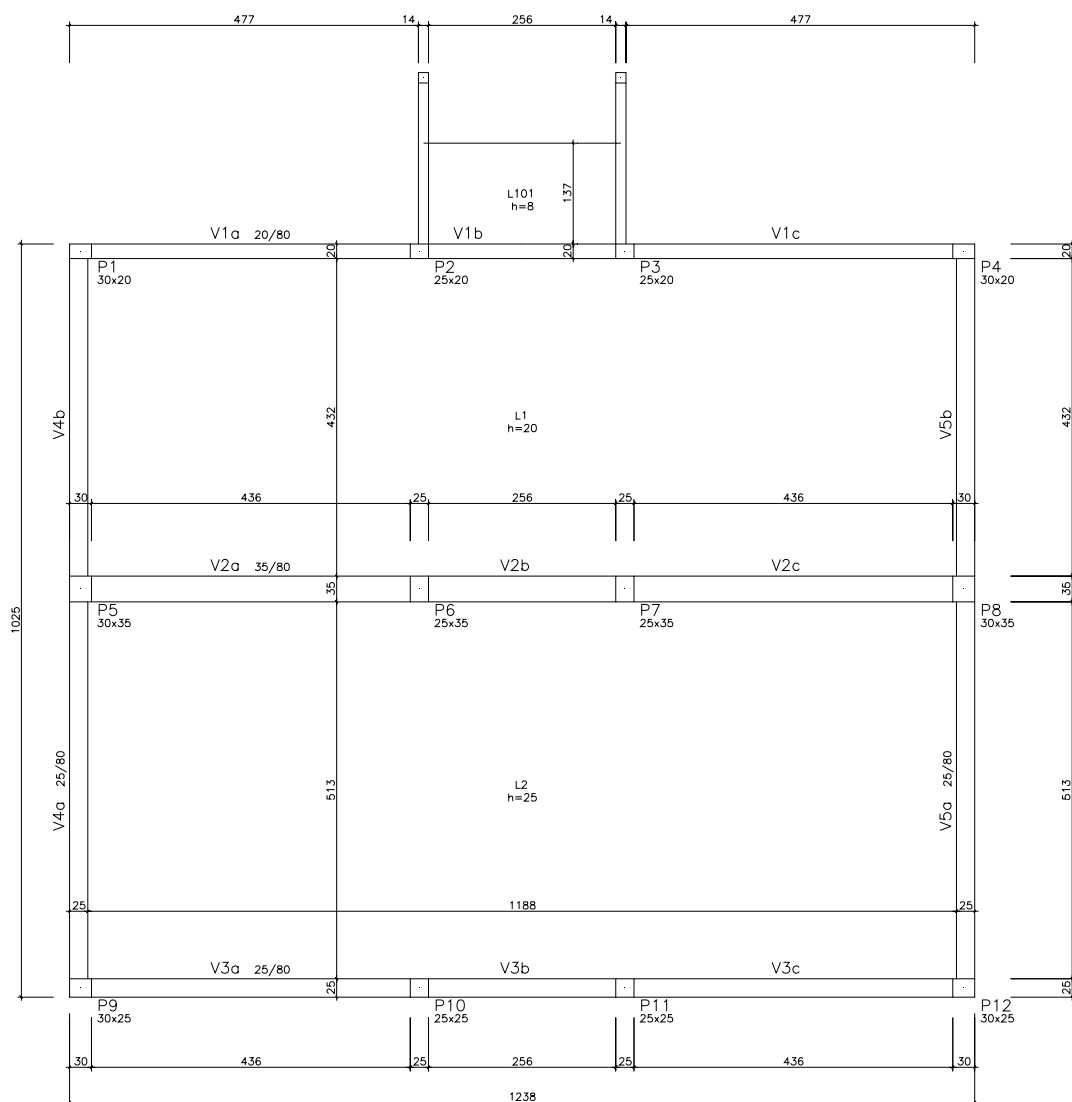


FIGURA 3.24– Prédio “C” – Fôrma da Opção 5

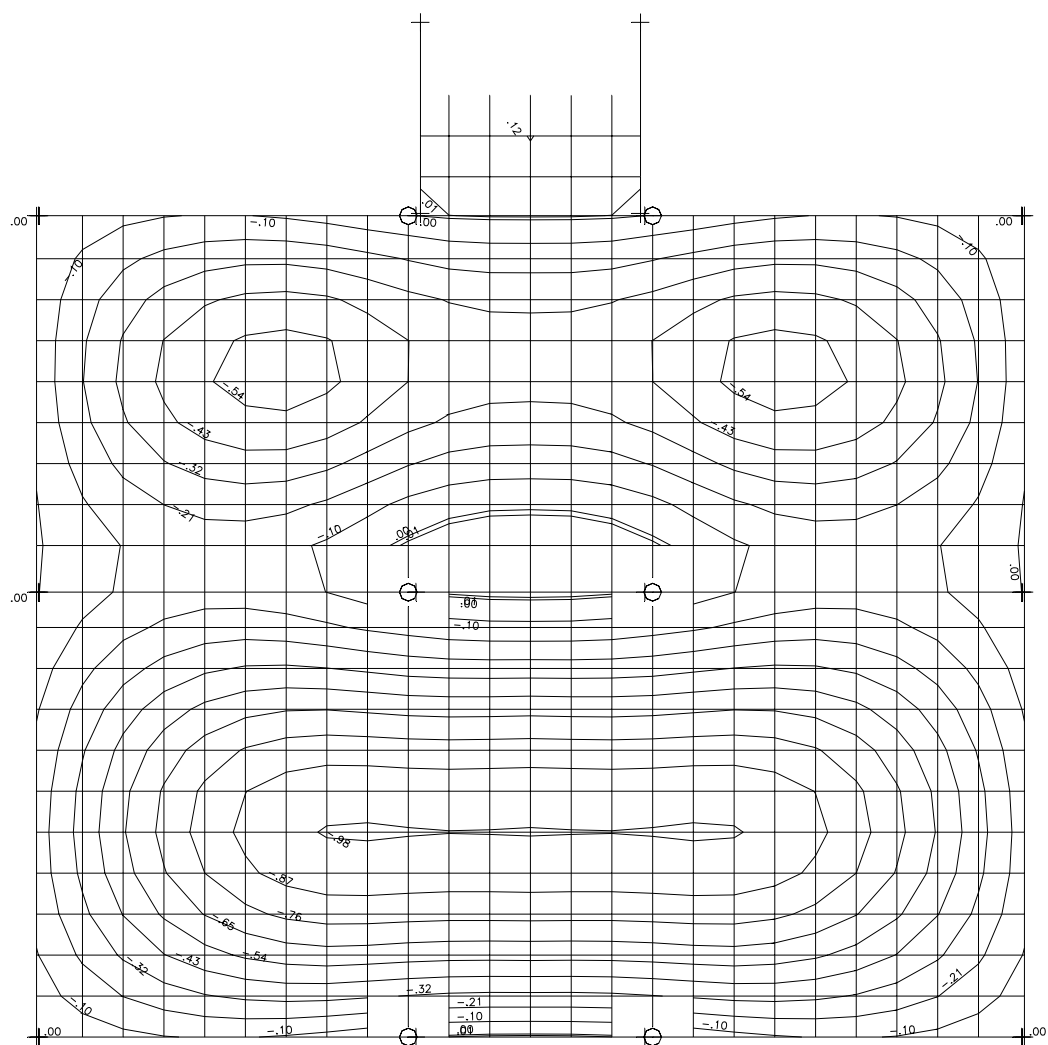


FIGURA 3.25 – Prédio “C” – Opção 5 – Deslocamentos das Vigas e Lajes (cm)

3.2.6 - Opções com lajes nervuradas

Foram também processadas as Opções 6 e 7, que são idênticas às Opções 4 e 5, com a utilização de laje nervurada em vez de laje maciça. Nessas lajes nervuradas, foram consideradas fôrmas de polipropileno, com distância entre eixos de nervura de 90 cm nas duas direções, altura total de 52,5 cm, capeamento de espessura igual a 10 cm e nervuras com largura média de 21 cm.

A Opção 6, cuja fôrma está na FIG.3.26, foi processada pelo Modelo b.2, citado no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os isovalores dos deslocamentos das lajes e vigas estão na FIG.3.27, e têm valores adequados. Notou-se, entretanto, que, em função das cargas das alvenarias nas lajes serem muito grandes, seria necessário armar muitas das regiões dessas lajes para combater o cisalhamento (ver FIG.3.28). Isso, na prática, seria inviável e, portanto, essa opção foi descartada e não será considerada nos outros prédios processados neste trabalho.

A Opção 7, cuja fôrma está na FIG.3.29, foi também processada pelo segundo modelo citado no item 2.1.4.b) deste trabalho, considerando rótulas sobre a viga V2 (FIG.3.30 e 3.31) e sem a consideração dessas rótulas (FIG.3.32 e 3.33). Os isovalores dos deslocamentos, nos dois casos, também apresentaram valores adequados (ver FIG.3.30 e 3.32). Entretanto, assim como na Opção 6, seria necessário armar muitas regiões dessas lajes, para combater o cisalhamento (ver FIG.3.31 e 3.33). Isso, na prática, seria inviável e, portanto, essa opção também foi descartada e não será considerada nos outros prédios processados neste trabalho.

3.2.7 – Gráficos e tabelas comparativos

A seguir são apresentados gráficos e tabelas que comparam o consumo do material para as várias opções do prédio “C”.

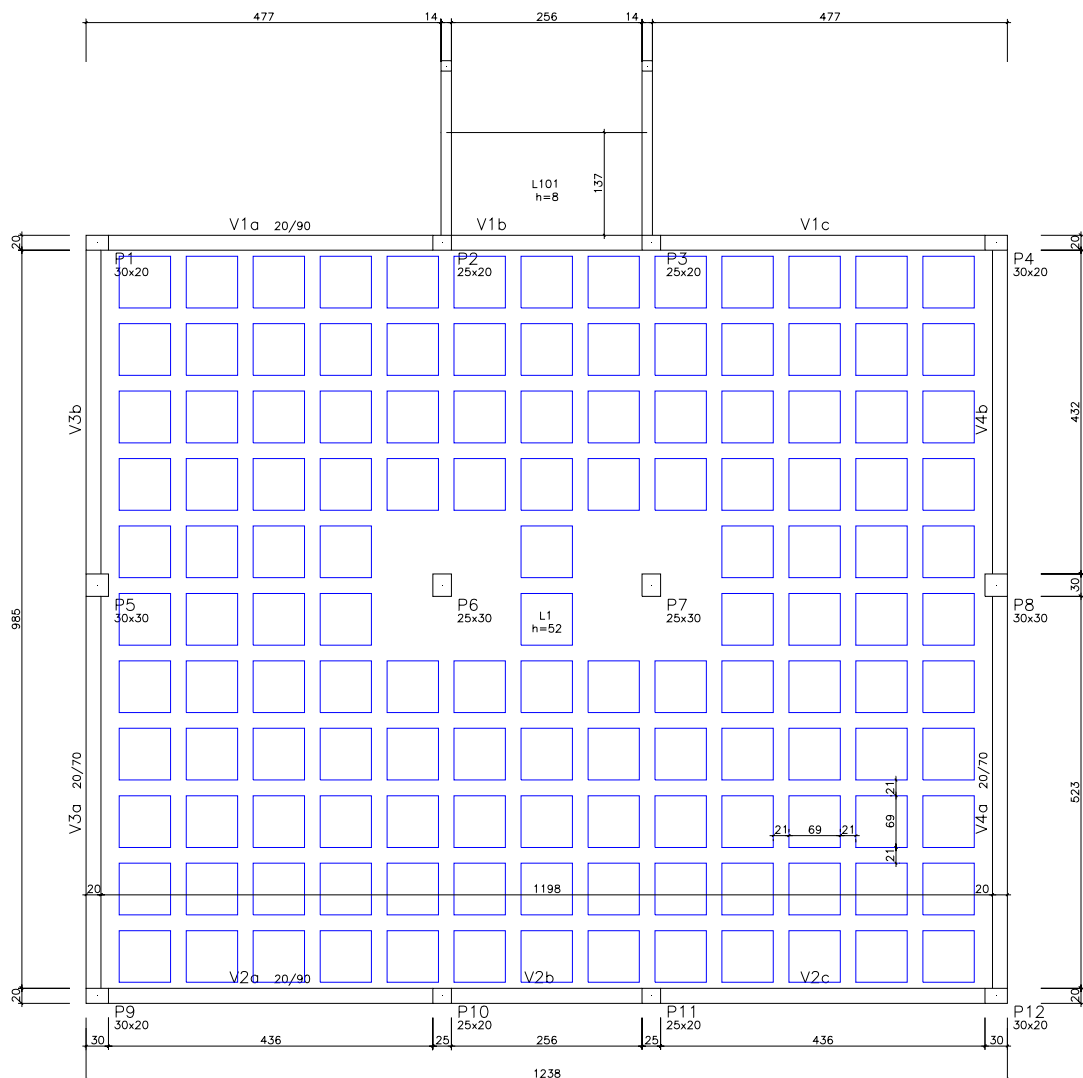


FIGURA 3.26 – Prédio “C” – Fôrma da Opção 6

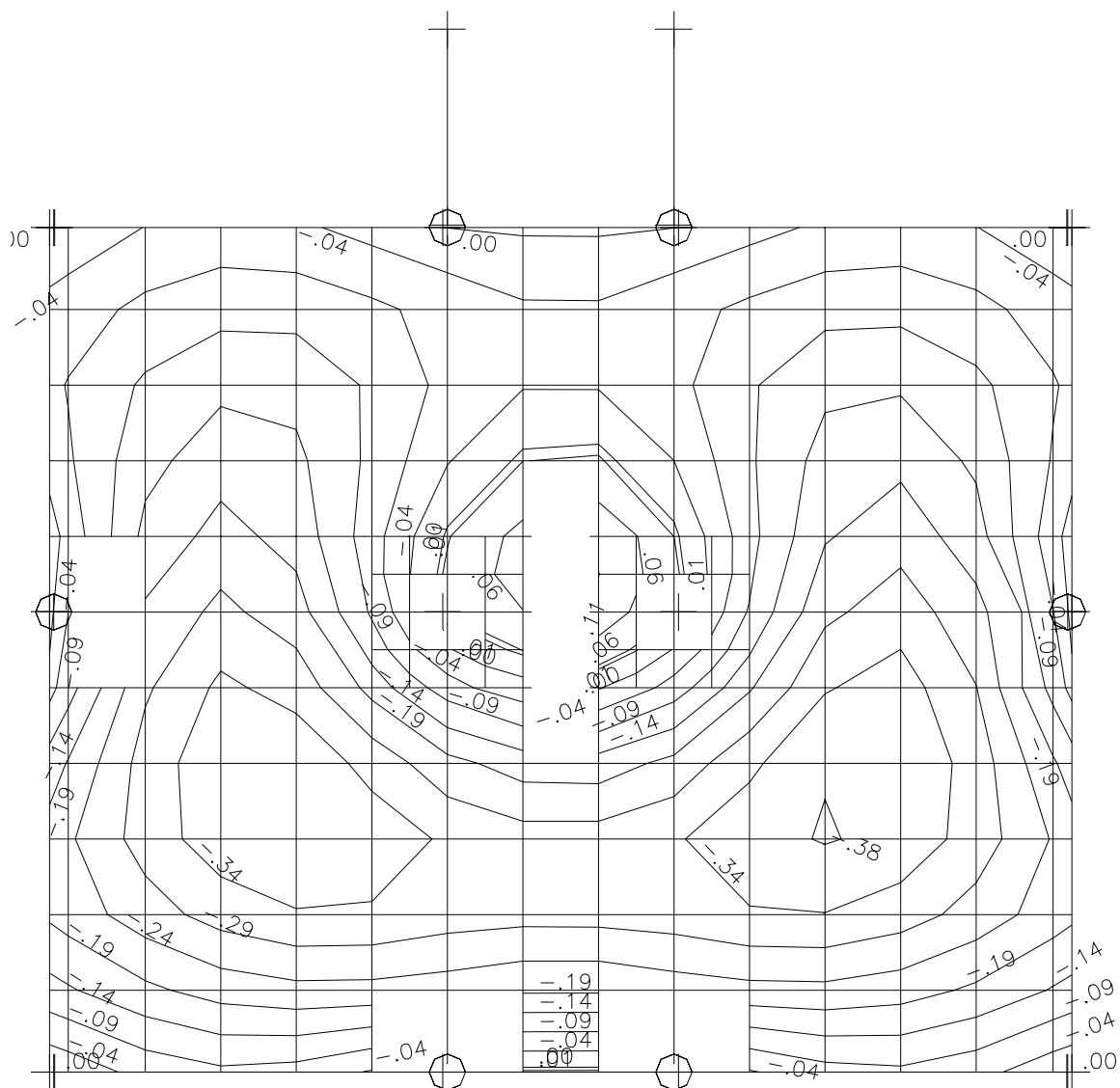


FIGURA 3.27 – Prédio “C” – Opção 6 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

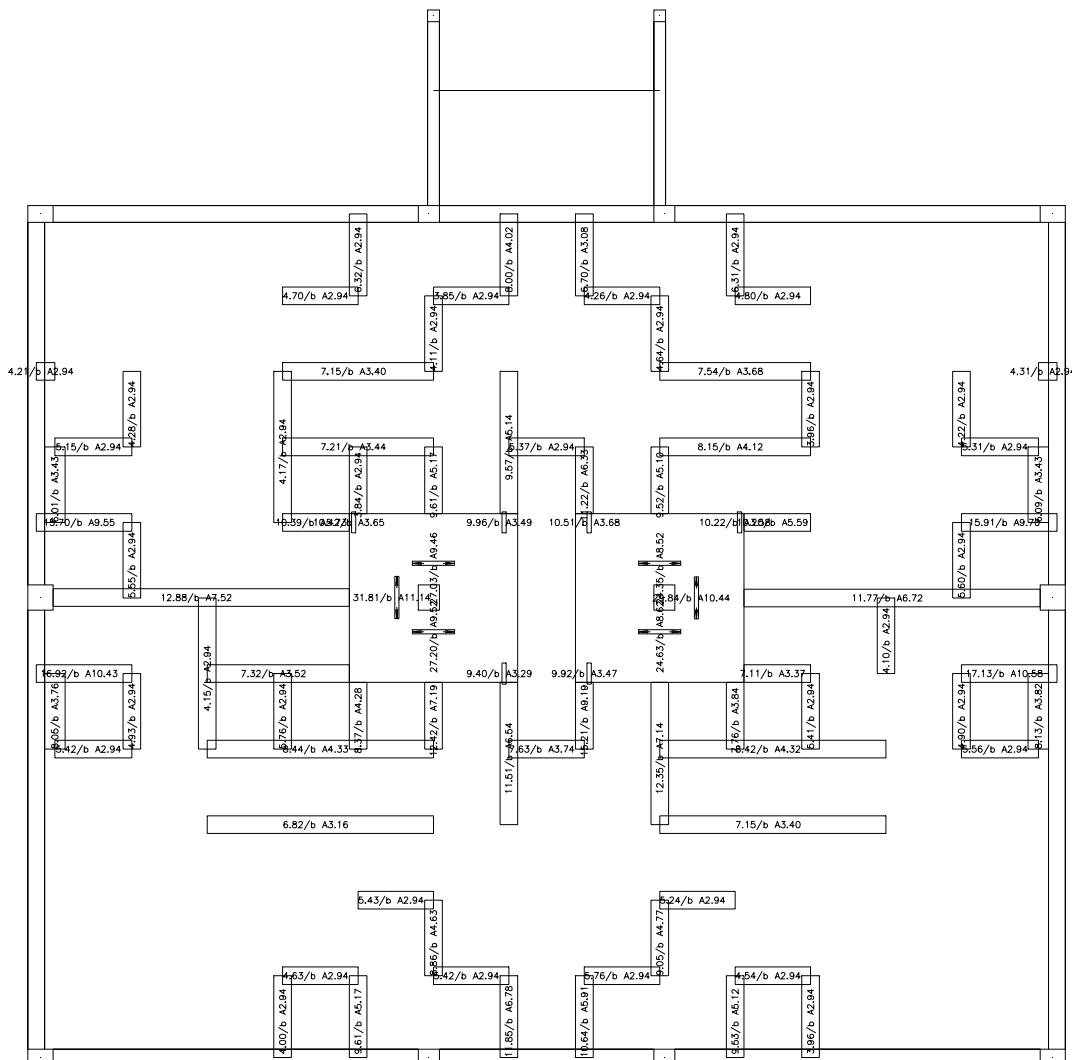


FIGURA 3.28 – Prédio “C” – Opção 6 – Regiões onde se precisa armar a laje ao cisalhamento

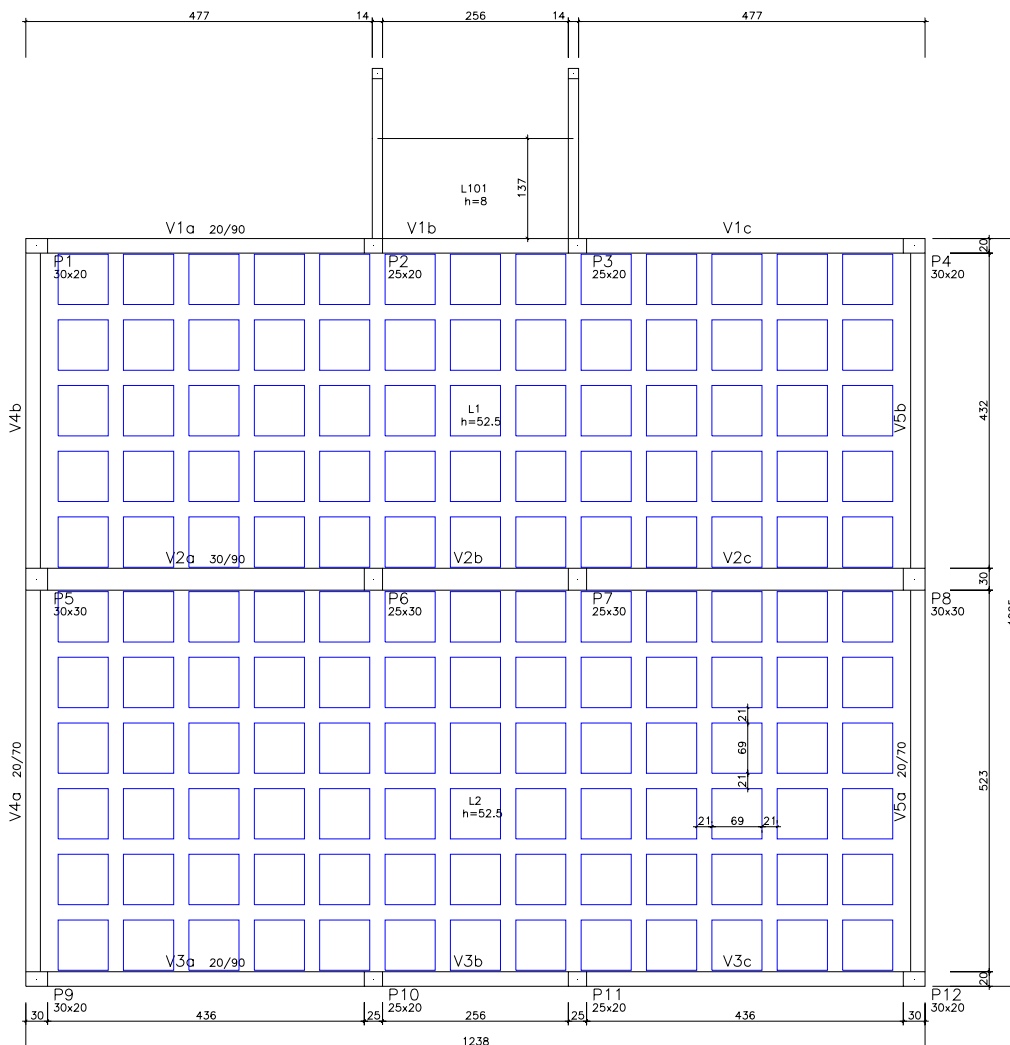


FIGURA 3.29 – Prédio “C” – Fôrma da Opção 7

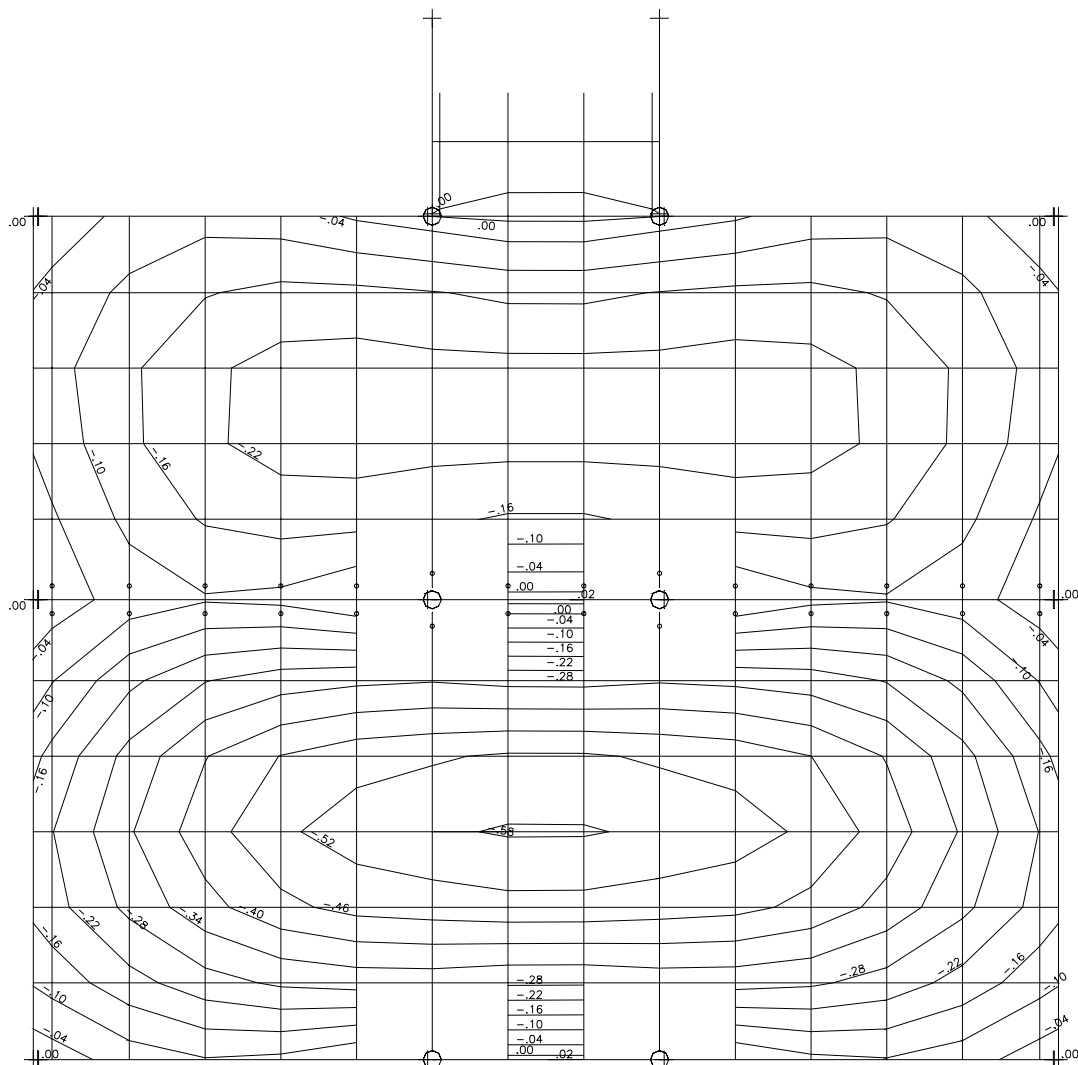


FIGURA 3.30 – Prédio “C” – Opção 7 – Deslocamentos das vigas e lajes com a consideração de rótula sobre a viga central V2 (cm)

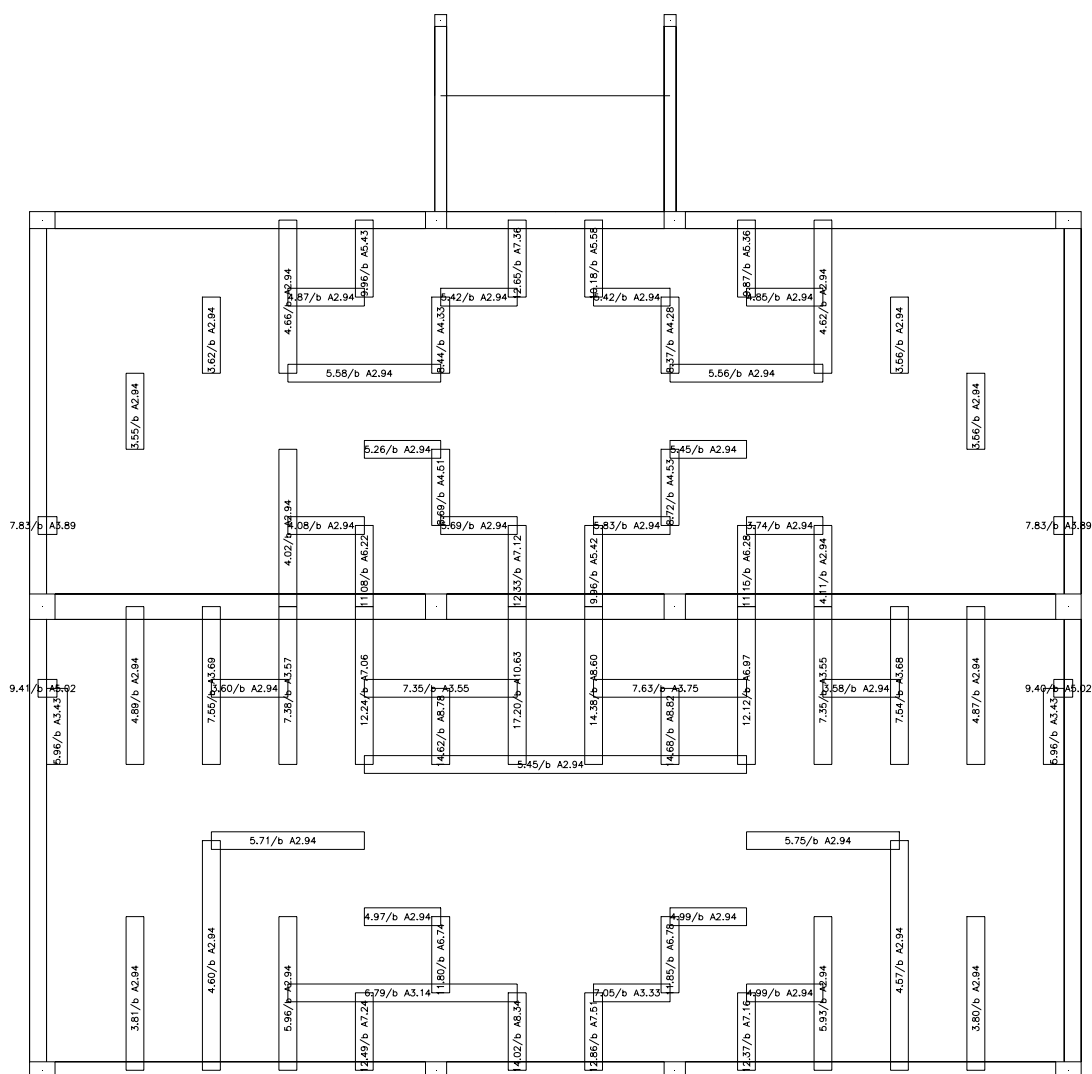


FIGURA 3.31 – Prédio “C” – Opção 7 – Regiões onde se precisa armar a laje ao cisalhamento com a consideração de rótula sobre a viga central V2

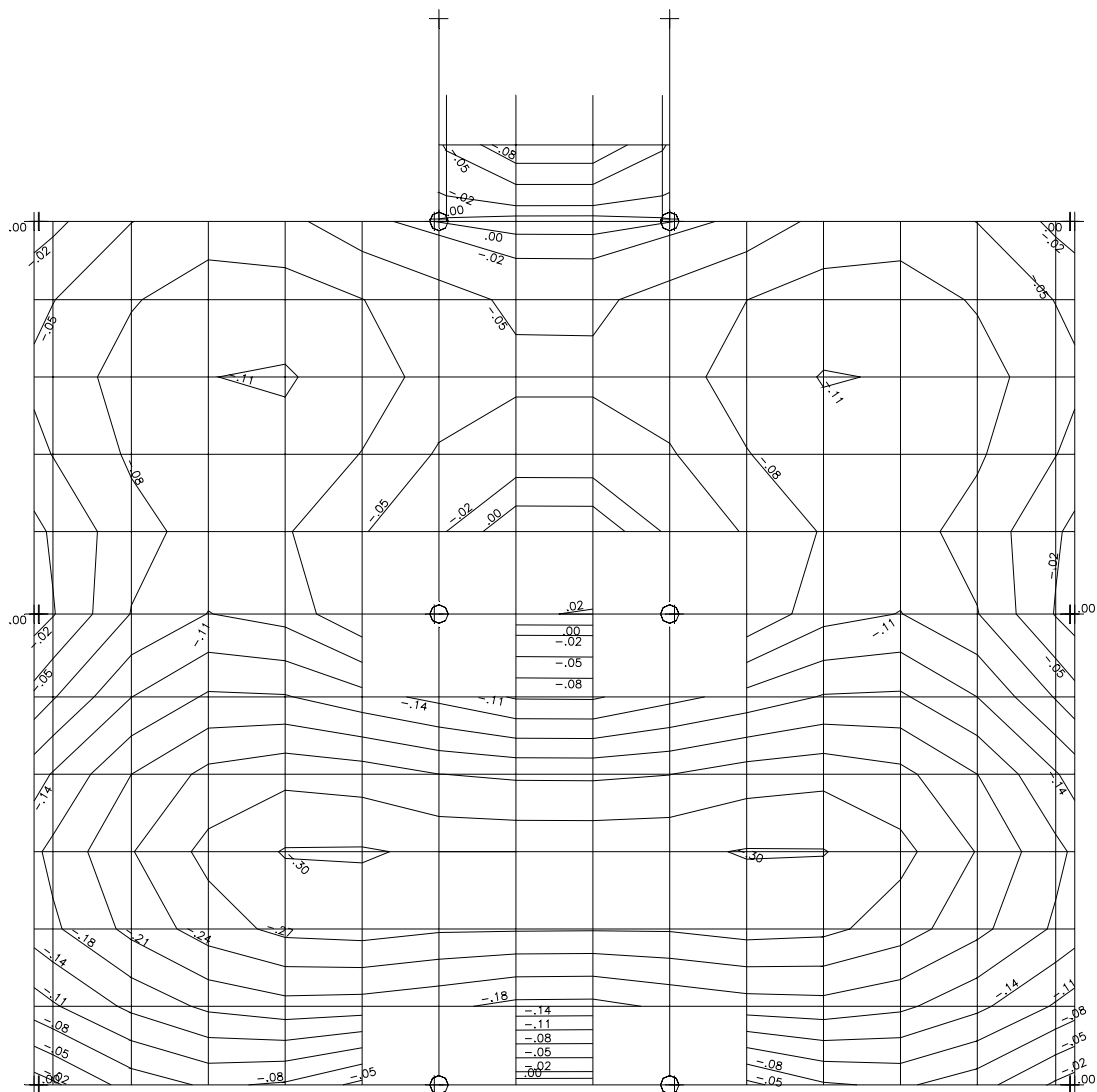


FIGURA 3.32 – Prédio “C” – Opção 7 – Deslocamentos das vigas e lajes sem a consideração de rótula sobre a viga central V2 (cm)

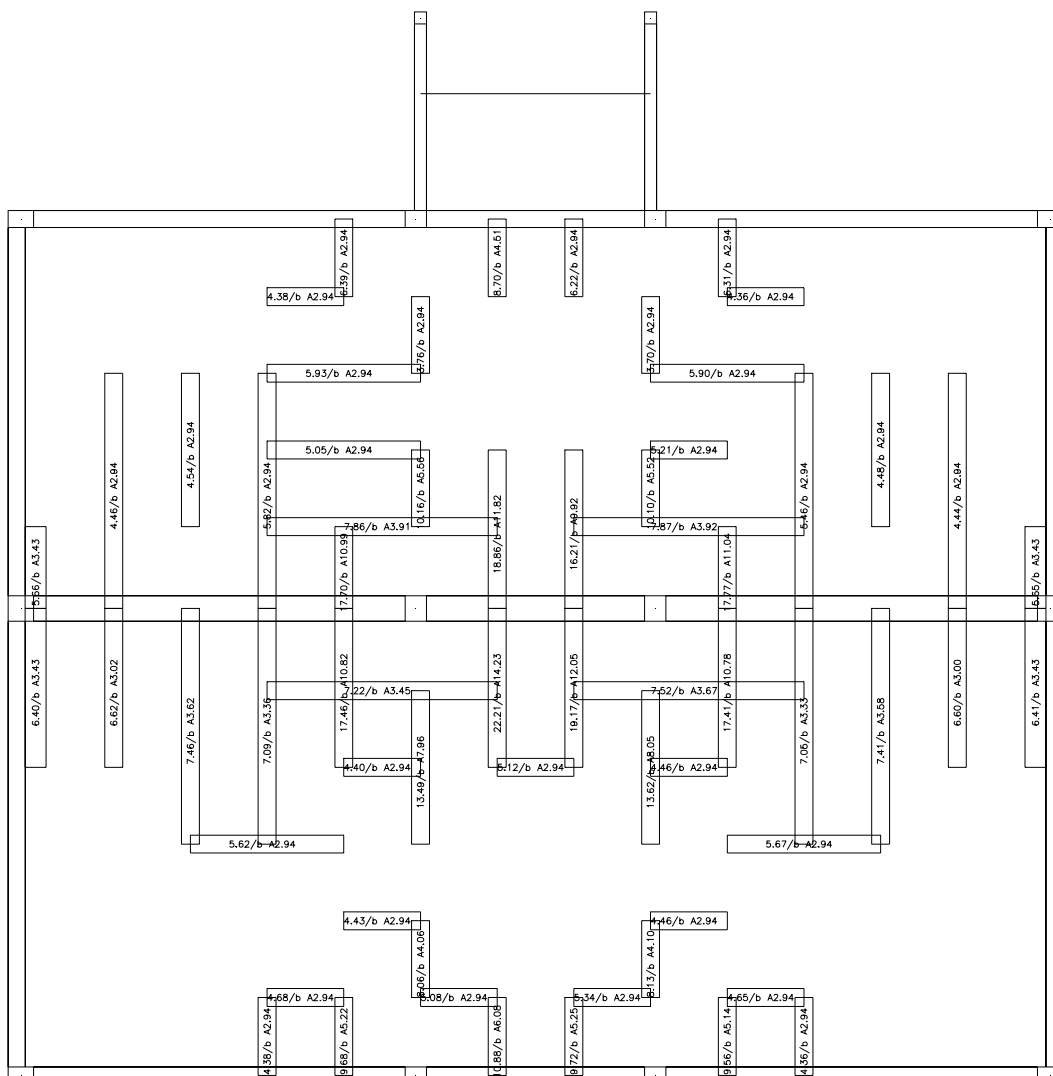


FIGURA 3.33 – Prédio “C” – Opção 7 – Regiões onde se precisa armar a laje ao cisalhamento sem a consideração de rótula sobre a viga central V2

TABELA 3.6 – Prédio “C” – Resumo dos quantitativos das várias opções

| OPÇÃO | FÔRMAS (m ²) | CONCRETO (m ³) | AÇO (kgf) |
|---------|--------------------------|----------------------------|-----------|
| Opção 1 | 283,96 | 26,58 | 3.302,00 |
| Opção 2 | 288,96 | 27,08 | 3.326,00 |
| Opção 3 | 282,96 | 26,78 | 3.269,00 |
| Opção 4 | 217,00 | 38,79 | 5.833,00 |
| Opção 5 | 233,96 | 39,18 | 5.300,00 |

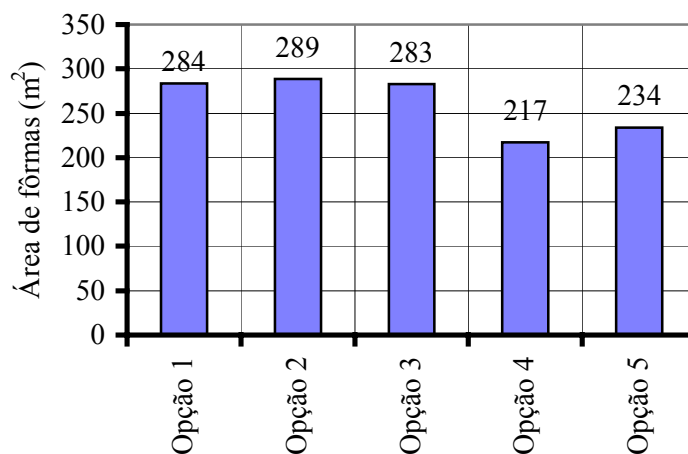


FIGURA 3.34 – Prédio “C” – Consumo de fôrma das várias opções

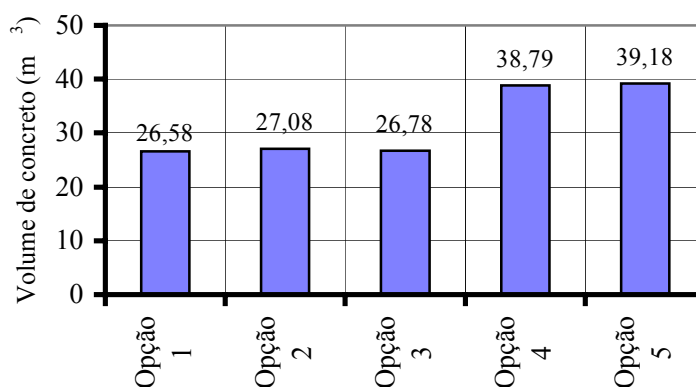


FIGURA 3.35 – Prédio “C” – Consumo de concreto das várias opções

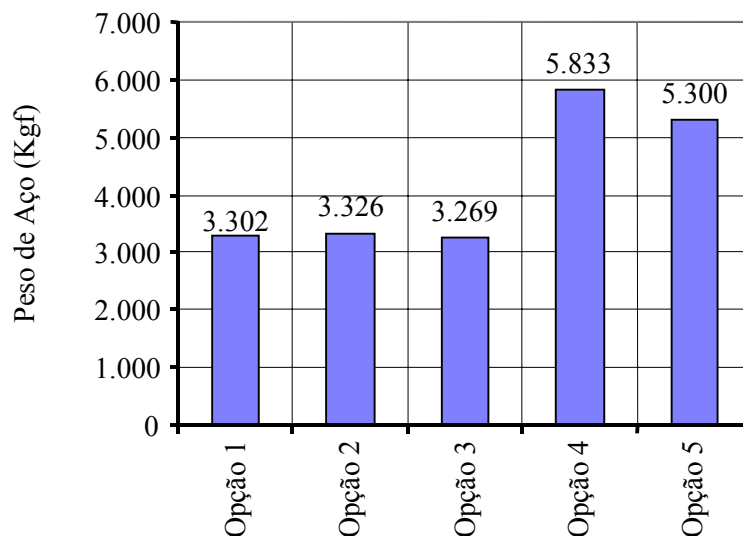


FIGURA 3.36 – Prédio “C” – Consumo de aço das várias opções

TABELA 3.7 – Prédio “C” – Quantitativos por m^2 para um pavimento tipo com área de $130,80 m^2$

| OPÇÃO | FÔRMAS (m^2/m^2) | CONCRETO (m^3/m^2) | AÇO (kgf/m^2) |
|---------|----------------------|------------------------|-------------------|
| Opção 1 | 2,17 | 0,203 | 25,24 |
| Opção 2 | 2,21 | 0,207 | 25,43 |
| Opção 3 | 2,16 | 0,205 | 24,99 |
| Opção 4 | 1,66 | 0,297 | 44,59 |
| Opção 5 | 1,79 | 0,300 | 40,52 |

TABELA 3.8 – Prédio “C” – Deslocamentos máximos para as várias opções (cm)

| OPÇÃO | Modelo grelha de vigas | Modelo grelha de vigas e lajes |
|---------|------------------------|--------------------------------|
| Opção 1 | 0,44 | 0,49 |
| Opção 2 | 0,75 | 0,72 |
| Opção 3 | 0,47 | 0,53 |
| Opção 4 | - | 1,26 |
| Opção 5 | - | 0,98 |

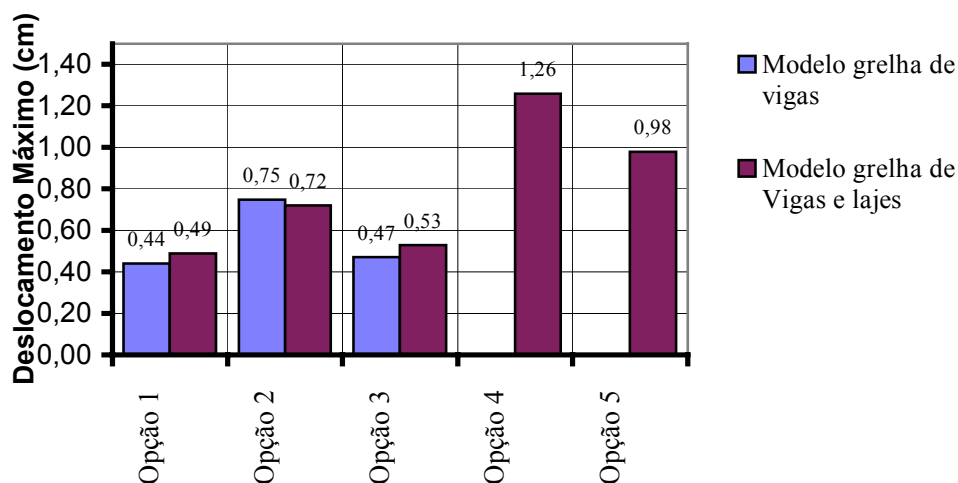


FIGURA 3.37 – Prédio “C” – Deslocamentos máximos para as várias opções

3.2.8 – Comentários sobre o prédio “C”

a) Quantitativos

Analisando-se a TAB.3.6 e as FIG.3.34 a 3.36, percebe-se que, como era de se esperar, os consumos das Opções 1, 2 e 3 (que têm uma estrutura convencional de lajes, vigas e pilares) são praticamente os mesmos, variando no máximo em 2%. A Opção 2, entretanto, que tem vigas com balanço de 2,0 metros, é das três a que apresenta os maiores consumos de fôrma, concreto e aço.

A Opção 4, que tem vigas somente no perímetro e laje lisa maciça com 25 cm de espessura, consome menos fôrma (24%), mas, em compensação, consome mais concreto (45%) e mais aço (77%) que a média das Opções 1 a 3.

A Opção 5, que, além das vigas do perímetro, tem mais uma viga central e lajes com grandes espessuras (20 cm e 25 cm), consome também menos fôrma (18%), mas, em compensação, consome mais concreto (46%) e mais aço (61%) que a média das Opções 1 a 3.

Apenas para uma avaliação inicial dos preços dessas opções, foram considerados os custos diretos abaixo relacionados para o material da estrutura, que foi gentilmente

fornecido pelo engenheiro JOÃO BAGNO, da PLANOR – Planejamento e Orçamentos de Obras, no mês de setembro/2003:

- Fôrma com pequena repetição = R\$20,00 /m²
- Concreto usinado e bombeado, $f_{ck} \geq 20$ MPa (inclusive mão-de-obra de lançamento) = R\$220,00/m³.
- Aço cortado e dobrado com 10% de perdas = R\$2,78/kgf.

É importante ressaltar que nesses preços, que serviram apenas para uma avaliação inicial, não foram considerados alguns fatores que os influenciam (tais como tempo de execução da obra, preço diferente para lançamento do concreto em lajes planas, etc), já que esses preços entraram apenas como referência para uma comparação entre as soluções e não são o objetivo principal do trabalho.

Para esses valores unitários, o preço de custo da estrutura de cada uma das opções será:

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| Opção 1 - R\$20.706,36 | (R\$158,31/m ²) |
| Opção 2 - R\$20.983,08 | (R\$160,42/m ²) |
| Opção 3 - R\$20.638,62 | (R\$157,79/m ²) |
| Opção 4 - R\$29.089,54 | (R\$222,40/m ²) |
| Opção 5 - R\$28.032,80 | (R\$214,32/m ²) |

Percebe-se que o preço médio das Opções 4 e 5 (R\$28.561,17) estaria 37% acima do preço médio da Opções 1, 2 e 3 (R\$20.776,02).

b) Deslocamentos

Analisando-se a TAB.3.8 e as FIG.3.8, 3.9, 3.14, 3.15, 3.20, 3.21, 3.23, 3.25 e 3.37, percebe-se que a Opção 4 e a Opção 5 têm deslocamentos bem superiores às Opções 1 a 3. Entre as Opções 1 a 3, a Opção 2 é a que apresenta os maiores deslocamentos, que ocorrem exatamente na região dos balanços de 2,0 metros. Com os dados da fôrma (FIG.3.13) e deslocamentos das extremidades das vigas da FIG.3.14, monta-se a TAB.3.9.

TABELA 3.9 – Prédio “C” – Opção 2 – Relação entre os deslocamentos verticais e os vãos das vigas da região do balanço de 2,0 metros

| Vigas | Vão L (cm) | Deslocamentos à esquerda (cm) | Deslocamentos à direita (cm) | Δ = Deslocamento diferencial (cm) | Δ/L |
|-------|------------|-------------------------------|------------------------------|--|------------|
| V1a | 220 | 0,41 | 0,01 | 0,40 | 1/550 |
| V2 | 354 | 0,58 | 0,04 | 0,54 | 1/655 |
| V4a | 220 | 0,53 | 0,01 | 0,52 | 1/423 |
| V5a | 354 | 0,65 | 0,13 | 0,52 | 1/681 |
| V6 | 354 | 0,75 | 0,26 | 0,49 | 1/722 |
| V8a | 220 | 0,45 | 0,01 | 0,44 | 1/500 |
| V9a1 | 262 | 0,45 | 0,75 | 0,30 | 1/873 |
| V9a2 | 147 | 0,75 | 0,65 | 0,10 | 1/1470 |
| V9a3 | 129 | 0,65 | 0,53 | 0,12 | 1/1075 |
| V9b1 | 253 | 0,53 | 0,58 | 0,05 | 1/5060 |
| V9b2 | 214 | 0,58 | 0,41 | 0,17 | 1/1259 |

A recomendação de THOMAZ (1989), na TAB.1.2, é de flechas da ordem de 1/1000 para paredes com aberturas, podendo ser admitido o valor de 1/500 para paredes sem aberturas ou “paredes com abertura com detalhes apropriados”. Analisando a TAB.3.9, nota-se que as vigas que recebem paredes sem aberturas (V1a, V2, V5, V8a) chegam a ter flechas de 1/500 (V8a), portanto no limite do recomendado. Já as vigas que recebem paredes com aberturas (V4, V6 e V9), apresentam flechas de até 1/423 (V4), o que estaria bem acima do valor recomendado.

3.3 - Segundo exemplo - prédio “A”

A planta com a arquitetura do pavimento tipo do prédio “A” está mostrada na FIG.3.38, e um corte esquemático dessa arquitetura está na FIG.3.39. Na FIG.3.40, é apresentado um esquema das paredes sem revestimento, que será usado no desenvolvimento de todas as opções que serão aqui analisadas.

As armações das várias opções foram calculadas no CADT/TQS[®], assim como as do prédio “C”, mas não serão acrescentadas nos ANEXOS para não tornar este trabalho ainda mais extenso.

3.3.1 - Opção 1 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A planta com a arquitetura da garagem da Opção 1 está na FIG.3.41, e o esquema da estrutura na FIG.3.42. Percebe-se nessas figuras que as vigas principais, que, no caso, são transversais, apresentam balanços nas duas extremidades de 0,87 metros (ver FIG.3.44). Para se ter uma idéia precisa da posição das paredes sobre as vigas dessa estrutura, apresenta-se na FIG.3.43 a superposição dessas paredes sobre a estrutura-suporte da Opção 1.

b) Processamento para avaliação dos quantitativos

Para avaliação dos quantitativos, esta Opção 1 foi então processada com a fôrma indicada na FIG.3.44, utilizando-se o modelo convencional ou simplificado, citado no item 2.1.4.a) deste trabalho. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.10.

TABELA 3.10 – Prédio “A” – Opção 1 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 164,00 | 200,00 | 90,00 | 454,00 |
| CONCRETO (m³) | 13,20 | 20,20 | 5,70 | 39,10 |
| AÇO (kgf) | 732,00 | 2.309,00 | 550,00 | 3.591,00 |

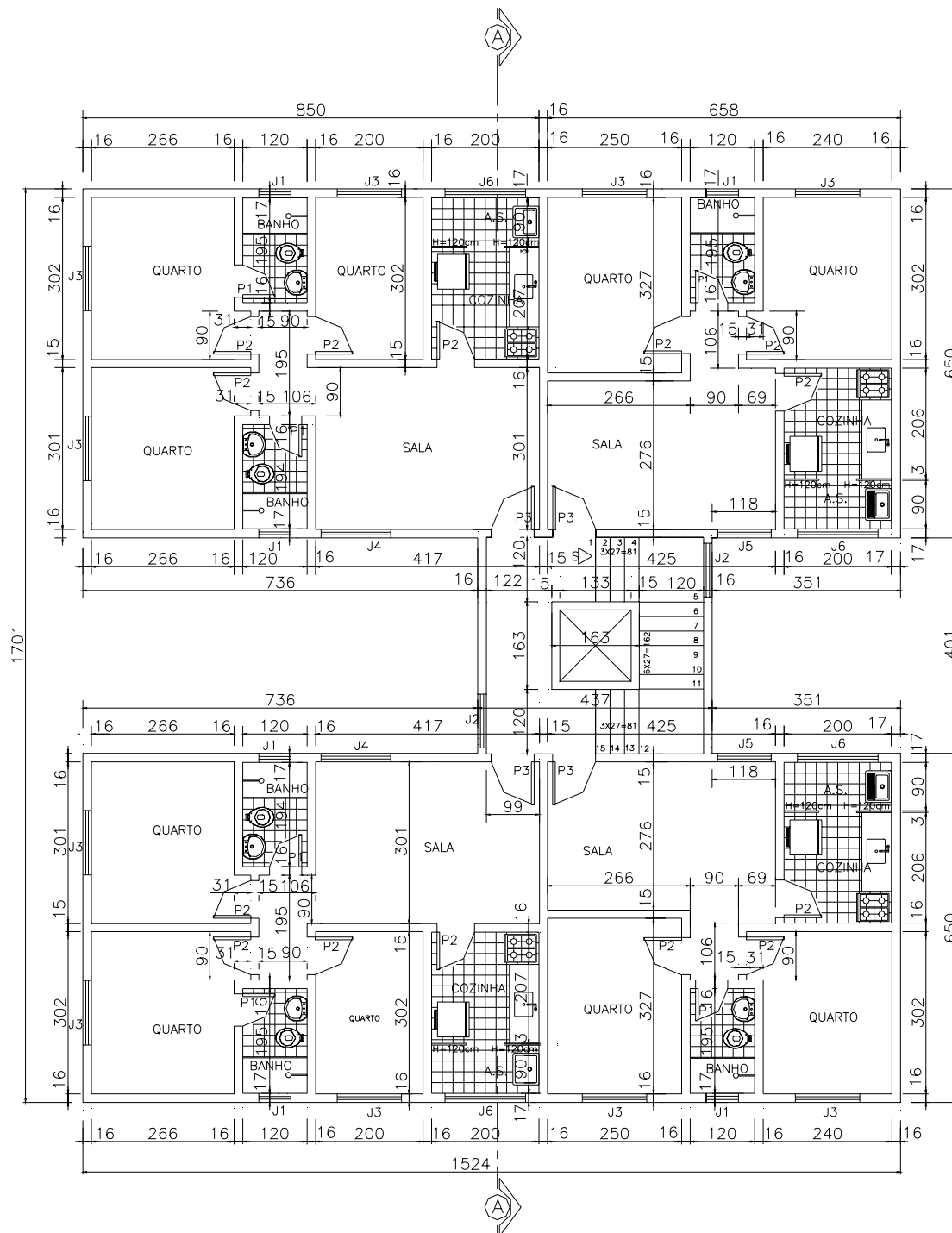


FIGURA 3.38 – Prédio “A” – Planta com a arquitetura do Pavimento Tipo

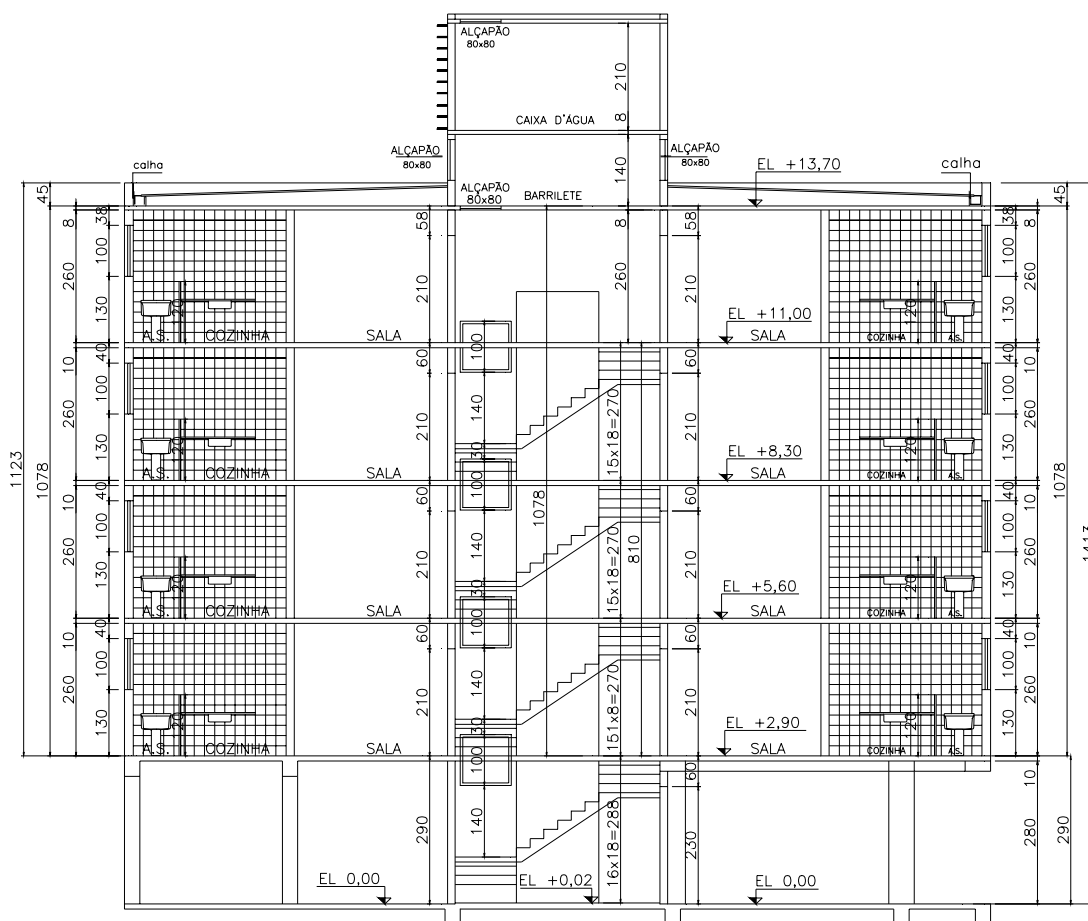


FIGURA 3.39 – Prédio “A” – Corte esquemático longitudinal A-A

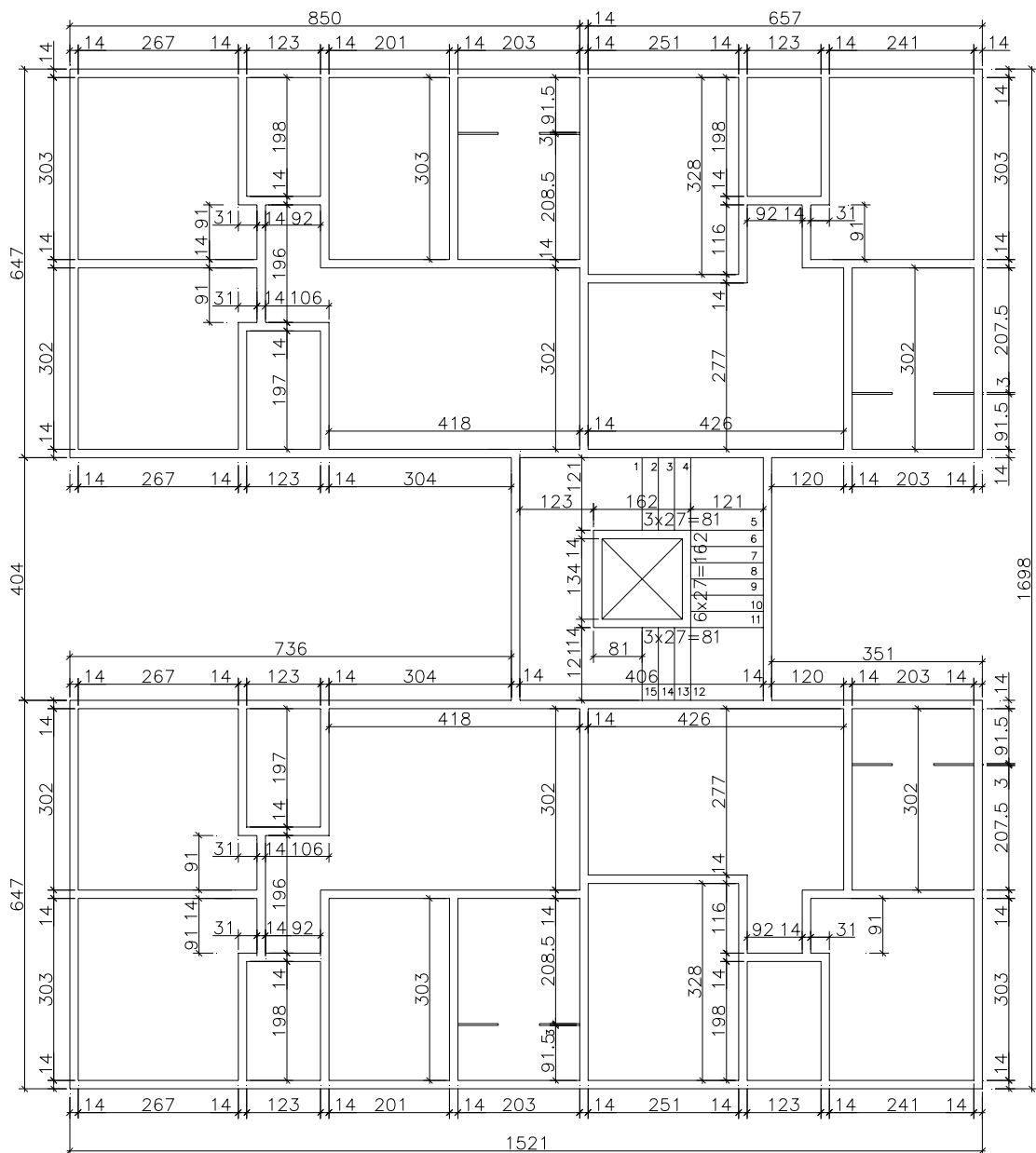


FIGURA 3.40 – Prédio “A” – Esquema das paredes sem revestimento

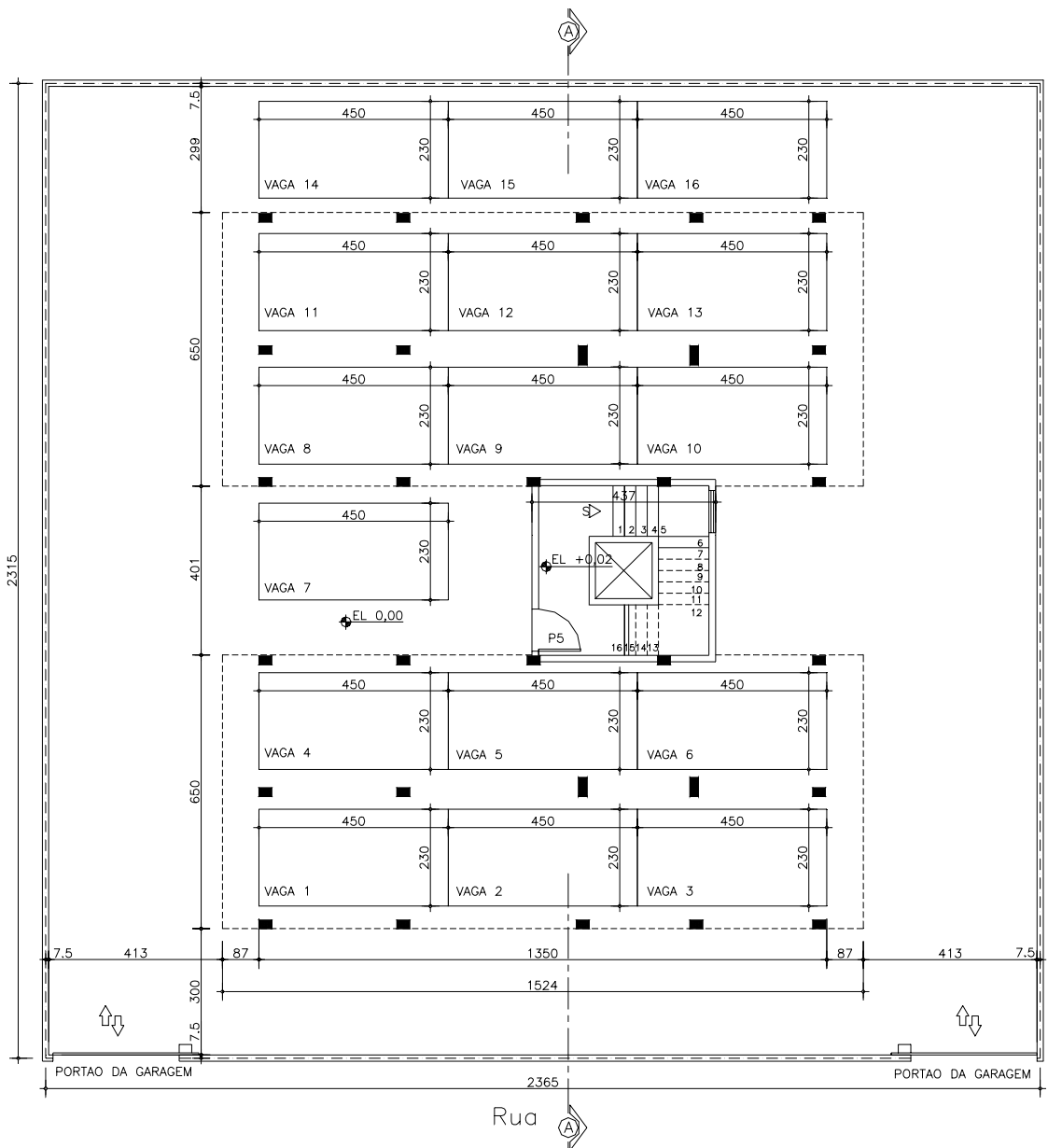


FIGURA 3.41 – Prédio “A” – Opção 1 – Planta da Garagem

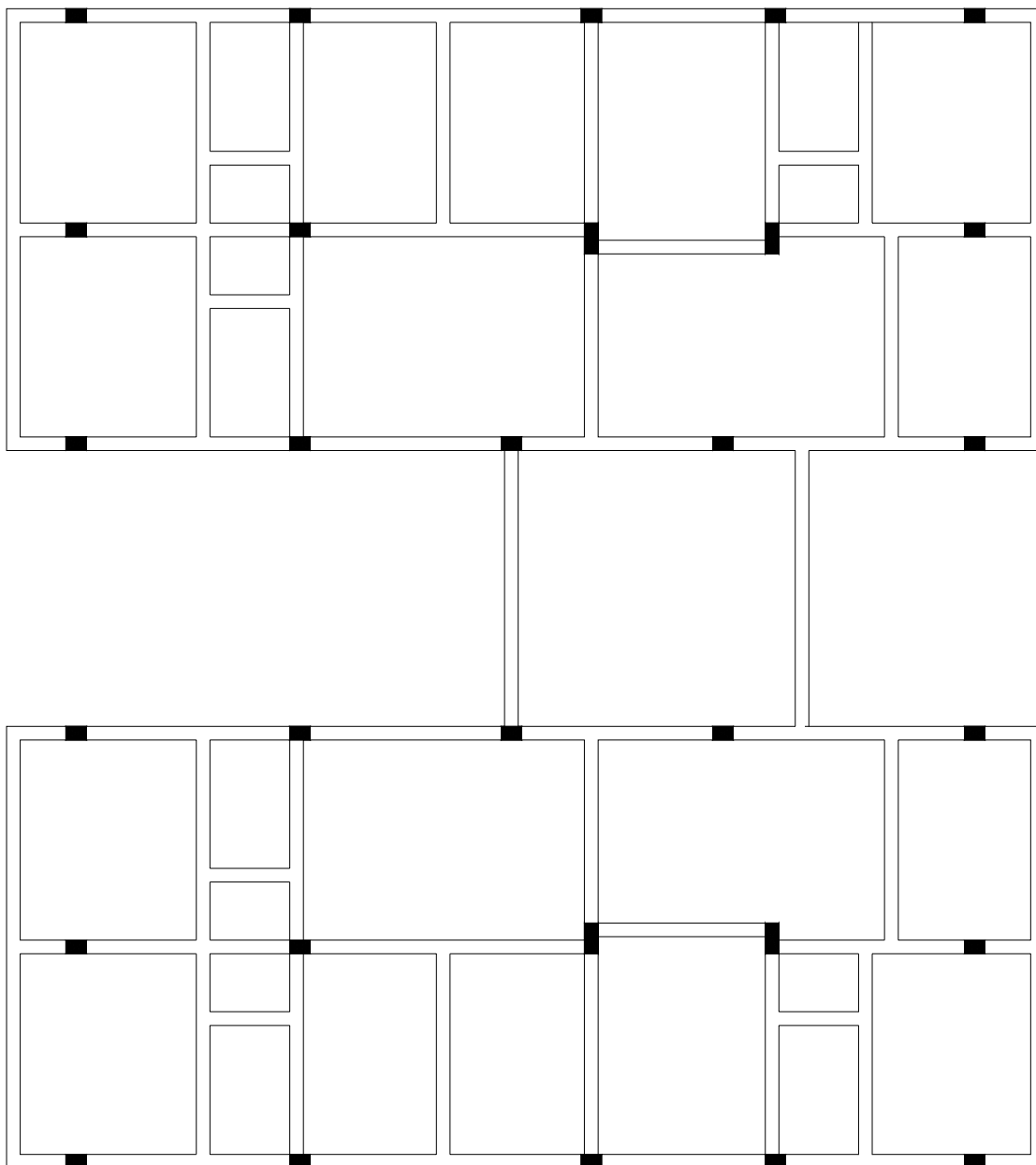


FIGURA 3.42 – Prédio “A” – Opção 1 - Esquema da estrutura

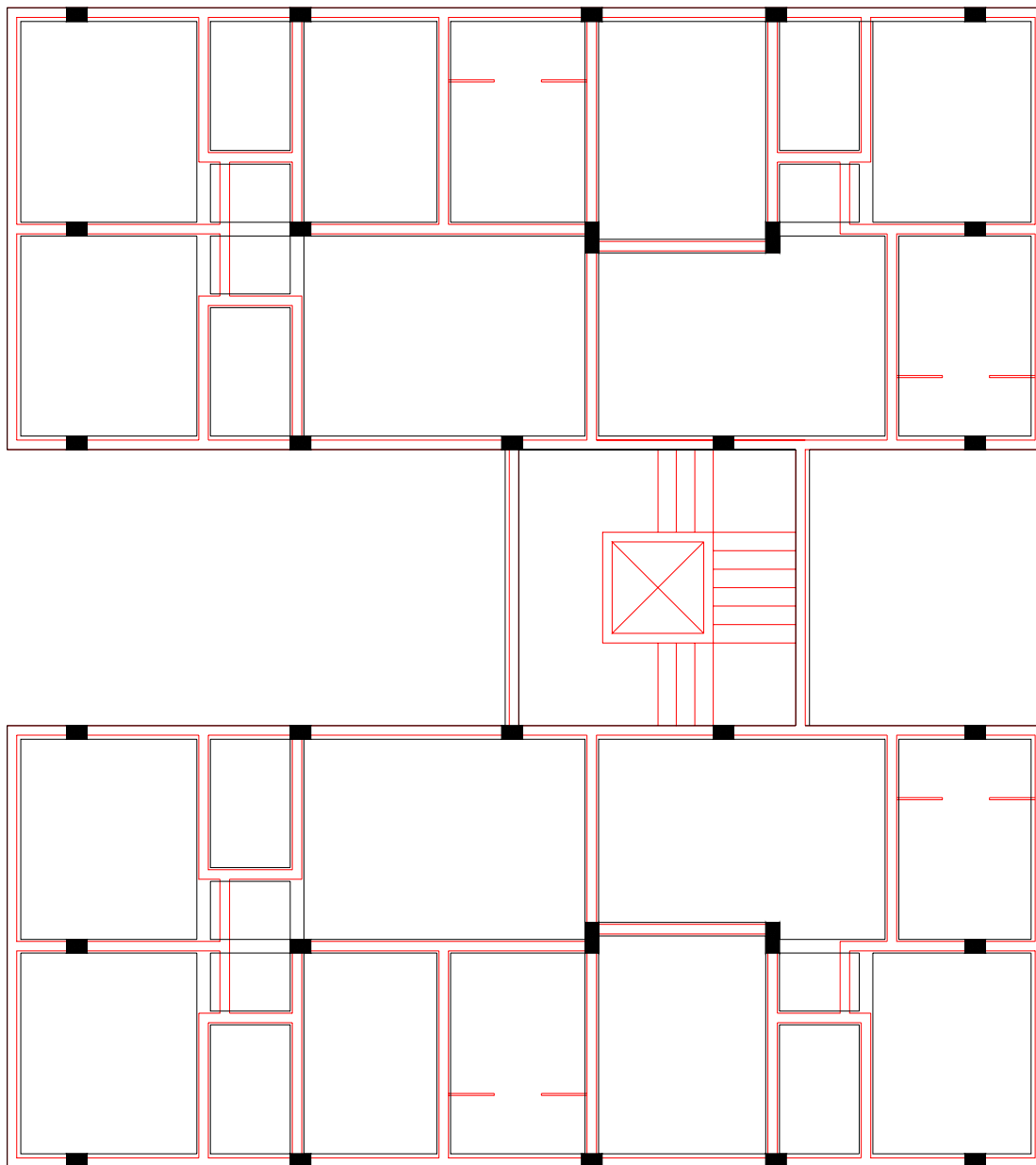


FIGURA 3.43 – Prédio “A”– Opção 1 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

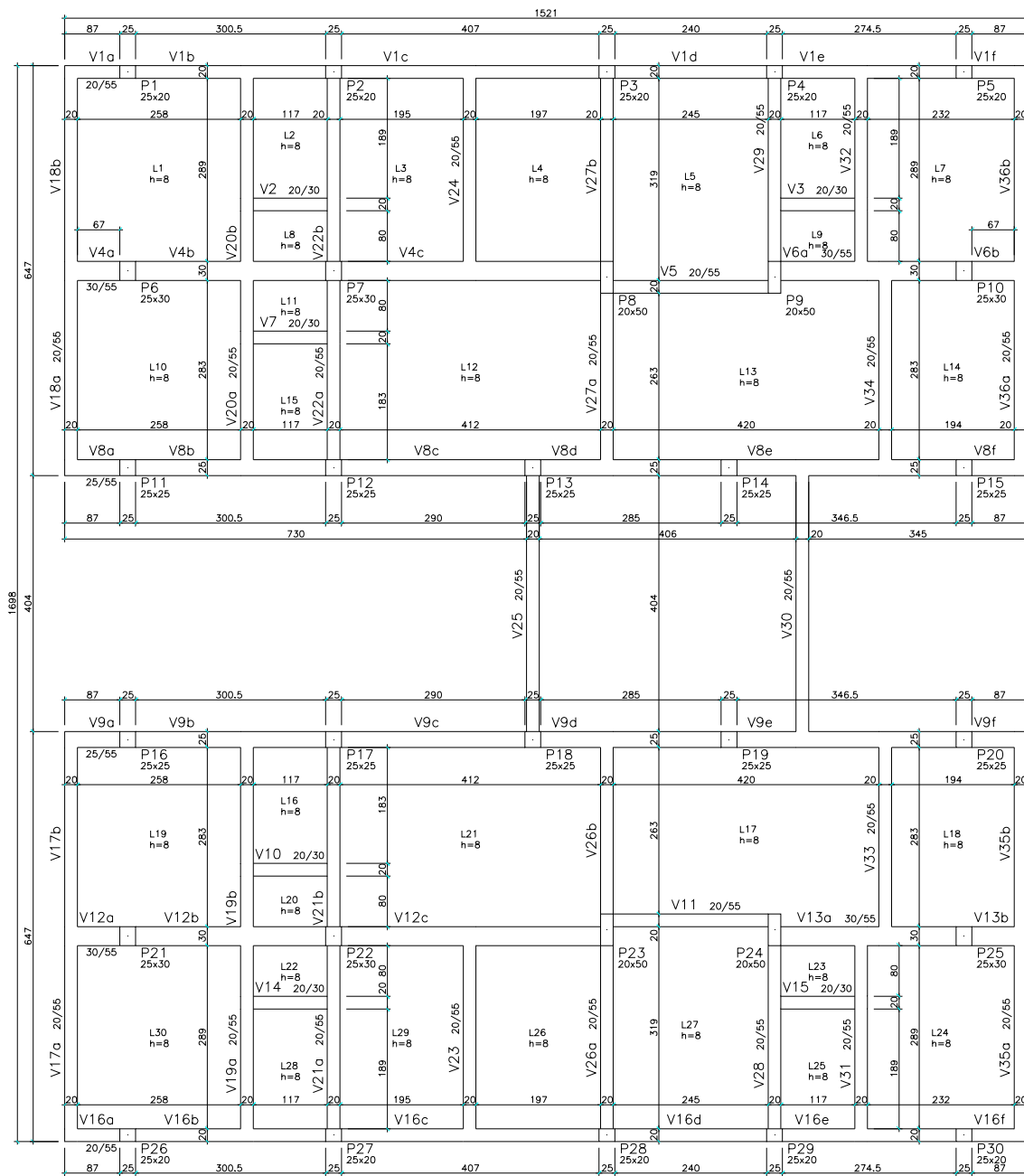


FIGURA 3.44 – Prédio “A” – Fôrma da Opção 1

Como a área dessa estrutura-suporte é de 205,5 m², constata-se pelos dados da TAB.3.10 uma taxa de fôrma de $(454 \text{ m}^2/205,5 \text{ m}^2) = 2,21 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(39,1 \text{ m}^3/205,5 \text{ m}^2) = 0,19 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(3591 \text{ kgf}/39,1 \text{ m}^3) = 91,84 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

c) Processamento para avaliação das deformações

Para uma melhor avaliação das deformações, esta Opção 1 foi processada com os dois modelos citados no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.1 estão mostrados na FIG.3.45, para cada uma das vigas. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.2 estão na FIG.3.46, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes em centímetros.

3.3.2 - Opção 2 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A planta com a arquitetura da garagem da Opção 2 está na FIG.3.47, e o esquema da estrutura na FIG.3.48. Percebe-se nessas figuras que as vigas principais, que, no caso, são transversais, apresentam balanços na extremidade esquerda de 1,74 metros e a outra extremidade não tem balanços (ver FIG.3.50). Para se ter uma idéia precisa da posição das paredes sobre as vigas dessa estrutura, apresenta-se na FIG.3.49 a superposição dessas paredes sobre a estrutura-suporte da Opção 2.

b) Processamento para avaliação dos quantitativos

Para avaliação dos quantitativos, esta Opção 2 foi então processada com a fôrma indicada na FIG.3.50, utilizando-se o modelo convencional ou simplificado, citado no item 2.1.4.a) deste trabalho. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.11.

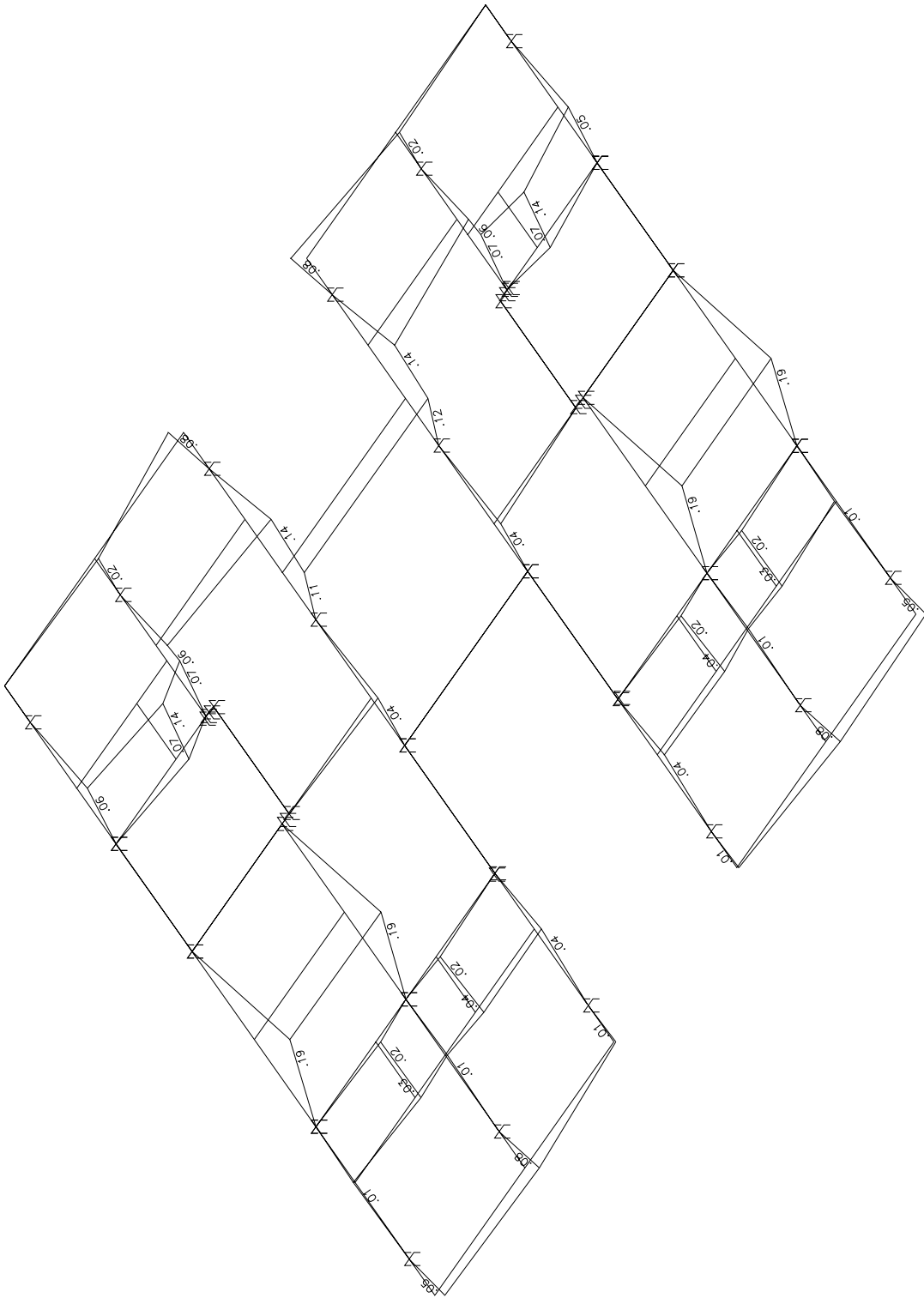


FIGURA 3.45 – Prédio “A” – Opção 1 – Deslocamentos das vigas (cm)

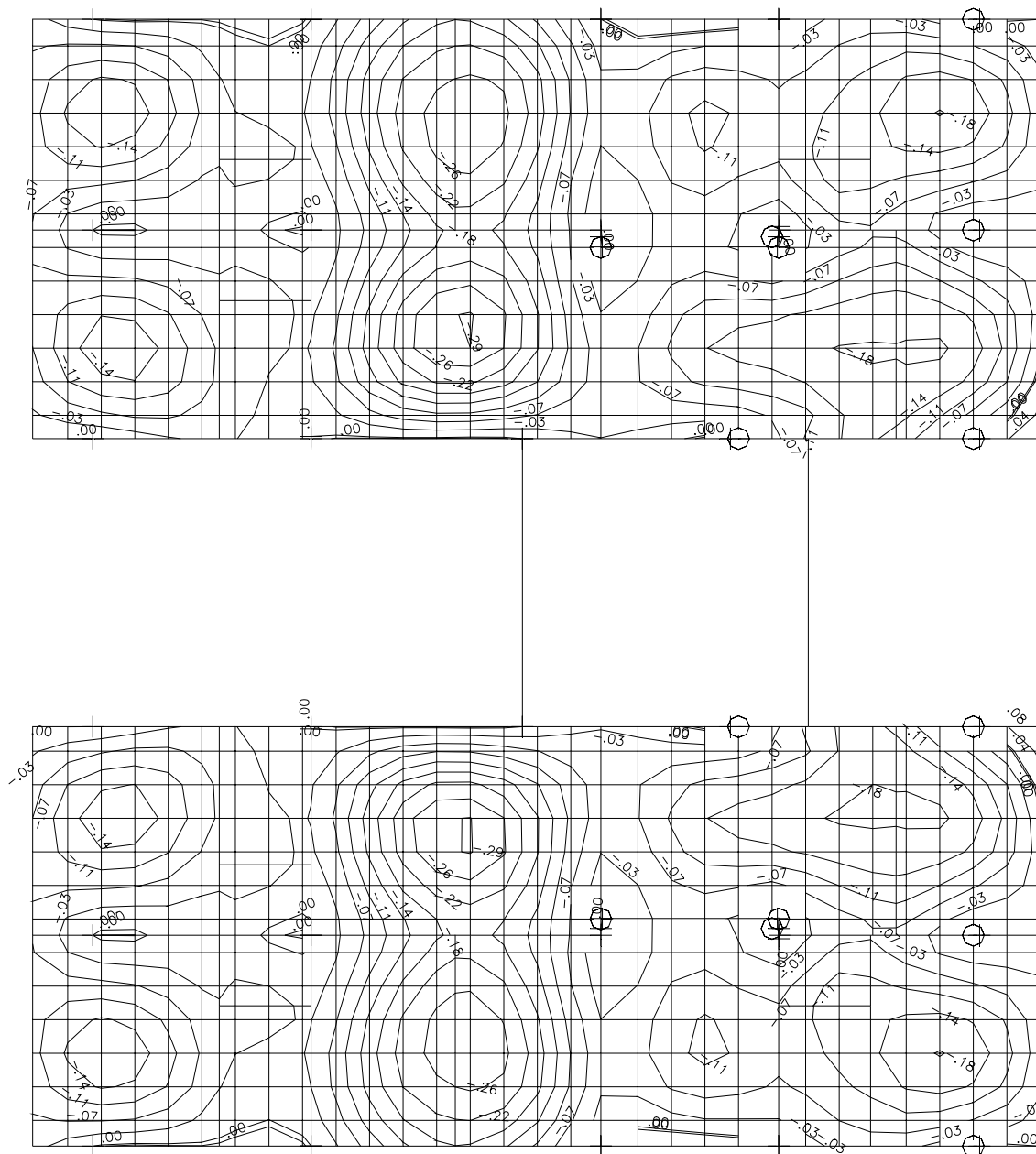


FIGURA 3.46 – Prédio “A” – Opção 1 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

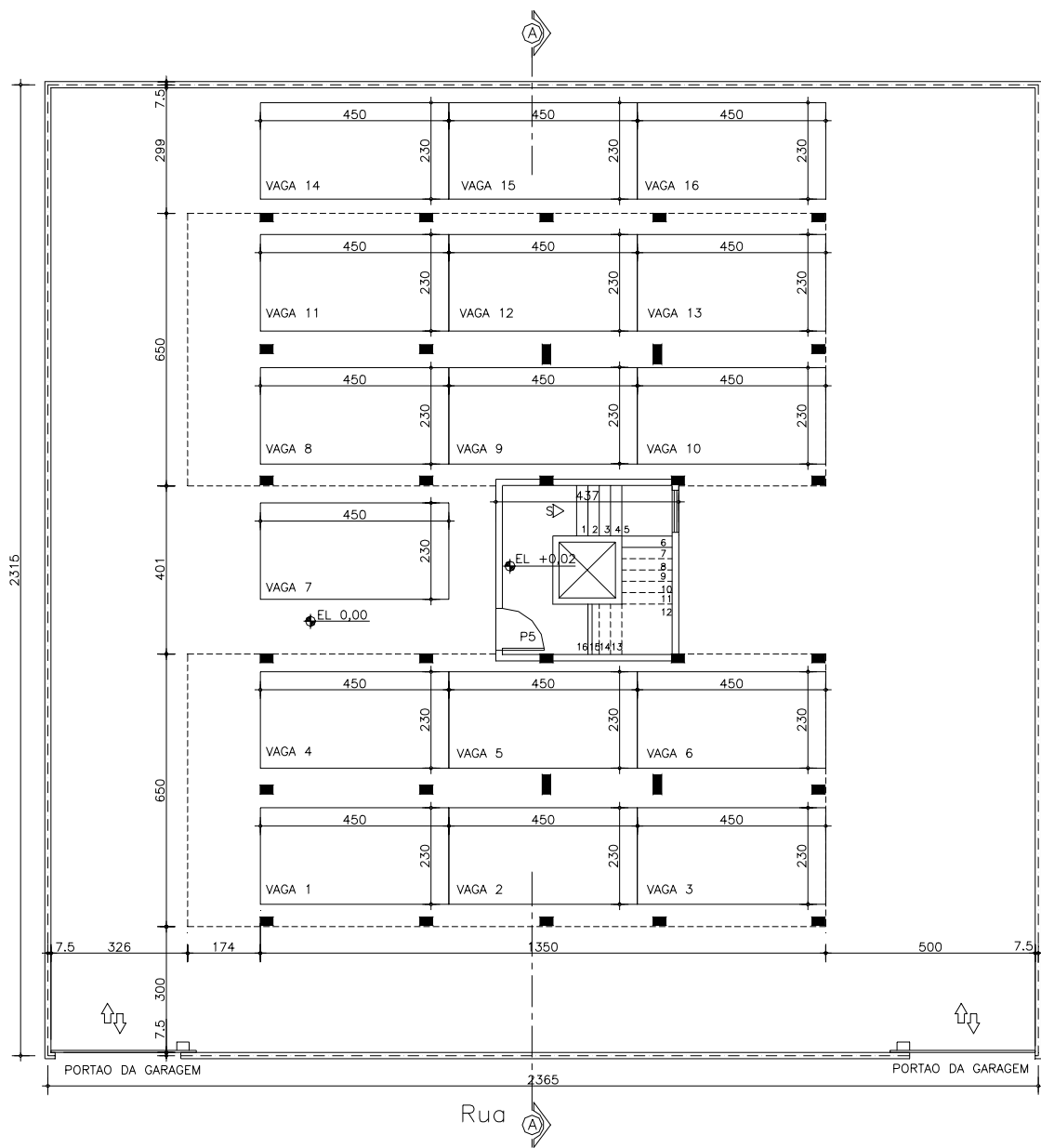


FIGURA 3.47 – Prédio “A” – Opção 2 – Planta da garagem

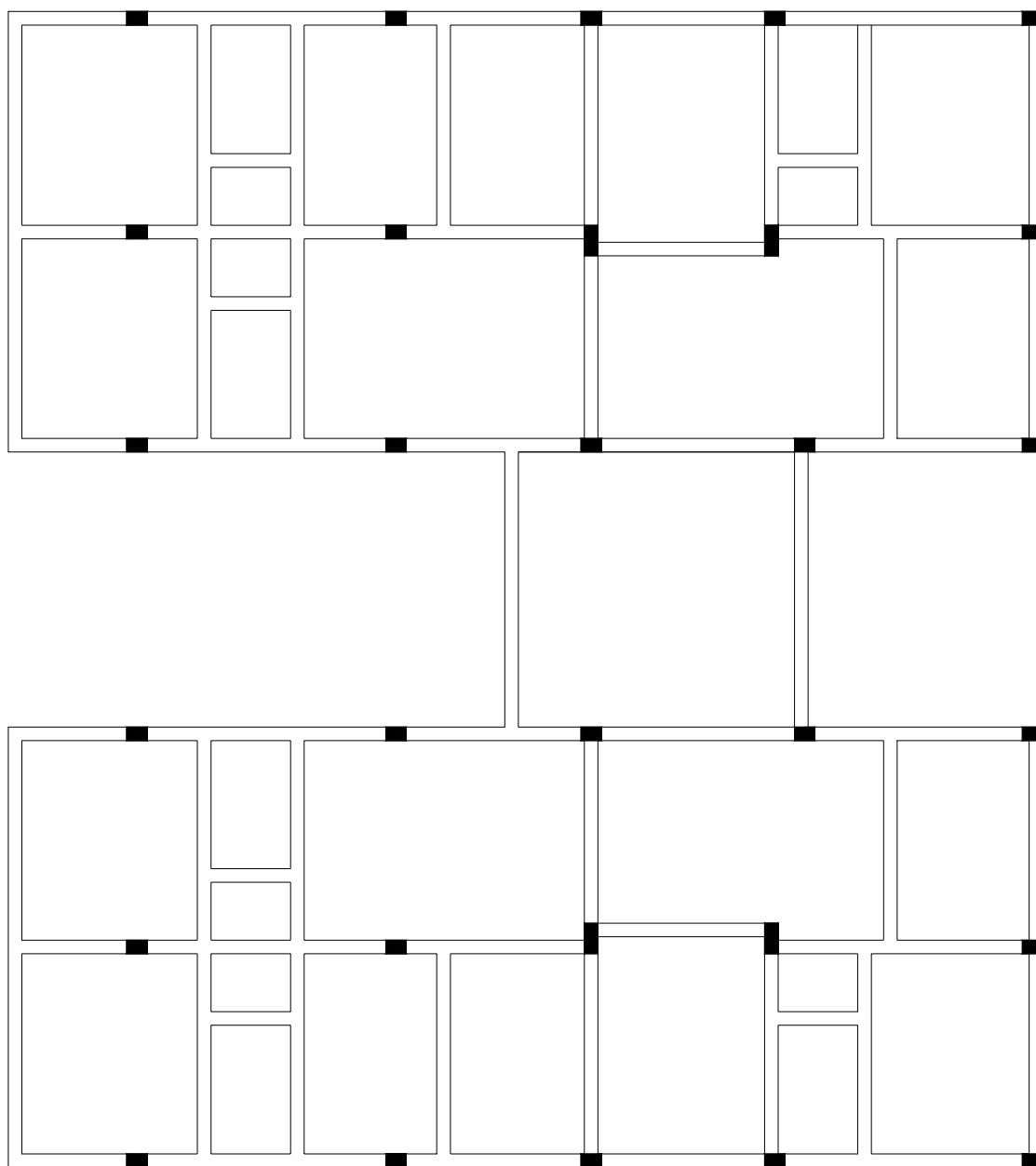


FIGURA 3.48 – Prédio “A” – Opção 2 – Esquema da estrutura

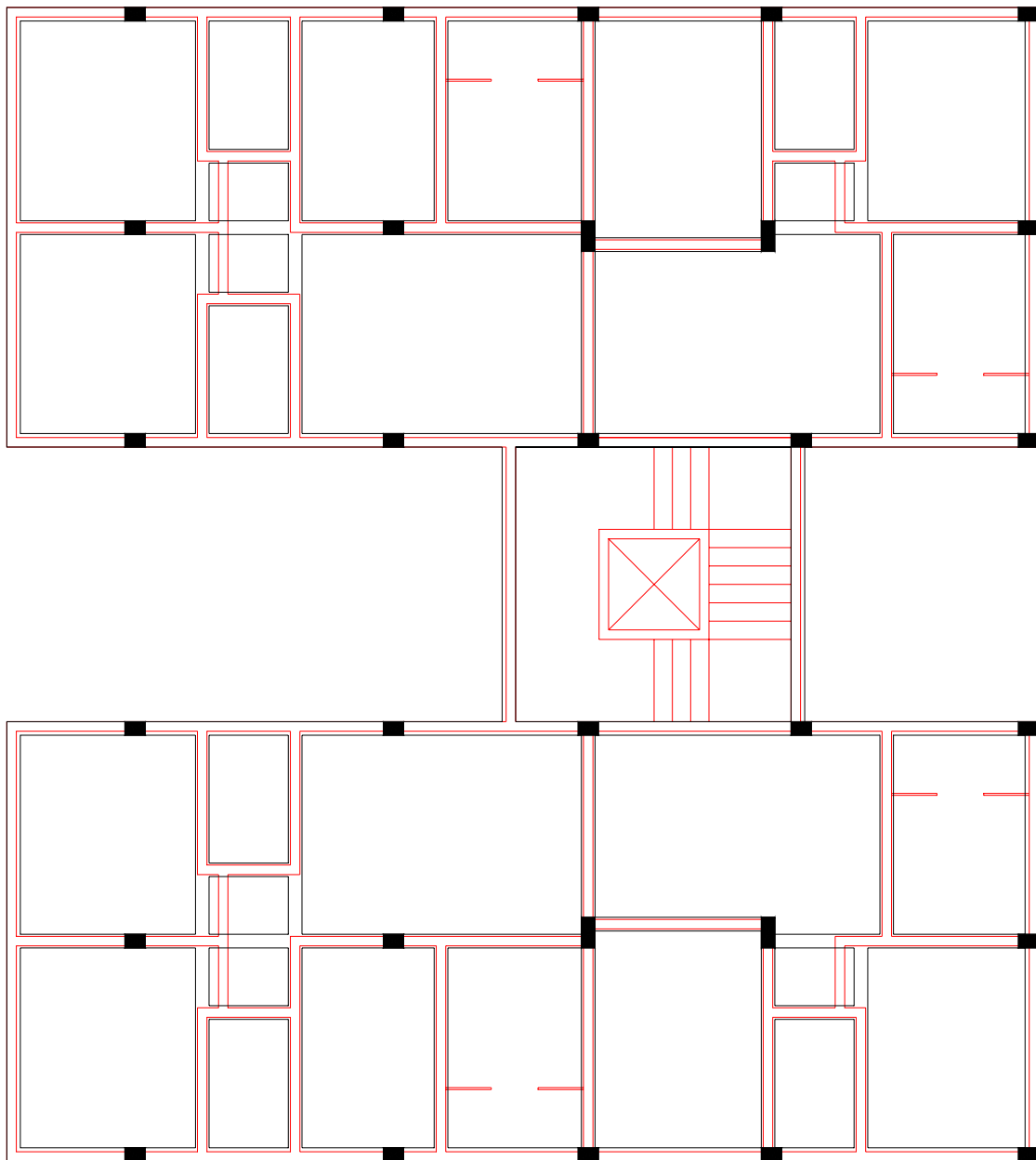


FIGURA 3.49 – Prédio “A” – Opção 2 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

TABELA 3.11 – Prédio “A” – Opção 2 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 162,00 | 202,00 | 93,00 | 457,00 |
| CONCRETO (m³) | 13,00 | 20,90 | 6,00 | 39,90 |
| AÇO (kgf) | 732,00 | 2.456,00 | 554,00 | 3.742,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 205,5 m², constata-se pelos dados da TAB.3.11 uma taxa de fôrma de $(457 \text{ m}^2/205,5 \text{ m}^2) = 2,22 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(39,9 \text{ m}^3/205,5 \text{ m}^2) = 0,194 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(3742 \text{ kgf}/39,9 \text{ m}^3) = 93,78 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

c) Processamento para avaliação das deformações

Para uma melhor avaliação das deformações, esta Opção 2 foi processada com os dois modelos citados no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.1 estão mostrados na FIG.3.51, para cada uma das vigas. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.2 estão na FIG.3.52, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes em centímetros.

3.3.3 - Opção 3 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A planta com a arquitetura da garagem da Opção 3 está na FIG.3.53, e o esquema da estrutura na FIG.3.54. Percebe-se nessas figuras que as vigas principais, que, no caso, são transversais, não apresentam balanços nas extremidades (ver FIG.3.56). Para se ter uma idéia precisa da posição das paredes sobre as vigas dessa estrutura, apresenta-se na FIG.3.55 a superposição dessas paredes sobre a estrutura-suporte da Opção 3.

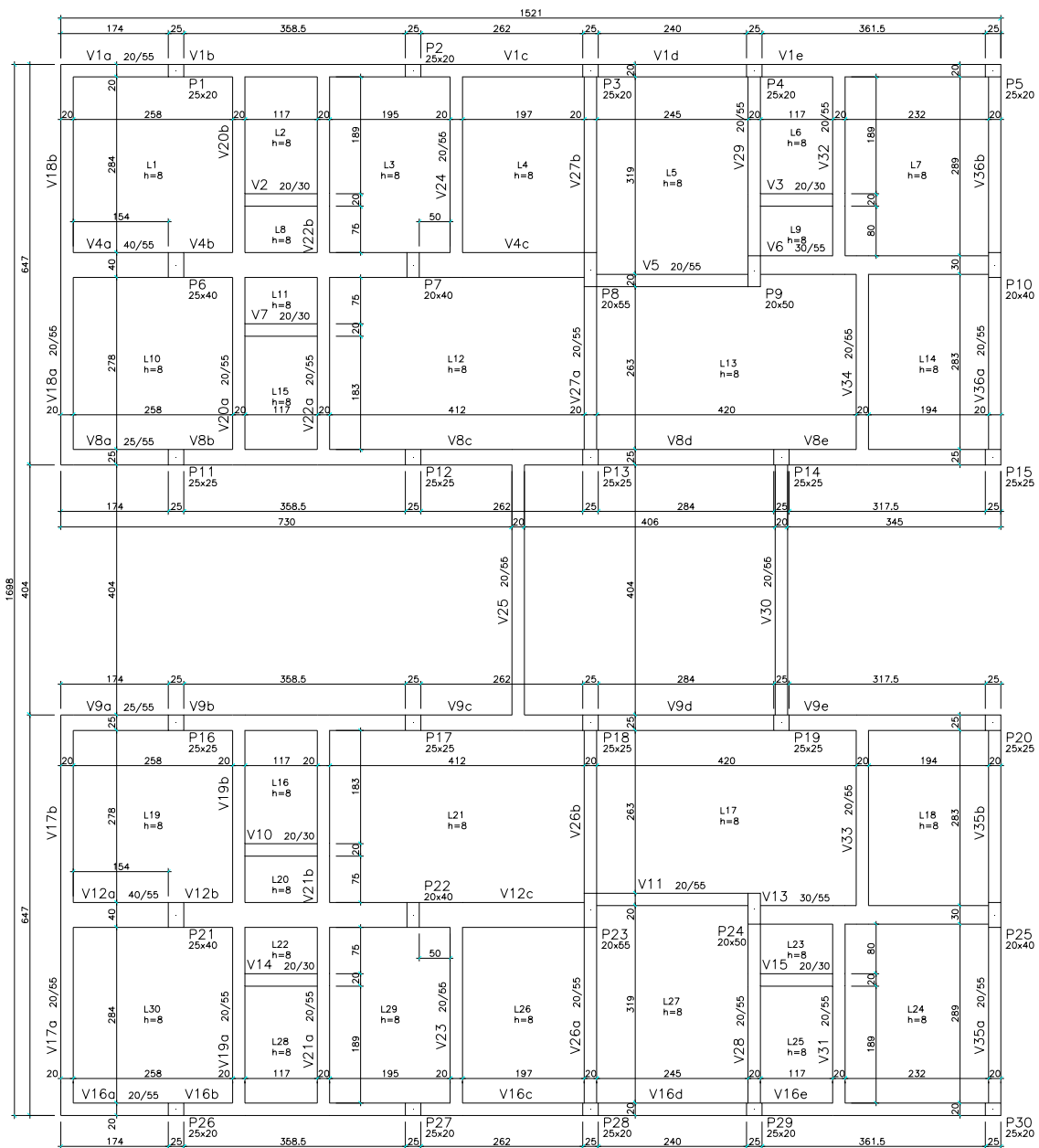


FIGURA 3.50 – Prédio “A” – Fôrma da Opção 2

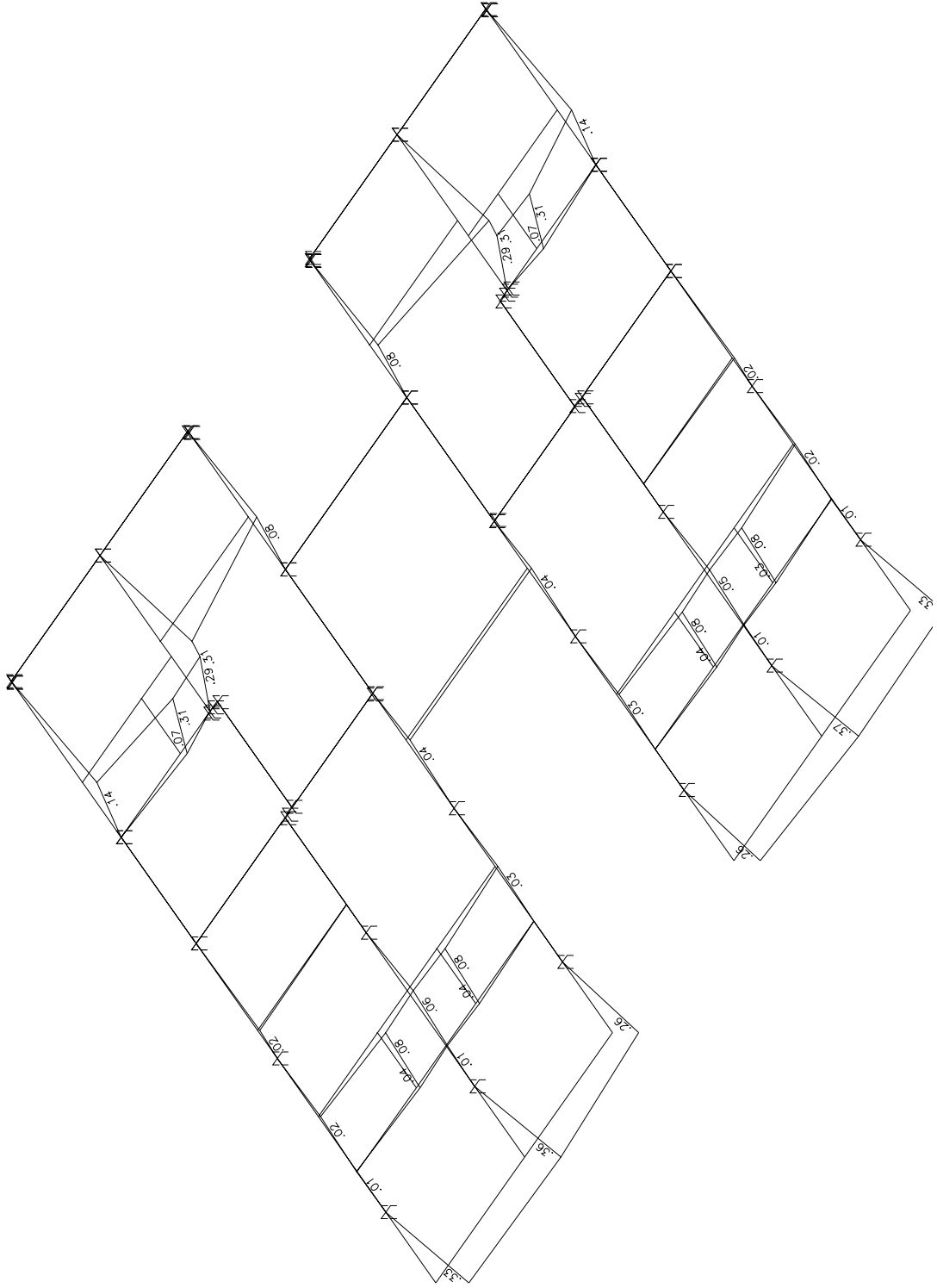


FIGURA 3.51 – Prédio “A” – Opção 2 – Deslocamentos das vigas (cm)

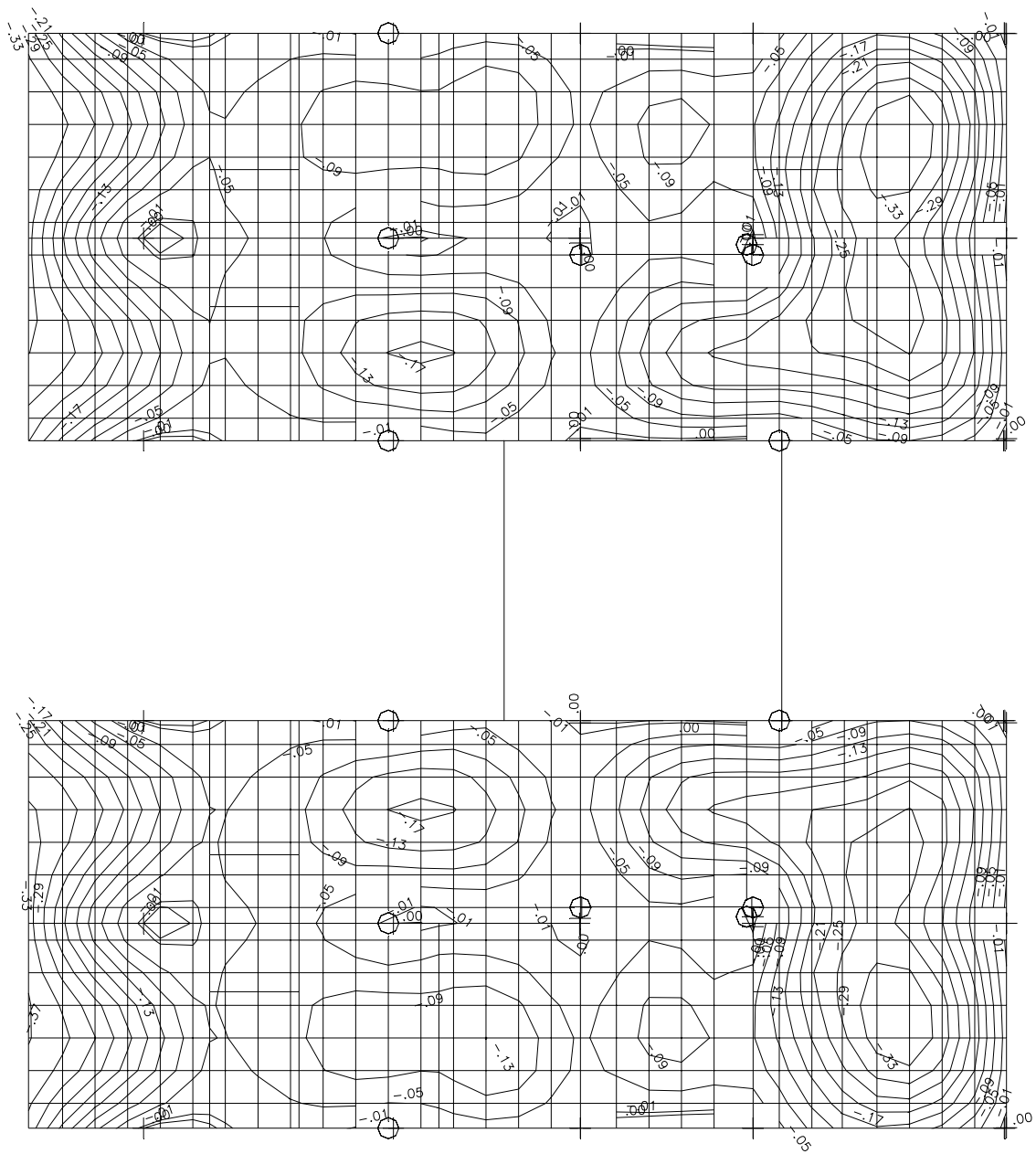


FIGURA 3.52 – Prédio “A” – Opção 2 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

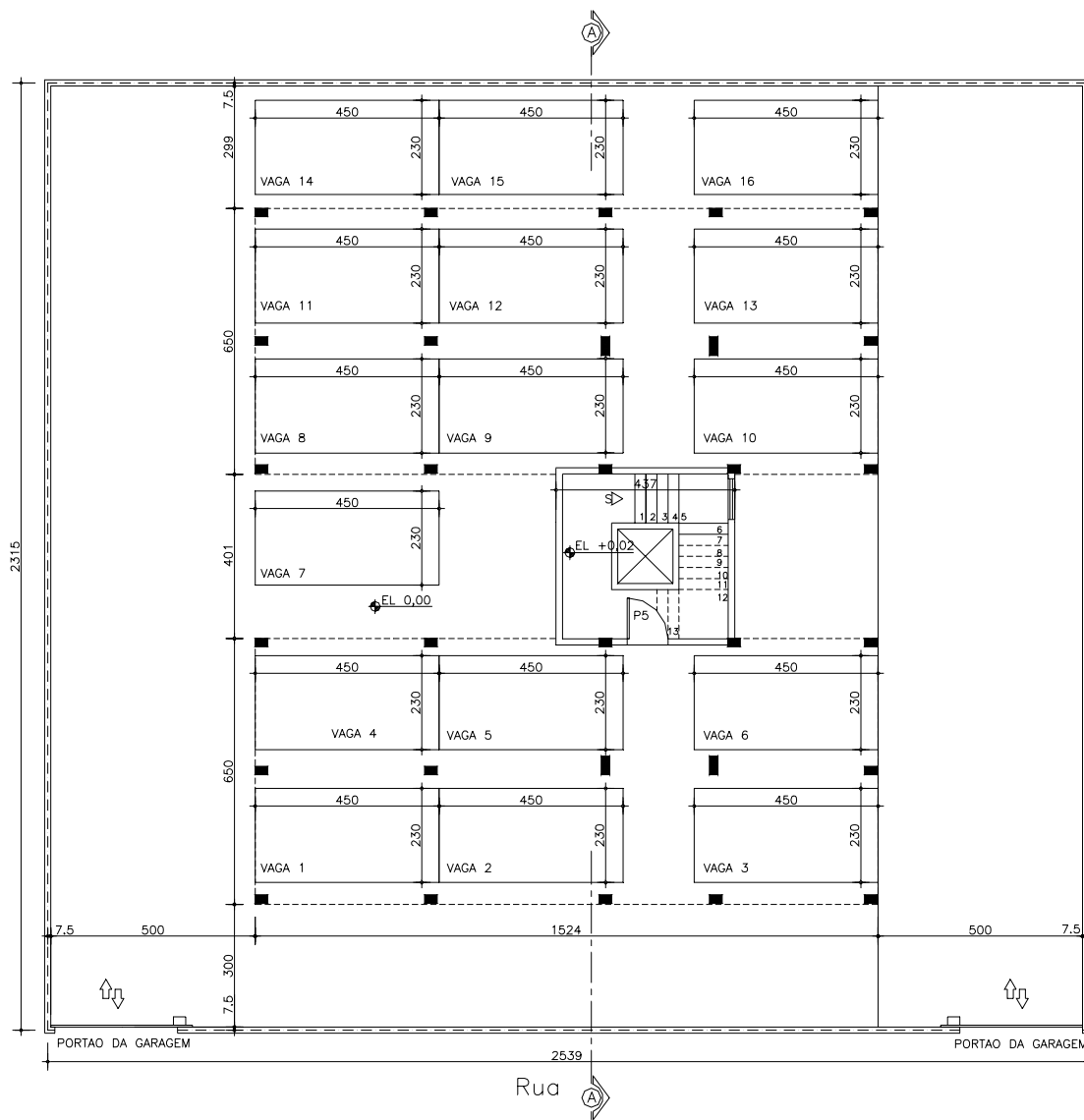


FIGURA 3.53 – Prédio “A” – Opção 3 – Planta da Garagem

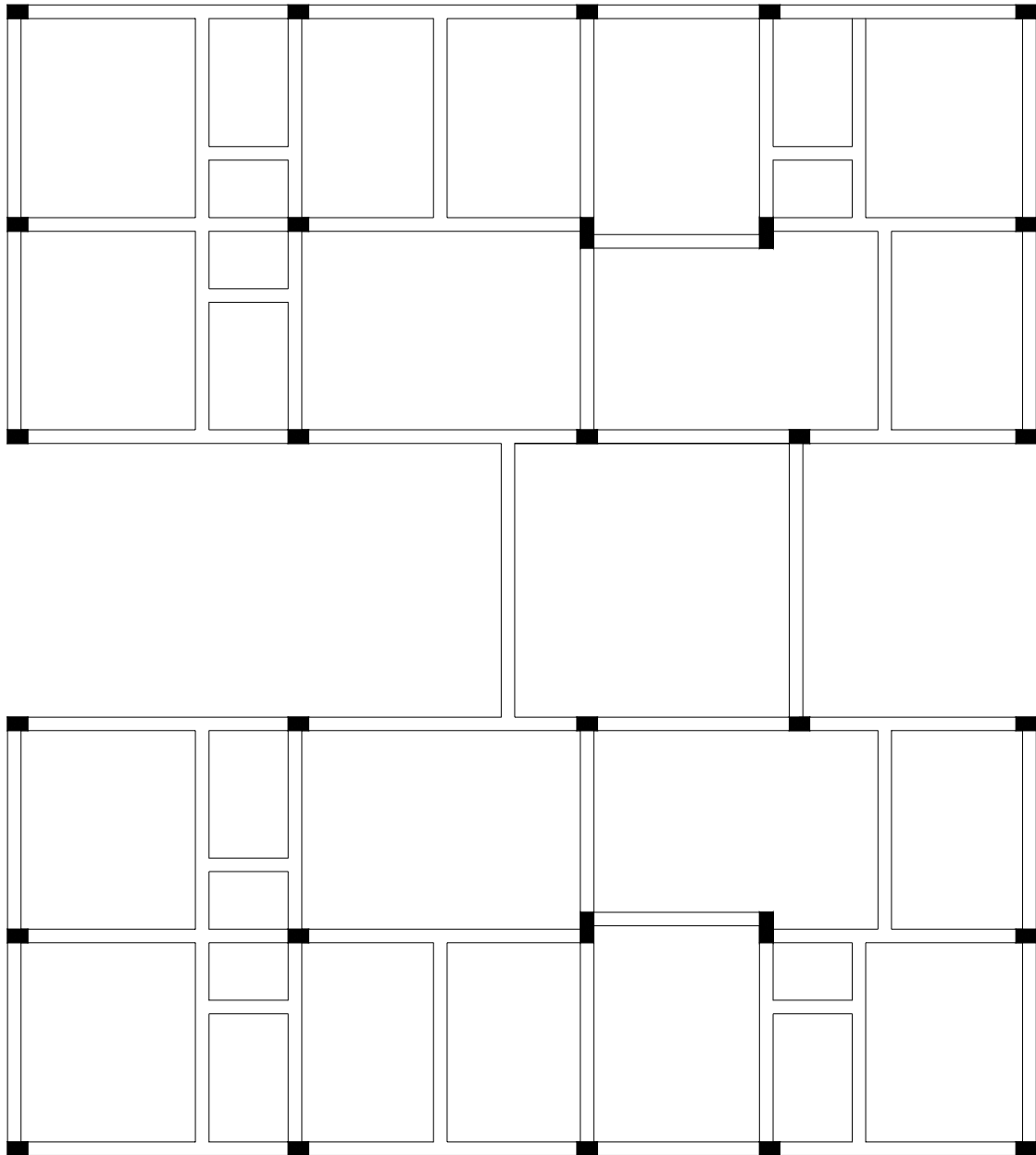


FIGURA 3.54 – Prédio “A” – Opção 3 – Esquema da estrutura

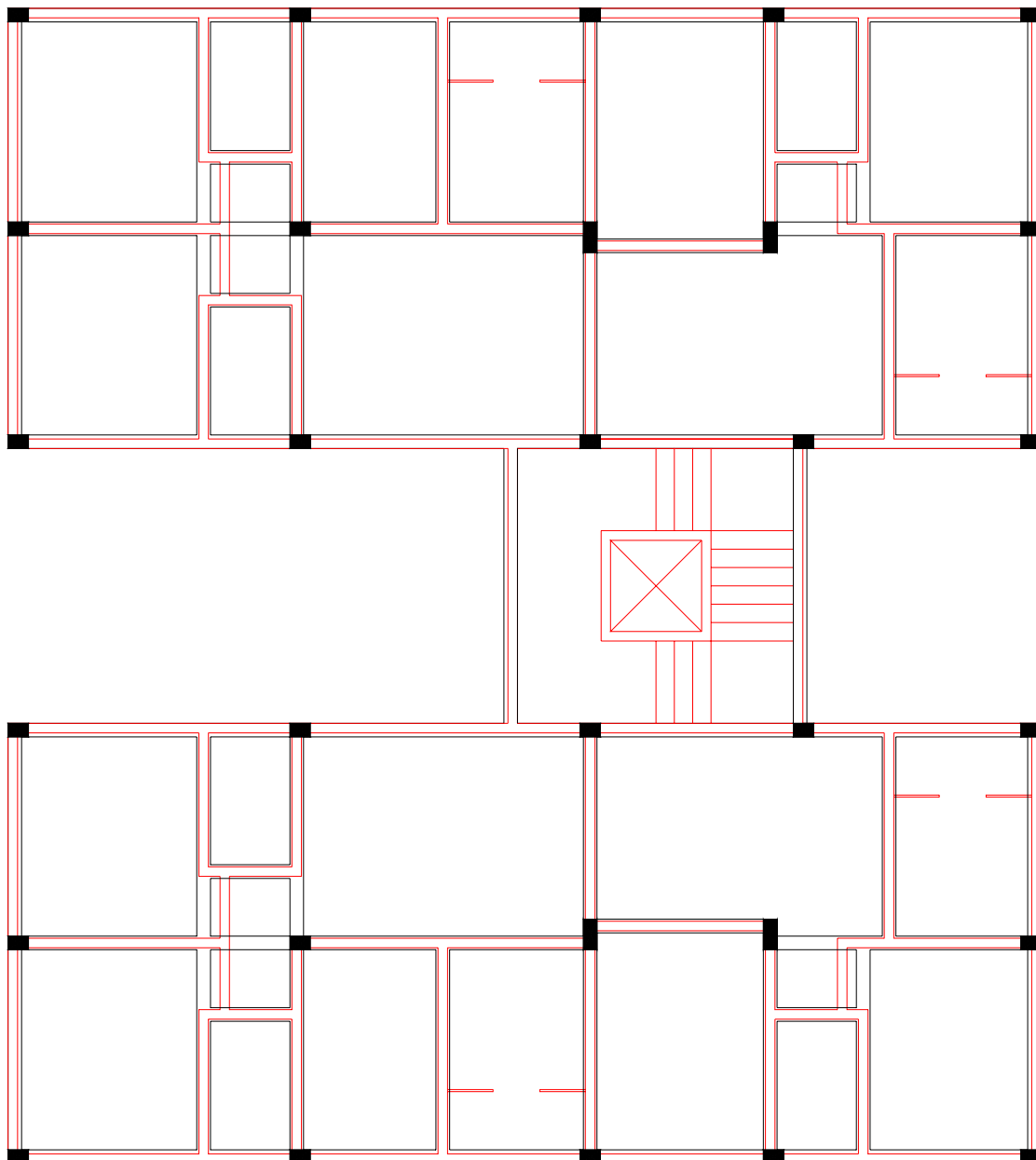


FIGURA 3.55 – Prédio “A” – Opção 3 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

b) Processamento para avaliação dos quantitativos

Para avaliação dos quantitativos, esta Opção 3 foi então processada com a fôrma indicada na FIG.3.56, utilizando-se o modelo convencional ou simplificado, citado no item 2.1.4.a) deste trabalho. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.12.

TABELA 3.12 – Prédio “A” – Opção 3 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 164,00 | 204,00 | 90,00 | 458,00 |
| CONCRETO (m³) | 13,20 | 20,50 | 5,70 | 39,40 |
| AÇO (kgf) | 732,00 | 2.373,00 | 572,00 | 3.677,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 205,5 m², constata-se pelos dados da TAB.3.12 uma taxa de fôrma de $(458 \text{ m}^2/205,5 \text{ m}^2) = 2,23 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(39,4 \text{ m}^3/205,5 \text{ m}^2) = 0,192 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(3677 \text{ kgf}/39,4 \text{ m}^3) = 93,33 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

c) Processamento para avaliação das deformações

Para uma melhor avaliação das deformações, esta Opção 3 foi processada com os dois modelos citados no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.1 estão mostrados na FIG.3.57, para cada uma das vigas. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.2 estão na FIG.3.58, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes em centímetros.

3.3.4 - Opção 4 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A Opção 4 tem a mesma distribuição de pilares da Opção 3 (planta da garagem da FIG.3.53), mas possui vigas apenas no perímetro. Sua fôrma está na FIG.3.59 e nela se

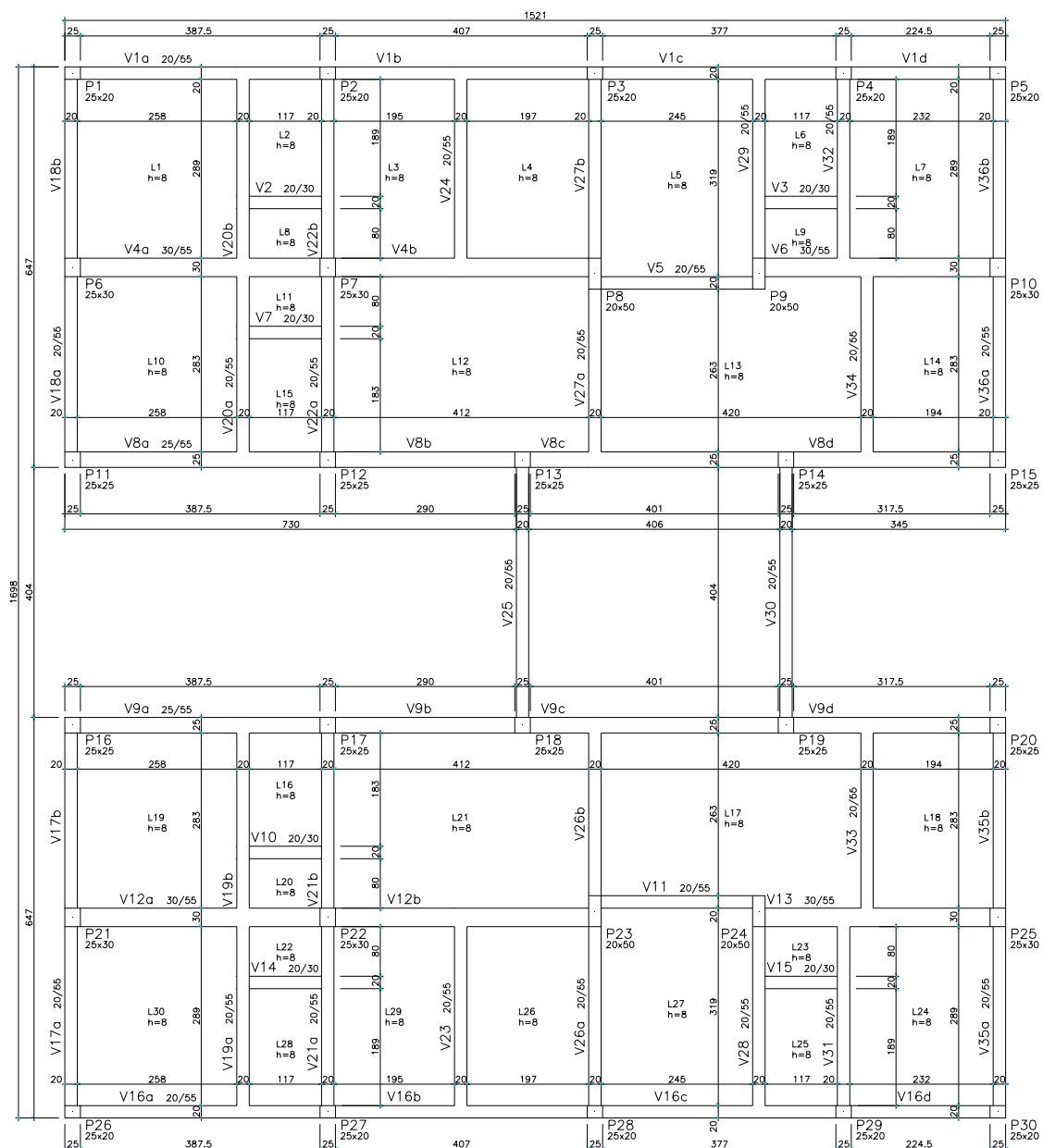


FIGURA 3.56 – Prédio “A” – Fôrma da Opção 3

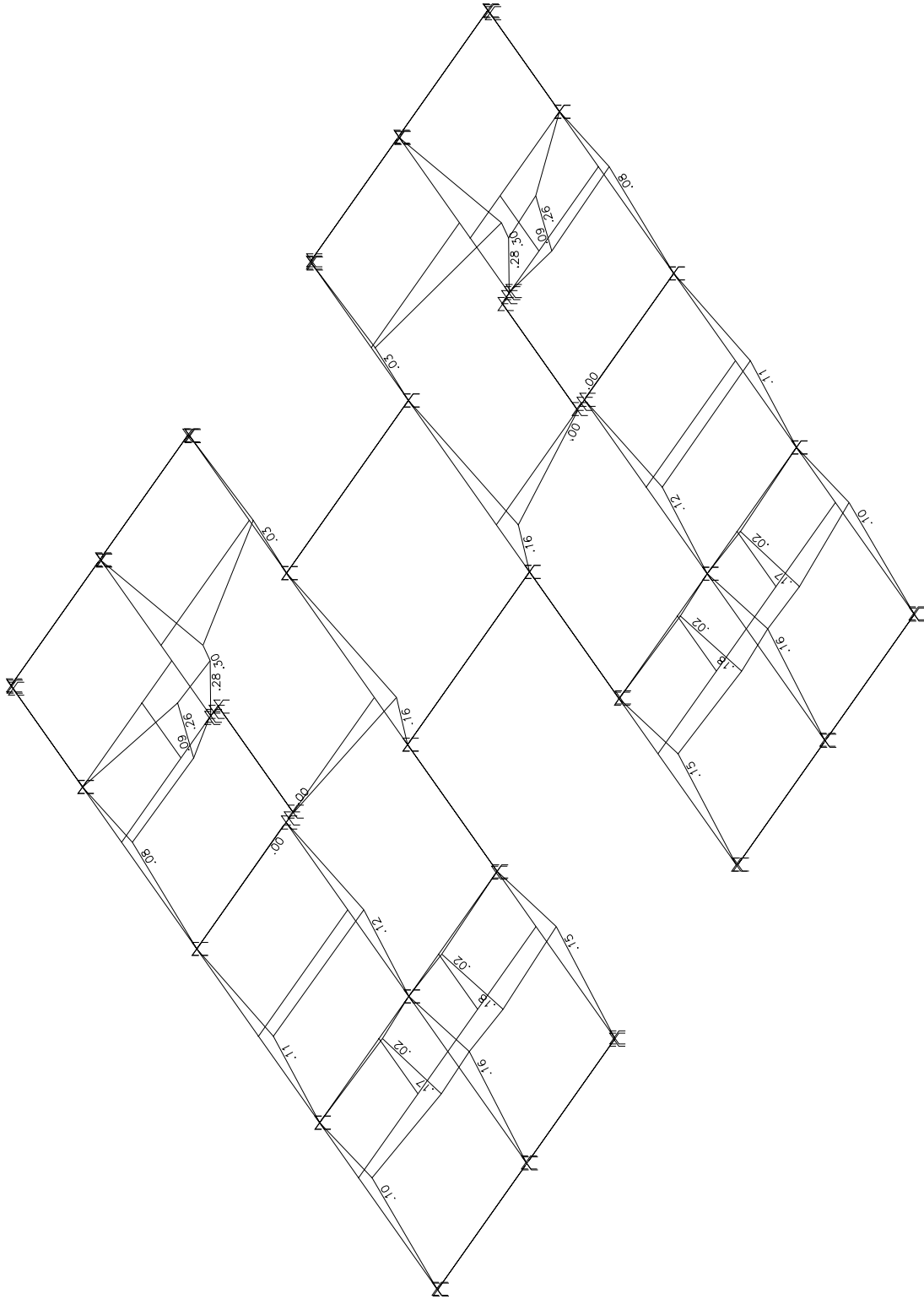


FIGURA 3.57 – Prédio “A” – Opção 3 – Deslocamentos das vigas (cm)

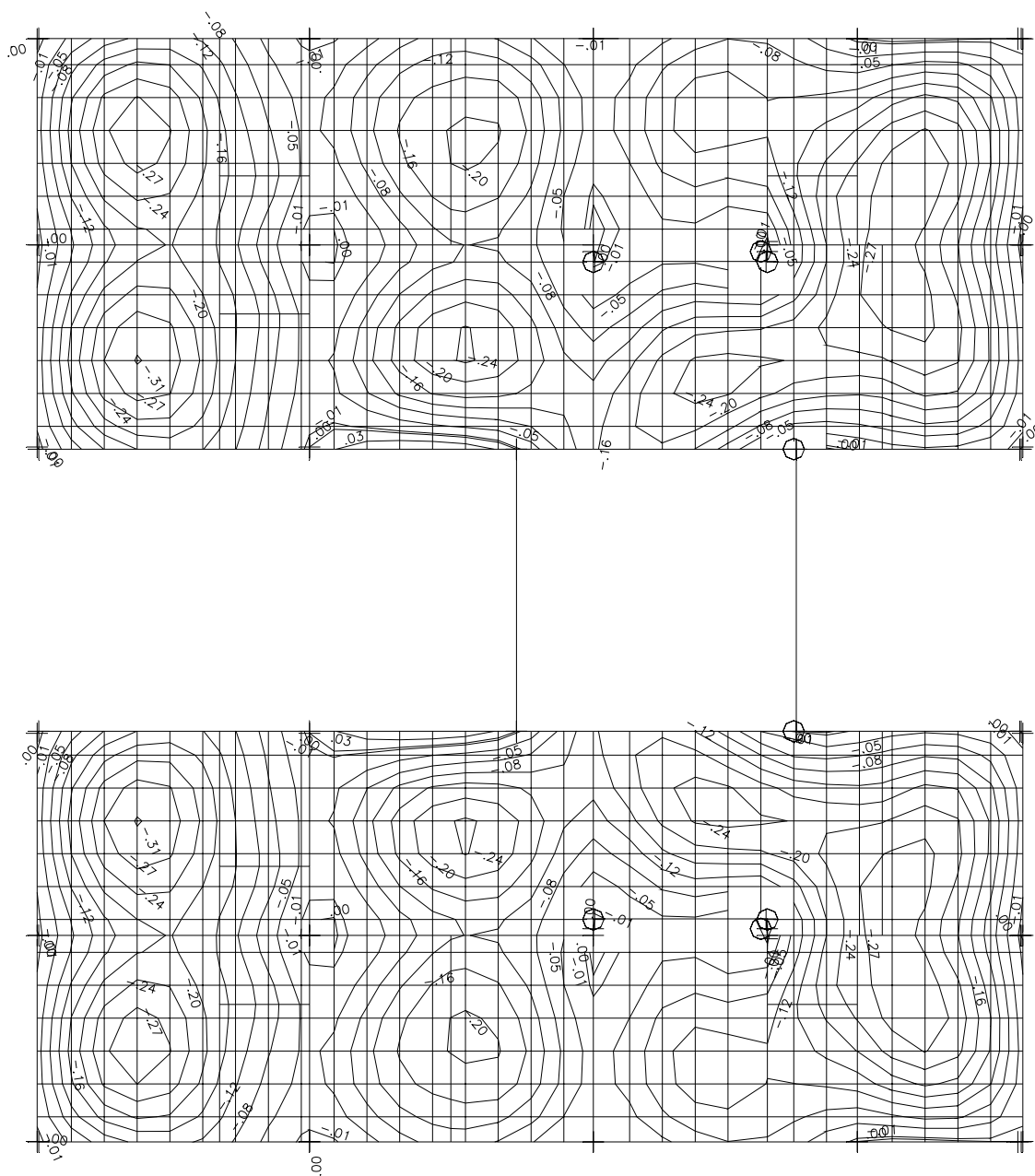


FIGURA 3.58 – Prédio “A” – Opção 3 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

percebe que a laje, que tem 18 cm de espessura, apóia-se nas vigas do perímetro e nos pilares centrais (P7 a P9 e P22 a P24), que têm um capitel de 140 x 140/50 centímetros para evitar o puncionamento da laje.

b) Processamento

Esta opção foi processada no Modelo b.2, citado no item 2.1.4.b) deste trabalho (grelha de vigas e lajes planas discretizadas em barras). Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.13

TABELA 3.13 – Prédio “A” – Opção 4 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|----------|----------|---------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 183,00 | 109,00 | 110,00 | 402,00 |
| CONCRETO (m³) | 32,20 | 12,60 | 7,20 | 52,00 |
| AÇO (kgf) | 3.821,00 | 1.720,00 | 600,00 | 6.141,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 205,5 m², constata-se pelos dados da TAB.3.13 uma taxa de fôrma de $(402 \text{ m}^2/205,5 \text{ m}^2) = 1,96 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(52 \text{ m}^3/205,5 \text{ m}^2) = 0,253 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(6141 \text{ kgf}/52 \text{ m}^3) = 118,1 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

Os deslocamentos obtidos estão na FIG.3.60, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes, em centímetros.

3.3.5 - Opção 5 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A Opção 5 é a Opção 4 com acréscimo de uma viga central sobre os pilares P6 a P10 e P21 a P25. Sua fôrma está na FIG.3.61 e nela se percebe que as lajes L1 a L4 têm 16 cm de espessura.

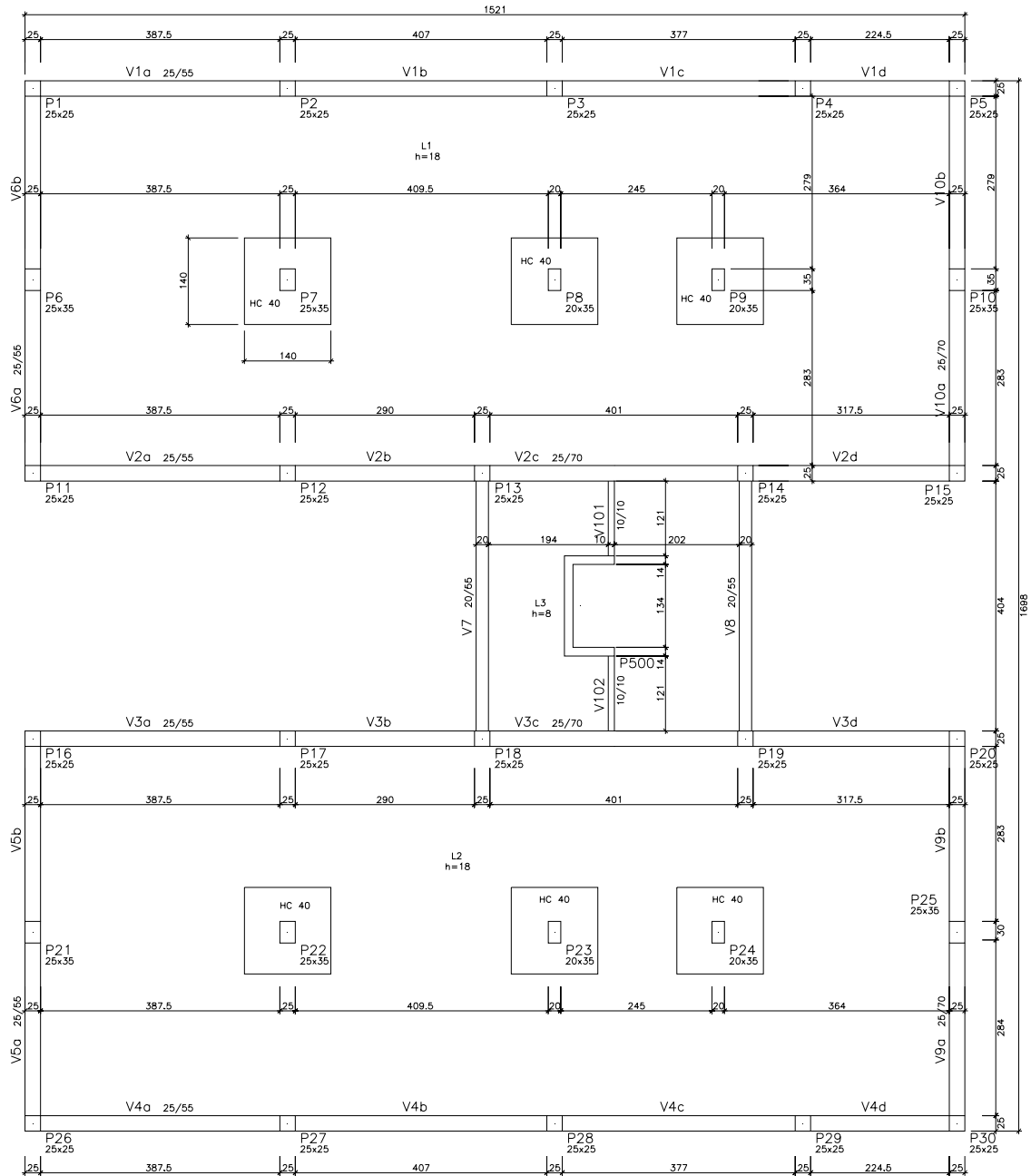


FIGURA 3.59 – Prédio “A” – Fôrma da Opção 4

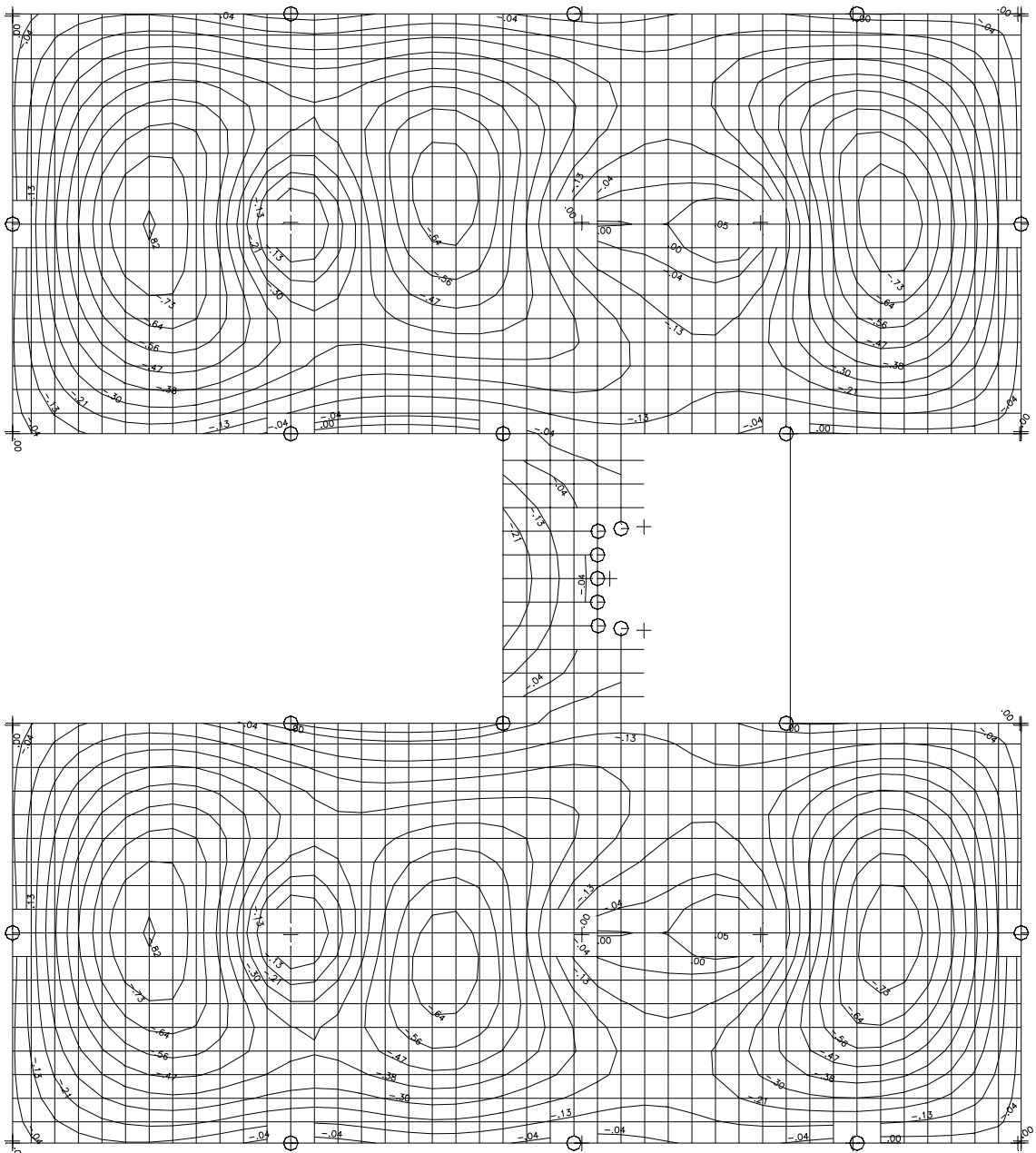


FIGURA 3.60 – Prédio “A” – Opção 4 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

b) Processamento

Esta opção foi processada no Modelo b.2, citado no item 2.1.4.b) deste trabalho (grelha de vigas e lajes planas discretizadas em barras). Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.14.

TABELA 3.14 – Prédio “A” – Opção 5 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|----------|----------|---------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 172,00 | 135,00 | 110,00 | 417,00 |
| CONCRETO (m³) | 27,00 | 17,10 | 7,20 | 51,30 |
| AÇO (kgf) | 2.781,00 | 2.558,00 | 581,00 | 5.920,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 205,5 m², constata-se pelos dados da TAB.3.14 uma taxa de fôrma de $(417 \text{ m}^2/205,5 \text{ m}^2) = 2,03 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(51,3 \text{ m}^3/205,5 \text{ m}^2) = 0,25 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(5920 \text{ kgf}/51,3 \text{ m}^3) = 115,4 \text{ kgf}/\text{m}^3$. Os deslocamentos obtidos estão na FIG.3.62, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes, em centímetros.

3.3.6 - Gráficos e tabelas comparativos

A seguir são apresentados gráficos e tabelas que comparam o consumo do material para as várias opções do prédio “A”.

TABELA 3.15 – Prédio “A” – Resumo dos Quantitativos das várias opções

| OPÇÃO | FÔRMAS (m ²) | CONCRETO (m ³) | AÇO (kgf) |
|----------------|--------------------------|----------------------------|-----------|
| Opção 1 | 454 | 39,10 | 3.591 |
| Opção 2 | 457 | 39,90 | 3.742 |
| Opção 3 | 458 | 39,40 | 3.677 |
| Opção 4 | 402 | 52,00 | 6.141 |
| Opção 5 | 417 | 51,30 | 5.920 |

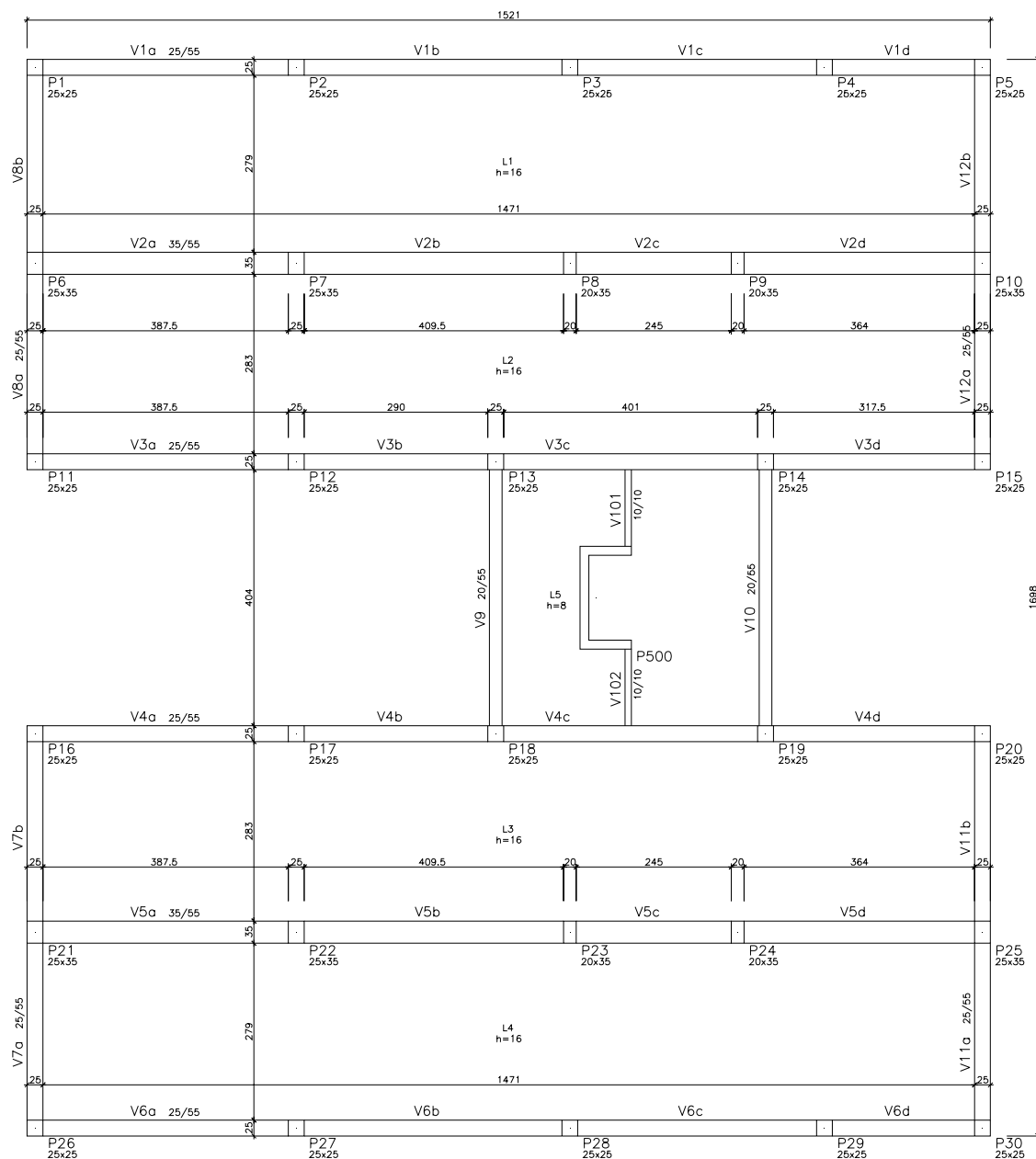


FIGURA 3.61– Prédio “A” – Fôrma da Opção 5

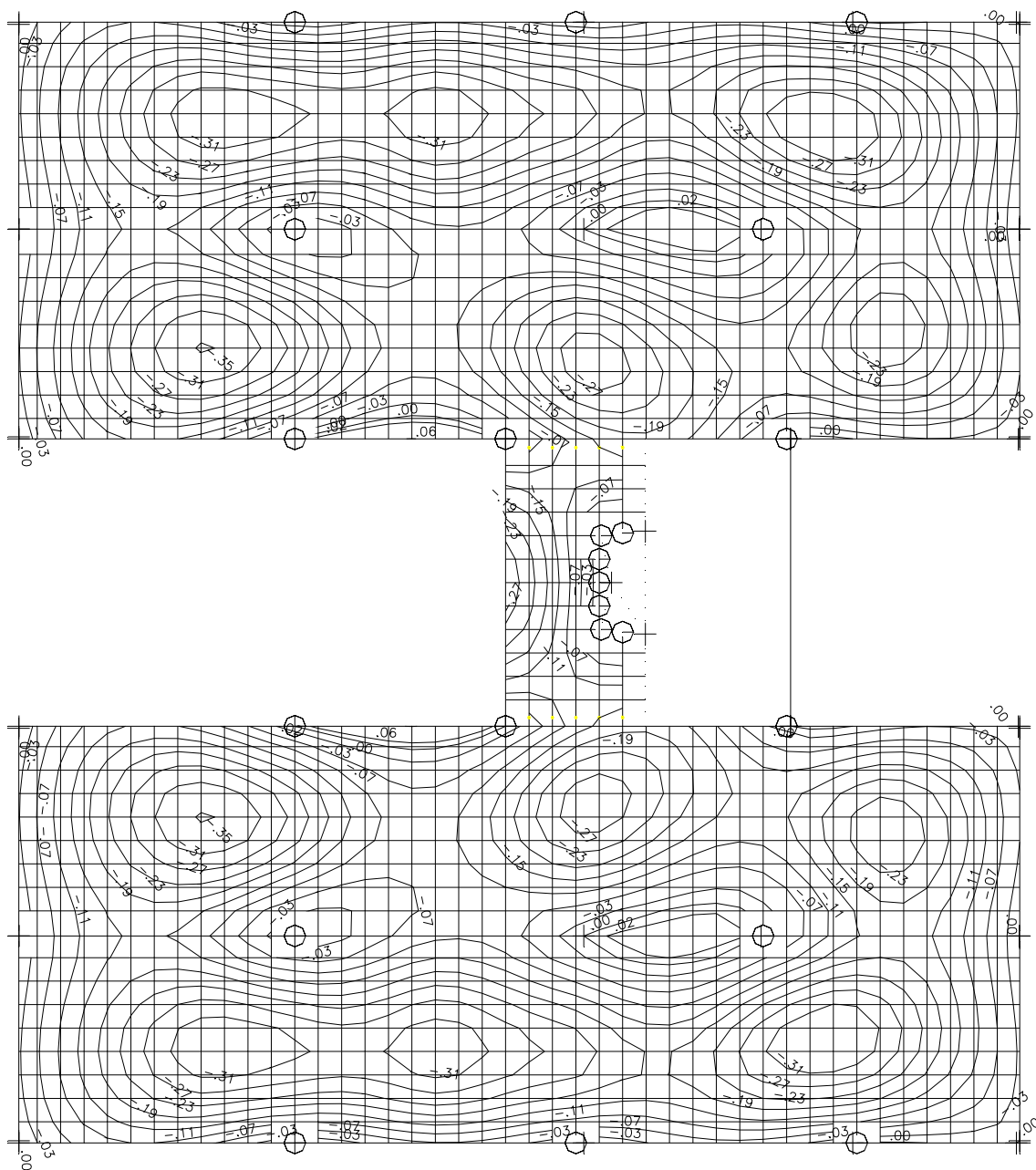


FIGURA 3.62 – Prédio “A” – Opção 5 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

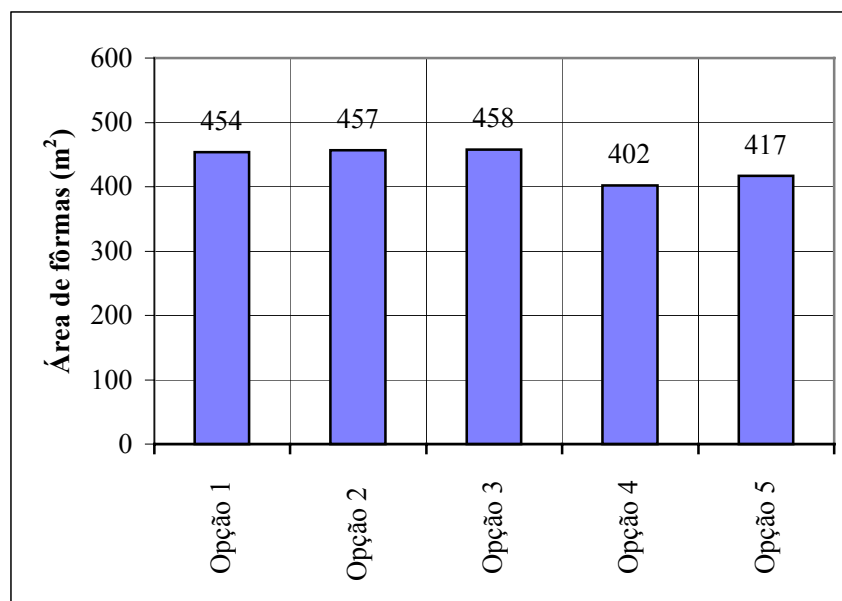


FIGURA 3.63 – Prédio “A” – Consumo de fôrma das várias opções

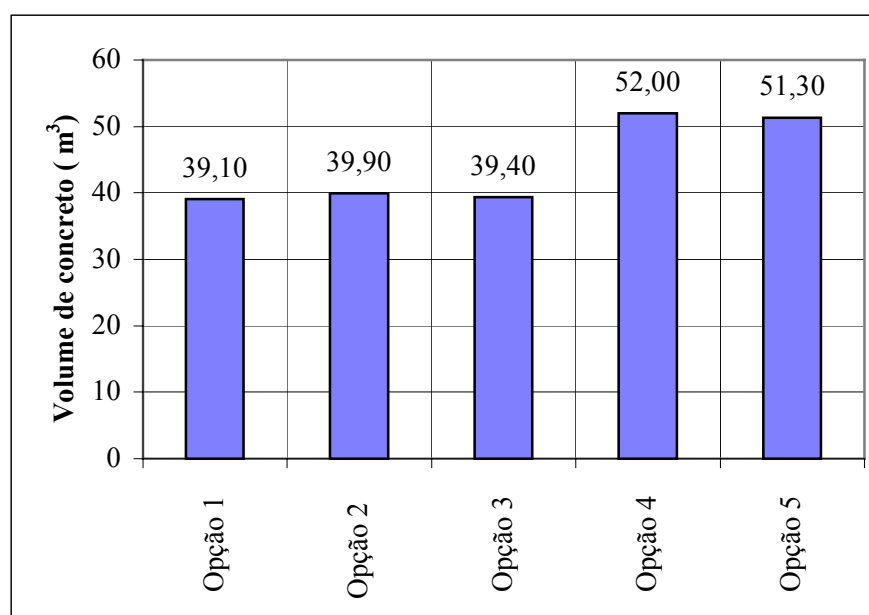


FIGURA 3.64 – Prédio “A” – Consumo de concreto das várias opções

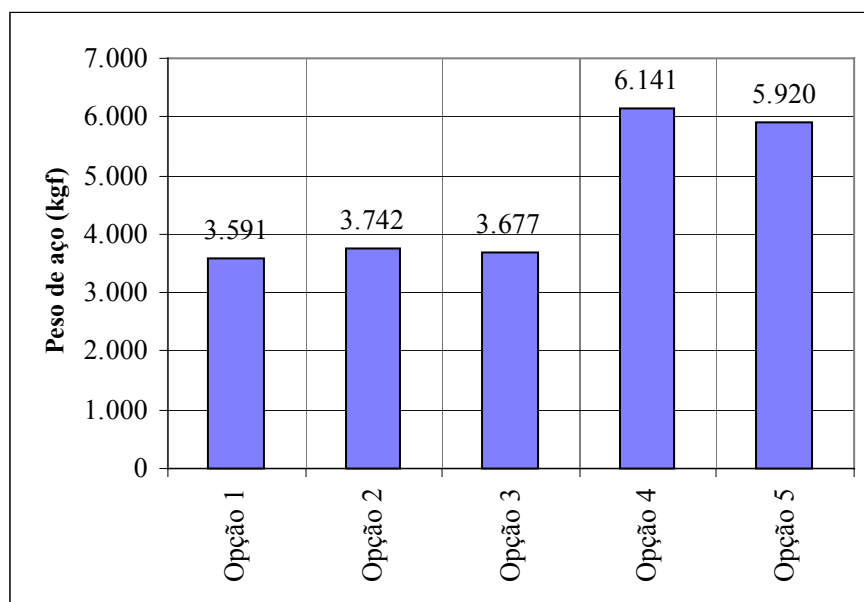


FIGURA 3.65 – Prédio “A” – Consumo de aço das várias opções

TABELA 3.16 – Prédio “A” – Quantitativos por m^2 para um pavimento tipo com área de $205,5 m^2$

| OPÇÃO | FÔRMAS (m^2/m^2) | CONCRETO (m^3/m^2) | AÇO (kgf/m^2) |
|---------|----------------------|------------------------|-------------------|
| Opção 1 | 2,21 | 0,190 | 17,47 |
| Opção 2 | 2,22 | 0,194 | 18,21 |
| Opção 3 | 2,23 | 0,192 | 17,89 |
| Opção 4 | 1,96 | 0,253 | 29,88 |
| Opção 5 | 2,03 | 0,250 | 28,81 |

TABELA 3.17 – Prédio “A” – Deslocamentos máximos para as várias opções (cm)

| OPÇÃO | Modelo grelha de vigas | Modelo grelha de vigas e lajes |
|---------|------------------------|--------------------------------|
| Opção 1 | 0,19 | 0,29 |
| Opção 2 | 0,37 | 0,37 |
| Opção 3 | 0,30 | 0,31 |
| Opção 4 | - | 0,82 |
| Opção 5 | - | 0,35 |

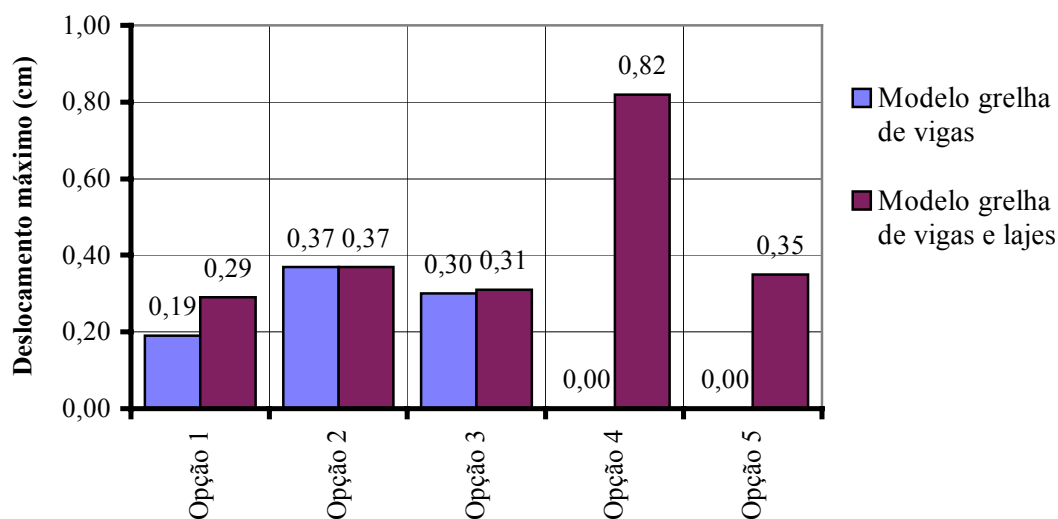


FIGURA 3.66 – Prédio “A” – Deslocamentos máximos para as várias opções

3.3.7 – Comentários sobre o prédio “A”

a) Quantitativos

Analisando-se a TAB.3.15 e as FIG.3.63 a 3.65, percebe-se que, como era de se esperar, os consumos das Opções 1, 2 e 3 (que têm uma estrutura convencional de lajes, vigas e pilares) são praticamente os mesmos, variando no máximo em 4%. A Opção 2, entretanto, que é a que apresenta as vigas com balanço de 1,74 metros, é das três a que apresenta os maiores consumos de fôrma, concreto e aço.

A Opção 4, que tem vigas somente no perímetro e laje lisa maciça com 18 cm de espessura, consome menos fôrma (12%), mas, em compensação, consome mais concreto (32%) e mais aço (67%) que a média das Opções 1 a 3.

A Opção 5, que além das vigas do perímetro tem mais uma viga central em cada “perna do H” e lajes com grande espessura (16 cm), consome também menos fôrma (9%) e, em compensação, consome também mais concreto (30%) e mais aço (61%) que a média das Opções 1 a 3.

Admitindo os mesmos preços unitários do prédio “C”, com as mesmas considerações, têm-se, em uma avaliação inicial, os preços de custo abaixo:

Opção 1 - R\$27.664,98 (R\$134,62/m²)

Opção 2 - R\$28.320,76 (R\$137,81/m²)

Opção 3 - R\$28.050,06 (R\$136,50/m²)

Opção 4 - R\$36.551,98 (R\$177,87/m²)

Opção 5 - R\$36.083,60 (R\$175,59/m²)

Percebe-se que o preço médio das Opções 4 e 5 (R\$36.317,79) estaria 30% acima do preço médio das Opções 1, 2 e 3 (R\$28.011,93).

b) Deslocamentos

Analisando-se a TAB.3.17 e as FIG.3.45, 3.46, 3.51, 3.52, 3.57, 3.58, 3.60, 3.62 e 3.66, percebe-se que a Opção 4 tem deslocamentos bem superiores às Opções 1 a 3. Já a Opção 5 tem deslocamentos da mesma ordem de grandeza das Opções 1 a 3. Entre as Opções 1 a 3, a Opção 2 é a que apresenta maiores deslocamentos, que ocorrem exatamente na região dos balanços de 1,74 metros. Com os dados da fôrma (FIG 3.50) e os deslocamentos nas extremidades das vigas da FIG.3.51, monta-se a TAB.3.18.

TABELA 3.18 – Prédio “A” – Opção 2 – Relação entre os deslocamentos verticais e os vãos das vigas da região do balanço de 1,74 metros

| Vigas | Vão L (cm) | Deslocamentos à esquerda (cm) | Deslocamentos à direita (cm) | Δ = Deslocamento diferencial (cm) | Δ/L |
|-------------|------------|-------------------------------|------------------------------|--|------------|
| V1a = V16a | 186,5 | 0,33 | 0,00 | 0,33 | 1/565 |
| V4a = V12a | 186,5 | 0,36 | 0,00 | 0,36 | 1/518 |
| V8a = V9a | 186,5 | 0,26 | 0,00 | 0,26 | 1/717 |
| V18a = V17b | 310,5 | 0,26 | 0,36 | 0,10 | 1/3105 |
| V18b = V17a | 314 | 0,36 | 0,33 | 0,03 | 1/10467 |

Comparando a relação da flecha da TAB.3.18 com as recomendações de THOMAZ (1989), que estão na TAB.1.2, percebe-se que as vigas que recebem paredes sem aberturas (V1a, V4a, V8a, V9a, V12a e V16a) chegam a ter flechas de 1/518, muito próximas, portanto, do limite recomendado de 1/500. Já as vigas que recebem paredes com abertura (V17a, V17b, V18a e V18b) apresentam flechas de 1/3105, o que seria bem inferior ao limite recomendado.

3.4 - Terceiro exemplo - prédio “M”

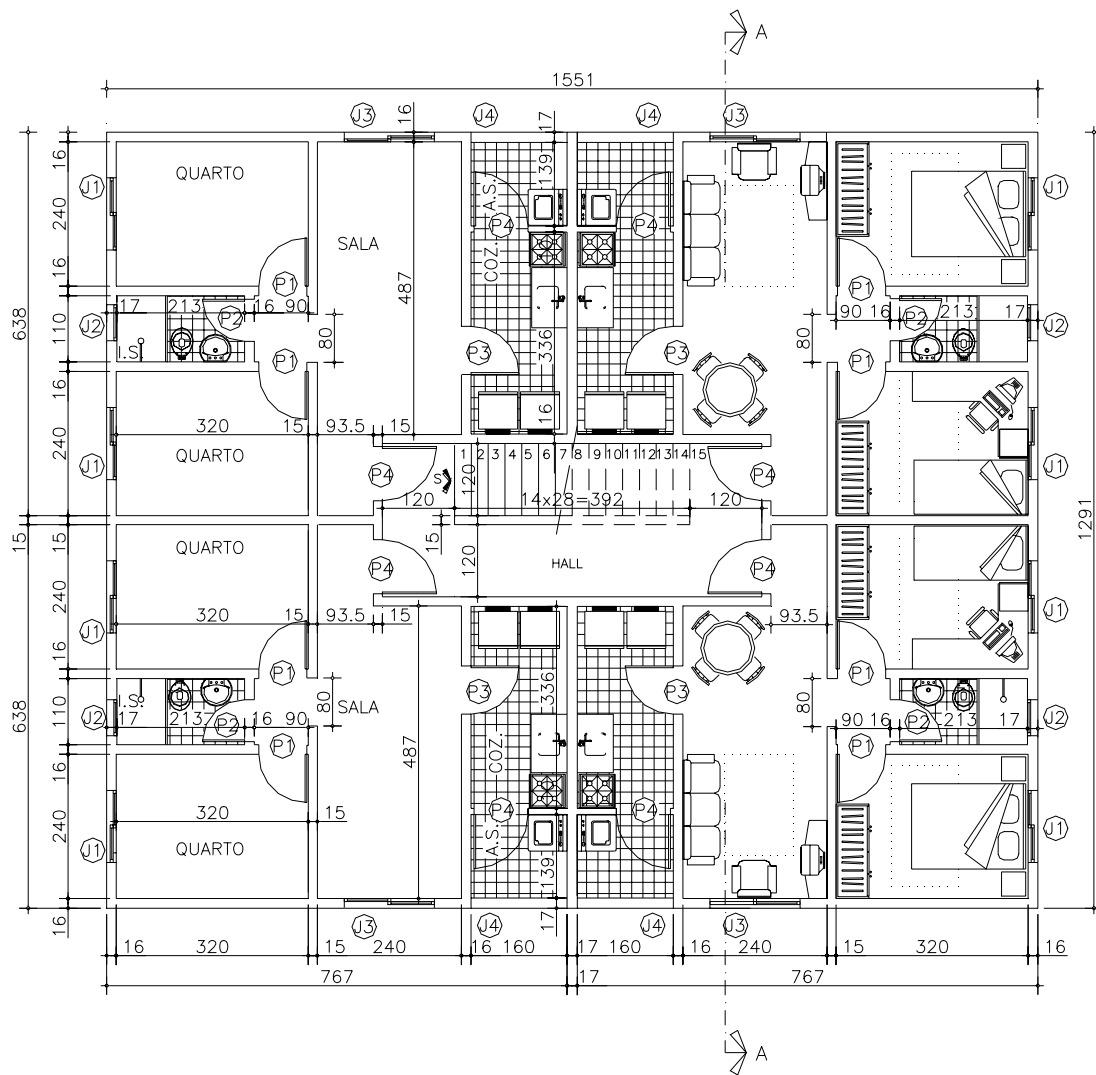
A planta com a arquitetura do pavimento tipo do prédio “M” está mostrada na FIG.3.67, e um corte esquemático dessa arquitetura está na FIG.3.68. Na FIG.3.69, apresenta-se um esquema das paredes sem revestimento, que será usado no desenvolvimento de todas as opções que serão aqui analisadas.

Assim como no prédio “A”, as armações das várias opções do prédio “M” que foram calculadas no CADT/TQS[®], não serão acrescentadas nos ANEXOS para não tornar este trabalho muito extenso.

3.4.1 - Opção 1 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A planta com a arquitetura da garagem da Opção 1 está na FIG.3.70, e o esquema da estrutura na FIG.3.71. Percebe-se nessas figuras que as vigas principais, que, no caso, são longitudinais, apresentam balanços nas duas extremidades de 1,105 metros (ver FIG.3.73). Para se ter uma idéia precisa da posição das paredes sobre as vigas dessa estrutura, apresenta-se na FIG.3.72 a superposição dessas paredes sobre a estrutura-suporte da Opção 1.



| TABELA DE ESQUADRIAS | |
|---|--|
| PORTAS | JANELAS |
| <p>Ⓐ PORTA QUARTOS = 0,72x2,10m</p> <p>Ⓑ PORTA BANHOS = 0,62x2,10m</p> <p>Ⓒ PORTA COZINHA = 0,72x2,10m</p> <p>Ⓓ PORTA SALA = 0,82x2,10m</p> <p>Ⓔ PORTA HALL TÉRREO = 1,00x2,10m</p> | <p>ⓙ JANELA QUARTOS = 1,20x1,20m</p> <p>ⓚ JANELA BANHOS = 0,60x0,60m</p> <p>ⓛ JANELA SALA = 1,50x1,20m</p> <p>ⓜ JANELA ÁREA DE SERVIÇOS = 1,20x1,20m</p> |

FIGURA 3.67 – Prédio “M” – Planta com a arquitetura do Pavimento Tipo

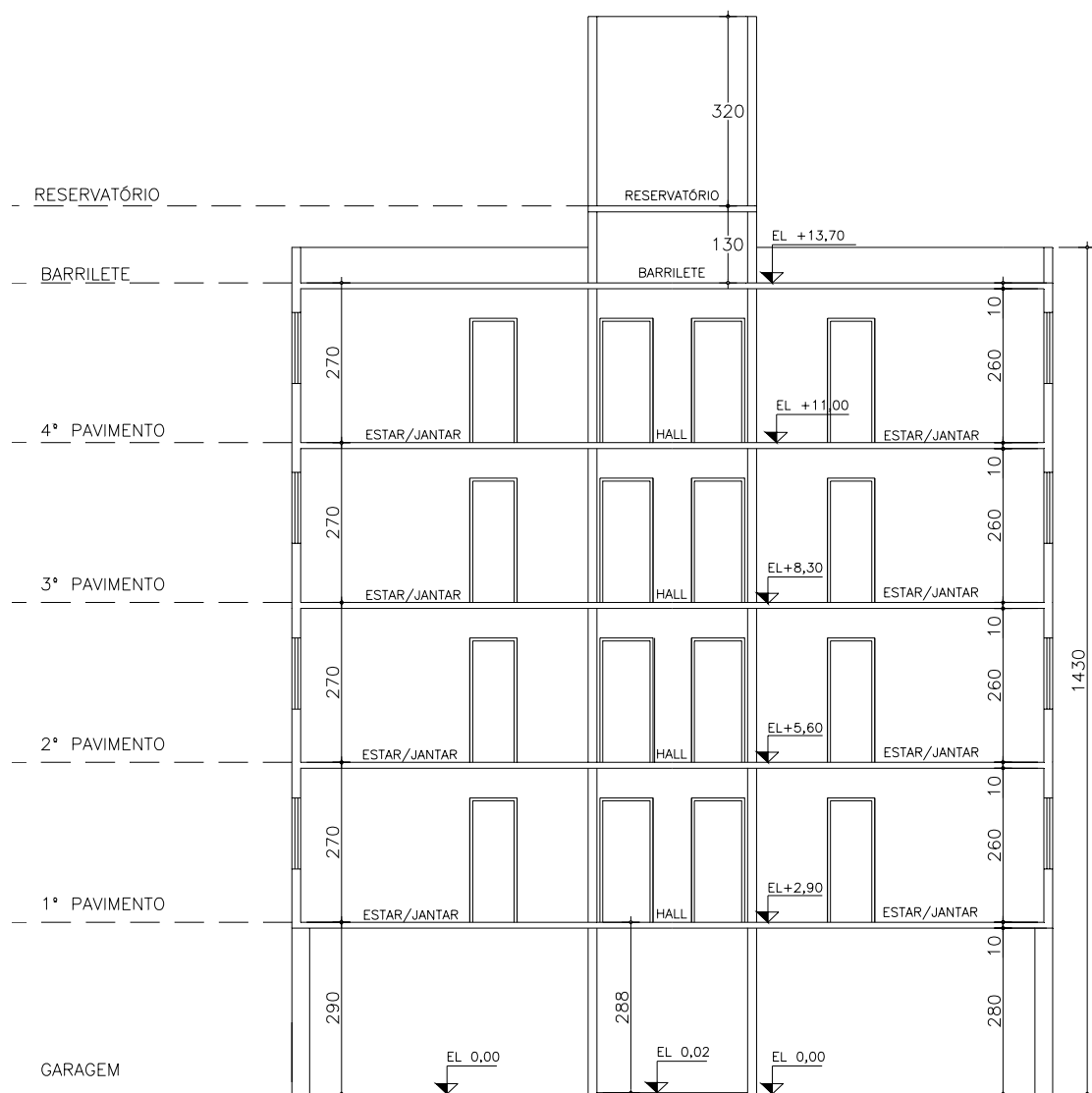


FIGURA 3.68 – Prédio “M” – Corte esquemático longitudinal A-A

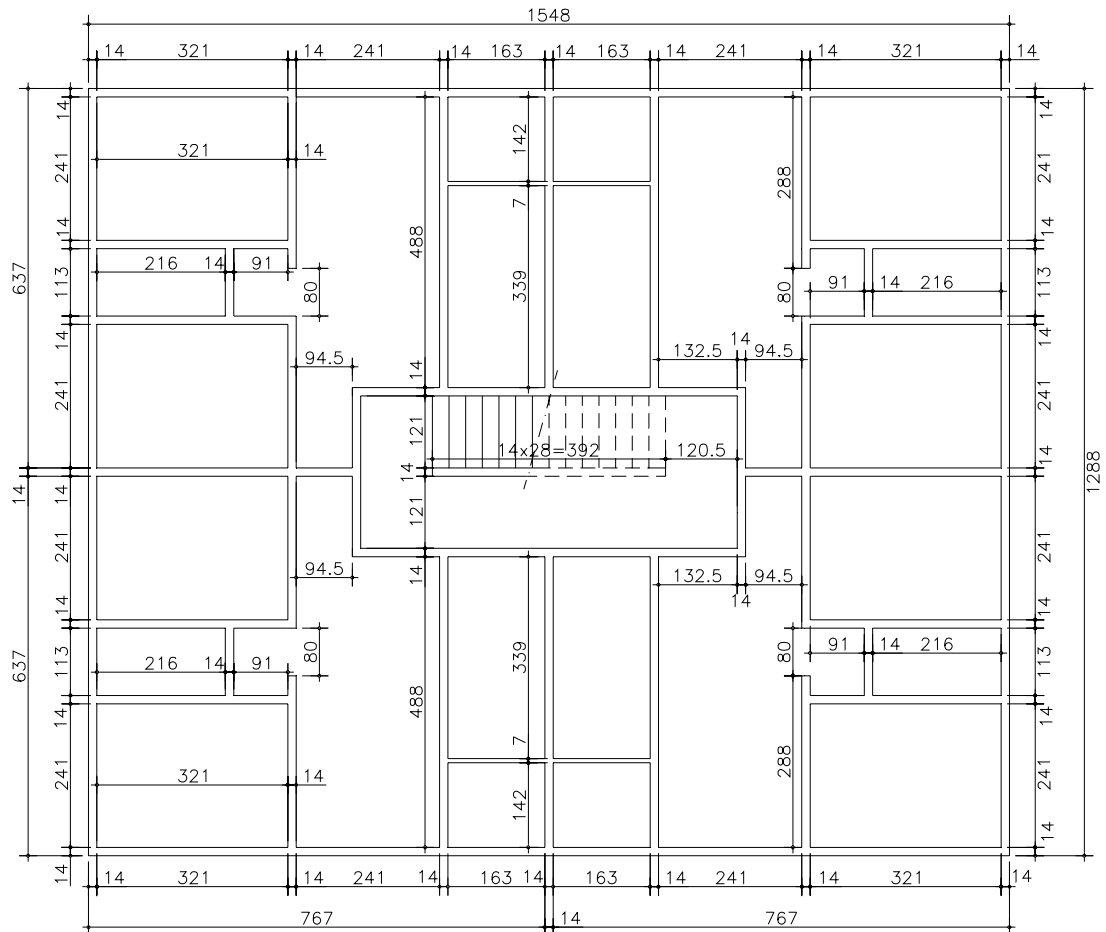


FIGURA 3.69 – Prédio “M” – Esquema das paredes sem revestimento

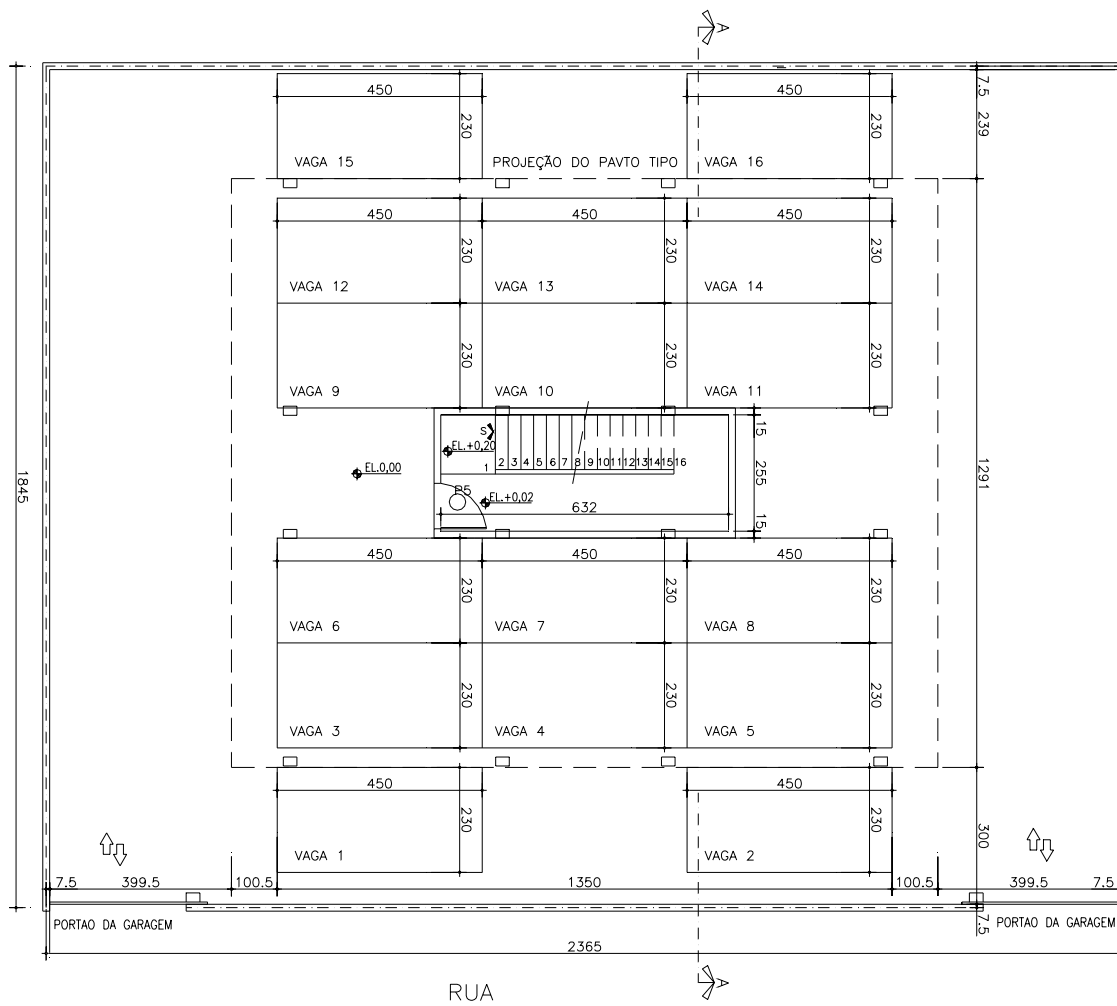


FIGURA 3.70 – Prédio “M” – Opção 1 – Planta da Garagem

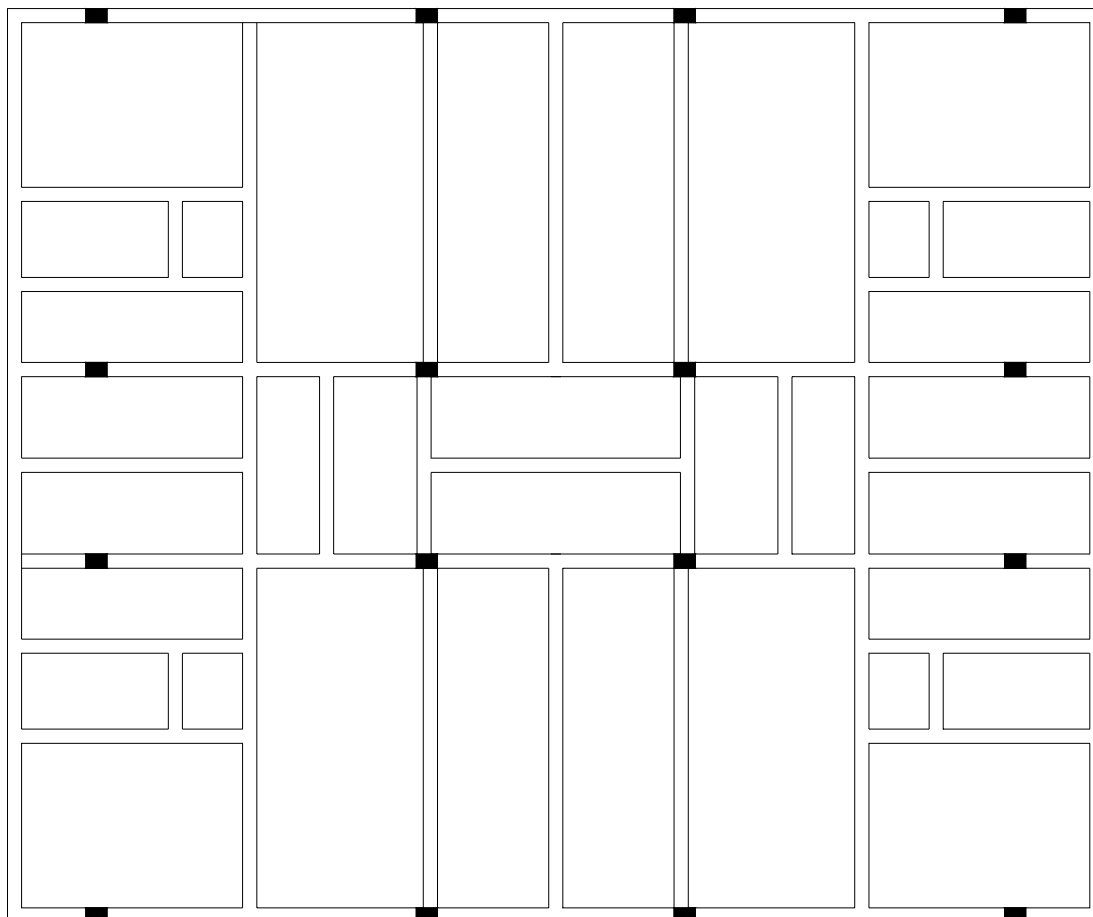


FIGURA 3.71 – Prédio “M” – Opção 1 - Esquema da estrutura

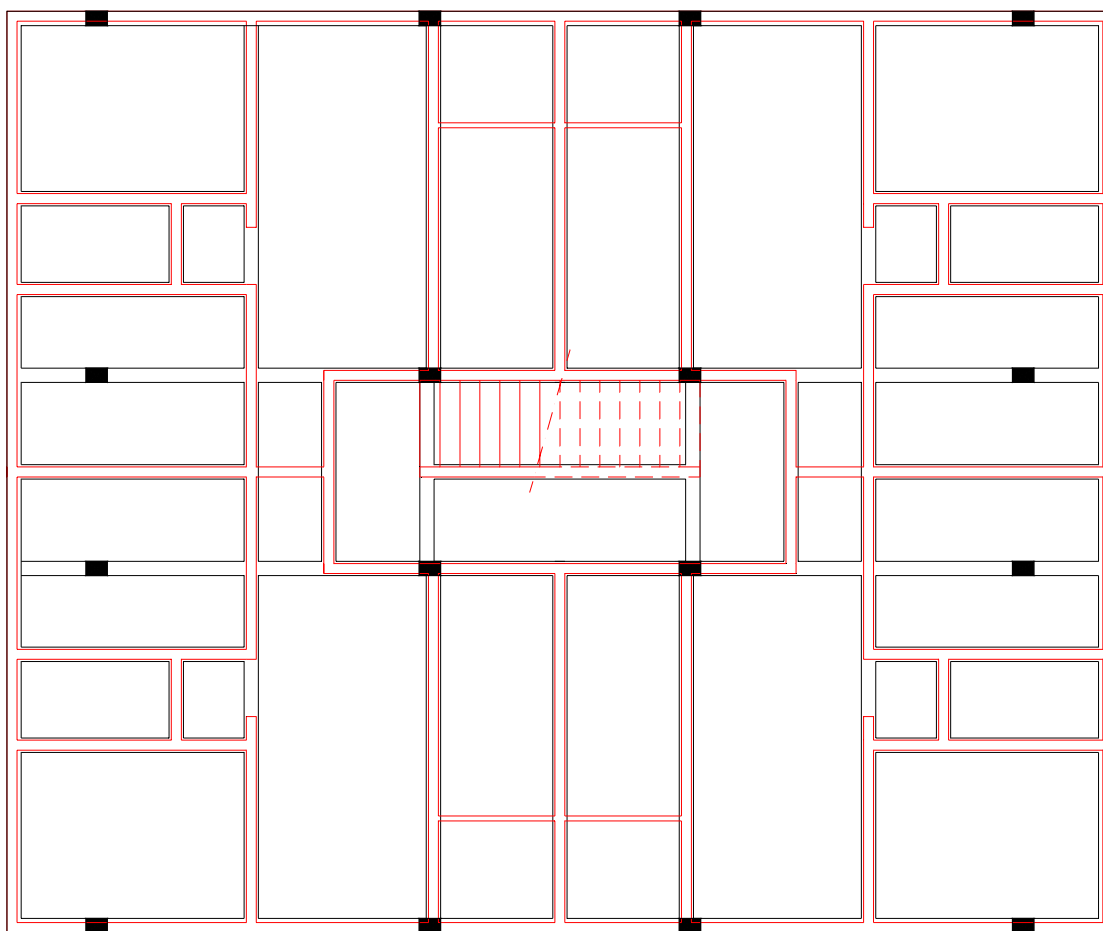


FIGURA 3.72 – Prédio “M”– Opção 1 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

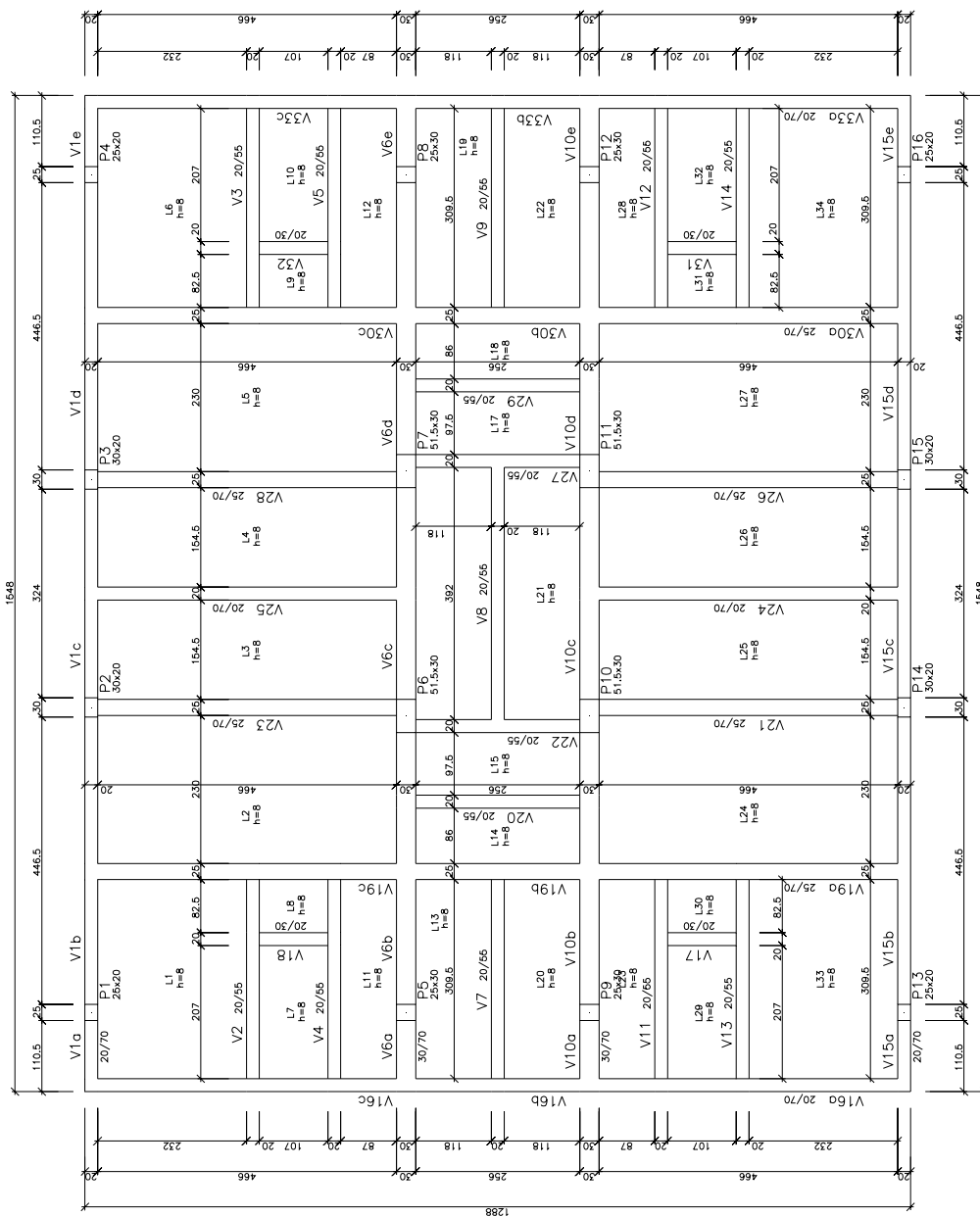


FIGURA 3.73 – Prédio “M” – Fôrma da Opção 1

b) Processamento para avaliação dos quantitativos

Para avaliação dos quantitativos, esta Opção 1 foi então processada no com a fôrma indicada na FIG.3.73, utilizando-se o modelo convencional ou simplificado, citado no item 2.1.4.a) deste trabalho. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.19.

TABELA 3.19 – Prédio “M” – Opção 1 – Quantitativos para a estrutura suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------|----------|---------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 152,00 | 238,00 | 54,00 | 444,00 |
| CONCRETO (m³) | 12,20 | 25,40 | 3,90 | 41,50 |
| AÇO (kgf) | 701,00 | 3.847,00 | 426,00 | 4.974,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 195,53 m², constata-se pelos dados da TAB.3.19 uma taxa de fôrma de $(444 \text{ m}^2/195,53 \text{ m}^2) = 2,27 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(41,5 \text{ m}^3/195,53 \text{ m}^2) = 0,212 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(4974 \text{ kgf}/41,5 \text{ m}^3) = 119,86 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

c) Processamento para avaliação das deformações

Para uma melhor avaliação das deformações, esta Opção 1 foi processada com os dois modelos citados no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.1 estão mostrados na FIG.3.74, para cada uma das vigas. Os deslocamentos obtidos no modelo b.2 estão na FIG.3.75, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes em centímetros.

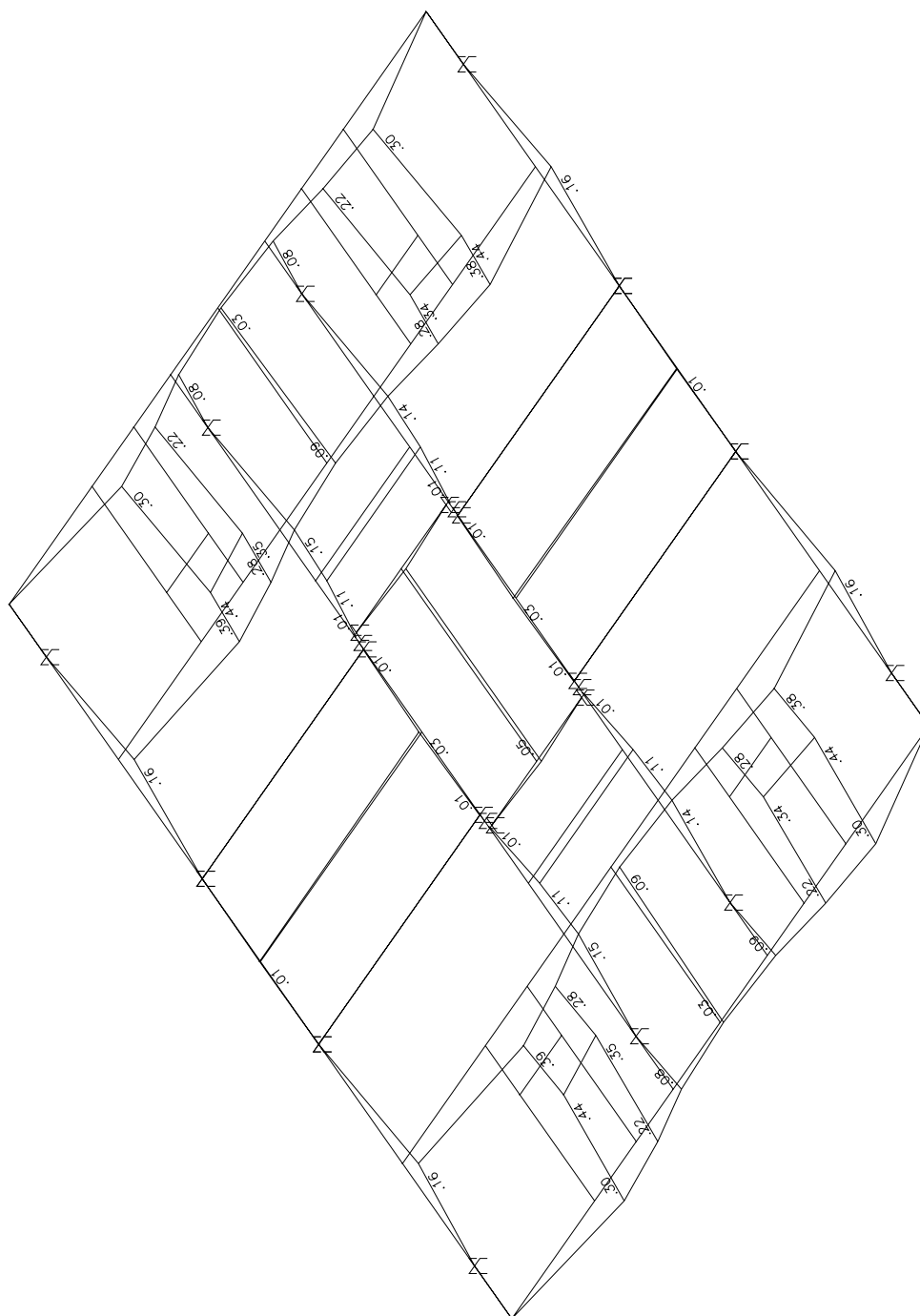


FIGURA 3.74 – Prédio “M” – Opção 1 – Deslocamentos das vigas (cm)

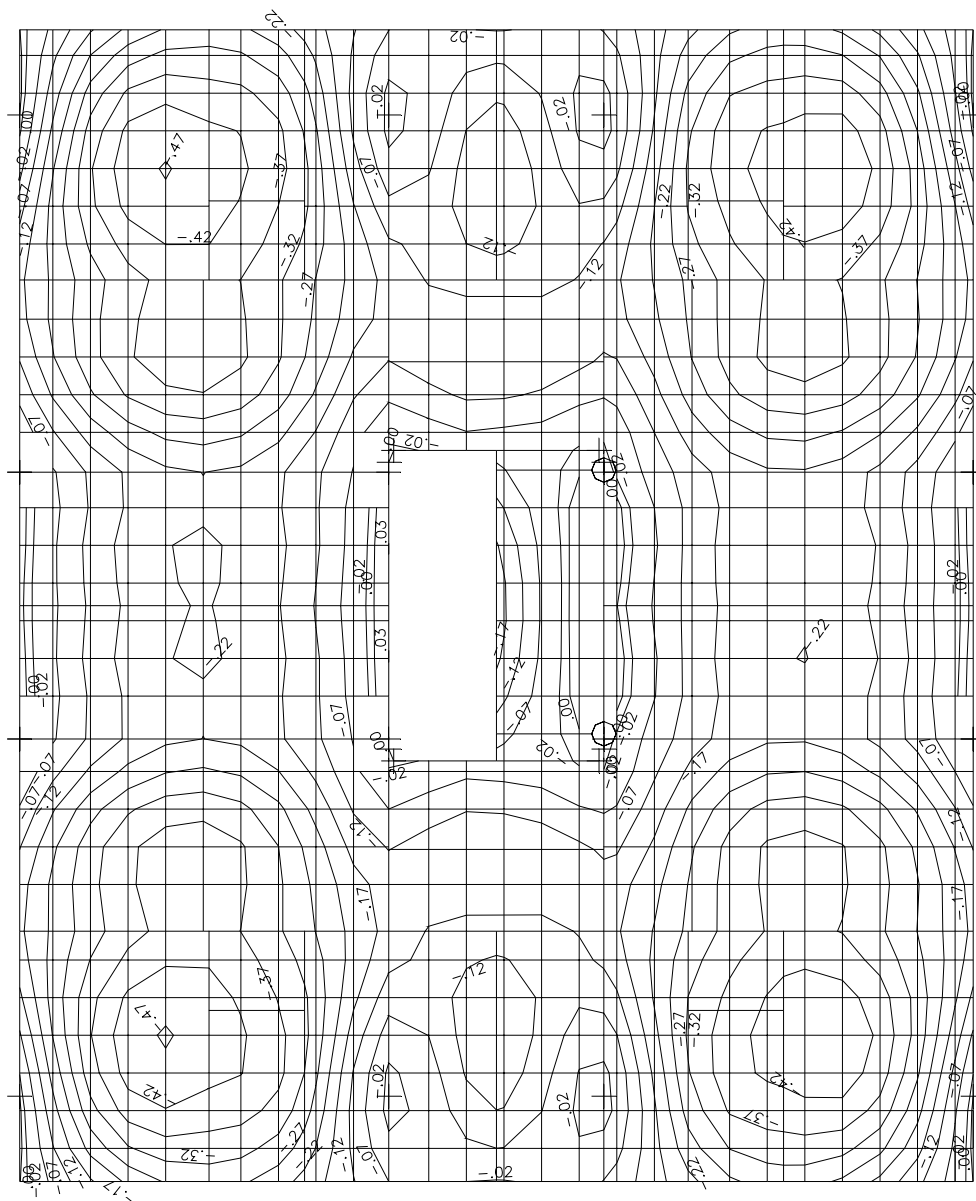


FIGURA 3.75 – Prédio “M” – Opção 1 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

3.4.2 - Opção 2 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A planta com a arquitetura da garagem da Opção 2 está na FIG.3.76, e o esquema da estrutura na FIG.3.77. Percebe-se nessas figuras que as vigas principais apresentam balanços na extremidade esquerda de 1,98 metros e a outra extremidade não tem balanços (ver FIG.3.79). Para se ter uma idéia precisa da posição das paredes sobre as vigas dessa estrutura, apresenta-se na FIG.3.78 a superposição dessas paredes sobre a estrutura-suporte da Opção 2.

b) Processamento para avaliação dos quantitativos

Para avaliação dos quantitativos, esta Opção 2 foi então processada com a fôrma indicada na FIG.3.79, utilizando-se o modelo convencional ou simplificado, citado no item 2.1.4.a) deste trabalho. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.20.

TABELA 3.20 – Prédio “M” – Opção 2 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 151,00 | 239,00 | 56,00 | 446,00 |
| CONCRETO (m³) | 12,10 | 26,10 | 4,40 | 42,60 |
| AÇO (kgf) | 701,00 | 4.334,00 | 468,00 | 5.503,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 195,53 m², constata-se pelos dados da TAB.3.20 uma taxa de fôrma de $(446 \text{ m}^2/195,53 \text{ m}^2) = 2,28 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(42,6 \text{ m}^3/195,53 \text{ m}^2) = 0,218 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(5503 \text{ kgf}/42,6 \text{ m}^3) = 129,18 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

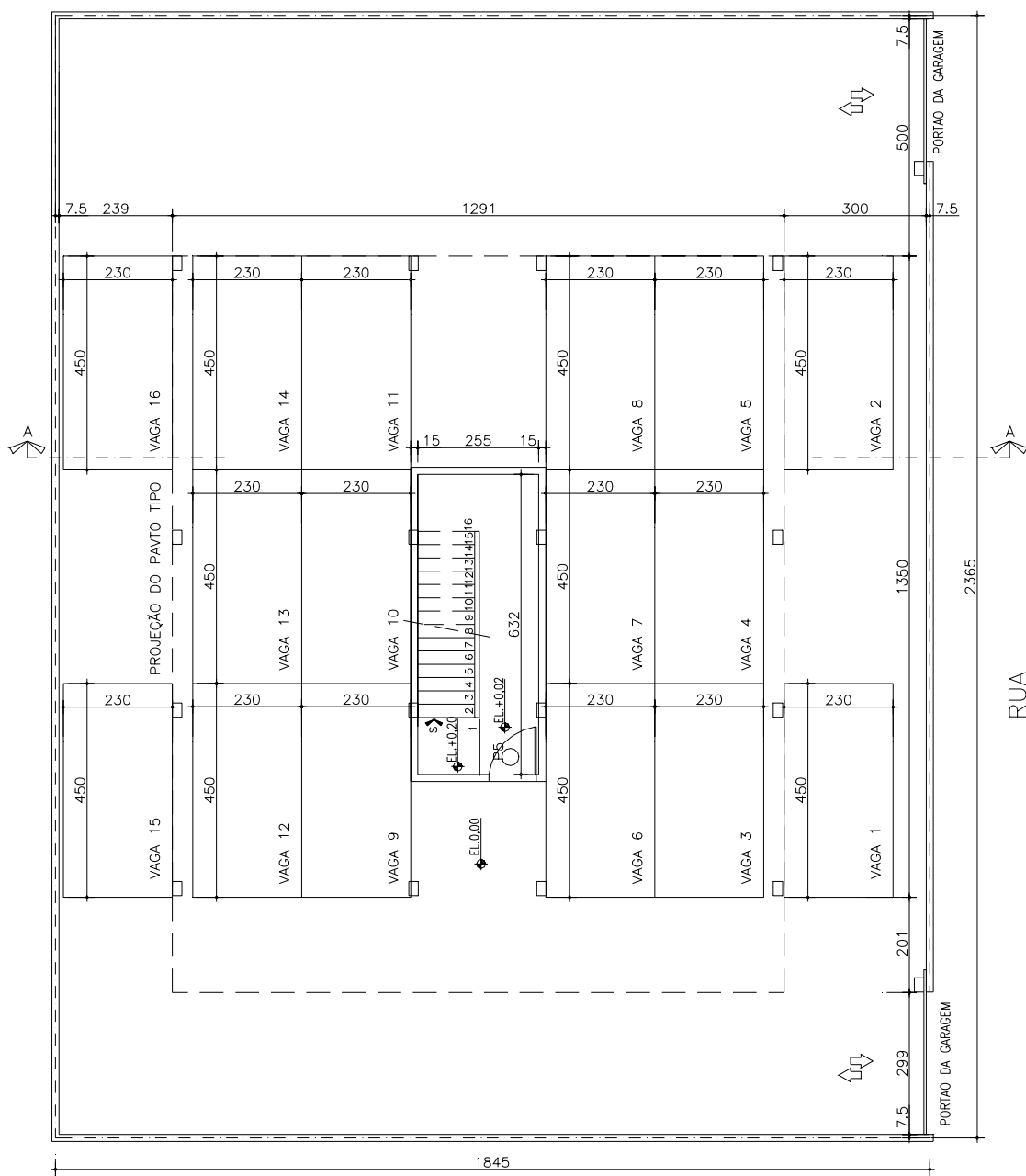


FIGURA 3.76 – Prédio “M” – Opção 2 – Planta da garagem

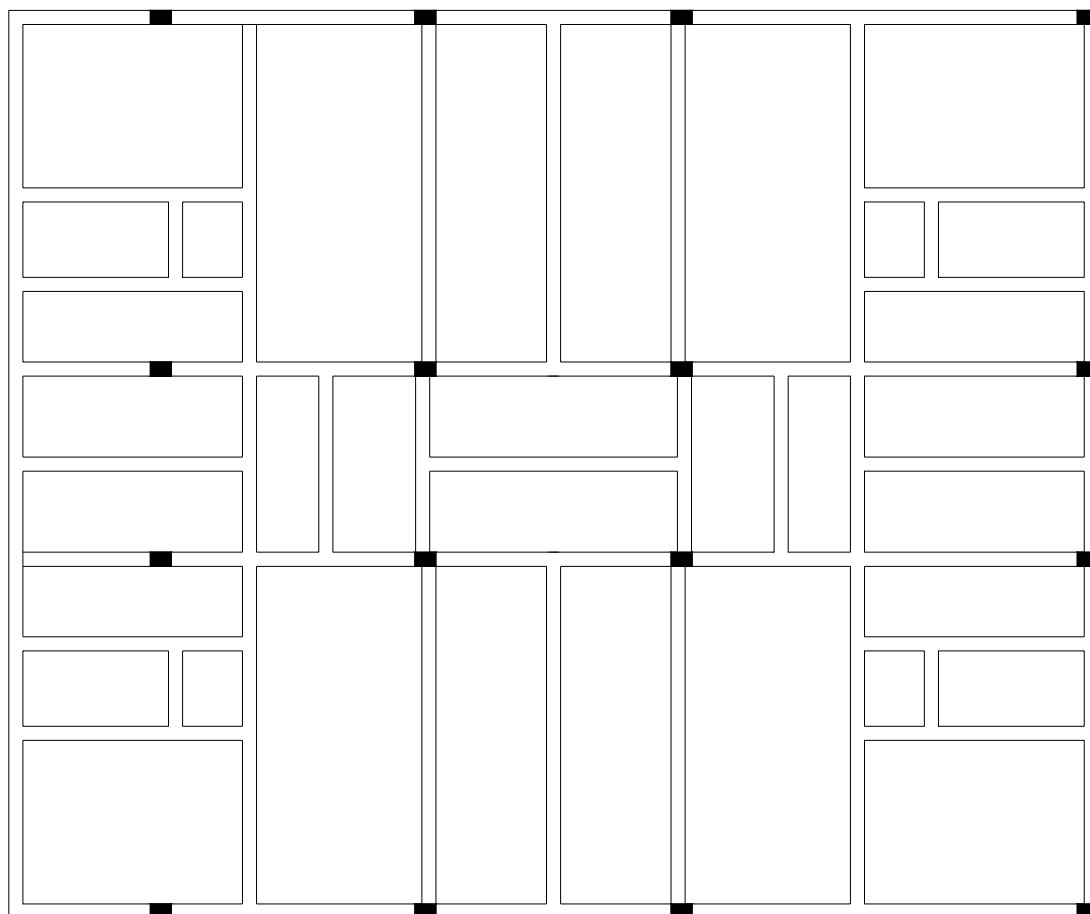


FIGURA 3.77 – Prédio “M” – Opção 2 – Esquema da estrutura

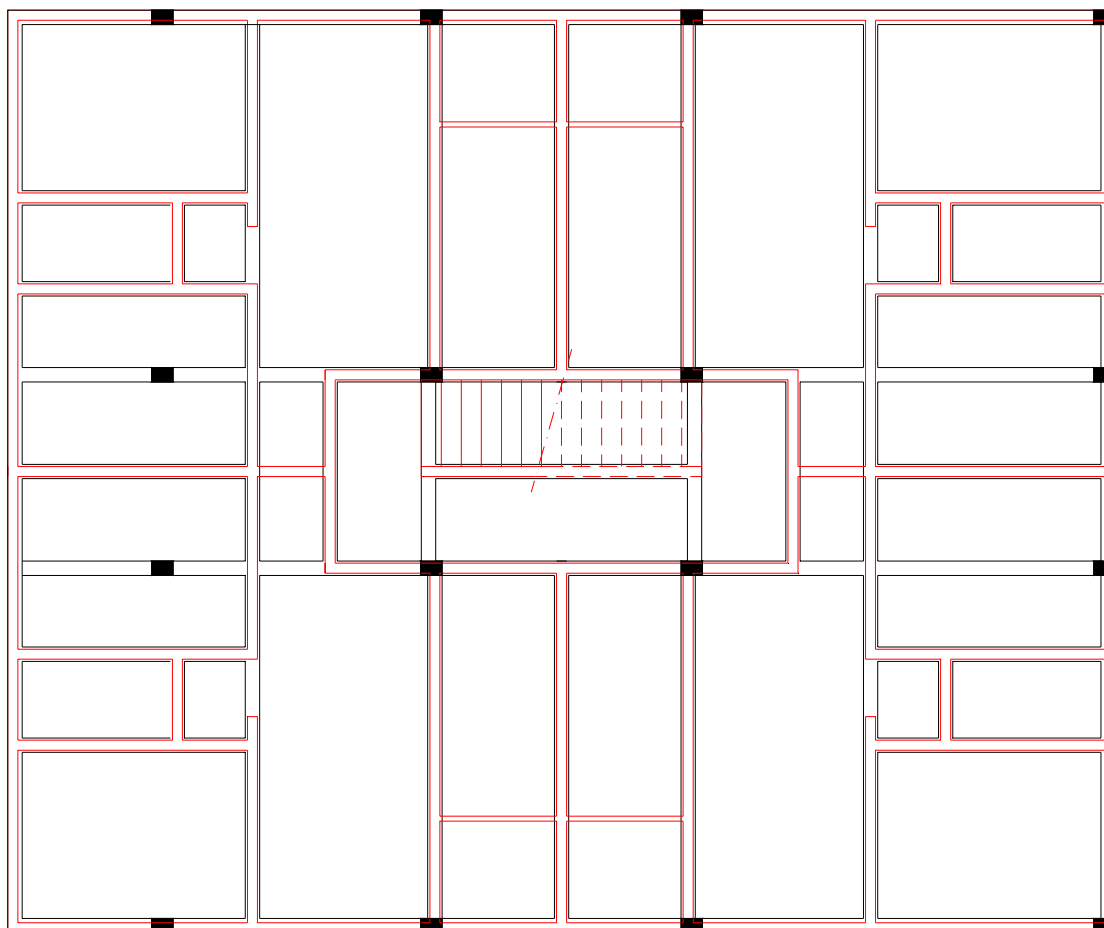


FIGURA 3.78 – Prédio “M” – Opção 2 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

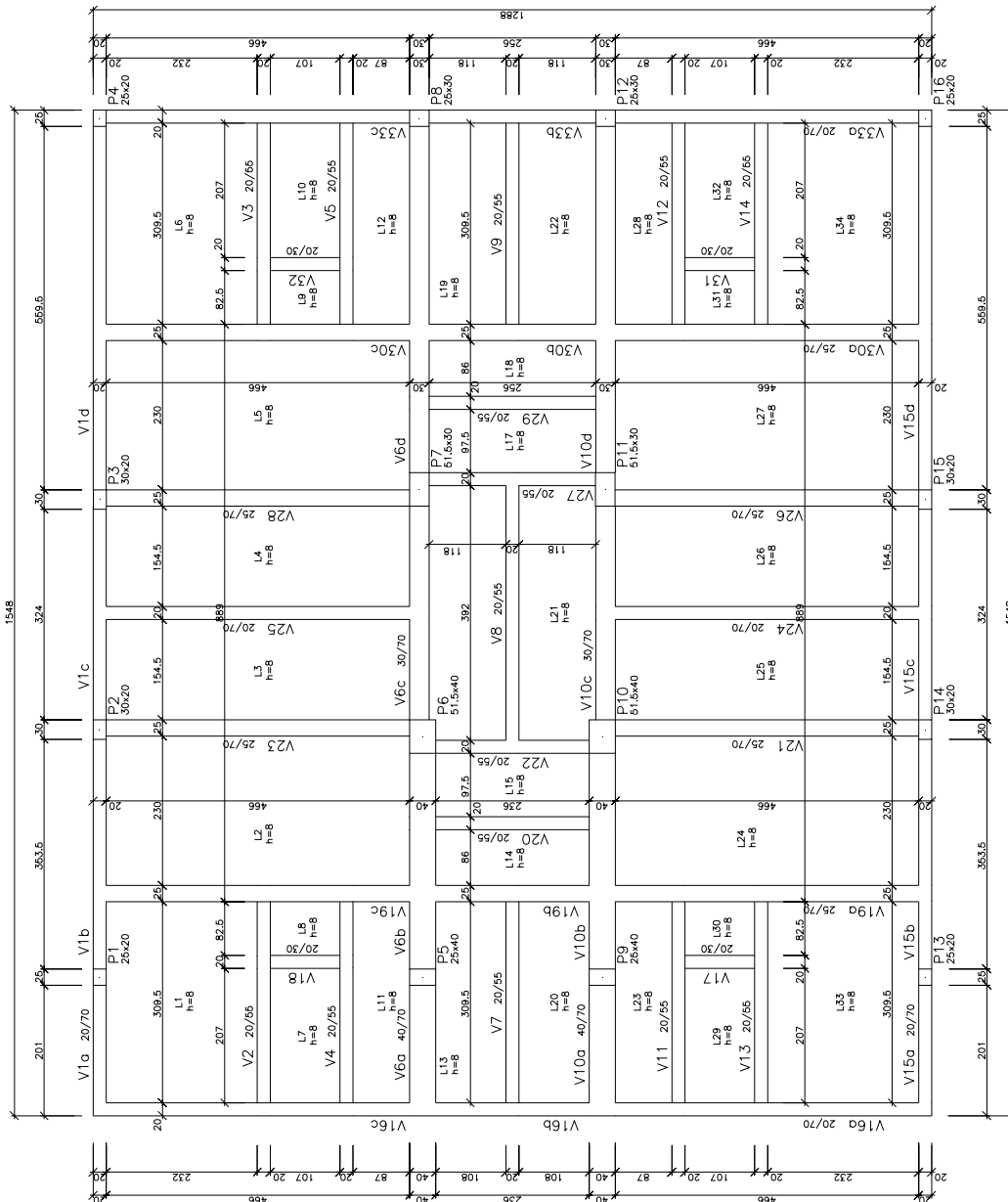


FIGURA 3.79 – Prédio “M” – Fôrma da Opção 2

c) Processamento para avaliação das deformações

Para uma melhor avaliação das deformações, esta Opção 2 foi processada com os dois modelos citados no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.1 estão mostrados na FIG.3.80, para cada uma das vigas. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.2 estão na FIG.3.81, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes em centímetros.

3.4.3 - Opção 3 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A planta com a arquitetura da garagem da Opção 3 está na FIG.3.82, e o esquema da estrutura na FIG.3.83. Percebe-se nessas figuras que as vigas principais não apresentam balanços nas extremidades (ver FIG.3.85). Para se ter uma idéia precisa da posição das paredes sobre as vigas dessa estrutura, apresenta-se na FIG.3.84 a superposição dessas paredes sobre a estrutura-suporte da Opção 3.

b) Processamento para avaliação dos quantitativos

Para avaliação dos quantitativos, esta Opção 3 foi então processada com a fôrma indicada na FIG.3.85, utilizando-se o modelo convencional ou simplificado, citado no item 2.1.4.a) deste trabalho. Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.21.

TABELA 3.21 – Prédio “M” – Opção 3 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 151,00 | 241,00 | 56,00 | 448,00 |
| CONCRETO (m³) | 12,10 | 26,40 | 4,40 | 42,90 |
| AÇO (kgf) | 701,00 | 4.101,00 | 414,00 | 5.216,00 |

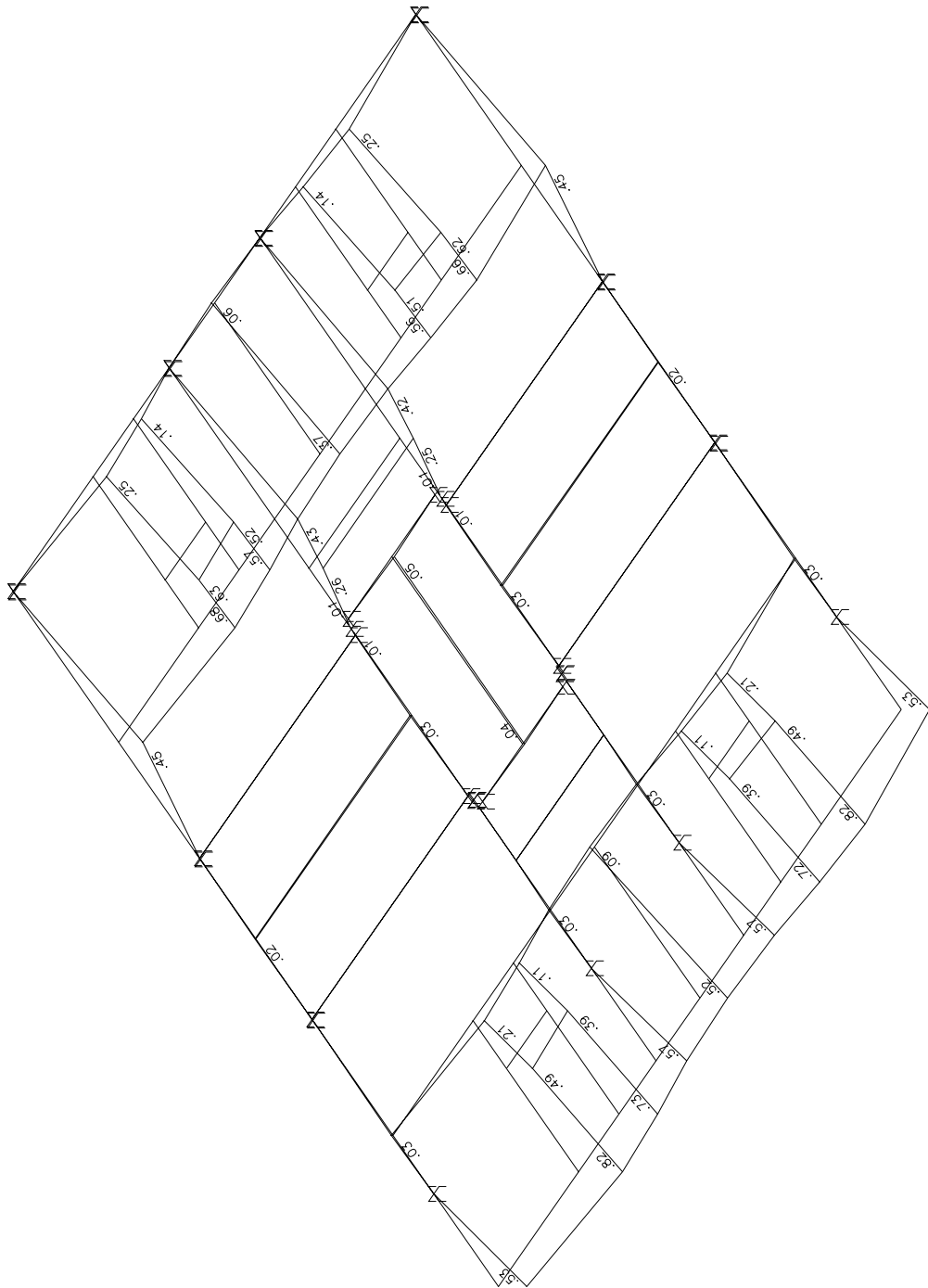


FIGURA 3.80 – Prédio “M” – Opção 2 – Deslocamentos das vigas (cm)

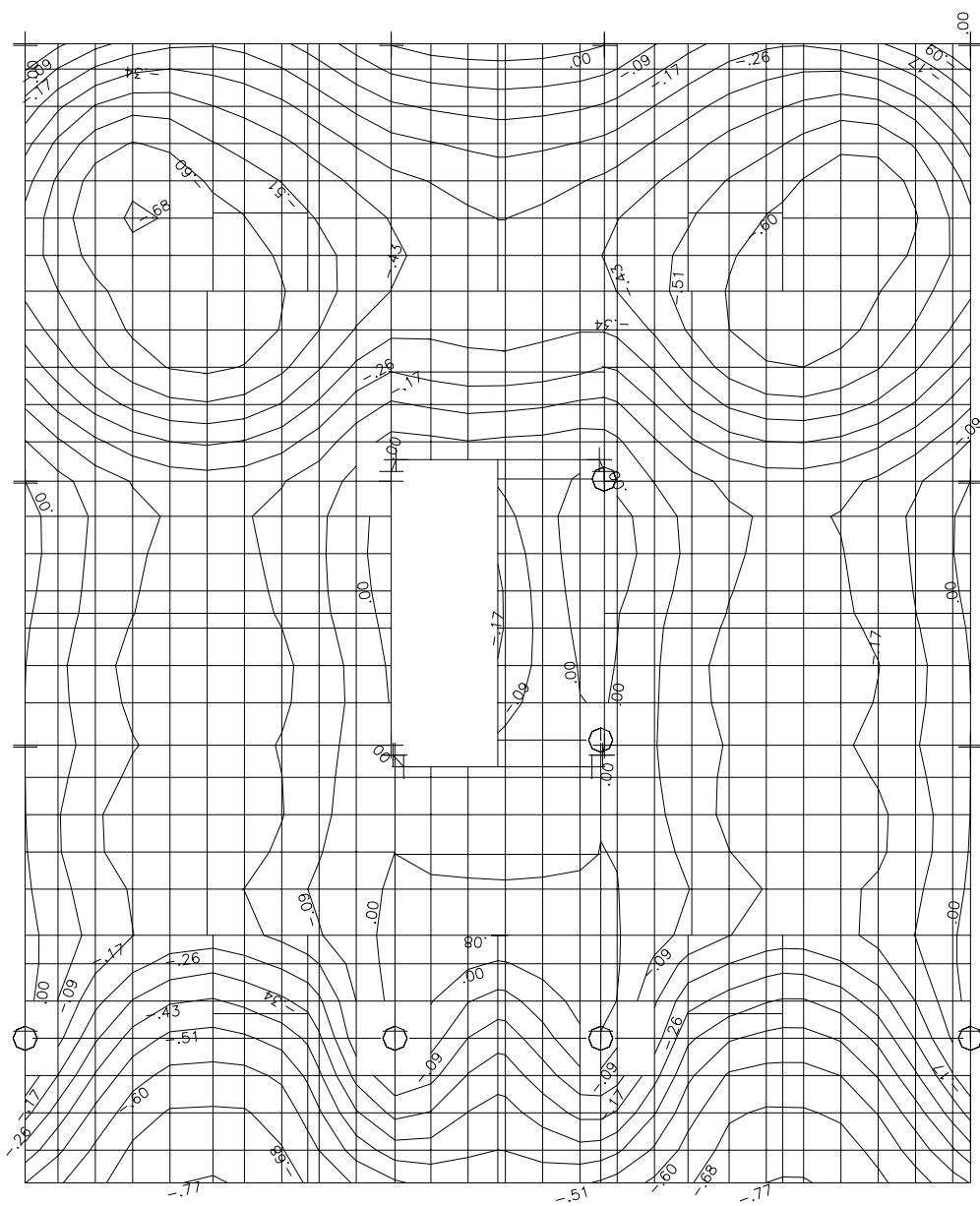


FIGURA 3.81 – Prédio “M” – Opção 2 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

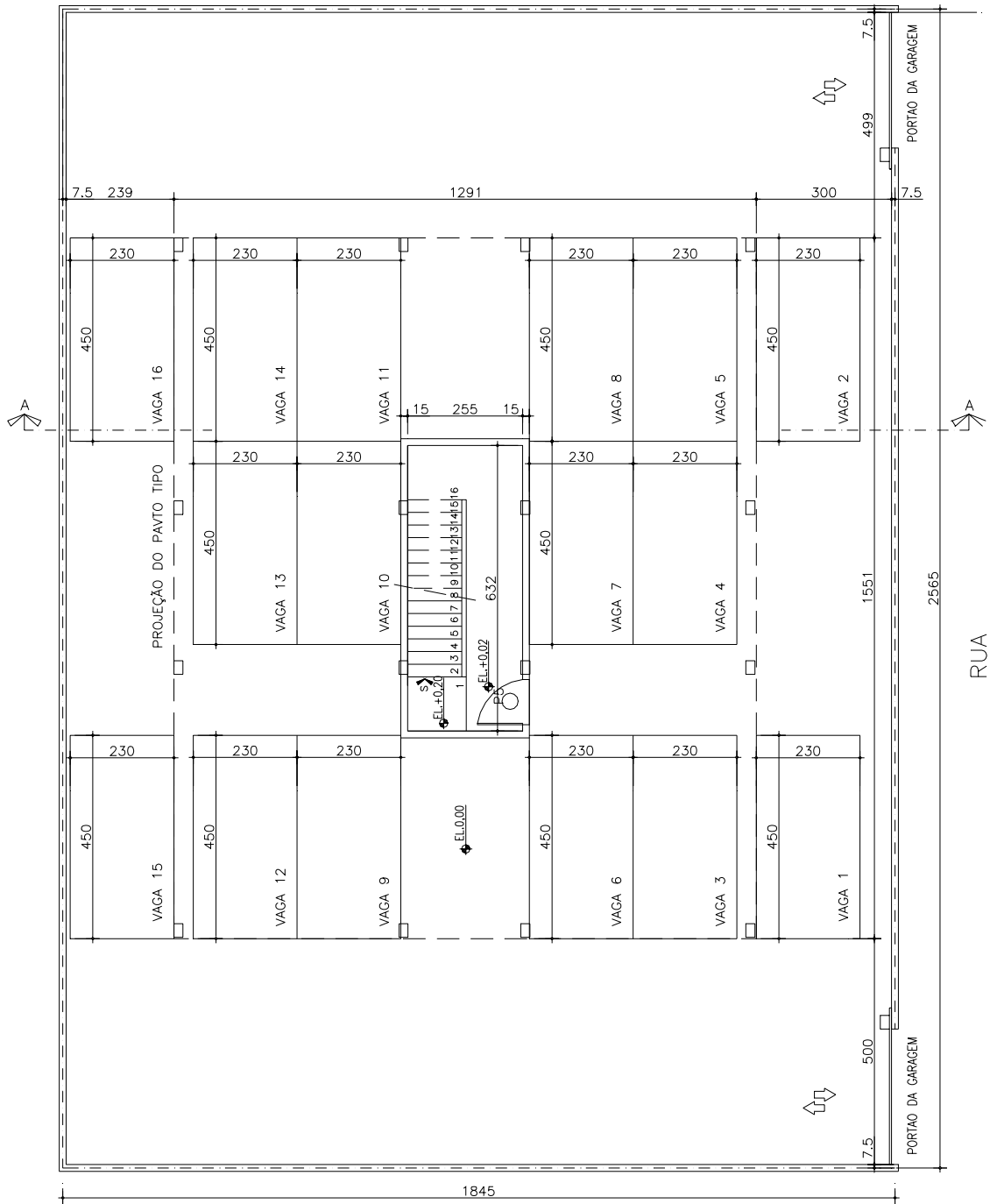


FIGURA 3.82 – Prédio “M” – Opção 3 – Planta da Garagem

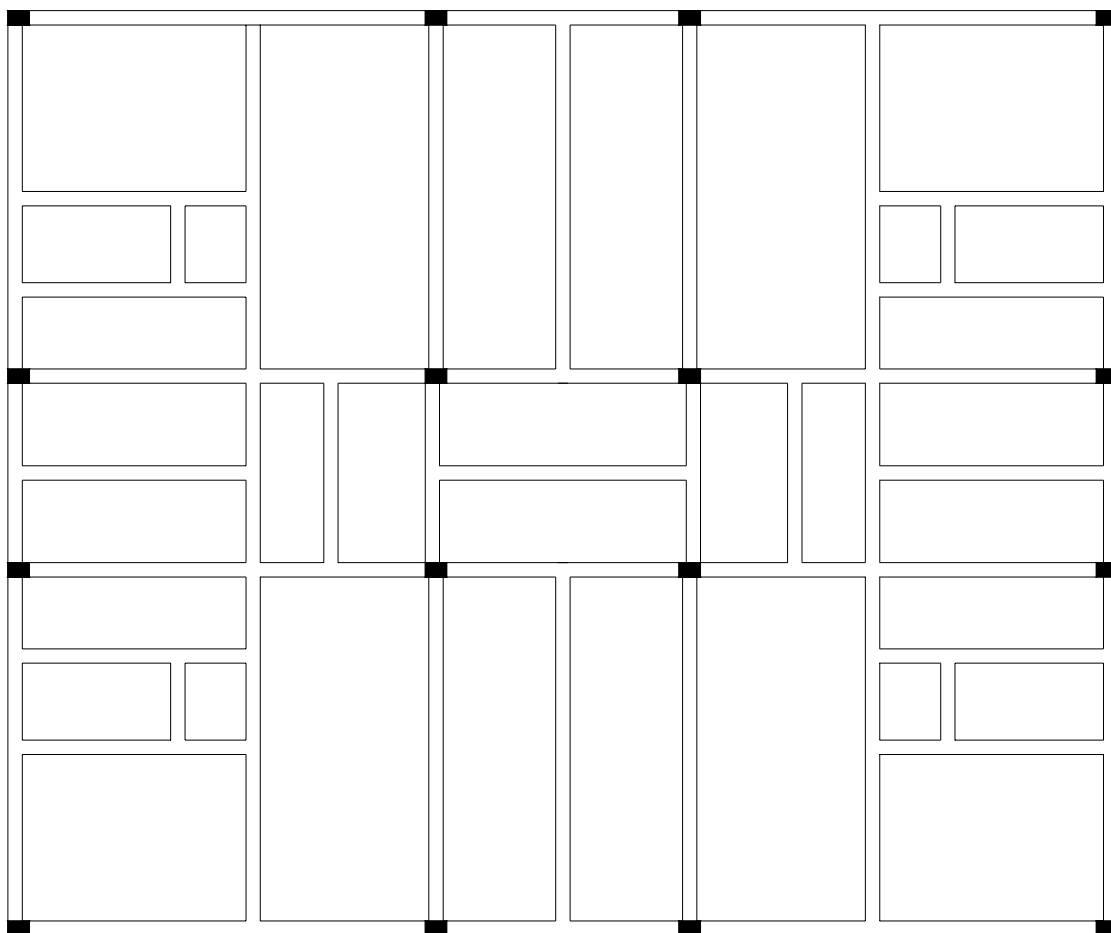


FIGURA 3.83 – Prédio “M” – Opção 3 – Esquema da estrutura

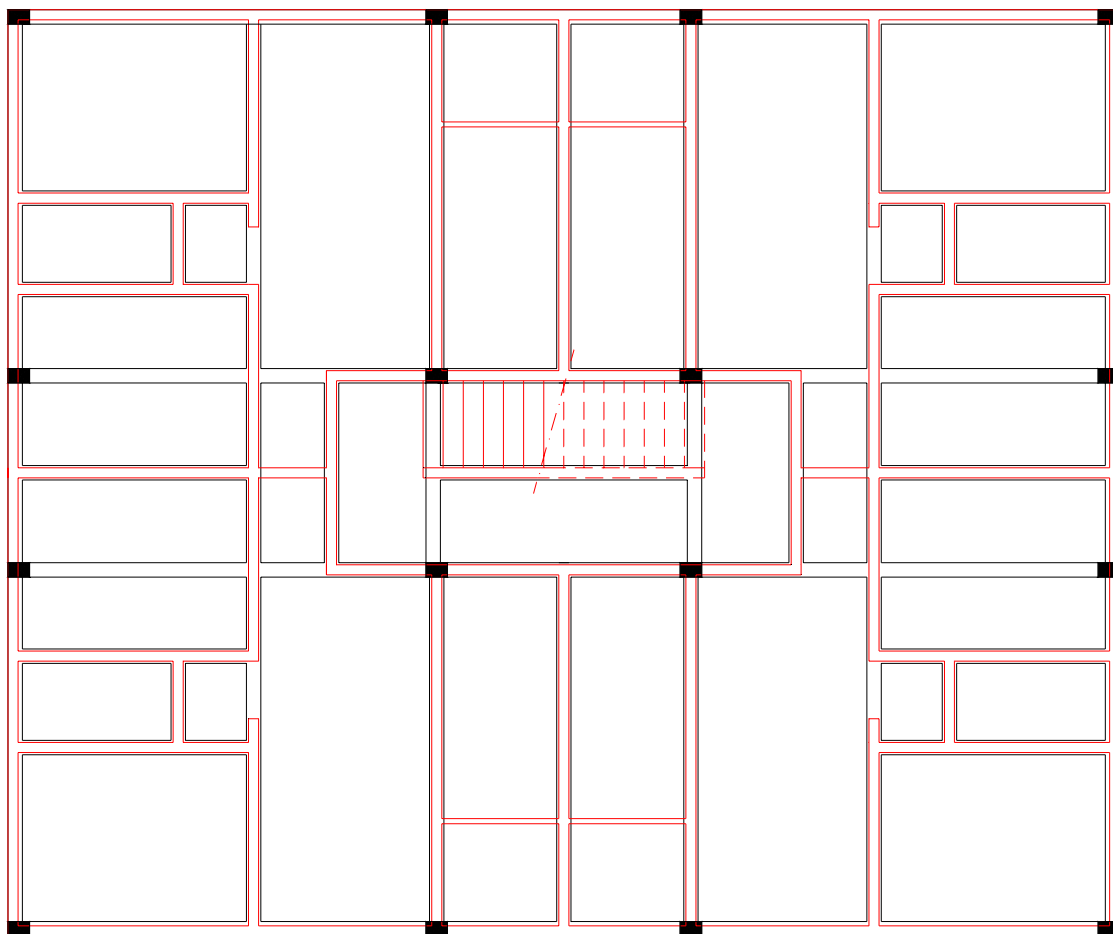


FIGURA 3.84 – Prédio “M” – Opção 3 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

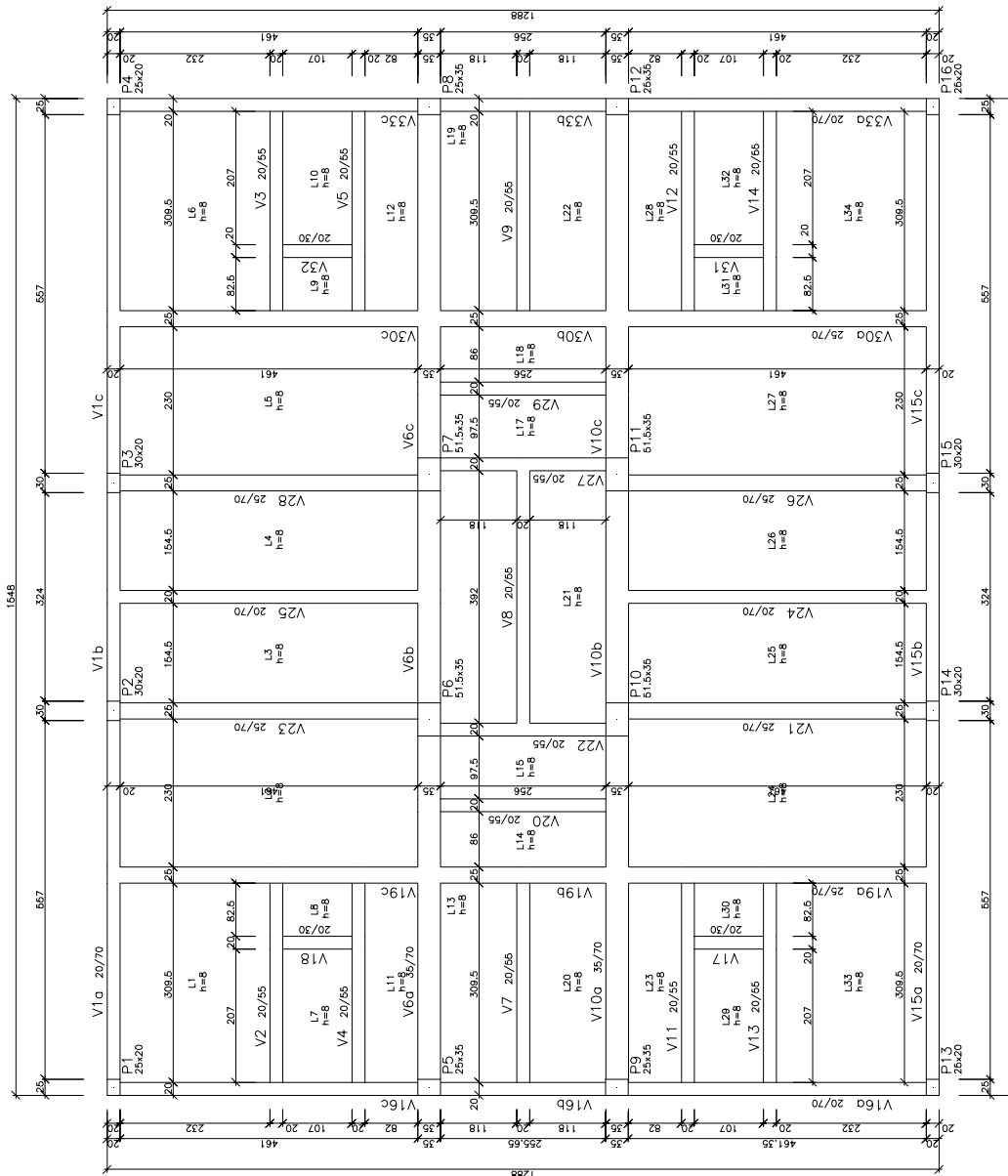


FIGURA 3.85 – Prédio “M” – Fôrma da Opção 3

Como a área dessa estrutura-suporte é de $195,53 \text{ m}^2$, constata-se pelos dados da TAB.3.21 uma taxa de fôrma de $(448 \text{ m}^2/195,53 \text{ m}^2) = 2,29 \text{ m}^2/ \text{ m}^2$; uma espessura equivalente de $(42,9 \text{ m}^3/195,53 \text{ m}^2) = 0,219 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(5216 \text{ kgf}/42,9 \text{ m}^3) = 121,52 \text{ kgf}/ \text{ m}^3$.

c) Processamento para avaliação das deformações

Para uma melhor avaliação das deformações, esta Opção 3 foi processada com os dois modelos citados no item 2.1.4.b) deste trabalho. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.1 estão mostrados na FIG.3.86, para cada uma das vigas. Os deslocamentos obtidos no Modelo b.2 estão na FIG.3.87, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes em centímetros.

3.4.4 - Opção 4 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A Opção 4 tem a mesma distribuição de pilares da Opção 3 (planta da garagem da FIG.3.82), mas possui vigas apenas no perímetro. Sua fôrma está na FIG.3.88 e nela se percebe que a laje, que tem 18 cm de espessura, apóia-se nas vigas do perímetro e nas vigas do núcleo central. Os pilares (P6, P7, P10 e P11) têm um capitel com altura de 50 centímetros para evitar o puncionamento da laje.

b) Processamento

Esta opção foi processada no Modelo b.2, citado no item 2.1.4.b) deste trabalho (grelha de vigas e lajes planas discretizadas em barras). Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.22.

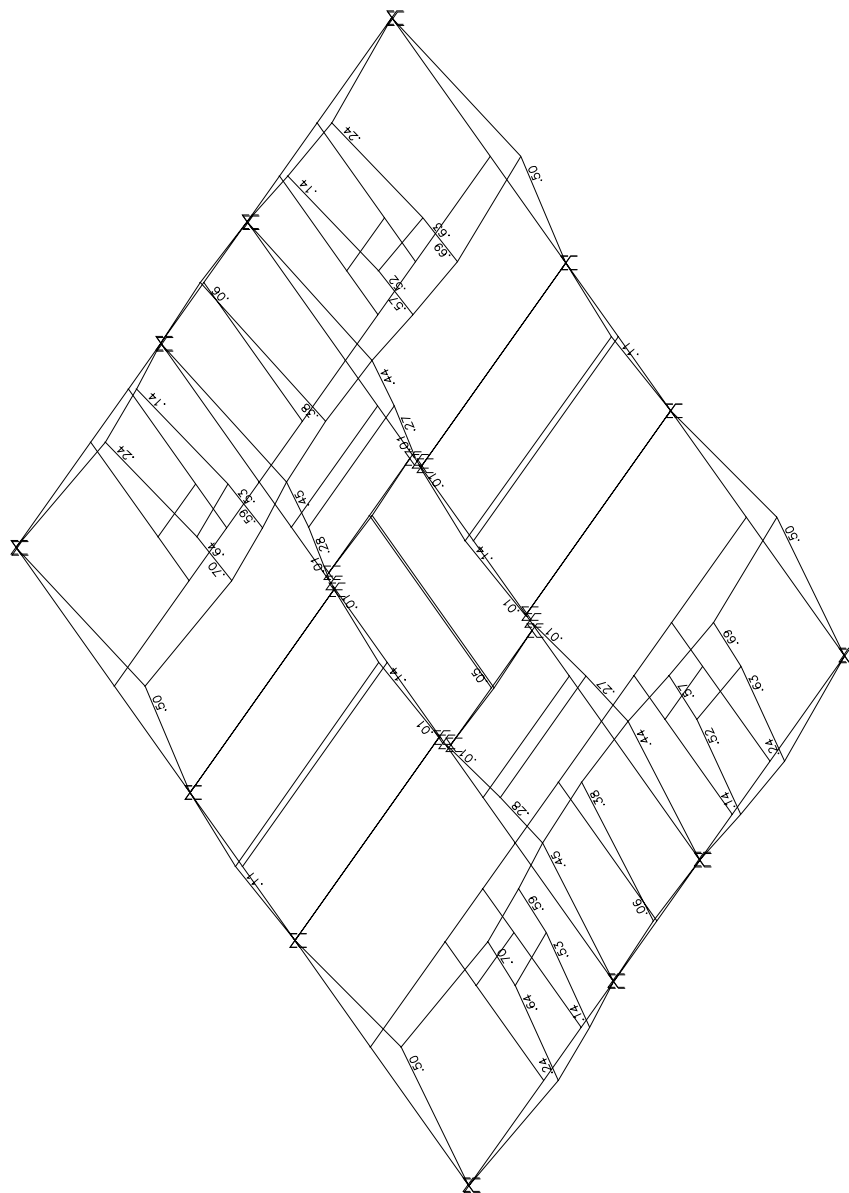


FIGURA 3.86 – Prédio “M” – Opção 3 – Deslocamentos das vigas (cm)

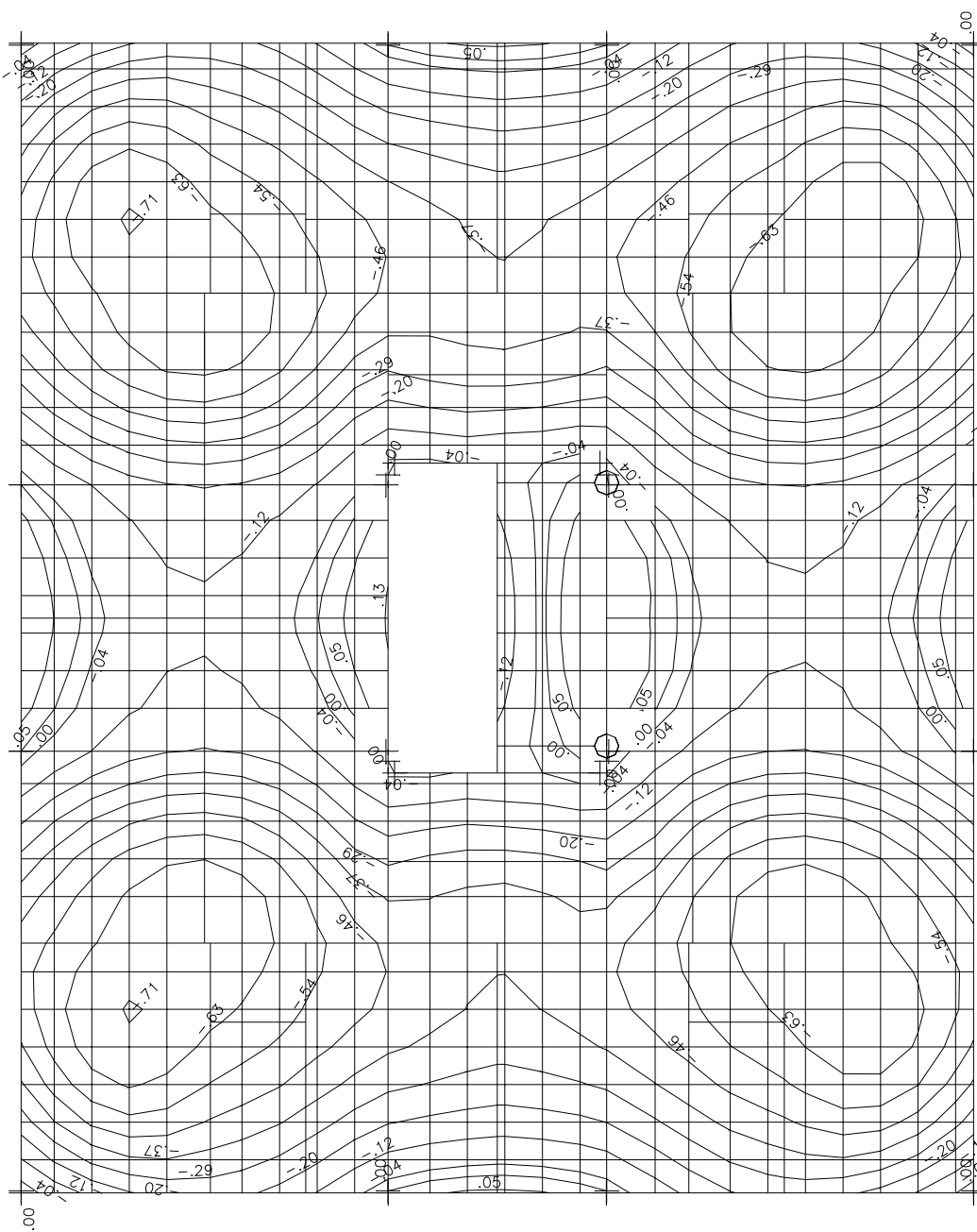


FIGURA 3.87 – Prédio “M” – Opção 3 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

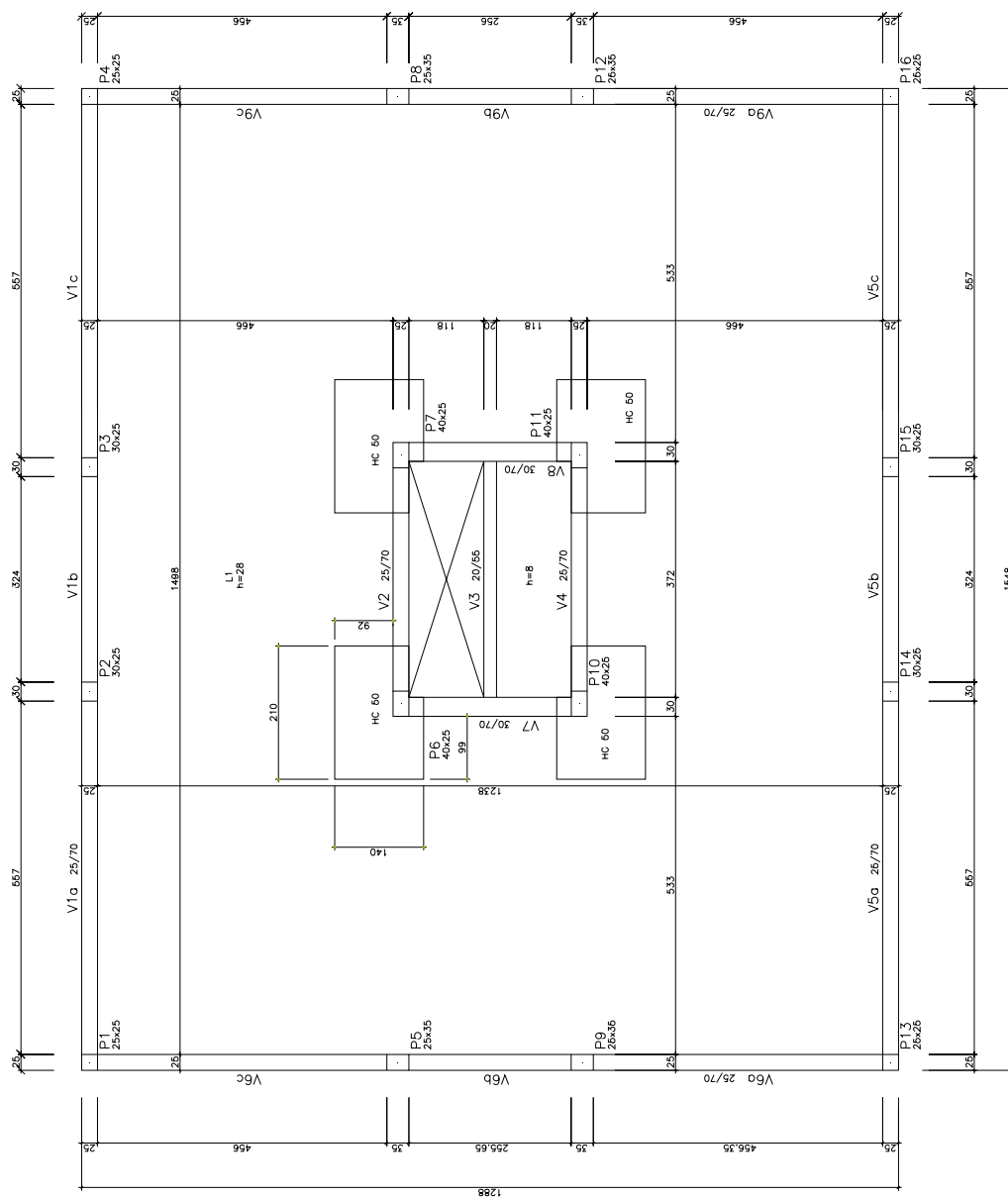


FIGURA 3.88 – Prédio “M” – Fôrma da Opção 4

TABELA 3.22 – Prédio “M” – Opção 4 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------------|------------------|
| FÔRMAS (m²) | 185,00 | 96,00 | 53,00 | 334,00 |
| CONCRETO (m³) | 51,90 | 11,80 | 3,80 | 67,50 |
| AÇO (kgf) | 7.715,00 | 1.917,00 | 711,00 | 10.343,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 195,53 m², constata-se pelos dados da TAB.3.22 uma taxa de fôrma de $(334 \text{ m}^2/195,53 \text{ m}^2) = 1,71 \text{ m}^2/\text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(67,5 \text{ m}^3/195,53 \text{ m}^2) = 0,345 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(10343 \text{ kgf}/67,5 \text{ m}^3) = 153,23 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

Os deslocamentos obtidos estão na FIG.3.89, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes, em centímetros.

3.4.5 - Opção 5 para a estrutura-suporte das alvenarias

a) Introdução

A Opção 5 é a Opção 4 com acréscimo de duas vigas centrais (V2 e V4) sobre os pilares P5 a P8 e P9 a P12. Sua fôrma está na FIG.3.90 e nela se percebe que a espessura das lajes é 20 cm e que os pilares P5, P8, P9 e P12 foram deslocados para dentro do prédio para, com a criação dos balanços, reduzir o momento positivo dos vãos extremos destas vigas V2 e V4.

b) Processamento

Esta opção foi processada no Modelo b.2, citado no item 2.1.4.b) deste trabalho (grelha de vigas e lajes planas discretizadas em barras). Os quantitativos obtidos para fôrmas, concreto e aço estão indicados na TAB.3.23.

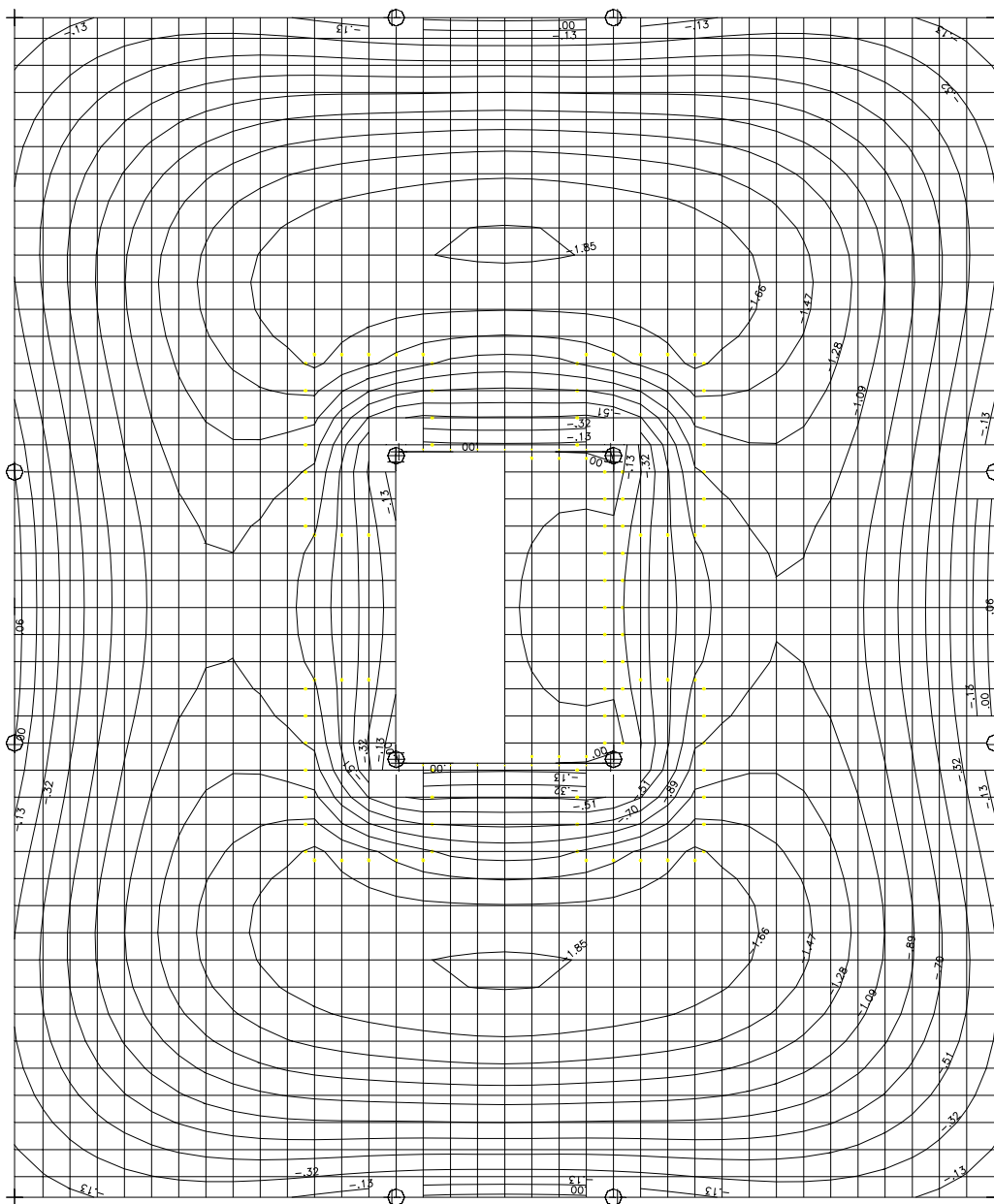


FIGURA 3.89 – Prédio “M” – Opção 4 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

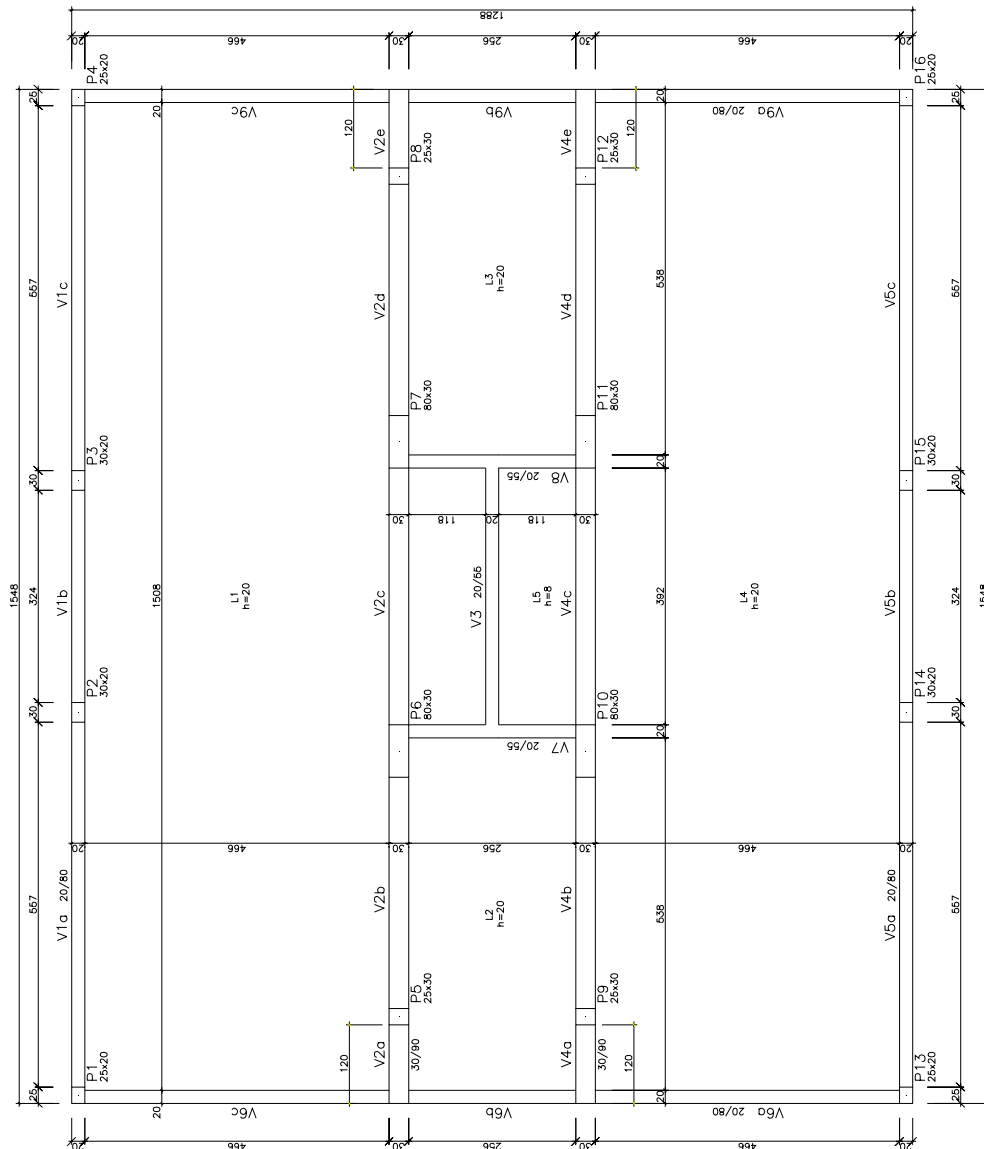


FIGURA 3.90 – Prédio “M” – Fôrma da Opção 5

TABELA 3.23 – Prédio “M” – Opção 5 – Quantitativos para a estrutura-suporte das alvenarias

| | LAJES | VIGAS | PILARES | TOTAL |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|
| FÔRMAS (m²) | 173,00 | 139,00 | 60,00 | 372,00 |
| CONCRETO (m³) | 34,00 | 16,40 | 4,90 | 55,30 |
| AÇO (kgf) | 5.265,00 | 2.187,00 | 617,00 | 8.069,00 |

Como a área dessa estrutura-suporte é de 195,53 m², constata-se pelos dados da TAB.3.23 uma taxa de fôrma de $(372 \text{ m}^2/195,53 \text{ m}^2) = 1,90 \text{ m}^2/ \text{m}^2$; uma espessura equivalente de $(55,3 \text{ m}^3/195,53 \text{ m}^2) = 0,28 \text{ m}$ e uma taxa de armação de $(8069 \text{ kgf}/55,3 \text{ m}^3) = 145,9 \text{ kgf}/ \text{m}^3$.

Os deslocamentos obtidos estão na FIG.3.91, na qual se apresentam os isovalores dos deslocamentos das vigas e lajes, em centímetros.

3.4.6 – Gráficos e tabelas comparativos

A seguir são apresentados gráficos e tabelas que comparam o consumo do material para as várias opções do prédio “M”.

TABELA 3.24 – Prédio “M” – Resumo dos quantitativos das várias opções

| OPÇÃO | FÔRMAS (m²) | CONCRETO (m³) | AÇO (kgf) |
|----------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|
| Opção 1 | 444 | 41,50 | 4.974 |
| Opção 2 | 446 | 42,60 | 5.503 |
| Opção 3 | 448 | 42,90 | 5.216 |
| Opção 4 | 334 | 67,50 | 10.343 |
| Opção 5 | 372 | 55,30 | 8.069 |

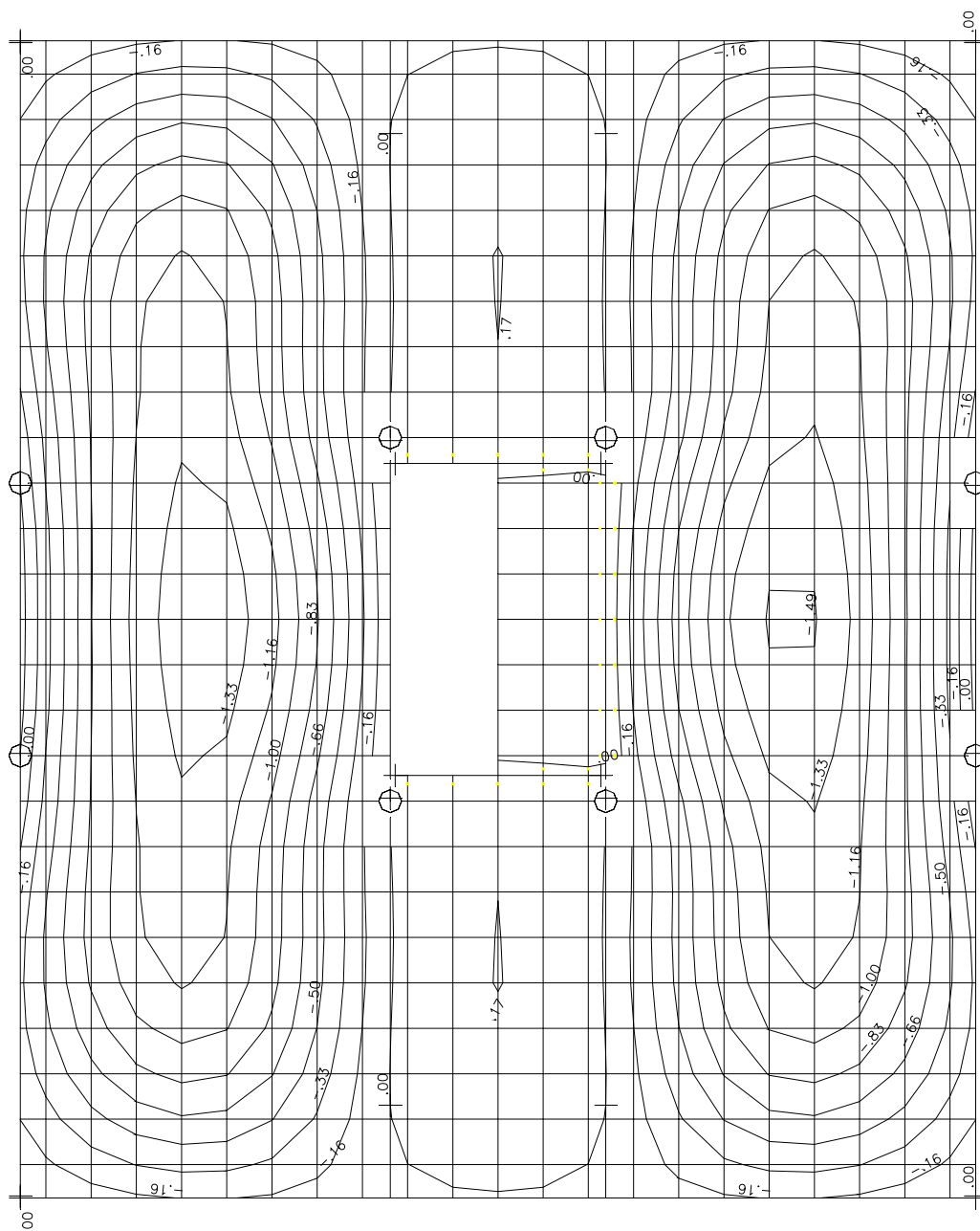


FIGURA 3.91 – Prédio “M” – Opção 5 – Deslocamentos das vigas e lajes (cm)

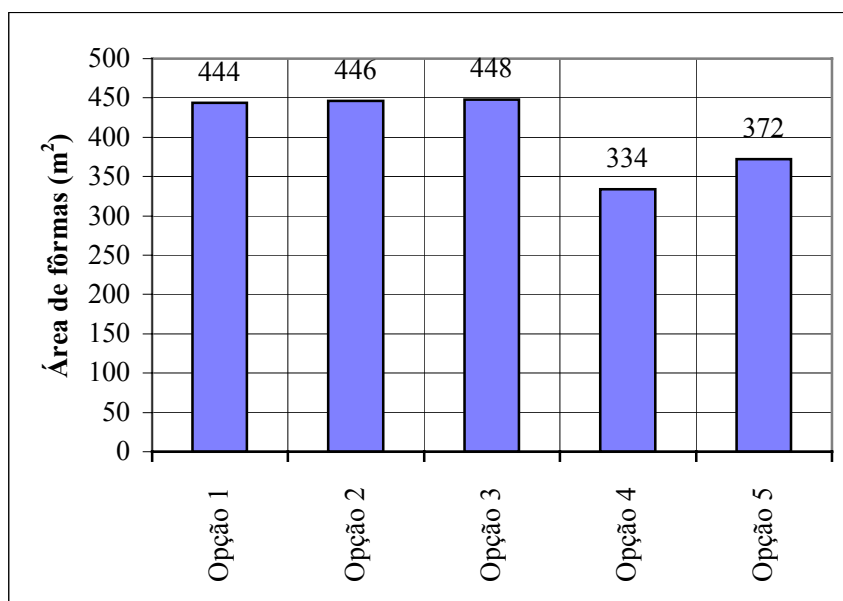


FIGURA 3.92 – Prédio “M” – Consumo de fôrma das várias opções

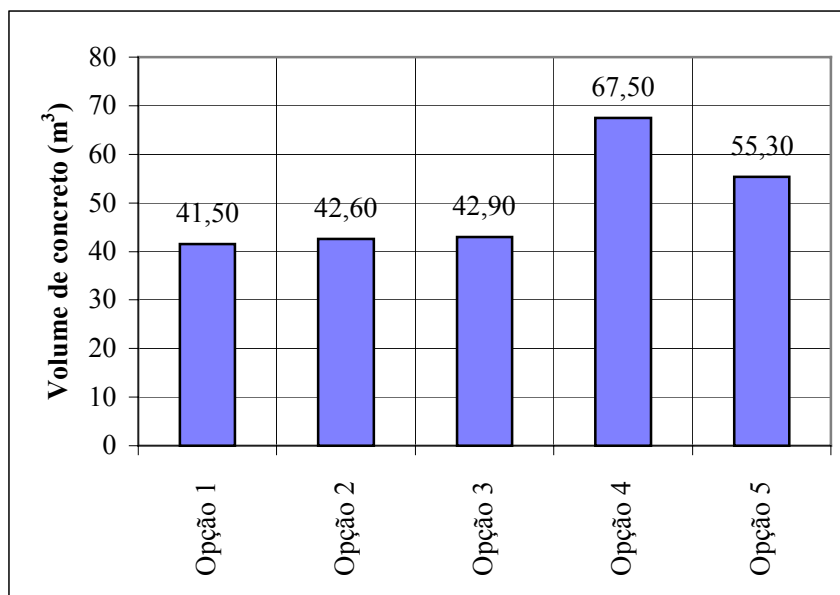


FIGURA 3.93 – Prédio “M” – Consumo de concreto das várias opções

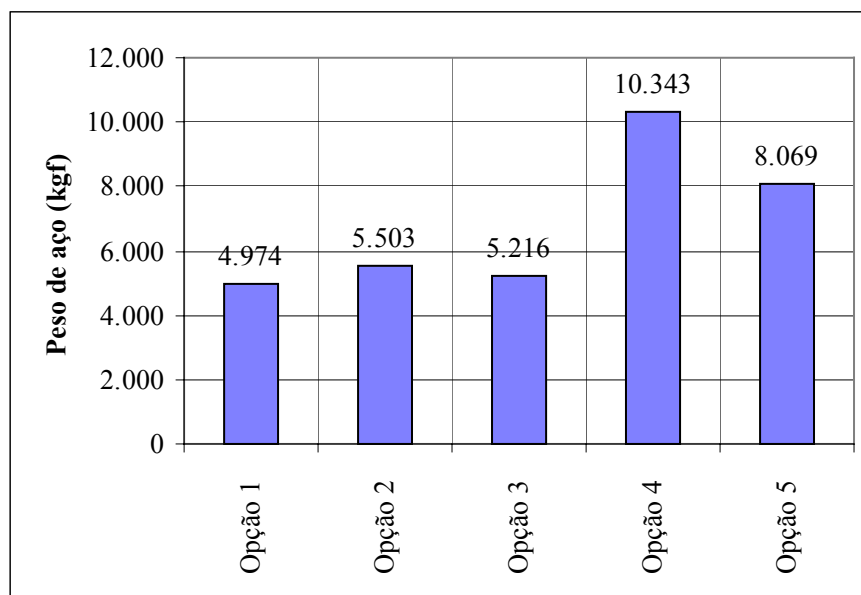


FIGURA 3.94 – Prédio “M” – Consumo de aço das várias opções

TABELA 3.25 – Prédio “M” – Quantitativos por m^2 para um pavimento tipo com área de $195,53 m^2$

| OPÇÃO | FÔRMAS (m^2/m^2) | CONCRETO (m^3/m^2) | AÇO (kgf/m^2) |
|---------|----------------------|------------------------|-------------------|
| Opção 1 | 2,27 | 0,212 | 25,44 |
| Opção 2 | 2,28 | 0,218 | 28,14 |
| Opção 3 | 2,29 | 0,219 | 26,68 |
| Opção 4 | 1,71 | 0,345 | 52,90 |
| Opção 5 | 1,90 | 0,283 | 41,27 |

TABELA 3.26 – Prédio “M” – Deslocamentos máximos para as várias opções (cm)

| OPÇÃO | Modelo grelha de vigas | Modelo grelha de vigas e lajes |
|---------|------------------------|--------------------------------|
| Opção 1 | 0,44 | 0,47 |
| Opção 2 | 0,82 | 0,77 |
| Opção 3 | 0,70 | 0,71 |
| Opção 4 | - | 1,85 |
| Opção 5 | - | 1,49 |

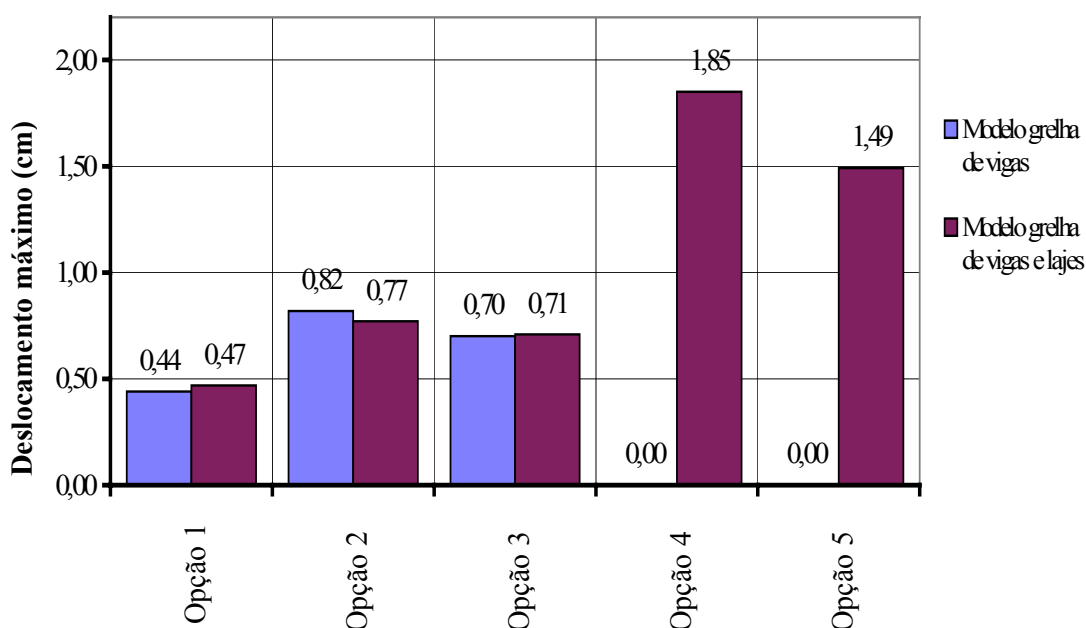


FIGURA 3.95 – Prédio “M” – Deslocamentos máximos para as várias opções

3.4.7 – Comentários sobre o prédio “M”

a) Quantitativos

Analisando-se a TAB.3.24 e as FIG.3.92 a 3.94, percebe-se que, como era de se esperar, os consumos das Opções 1, 2 e 3 (que têm uma estrutura convencional de lajes, vigas e pilares) são praticamente os mesmos, variando em 11% na armação, 3% no concreto e 1% na forma. A Opção 2, entretanto, que é a que apresenta as vigas com balanço de 1,98 metros, é das três a que apresenta o maior consumo de aço, enquanto a Opção 3, que ficou com os vãos extremos das vigas muito grandes, apresentou maior consumo de fôrma e de concreto.

A Opção 4, que tem vigas somente no perímetro e na caixa da escada e laje lisa maciça com 28 cm de espessura, consome menos forma (25%), mas, em compensação, consome mais concreto (59%) e mais aço (98%) que a média das Opções 1 a 3.

A Opção 5, que, além das vigas da Opção 4, tem ainda duas vigas centrais nas laterais da caixa da escada e laje de 20 cm de espessura, consome também menos forma (17%), mas, em compensação, mais concreto (31%) e mais aço (54%) que a média das Opções 1 a 3.

Admitindo-se os mesmos preços unitários dos prédios “C” e “A”, com as mesmas considerações, tem-se, em uma avaliação inicial, os preços de custo abaixo:

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| Opção 1 - R\$31.837,72 | (R\$162,83/m ²) |
| Opção 2 - R\$33.590,34 | (R\$171,79/m ²) |
| Opção 3 - R\$32.898,48 | (R\$168,25/m ²) |
| Opção 4 - R\$50.283,54 | (R\$257,17/m ²) |
| Opção 5 - R\$42.037,82 | (R\$214,99/m ²) |

Percebe-se que o preço médio das Opções 4 e 5 (R\$46.160,68) estaria 41% acima do preço médio das Opções 1 a 3 (R\$32.775,51).

b) Deslocamentos

Analisando-se a TAB.3.26 e as FIG.3.74, 3.75, 3.80, 3.81, 3.86, 3.87, 3.89, 3.91 e 3.95, percebe-se que a Opção 4 e a Opção 5 têm deslocamentos bem superiores às Opções 1 a 3. Entre as Opções 1 a 3, a Opção 2 é a que apresenta maiores deslocamentos, que ocorrem exatamente na região dos balanços de 1,98 metros. Com os dados da fôrma (FIG.3.79) e os deslocamentos nas extremidades das vigas da FIG.3.80, monta-se a TAB.3.27.

TABELA 3.27 – Prédio “M” – Opção 2 – Relação entre os deslocamentos verticais e os vãos das vigas da região do balanço de 1,98 metros

| Vigas | Vão L (cm) | Deslocamentos à esquerda (cm) | Deslocamentos à direita (cm) | Δ = Deslocamento diferencial (cm) | Δ/L |
|---------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|------------------------------|
| V1a = V15a | 213,5 | 0,53 | 0,00 | 0,53 | 1/403 |
| V2 = V13 | 342 | 0,82 | 0,21 | 0,61 | 1/561 |
| V4 = V11 | 342 | 0,73 | 0,11 | 0,62 | 1/552 |
| V6a = V10a | 213,5 | 0,57 | 0,00 | 0,57 | 1/374 |
| V7 | 342 | 0,52 | 0,09 | 0,43 | 1/795 |
| V16a1 = V16c3 | 252 | 0,53 | 0,82 | 0,29 | 1/869 |
| V16a2 = V16c2 | 127 | 0,82 | 0,72 | 0,10 | 1/1270 |
| V16a3 = V16c1 | 117 | 0,72 | 0,57 | 0,15 | 1/780 |
| V16b1 = V16b2 | 138 | 0,57 | 0,52 | 0,05 | 1/2760 |

Comparando a relação da flecha da TAB.3.27 com as recomendações de THOMAZ (1989), que estão na TAB.1.2, nota-se que as vigas que recebem paredes sem aberturas (V1a, V7, e V15a) chegam a ter flechas de 1/403 (V1a e V15a), acima, portanto, da recomendação de 1/500. Já as vigas que recebem paredes com aberturas (V2, V4, V16a, V16b, V16c, V11 e V13) apresentam flechas de 1/552 (V4 e V11) e 1/561 (V2 e V3), bem acima também do valor recomendado de 1/1000, e exigiriam, portanto, cuidados especiais no detalhamento das alvenarias que sobre elas se apóiam.

3.5 – Análise da Alvenaria sobre a Estrutura do Prédio “M”

3.5.1 – Introdução

Após a análise das deformações nas várias Opções estruturais dos prédios “C”, “A” e “M”, decidiu-se fazer uma avaliação inicial da influência dessas deformações sobre as tensões nas paredes que se apóiam sobre essas estruturas. Analisados os resultados dos itens 3.2, 3.3 e 3.4, escolheu-se para essa avaliação a Opção 2 do prédio “M”, cuja fôrma é a FIG 3.79, por ser, entre as três opções convencionais com lajes, vigas e pilares, que são as mais utilizadas pelos construtores, a que apresentou deslocamentos mais significativos não apenas nas extremidades dos balanços de 1,98 metros, mas também nos vãos extremos do lado oposto ao balanço.

Não existe a intenção de fazer uma análise de grande precisão, uma vez que a alvenaria é bastante complexa de ser modelada, como também é diretamente afetada pela maneira de se assentar as fiadas de tijolos, e essa análise de tensões não é o objetivo principal deste trabalho. Pretende-se apenas avaliar como essas deformações, que estão a cada dia maiores pelos motivos já expostos no capítulo 1, afetam as tensões verticais nas paredes da edificação.

A estrutura foi modelada no programa ANSYS e sobre ela foram colocados quatro andares com lajes e paredes, criando-se até as aberturas das portas e janelas (ver FIG.3.96). Foram utilizadas a parametrização e as definições descritas no item 2.2. Foram estudados dois modelos.

No Modelo 1, as cargas foram colocadas sobre as lajes nos vários andares e foi fornecida o peso específico dos elementos das paredes, das vigas e das lajes, de modo que a chegada das cargas à estrutura-suporte fosse similar ao que ocorre na realidade.

No Modelo 2, todo o carregamento foi aplicado diretamente sobre as vigas e as lajes da estrutura-suporte, como é o procedimento tradicional, com os valores indicados na FIG.3.97 que foram os utilizados no processamento das Opções 1 a 5 do item 3.4. Nesse

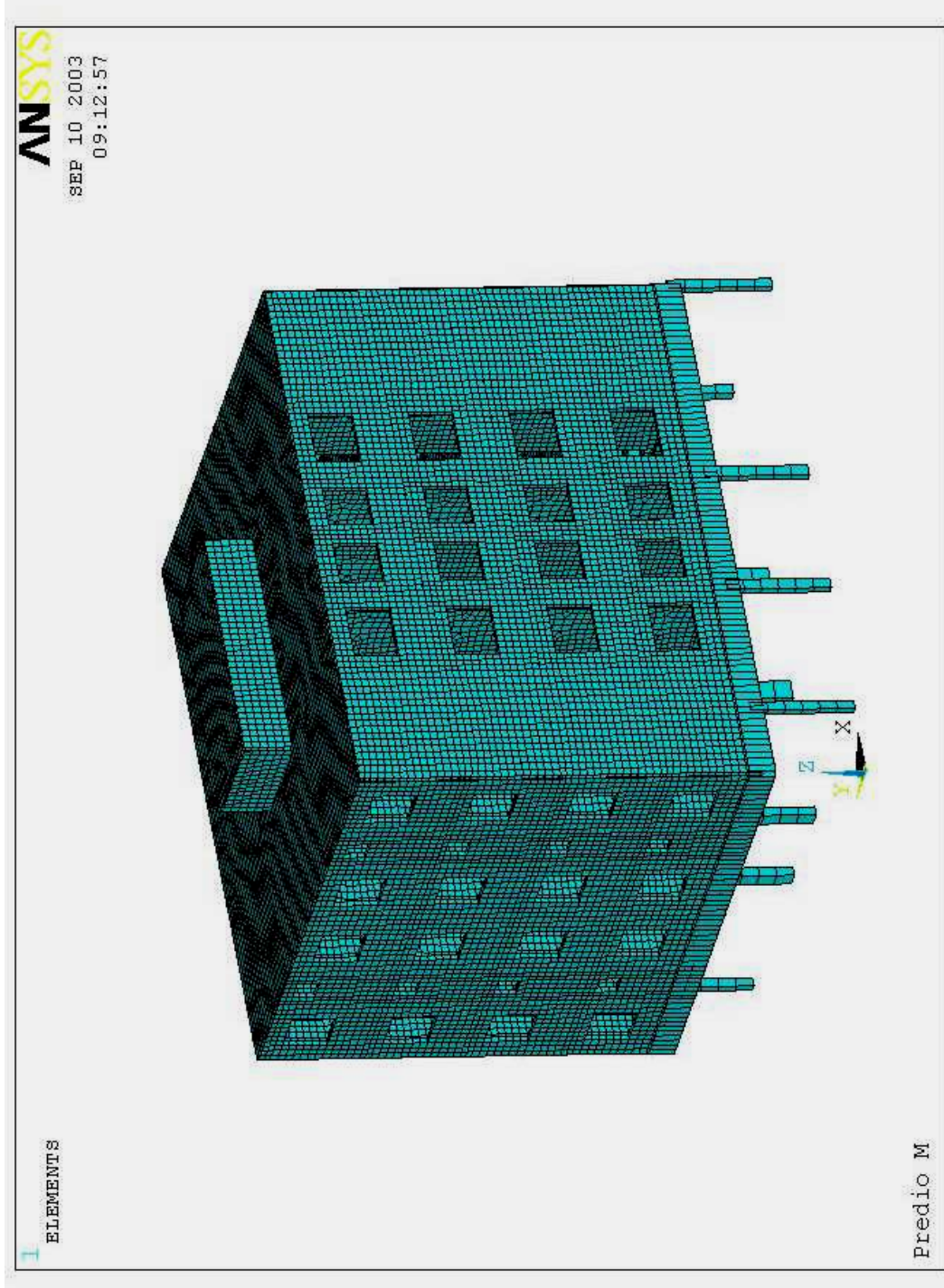


FIGURA 3.96 – Visualização em 3D da modelagem do Prédio “M” no ANSYS

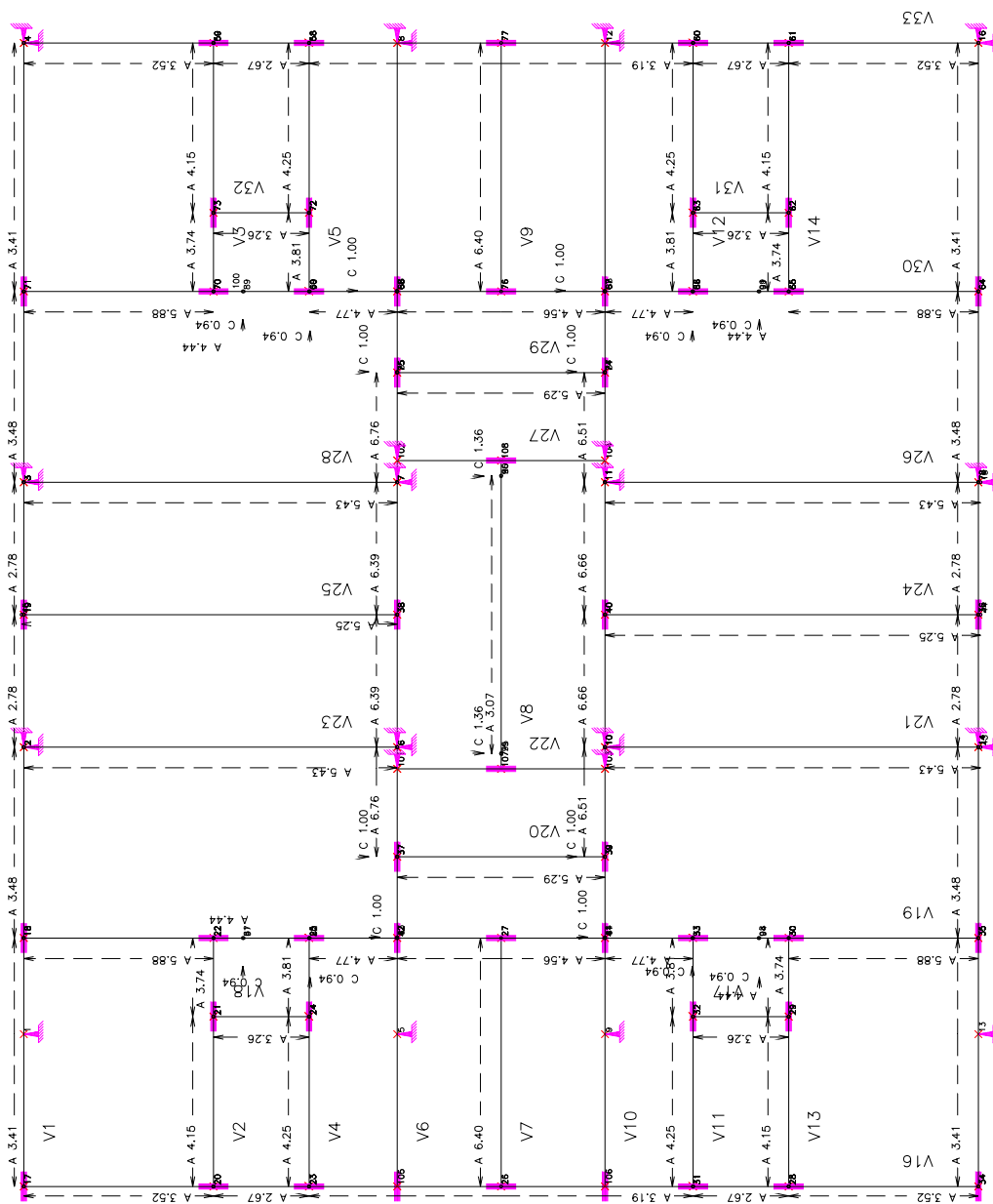


FIGURA 3.97 – Prédio “M” – Cargas acumuladas consideradas sobre a estrutura no Modelo 2

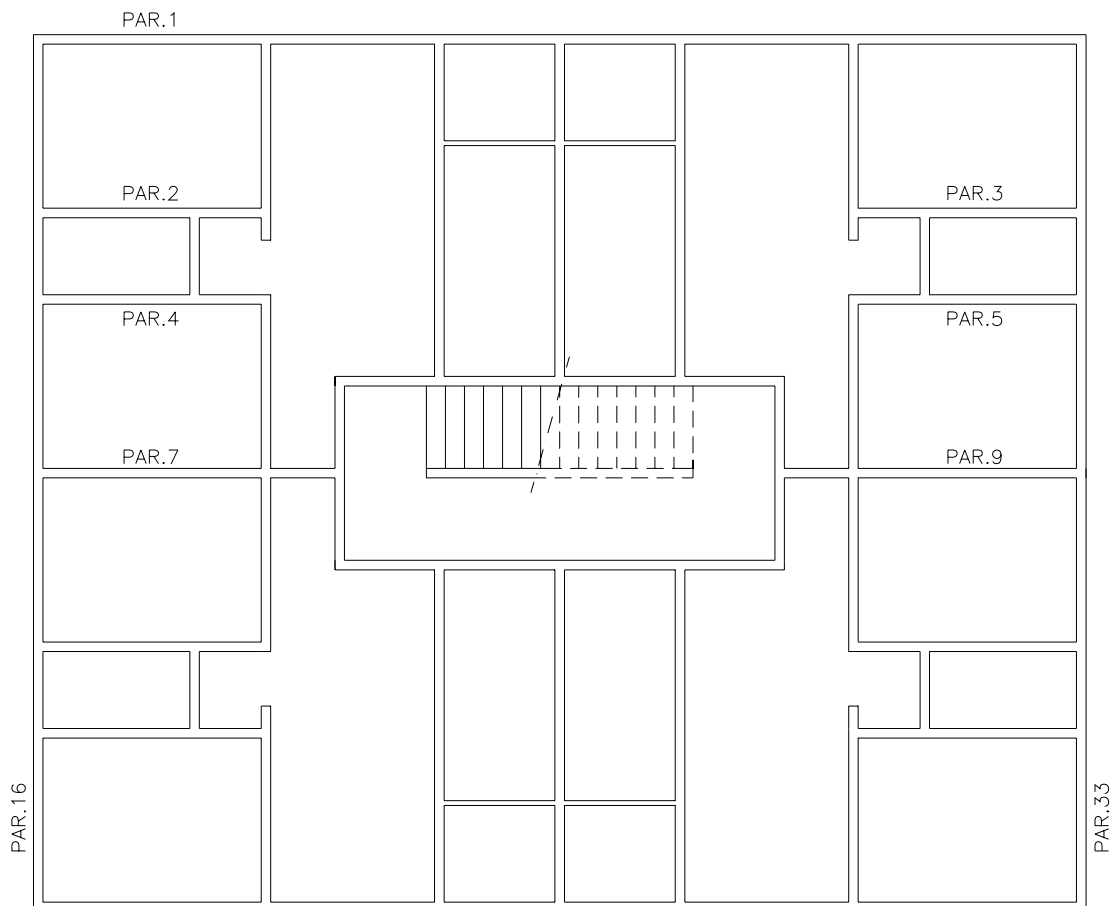


FIGURA 3.98 – Prédio “M” – Numeração das paredes a serem analisadas no ANSYS

modelo, o peso específico das lajes e vigas superiores e das paredes foi considerada nula, visto que seus pesos já estão incluídos nas cargas da FIG.3.97. Sendo assim, as tensões do Modelo 2 representarão, na verdade, apenas o acréscimo de tensões nas paredes, provocado pela deformação da estrutura-suporte do concreto armado.

Foram escolhidas sete paredes, bastante representativas de todo o conjunto, para serem analisadas. Optou-se por numerar essas paredes com o mesmo número da viga sobre a qual elas se apóiam (ver FIG.3.79 e 3.98).

3.5.2 – Deslocamentos verticais

Para comparar os deslocamentos verticais do Modelo 1, do Modelo 2, e da estrutura processada do item 3.4.2 (FIG.3.80 e 3.81), montou-se a TAB.3.28. Nessa tabela percebe-se que, em todas as paredes, os deslocamentos encontrados no item 3.4.2, nos modelos “grelha de vigas isoladas” e “grelha de vigas e lajes”, são muito semelhantes entre si e bem maiores que os deslocamentos encontrados pelo programa ANSYS no Modelo 1 e no Modelo 2. Isso pode ser explicado já que as paredes, estando no modelo numérico ligadas às vigas, estão dando maior rigidez ao conjunto viga/parede e, conseqüentemente, reduzindo substancialmente os seus deslocamentos.

No caso real, o descolamento da parede em relação à viga reduz a ação conjunta parede/viga e, conseqüentemente, aumenta o deslocamento vertical das vigas. A utilização de uma argamassa de assentamento resiliente, com grande elasticidade, vai permitir na prática que a alvenaria acompanhe melhor o deslocamento da estrutura. Acredita-se que, na modelagem do ANSYS, a utilização de elementos de contato entre a alvenaria e a viga, que permitem o deslocamento relativo entre elas, poderia aumentar o valor desses deslocamentos, que se aproximariam mais dos modelos de grelha plana processados no CAD/TQS[®].

Percebe-se, também, que em muitas dessas paredes, os deslocamentos dos níveis superiores são maiores que os dos níveis inferiores. Isso ocorre porque os níveis superiores estão sofrendo o efeito acumulado do deslocamento dos níveis inferiores,

TABELA 3.28 – Prédio “M” – Deslocamentos verticais das paredes, na região de apoio na estrutura de concreto armado (cm)

| Parede | Local | Grelha de Vigas Isoladas (FIG.3.80) | Grelha de Vigas e Lajes (FIG.3.81) | Modelo 1 | Modelo 2 |
|---------------|----------------------------------|--|---|------------------|------------------|
| Parede 1 | Extremidade do Balanço de 1,98 m | 0,53 | 0,51 | 0,18 (FIG.3.99) | 0,14 (FIG.3.100) |
| Parede 1 | Vão extremo oposto ao balanço | 0,45 | 0,44 | 0,18 (FIG.3.99) | 0,16 (FIG.3.100) |
| Parede 2 | Extremidade esquerda | 0,82 | 0,77 | 0,26 (FIG.3.101) | 0,22 (FIG.3.102) |
| Parede 3 | Extremidade esquerda | 0,68 | 0,64 | 0,21 (FIG.3.101) | 0,21 (FIG.3.102) |
| Parede 7 | Extremidade esquerda | 0,52 | 0,49 | 0,24 (FIG.3.103) | 0,20 (FIG.3.104) |
| Parede 9 | Extremidade esquerda | 0,37 | 0,38 | 0,20 (FIG.3.103) | 0,18 (FIG.3.104) |
| Parede 16 | Vãos externos | 0,82 | 0,77 | 0,27 (FIG.3.105) | 0,22 (FIG.3.106) |
| Parede 33 | Vãos externos | 0,25 | 0,26 | 0,14 (FIG.3.107) | 0,13 (FIG.3.108) |

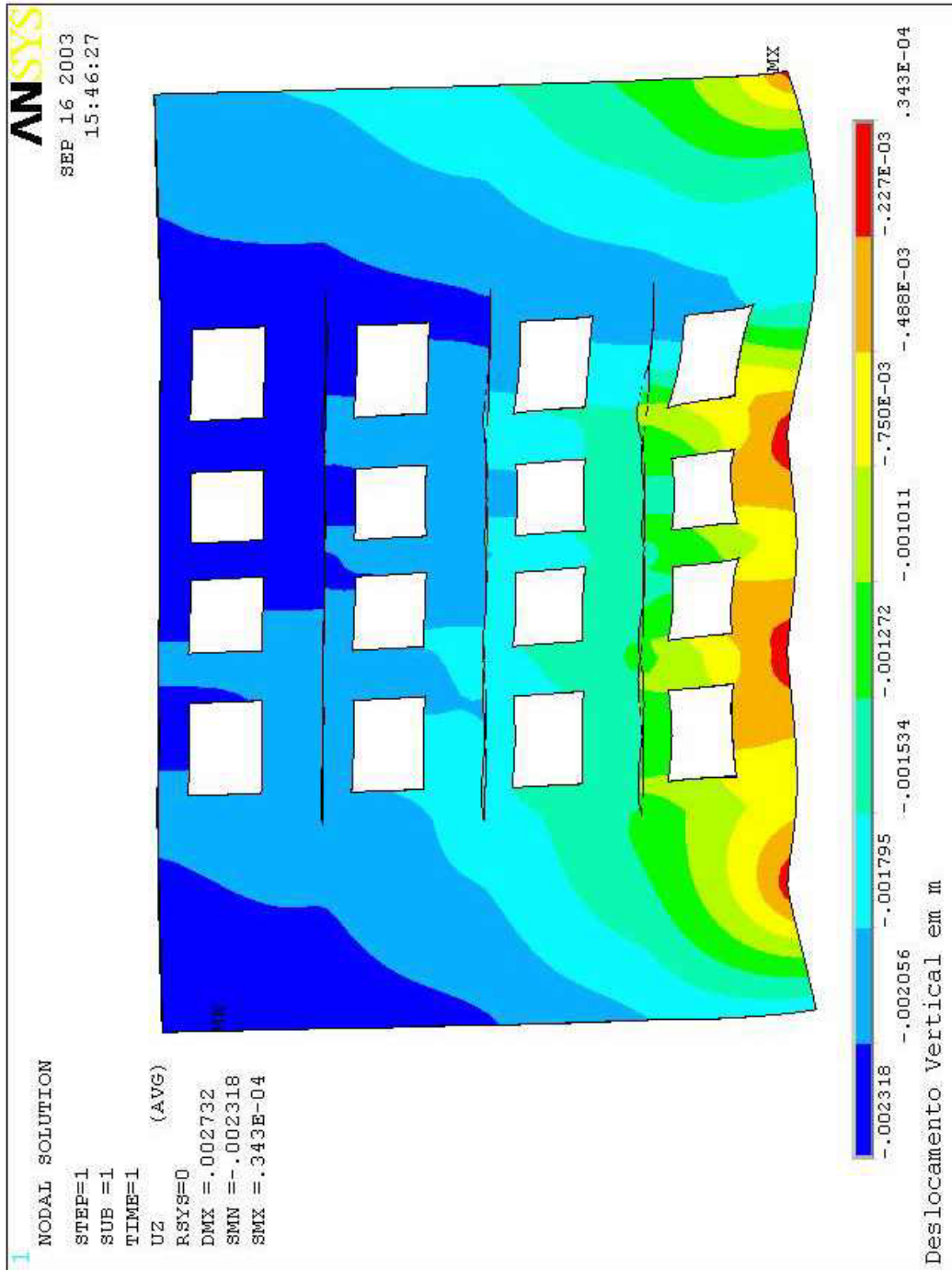


FIGURA 3.99 – PAREDE 1 – Deslocamentos Verticais no Modelo 1

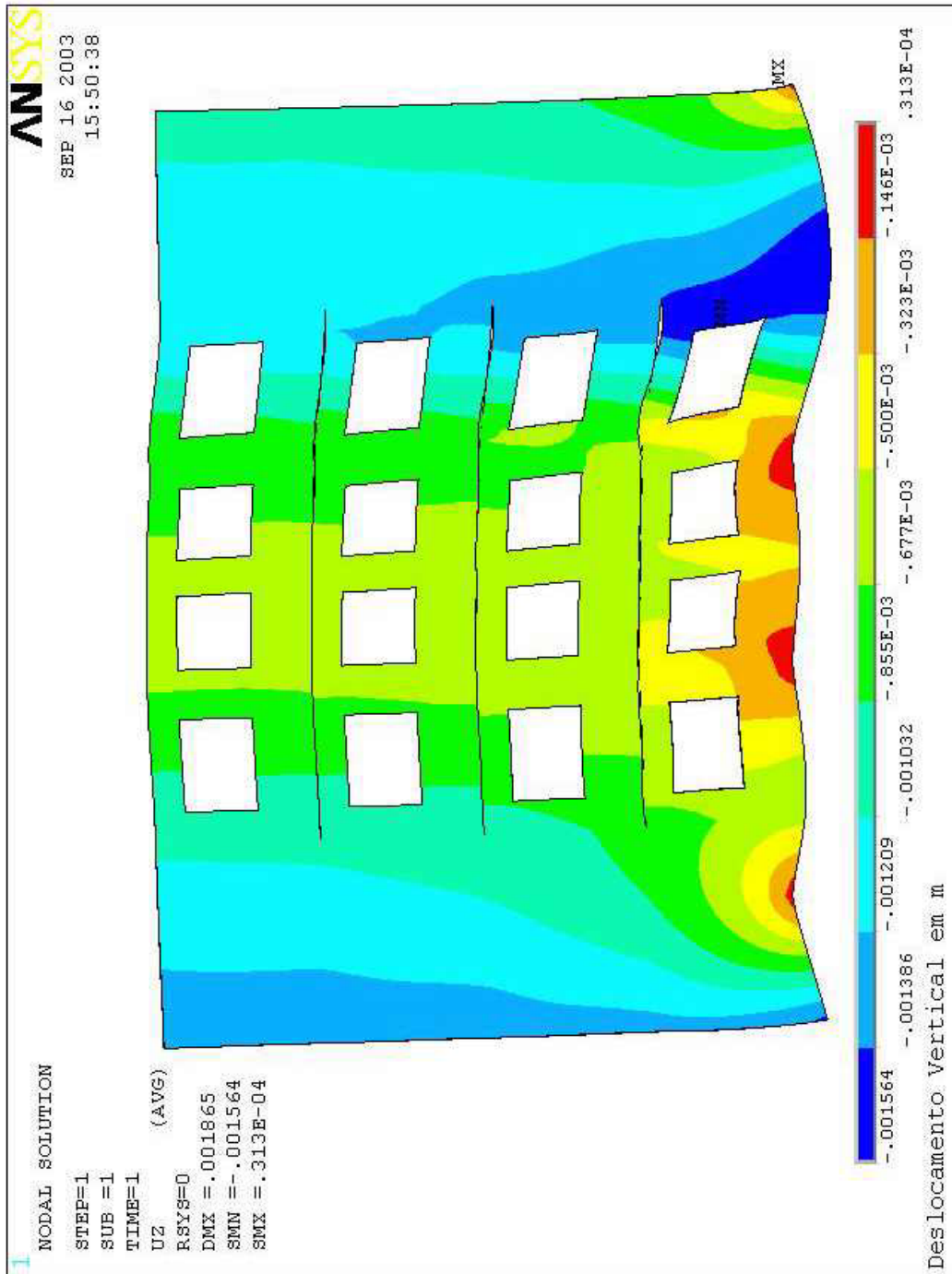


FIGURA 3.100 – PAREDE 1 – Deslocamentos Verticais no Modelo 2

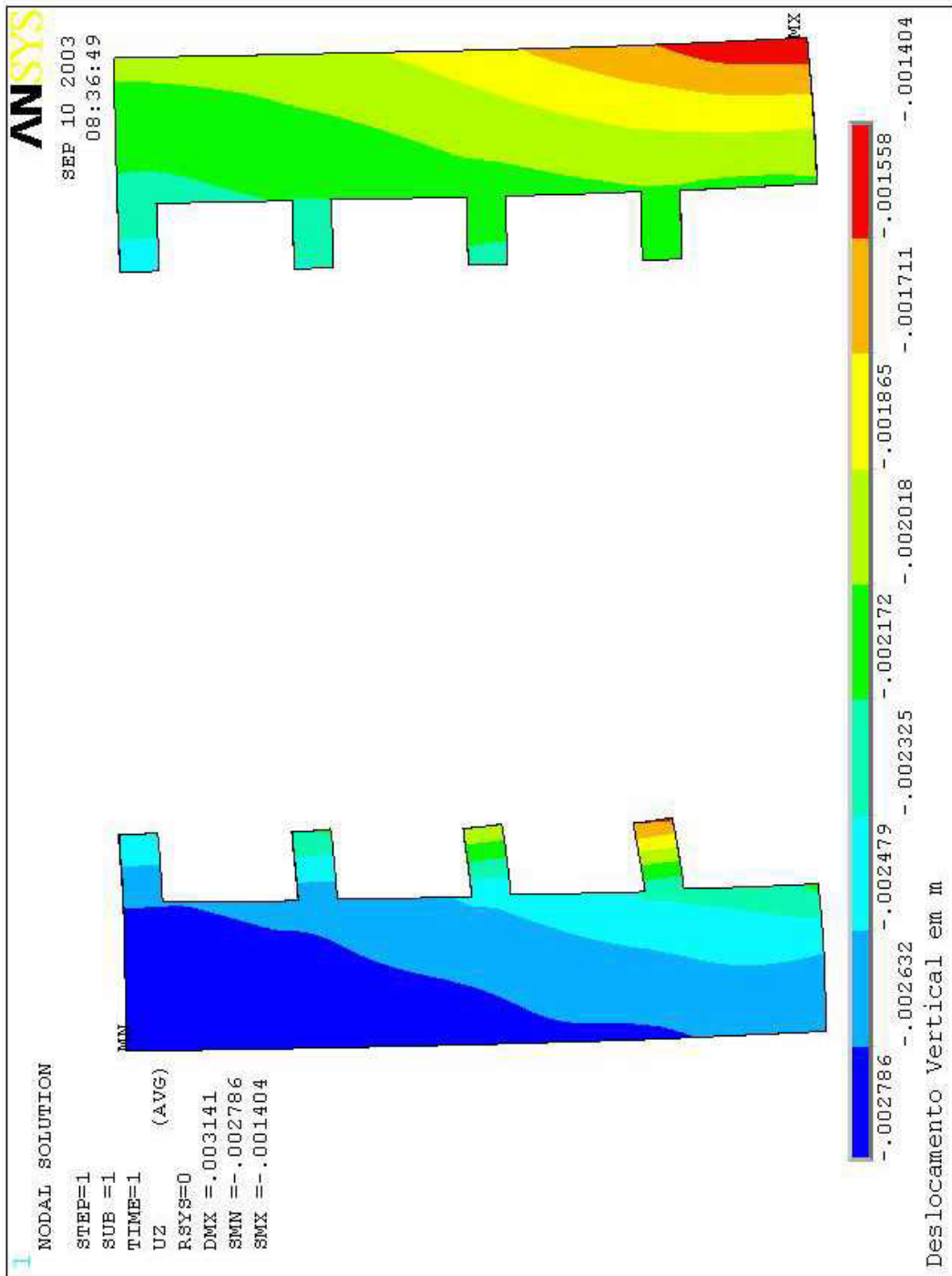


FIGURA 3.101 – Parede 2 (esquerda) e Parede 3 (direita) – Deslocamentos Verticais no Modelo 1

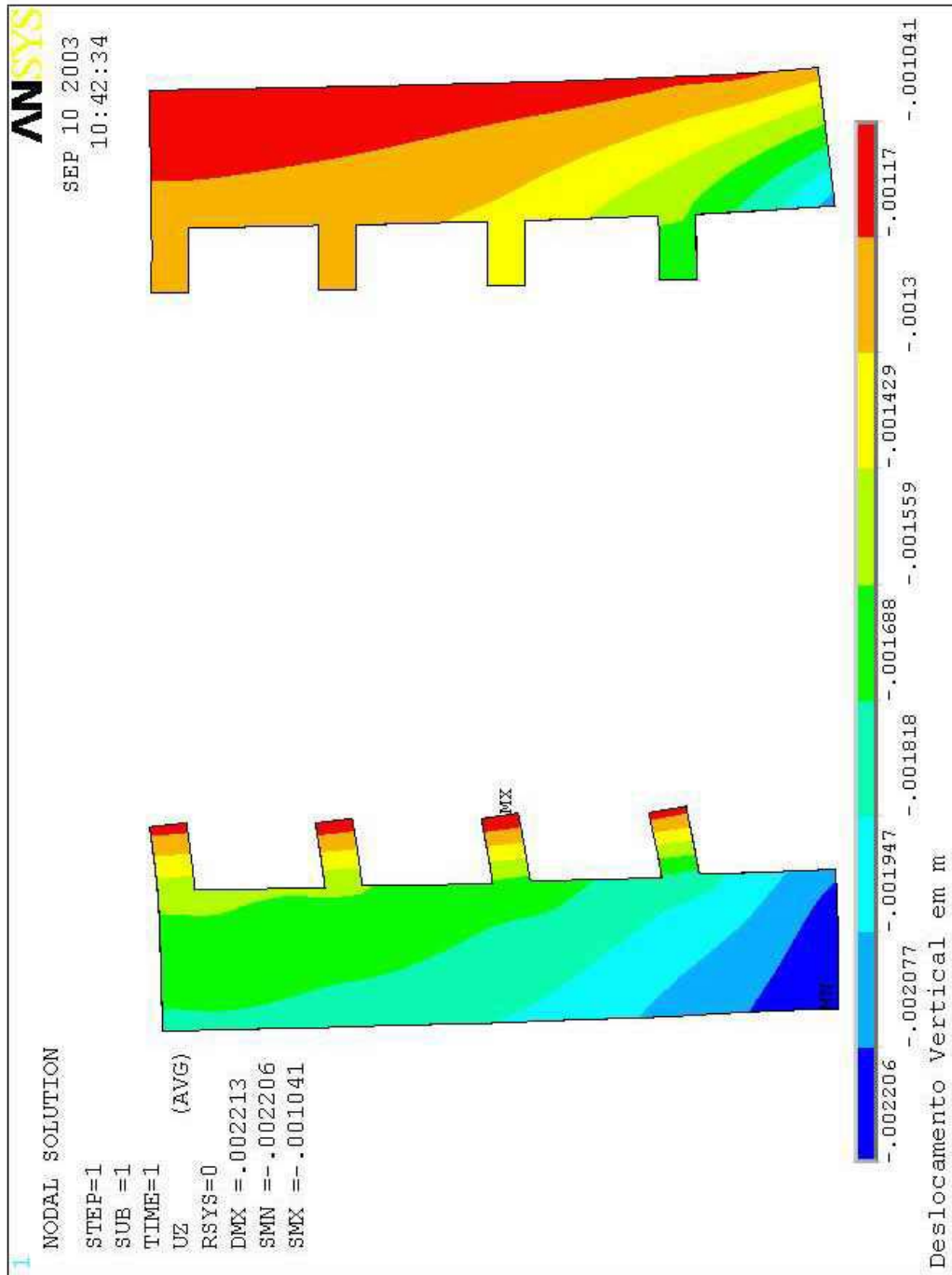


FIGURA 3.102 – Parede 2 (esquerda) e Parede 3 (direita) – Deslocamentos Verticais no Modelo 2

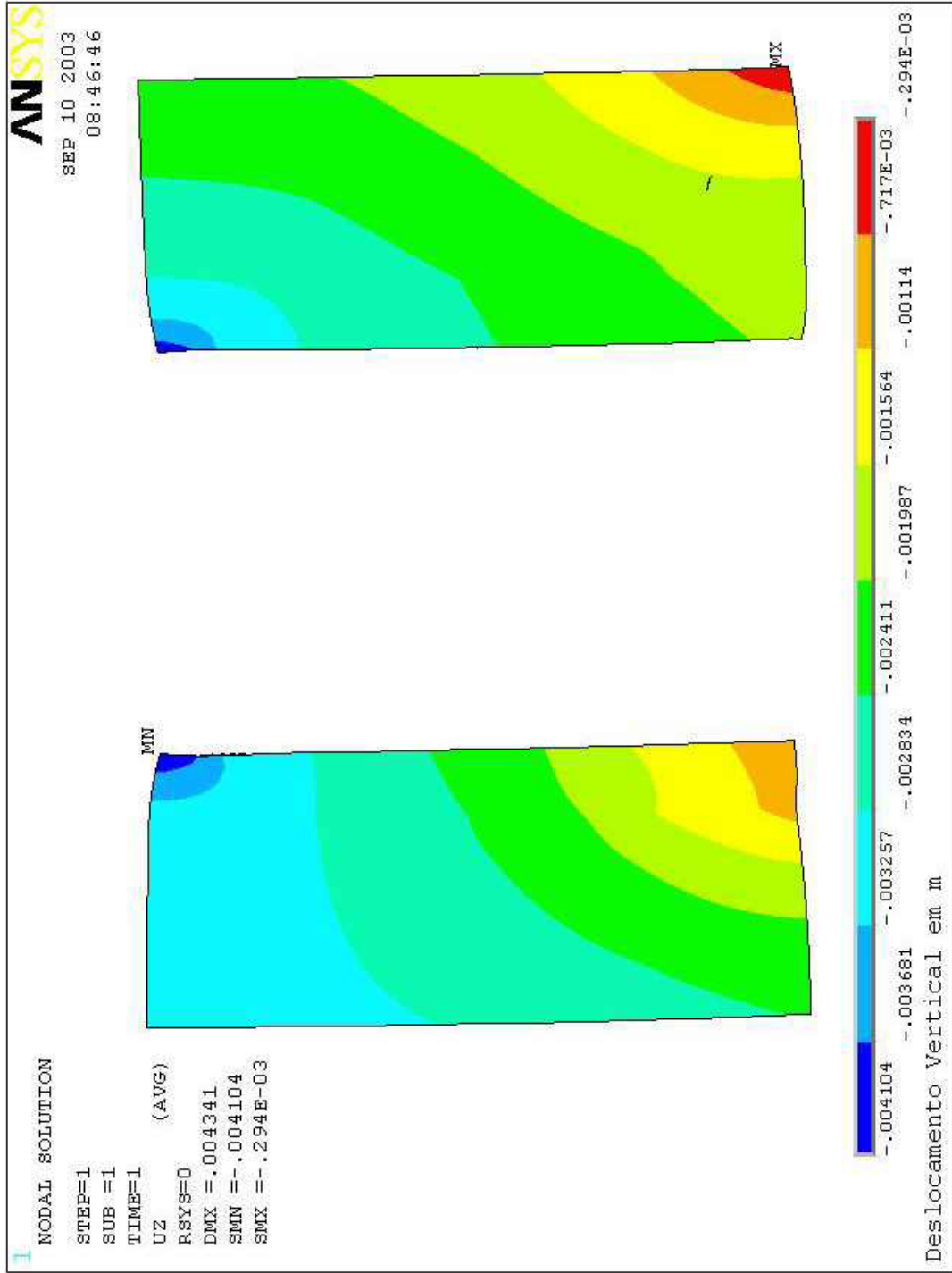


FIGURA 3.103 – Parede 7 (esquerda) e Parede 9 (direita) – Deslocamentos Verticais no Modelo 1

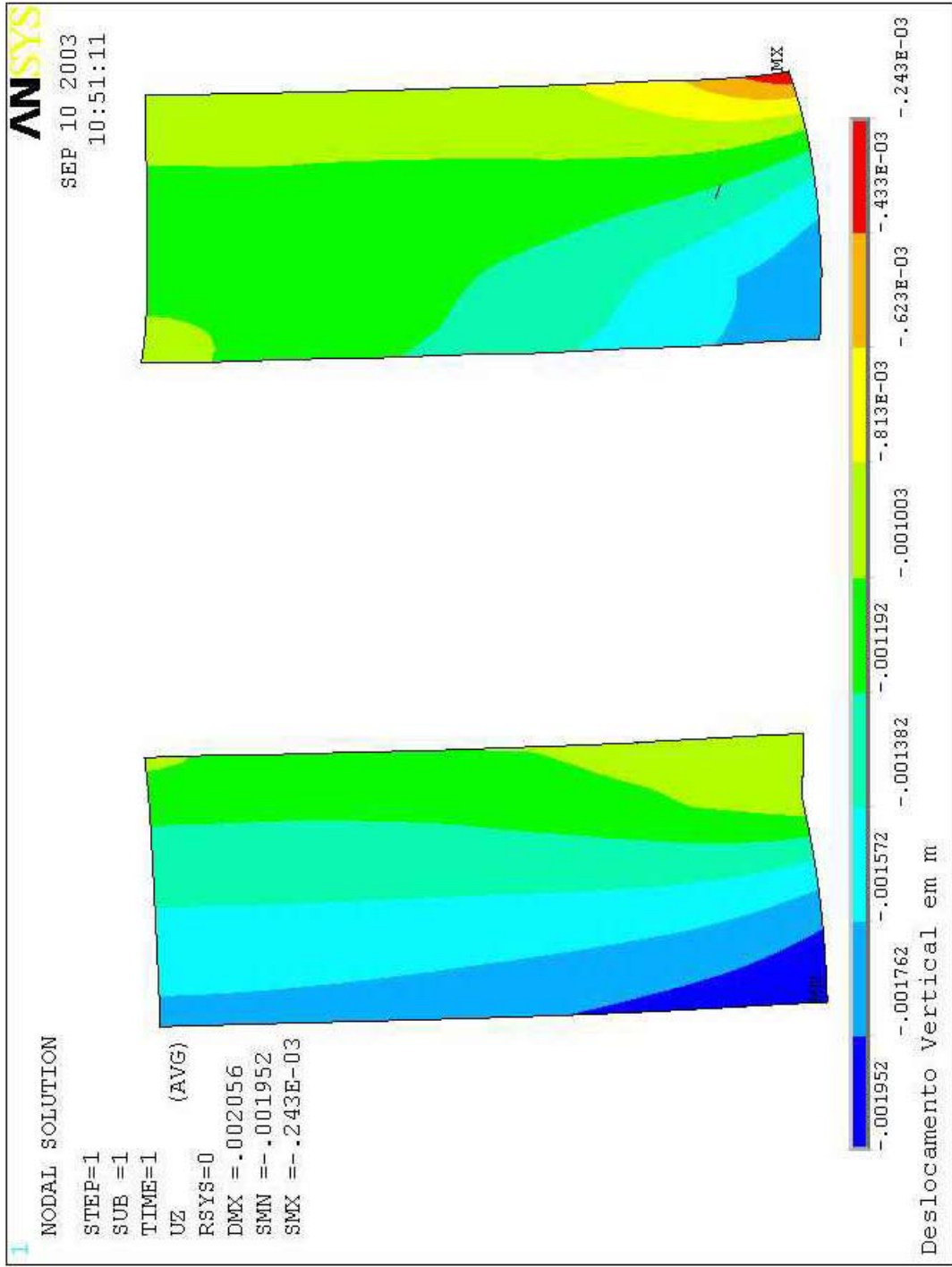


FIGURA 3.104 – Parede 7 (esquerda) e Parede 9 (direita) – Deslocamentos Verticais no Modelo 2

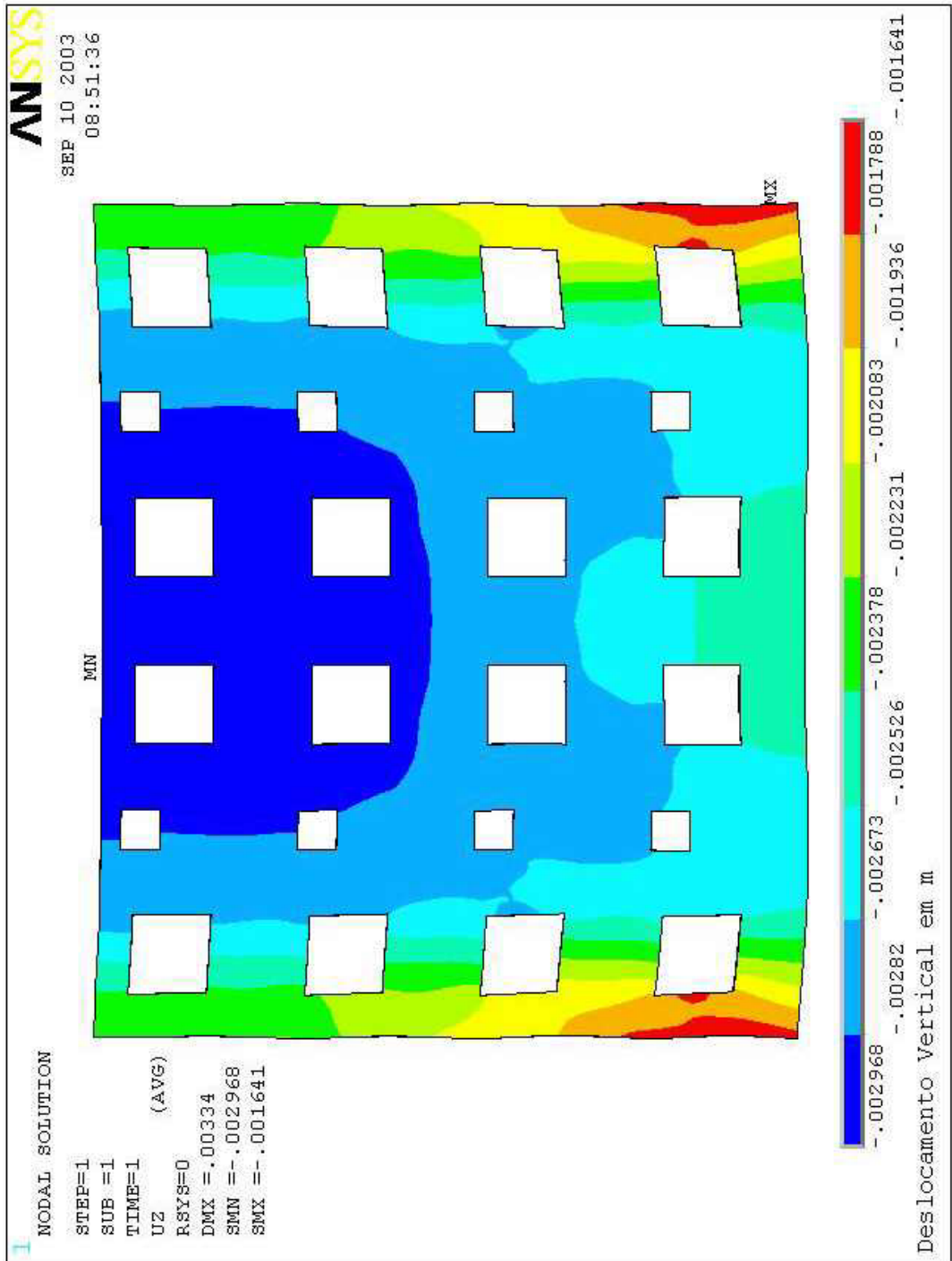


FIGURA 3.105 – Parede 16 – Deslocamentos Verticais no Modelo 1

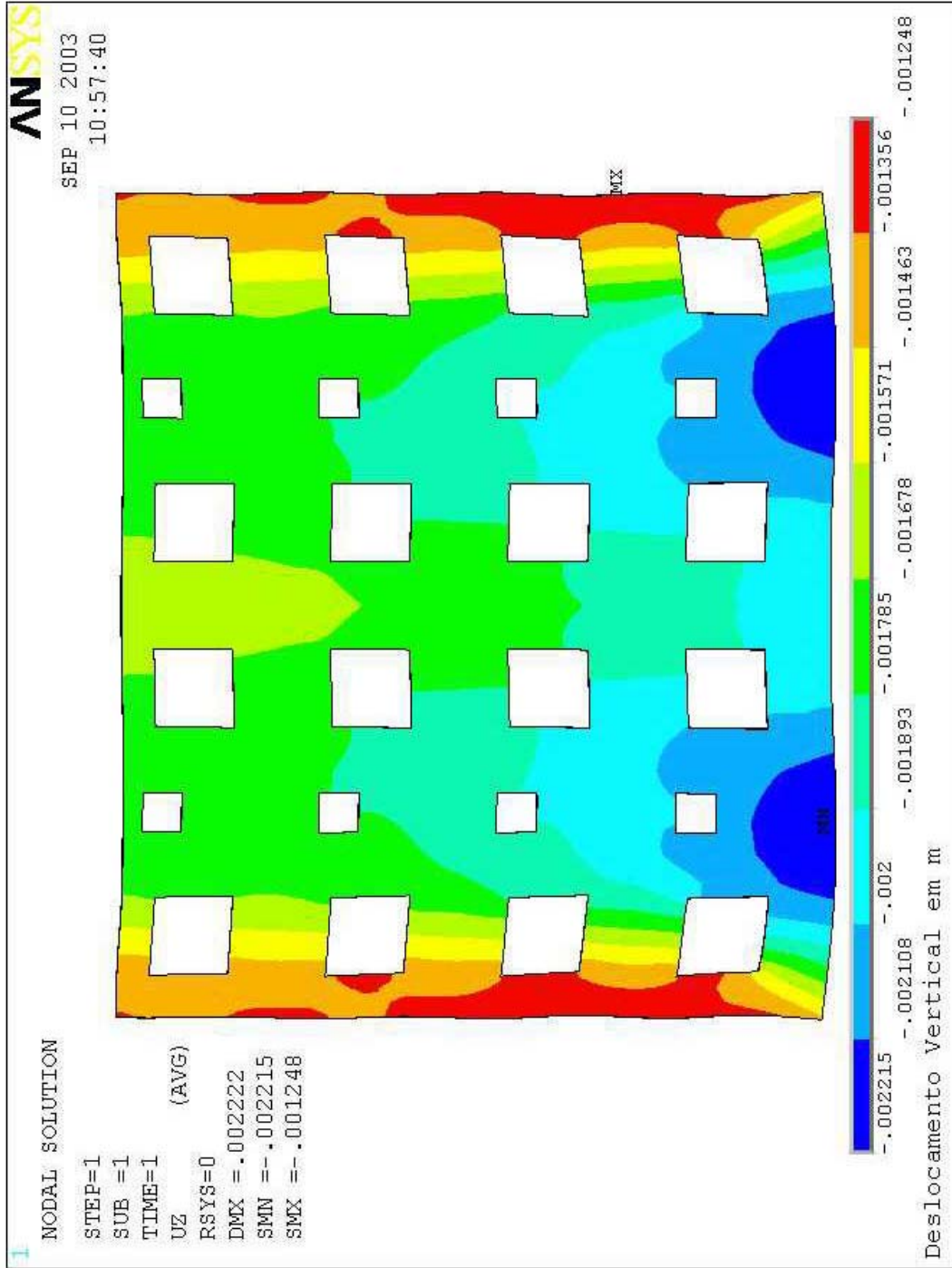


FIGURA 3.106 – Parede 16 – Deslocamentos Verticais no Modelo 2

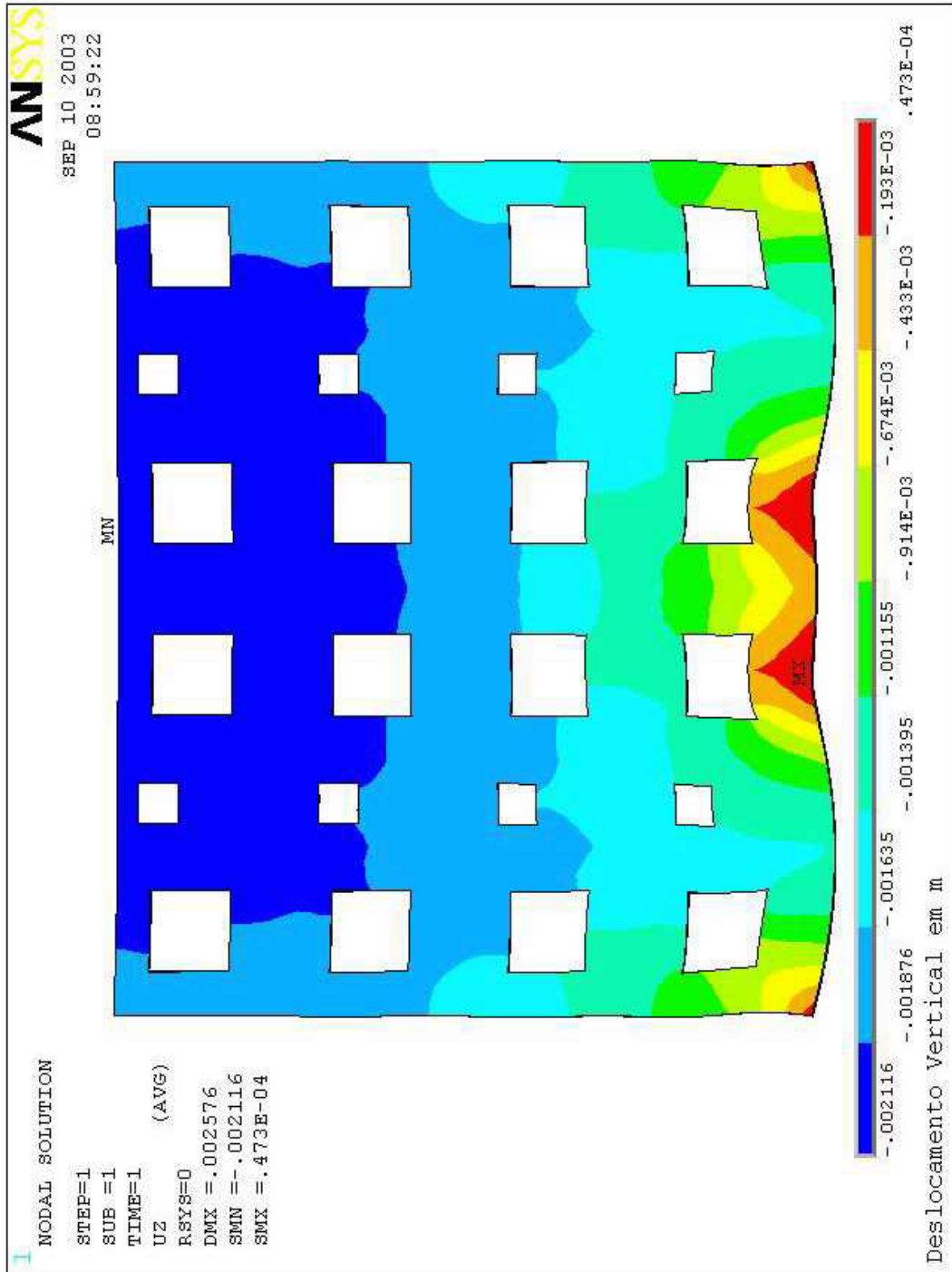


FIGURA 3.107 – Parede 33 – Deslocamentos Verticais no Modelo 1

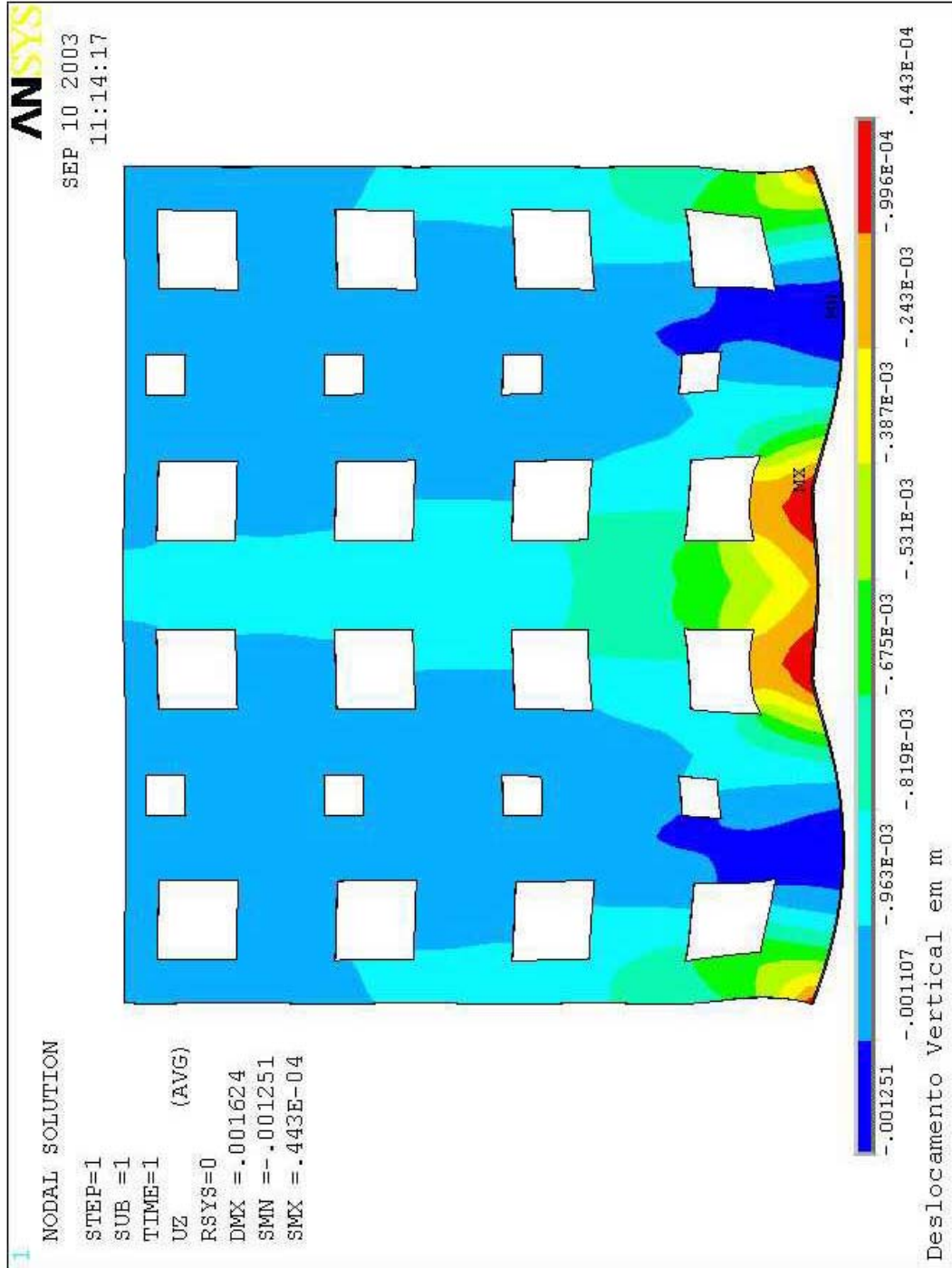


FIGURA 3.108 – Parede 33 – Deslocamentos Verticais no Modelo 2

uma vez que não foi feita a análise por um processo evolutivo que levasse em consideração os deslocamentos dos elementos apenas a partir do momento em que foram construídos (VASCONCELLOS, 1981).

3.5.3 – Tensões verticais

Para comparar, na região de apoio das paredes na estrutura de concreto, as tensões verticais do Modelo 1 e do Modelo 2 com a tensão vertical nominal obtida pela divisão da carga por metro linear encontrada pelo processo convencional pela área de 100 cm x 14 cm, montou-se a TAB.3.29. Observar que o *software* adota a convenção de tensão positiva para tração e tensão negativa para compressão.

As tensões encontradas no Modelo 1 são provocadas pelas cargas verticais e pelos deslocamentos da estrutura-suporte; as encontradas no Modelo 2 são provocadas apenas pelos deslocamentos da estrutura-suporte; e as tensões nominais são provocadas apenas pelas cargas verticais. Para fazer uma comparação com as tensões do Modelo 1, as tensões nominais foram somadas às do Modelo 2, na última coluna da TAB.3.29, para obter o efeito combinado das cargas e dos deslocamentos.

Percebe-se, pela análise da TAB.3.29, que o deslocamento vertical provocaria em alguns casos (como na parede 1), tensões até dez vezes superiores à tensão nominal. Acredita-se, entretanto, que, no caso real, essas tensões seriam reduzidas pelo descolamento da parede da viga e pela redistribuição dos esforços na alvenaria próxima a esses pontos de grande concentração de tensões. Percebe-se, também, na TAB.3.29 que, em muitas das paredes analisadas, a tensão nominal somada à do Modelo 2 fica muito próxima da tensão encontrada no Modelo 1.

A análise da TAB.3.29 nos mostra ainda que, nas paredes que sofreram pequenos deslocamentos relativos, como na parede 16 e na parede 33, as tensões ficam pequenas e muito próximas da tensão nominal. Já nas paredes que sofrem maiores deslocamentos relativos (como na parede 1), as tensões aumentam bastante.

TABELA 3.29 – Prédio “M” – Tensões verticais nas paredes, na região de apoio na estrutura de concreto armado (MPa)

| Parede | Local | Tensão Nominal | Modelo 1 | Modelo 2 (*) | Tensão Nominal + Acréscimo do Valor do Modelo 2 |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|--|
| Parede 1 | Balanço de 1,98 m, próximo ao pilar | - 0,24 | - 2,76 (FIG.3.109) | - 1,94 (FIG.3.110) | - 2,18 |
| Parede 1 | Apoio externo oposto ao balanço | - 0,24 | - 2,76 (FIG.3.109) | - 2,42 (FIG.3.110) | - 2,66 |
| Parede 2 | Extremidade direita | - 0,27 | - 0,62 (FIG.3.111) | + 0,24 (FIG.3.112) | - 0,51 |
| Parede 2 | Centro da viga V2 | - 0,30 | + 0,09 (FIG.3.111) | + 0,38 (FIG.3.112) | + 0,08 |
| Parede 3 | Extremidade esquerda | - 0,27 | - 0,19 (FIG.3.111) | + 0,81 (FIG.3.112) | + 0,54 |
| Parede 3 | Extremidade direita | - 0,30 | - 0,19 (FIG.3.111) | + 0,10 (FIG.3.112) | - 0,20 |
| Parede 7 | Extremidade esquerda | - 0,46 | - 0,32 (FIG.3.113) | + 0,11 (FIG.3.114) | - 0,35 |
| Parede 9 | Extremidade esquerda | - 0,46 | - 2,36 (FIG.3.113) | - 0,87 (FIG.3.114) | - 1,33 |
| Parede 16 | Vãos externos | - 0,25 | - 0,29 (FIG.3.115) | - 0,28 (FIG.3.116) | - 0,53 |
| Parede 33 | Vãos externos | - 0,25 | - 0,31 (FIG.3.117) | - 0,36 (FIG.3.118) | - 0,61 |

* Os valores do Modelo 2 correspondem a “acréscimos de tensões”

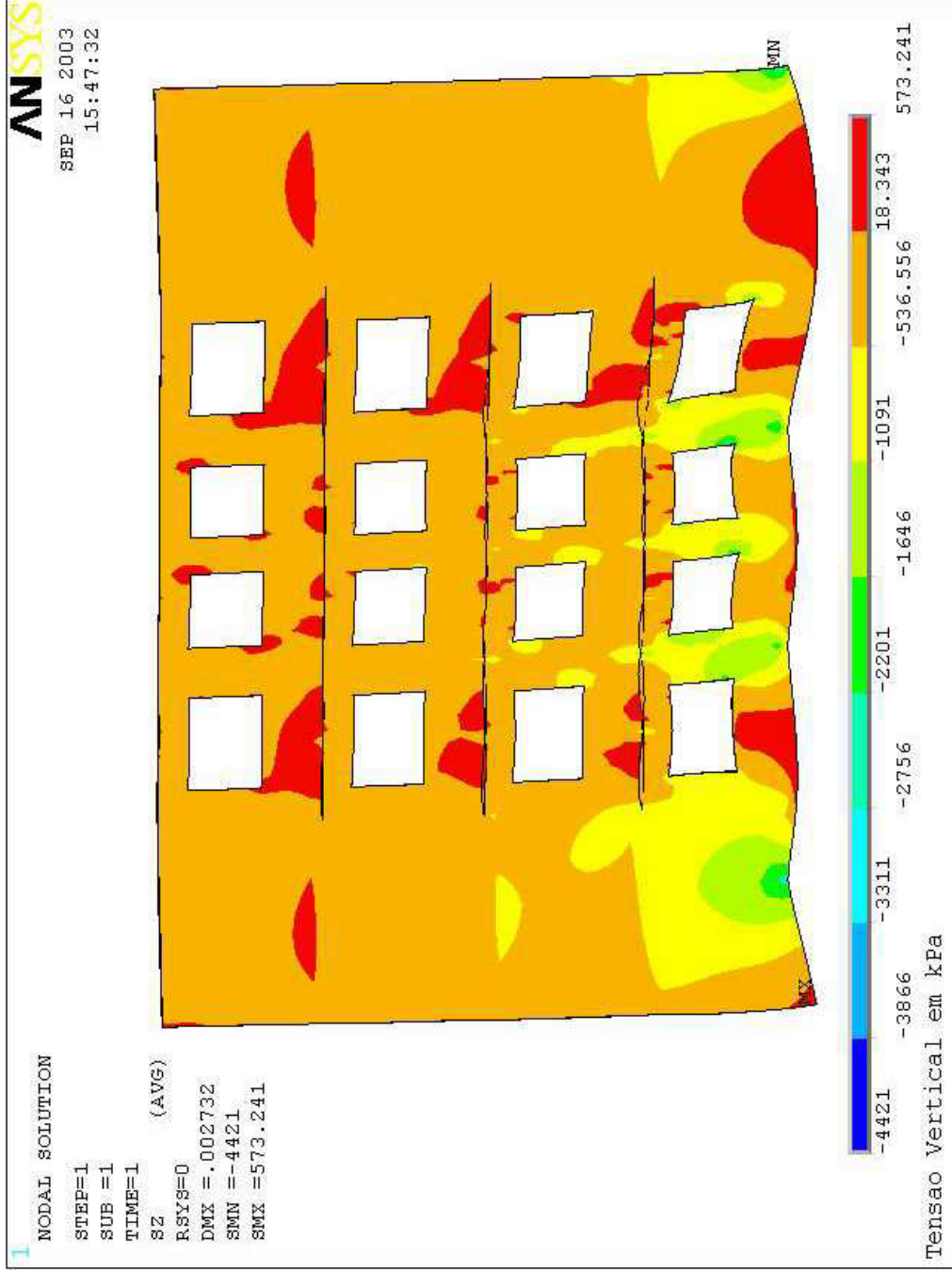


FIGURA 3.109 – Parede 1 – Tensões Verticais no Modelo 1

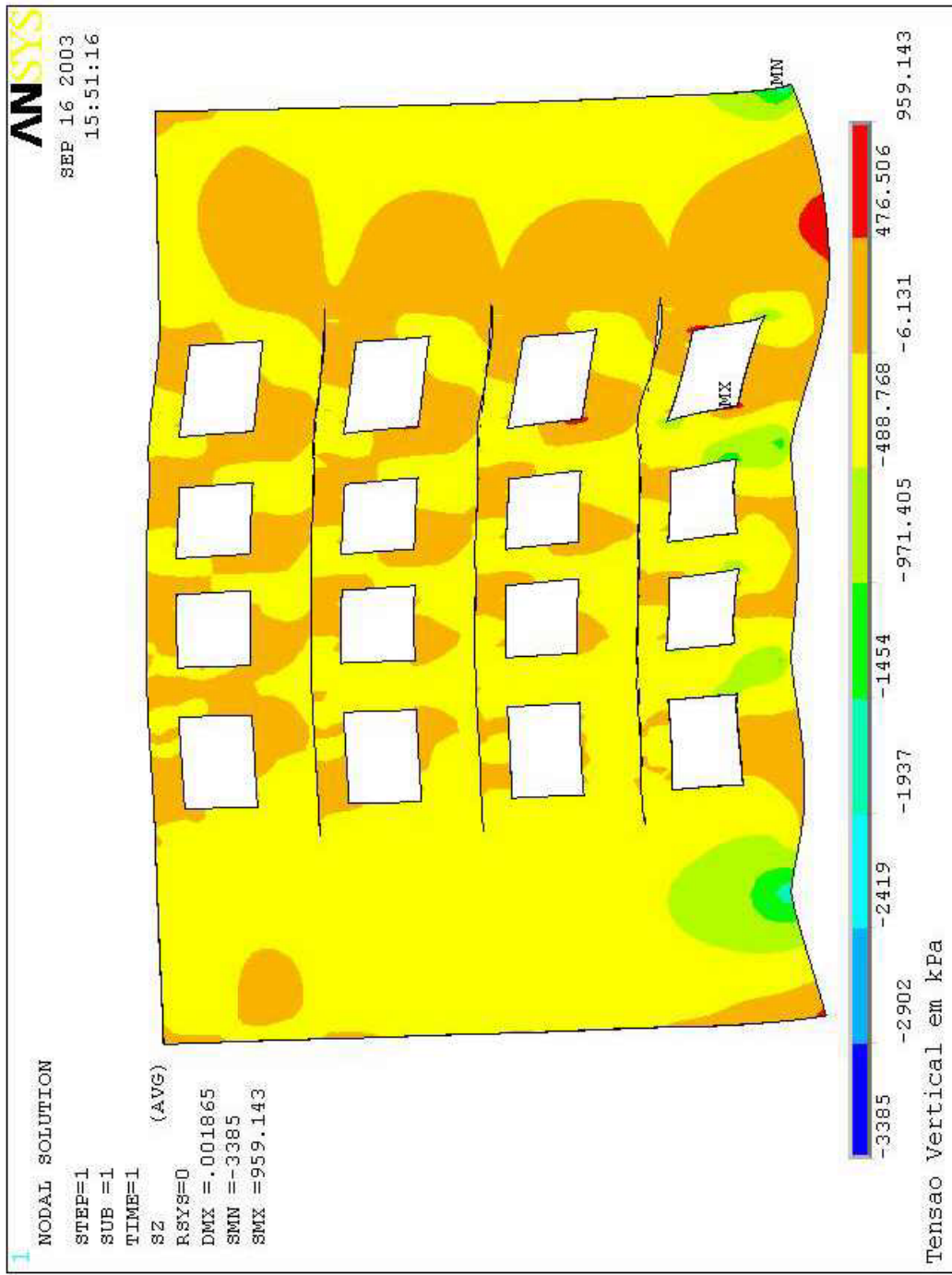


FIGURA 3.110 – Parede 1 – Tensões Verticais no Modelo 2

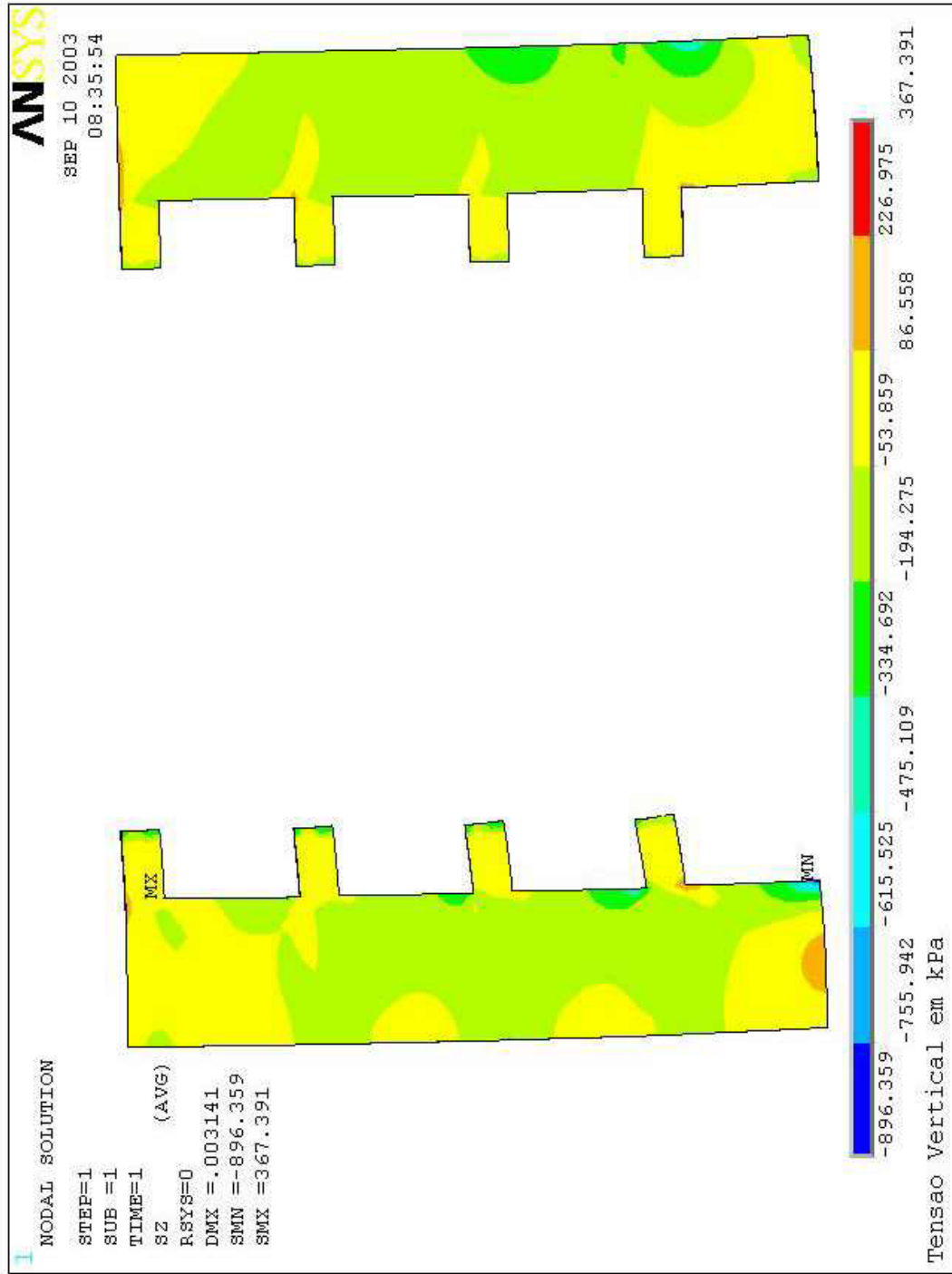


FIGURA 3.111 – Parede 2 (esquerda) e Parede 3 (direita) – Tensões Verticais no Modelo 1

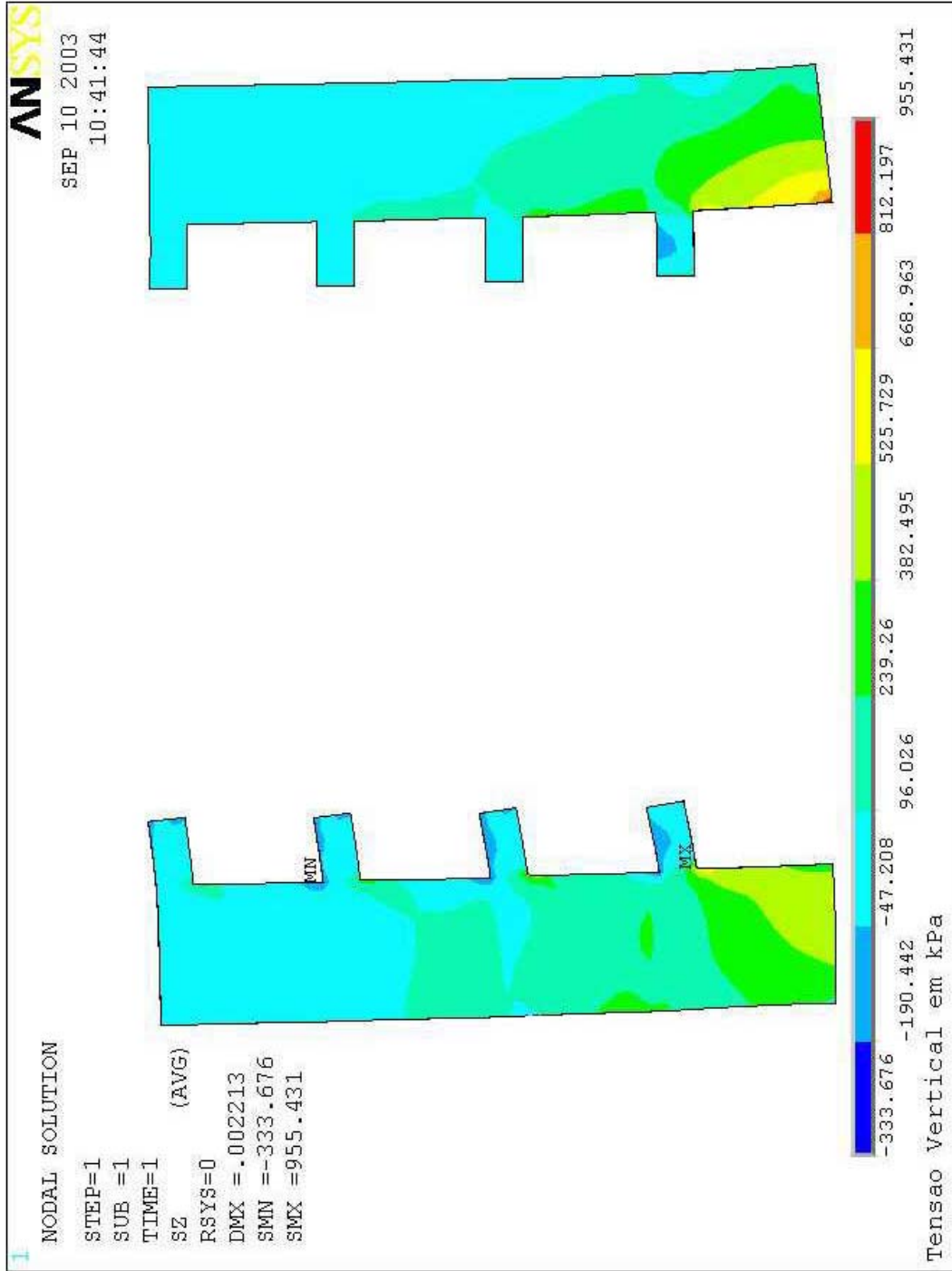


FIGURA 3.112 – Parede 2 (esquerda) e Parede 3 (direita) – Tensões Verticais no Modelo 2

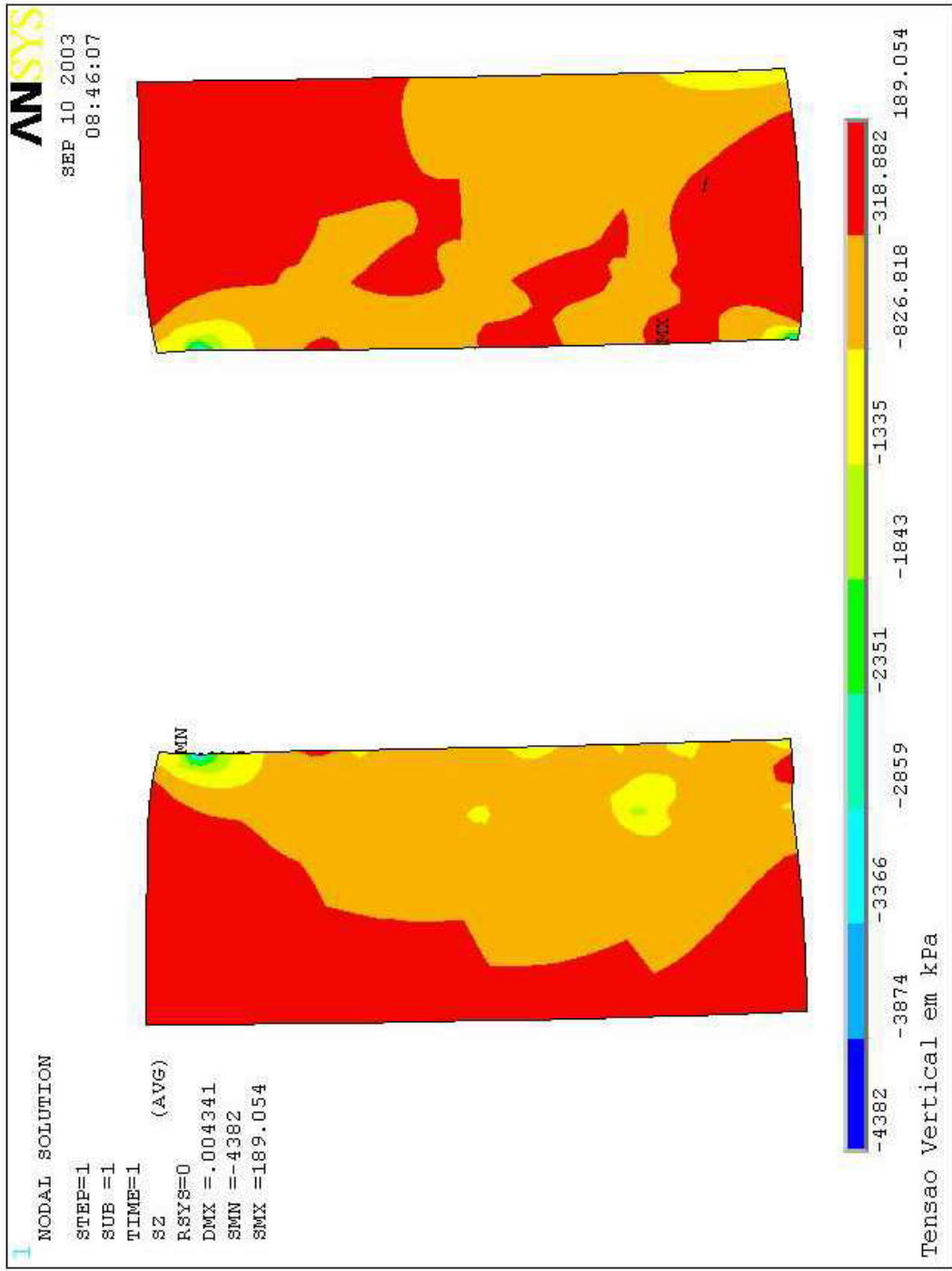


FIGURA 3.113 – Parede 7 (esquerda) e Parede 9 (direita) – Tensões Verticais no Modelo 1

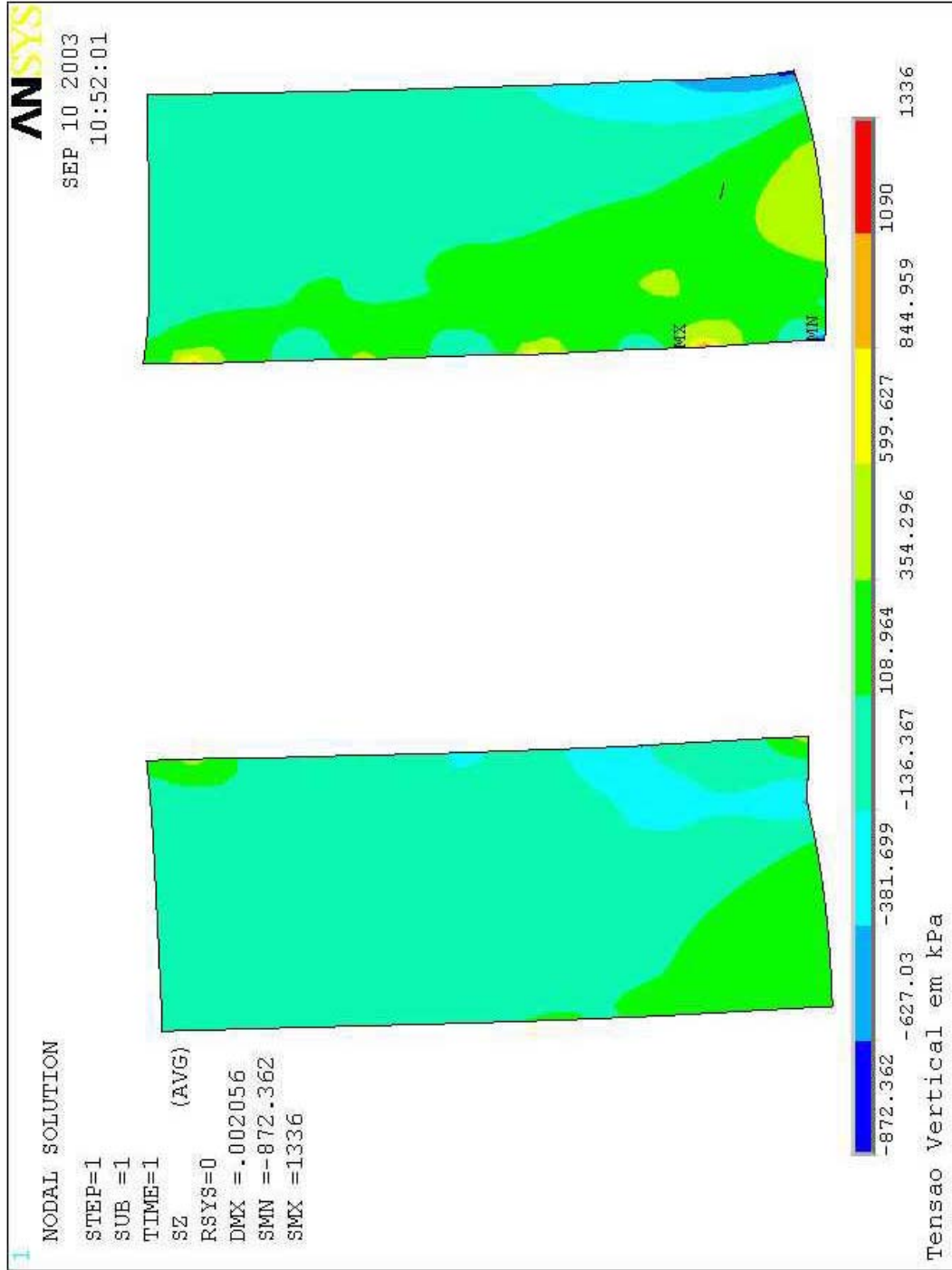


FIGURA 3.114 – Parede 7 (esquerda) e Parede 9 (direita) – Tensões Verticais no Modelo 2

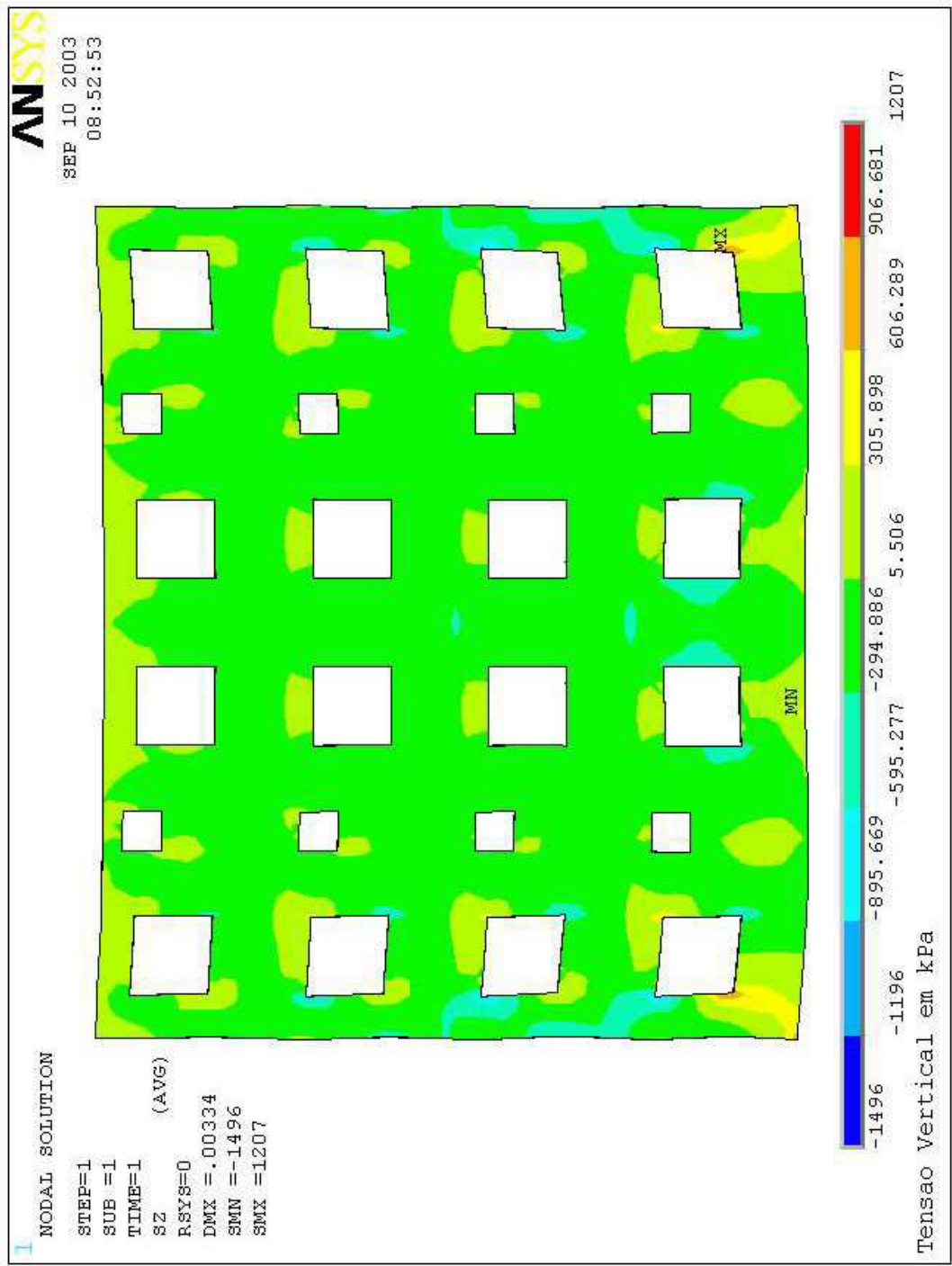


FIGURA 3.115 – Parede 16 – Tensões Verticais no Modelo 1

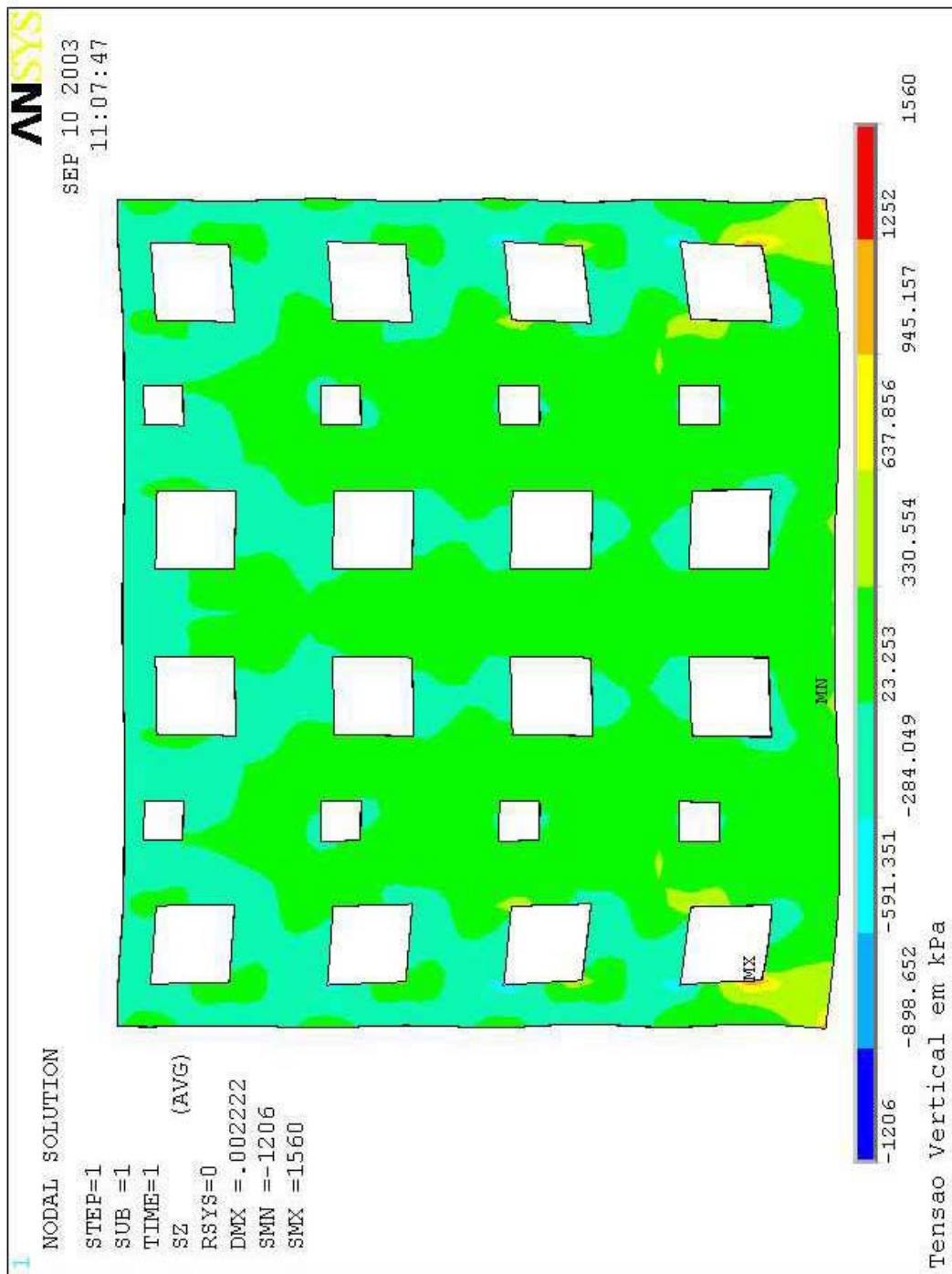


FIGURA 3.116 – Parede 16 – Tensões Verticais no Modelo 2

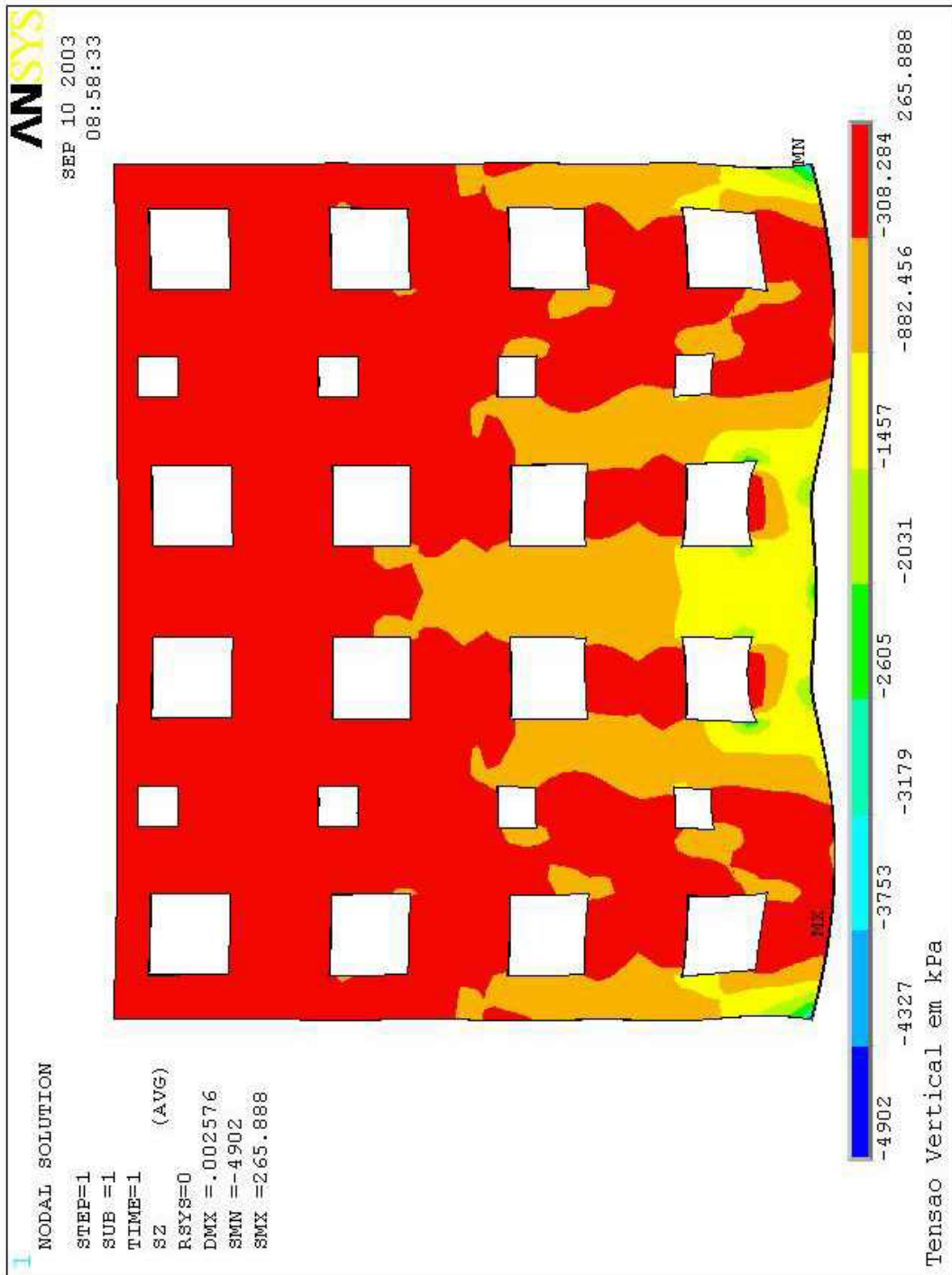


FIGURA 3.117 – Parede 33 – Tensões Verticais no Modelo 1

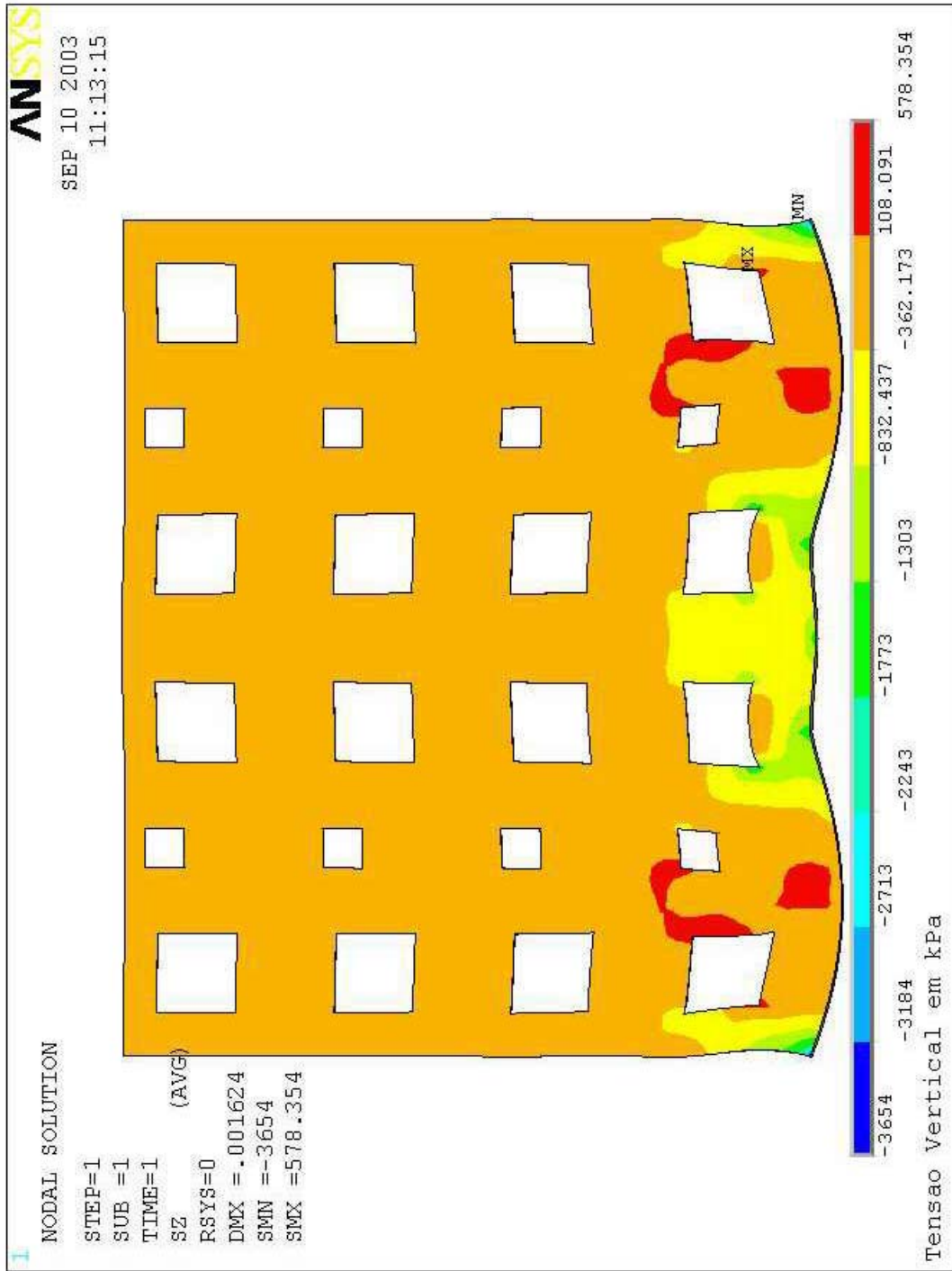


FIGURA 3.118 – Parede 33 – Tensões Verticais no Modelo 2

Nota-se ainda que, sob as janelas, a tensão na altura do apoio nas vigas é desprezível, e que o efeito arco ocorre na maioria das vezes, aliviando alguns trechos da alvenaria e sobrecarregando outros. Nota-se também que a parede 16 fica em grande parte tracionada, pois fica “apoiada” nas paredes transversais que se deformam menos.

Para se ter um parâmetro de referência na avaliação dessas tensões, para uma tensão de prisma $f_p = 3,6$ MPa (que foi a utilizada nessa modelagem tridimensional), a tensão admissível pela NBR10837 seria:

$$\sigma_{adm} = 3,6 \times 0,20 \left[1 - \left(\frac{262}{40 \times 14} \right)^3 \right] = 0,65 \text{ MPa}$$

Na parede 1, por exemplo, a tensão nominal é de 0,24 MPa (37% da admissível), mas a tensão obtida no Modelo 2 chegaria a 2,76 MPa (4,2 vezes superior à tensão admissível). Na prática, haveria uma redistribuição de tensões nessas regiões, que teriam que ser grauteadas ou até mesmo armadas para resistir às tensões que resultariam de tal redistribuição.

3.5.4 – Tensões Horizontais

Apenas a título de ilustração, para complementar este trabalho, apresentou-se as tensões horizontais na parede 1 nos Modelos 1 e 2 nas FIG.3.119 e FIG.3.120, respectivamente.

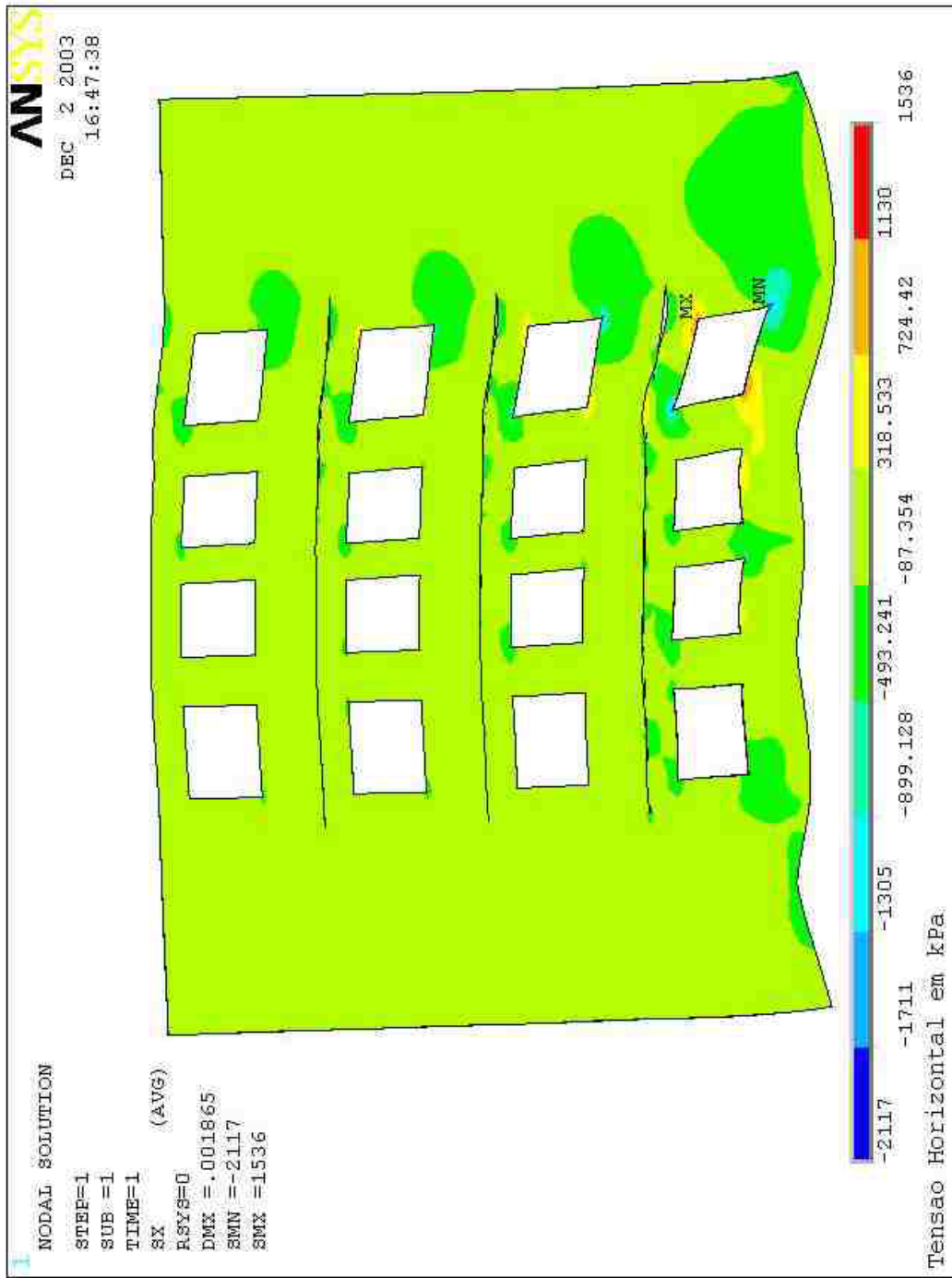


FIGURA 3.119 – Parede 1 – Tensões Horizontais no Modelo 1

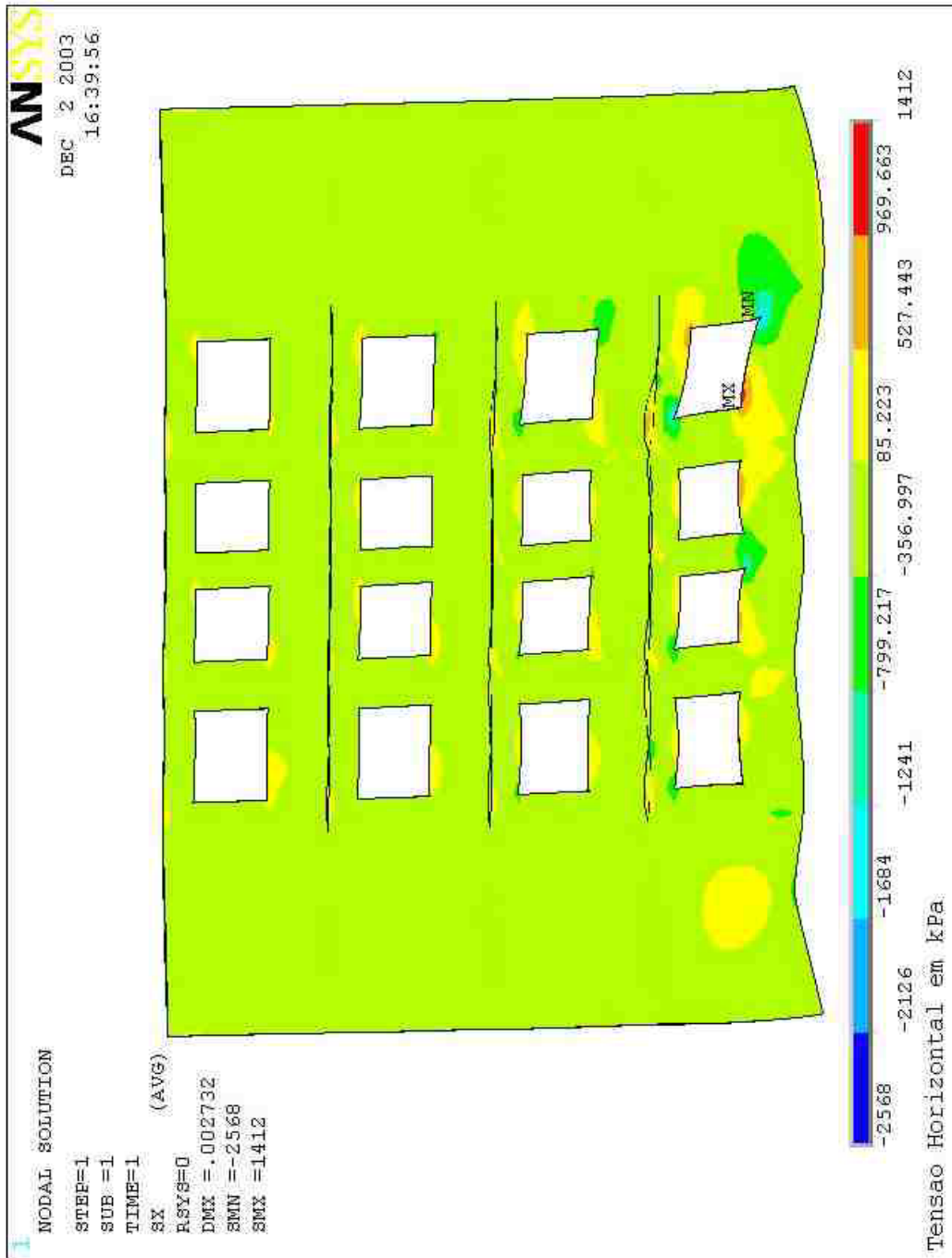


FIGURA 3.120 – Parede 1 – Tensões Horizontais no Modelo 2

4

CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 - Comentários

Resumidamente, pode-se dividir este trabalho em quatro etapas: definição dos exemplos a serem analisados, processamento desses exemplos no CAD/TQS[®], processamento do modelo tridimensional no programa ANSYS e análise dos resultados.

A definição dos exemplos analisados foi bastante trabalhosa, já que se pretendeu analisar prédios com formas diferentes, de modo que este estudo não se restringisse apenas a um tipo de edificação. Após avaliar os vários tipos de arquitetura, optou-se por aqueles que foram chamados de “prédio C”, “prédio A” e “prédio M”, correspondendo a prédios de conjuntos residenciais cujos nomes começavam por essas letras, sendo um deles em forma de I (prédio “C”), outro em forma de H (prédio “A”) e outro retangular com escada enclausurada (prédio “M”). Os tipos de arquitetura foram adaptados de modo que se apresentasse neste trabalho uma solução completa, inclusive com a distribuição das vagas nas garagens.

No processamento dos exemplos no CAD/TQS[®], foi dada atenção especial à

parametrização e aos modelos estruturais que seriam analisados nas Opções 1 a 7, principalmente nos que eram constituídos por lajes lisas de grandes dimensões (Opções 4 e 5). Algumas dessas opções foram processadas várias vezes, para se chegar a parâmetros compatíveis com os utilizados na prática em escritórios de projeto como, por exemplo, os coeficientes de plastificação das lajes sobre os capitéis dos pilares.

No processamento do modelo tridimensional no programa ANSYS, uma das maiores dificuldades foi definir o que seria apresentado, uma vez que *software* possui um número enorme de possibilidades e de resultados bastante interessantes, cujas análises certamente dariam algumas dissertações completas.

Na análise dos resultados, procurou-se criar tabelas e gráficos para facilitar a visualização dos dados e, de forma objetiva, chegar a algumas conclusões.

4.2 - Conclusões

Nos três prédios estudados, os resultados das cinco opções analisadas foram bastante coerentes.

Nas Opções 1, 2 e 3, que têm um sistema estrutural mais convencional com vigas sob quase todas as paredes, os resultados foram muito semelhantes entre si. O consumo de material variou muito pouco (de 1% a 4%) e apenas no prédio “M”, o consumo de aço da Opção 2 ficou 11% acima do consumo das outras duas opções. Consequentemente, os custos dessas três opções variaram também muito pouco (1,3% no prédio “C”, 2,4% no prédio “A” e 5,5% no prédio “M”).

Nessas três opções, a variação dos deslocamentos verticais foi mais representativa (58% no prédio “C”, 54% no prédio “A” e 74% no prédio “M”), sendo que nos três prédios a Opção 2, que tem balanços de ordem de 2,0 metros, foi a que mais se deformou.

Nas Opções 4 e 5, que têm um sistema estrutural com poucas vigas e lajes de grandes vãos, os consumos de concreto e aço ficaram bem acima do consumo das Opções 1 a 3

e, apesar do menor consumo de formas, o seu custo médio foi também maior (37% no prédio “C”, 30% no prédio “A” e 41% no prédio “M”).

Nessas opções, os deslocamentos foram grandes, principalmente na Opção 4, na qual eles superavam os deslocamentos das Opções 1 a 3 em 2,7 vezes (prédio “C”), 3,4 vezes (prédio “A”) e 4,1 vezes (prédio “M”).

Pode-se concluir, portanto, que a melhor solução (estrutural) para a estrutura suporte das alvenarias dos prédios de pequeno porte é a que tem vigas sob quase todas as paredes, por apresentar menor custo e menores deformações. Pode-se deduzir, também, que nesse tipo de estrutura, deve-se evitar grandes balanços (ou mesmo grandes vãos), já que nesses casos os custos aumentam e os deslocamentos são bem maiores.

Quanto ao efeito dos deslocamentos sobre a alvenaria, as TAB.3.9, 3.18 e 3.27 mostram que, nos exemplos processados, várias paredes têm flecha acima dos limites recomendados pelo CSTC (1980) (1/500 para paredes sem aberturas e 1/1000 para paredes com abertura). Em publicação recente, TOMAZ (2001) propõe limites ainda mais rigorosos. Conseqüentemente, muitas dessas paredes teriam de receber detalhes apropriados, para tentar minimizar os efeitos dessas deformações excessivas das estruturas-suporte sobre elas. É importante ressaltar ainda que nos balanços este efeito é agravado já que neles a deformação lenta é mais crítica que nos vãos, onde a laje ajuda a minimizar este efeito.

Vale ressaltar também que nas regiões onde é grande o gradiente de variação do deslocamento (linhas muito próximas nas figuras dos deslocamentos das vigas e lajes), o efeito dos deslocamentos sobre a alvenaria costuma ser bem maior do que para grandes deslocamentos absolutos.

Análises feitas nos resultados da modelagem tridimensional da alvenaria sobre a estrutura-suporte mostram que as tensões em alguns pontos da parede, provocadas por essas deformações excessivas, podem chegar a valores muito altos e a exigir grauteamento ou até mesmo a armação da alvenaria nesses locais. Para que os valores

obtidos nesses modelos se aproximem mais dos resultados reais, é necessário que se façam mais avaliações experimentais para que se consiga parâmetros mais adequados para a modelagem numérica da alvenaria. Uma outra possibilidade seria, no programa *ANSYS*, considerar as cargas divididas por área e não por linha, para se tentar reduzir estes picos de tensões concentradas.

Para terminar, fica claro que a preocupação que motivou este trabalho se justificava e que os responsáveis pelos projetos arquitetônicos e estruturais desse tipo de edificação devem ficar bastante atentos aos inconvenientes que essas estruturas com grandes vãos entre pilares e grandes balanços podem trazer. Alertados, cabe a eles tomar medidas para tentar minimizar os efeitos indesejáveis.

4.3 - Sugestões

Este é um assunto bastante amplo, não sendo possível esgotá-lo em uma dissertação. A fim de complementar este trabalho, sugere-se alguns temas a serem estudados:

- Modelagem da estrutura espacial, considerando os elementos de contato;
- Análise experimental, com instrumentação, de uma edificação, medindo-se os deslocamentos e até mesmo as tensões nas paredes ao longo da execução da obra;
- Modelagem da estrutura espacial, considerando as etapas do processo evolutivo;
- Análise do efeito da retirada de alguma parede ou abertura de vãos nas tensões das paredes adjacentes e nas deformações da estrutura.

5

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A.T. (1999) - *Análise de Alternativas Estruturais para Edifícios em Concreto Armado*. São Carlos – Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10837 (1989)
Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto - Procedimento Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6120 (1980)
Cargas para o cálculo de estruturas de edificações Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118 (1980)
Projeto e execução de obras de concreto armado Rio de Janeiro.

BARBOSA, P. C. (2000) - *Estudo da Interação das Paredes e Alvenaria Estrutural com Vigas de Concreto Armado*. São Carlos – Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAD/TQS[®] (2000) - *Sistemas Computacionais de Engenharia Estrutural* São Paulo

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (2002) - *Caderno de Orientações de Empreendimento - Manual Técnico de Engenharia* - Belo Horizonte - GIDUR/CEF.

CAMPOS, M.R. (1996) - *Projeto e Implantação de um Software Amigável para Análise de Placas Ortótropas com Enrijecedores*. Belo Horizonte – Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia, UFMG.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION (1980). *Deformations Admissibles Dans le Bâtiment*. - Bruxelles, apud TOMAZ, E. (1989).

MANUAL PROGRAMA ANSYS 6.1.

PEREZ, G. B. (1999) - *Análise Comparativa de Modelos do Sistema Estrutural de um Edifício de Andares Múltiplos em Concreto Armado*. Belo Horizonte - Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia, UFMG.

PITANGUEIRA, R; VASCONCELOS FILHO, A (1999) - *Uso do Programa PLENOR para a Análise de Estruturas Reticuladas*. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG.

SILVA, A. R. (2002) - *Análise Comparativa de Custos de Sistemas Estruturais para Pavimentos de Concreto Armado*. Belo Horizonte – Dissertação (mestrado)- Escola de Engenharia, UFMG.

SÜSSEKIND, J.C. (1980) - *Curso de Concreto - v.1 - Concreto Armado*. Porto Alegre, Editora Globo.

TEPEDINO, J.M (1987) – *Curso de Especialização – Sistemas II – Deformações*. Belo Horizonte, Edições COTEC-EEUFMG.

TOMAZ, E. (1989) – *Trincas em Edifícios, Causas, Prevenção e Recuperação* - São Paulo-SP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

TOMAZ, E. (2001) - *Tecnologia, Gerenciamento e Qualidade na Construção*. São Paulo – SP – Editora PINI.

TOMAZELA, C.A (1995) - *Ação Conjunta Parede-Viga na Alvenaria Estrutural*. São Carlos - Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

VASCONCELLOS F., A. (1981) - *Edifícios de Andares Múltiplos*. Belo Horizonte, Edições Engenharia Escola de Engenharia - EEUFMG

VASCONCELLOS F., A. ; MAIA, E.V.; SILVA, R.P (1995) - *Programas para Cálculo de Estruturas de Barras*. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG

ANEXOS

Os anexos têm por objetivo apresentar os desenhos que complementam o texto da dissertação.

Anexo A

Neste anexo, encontra-se a arquitetura esquemática de dois prédios projetados na década de 80. Esses prédios, chamados “SF” e “G”, estão citados nessa dissertação no item “I.1 – Histórico”.

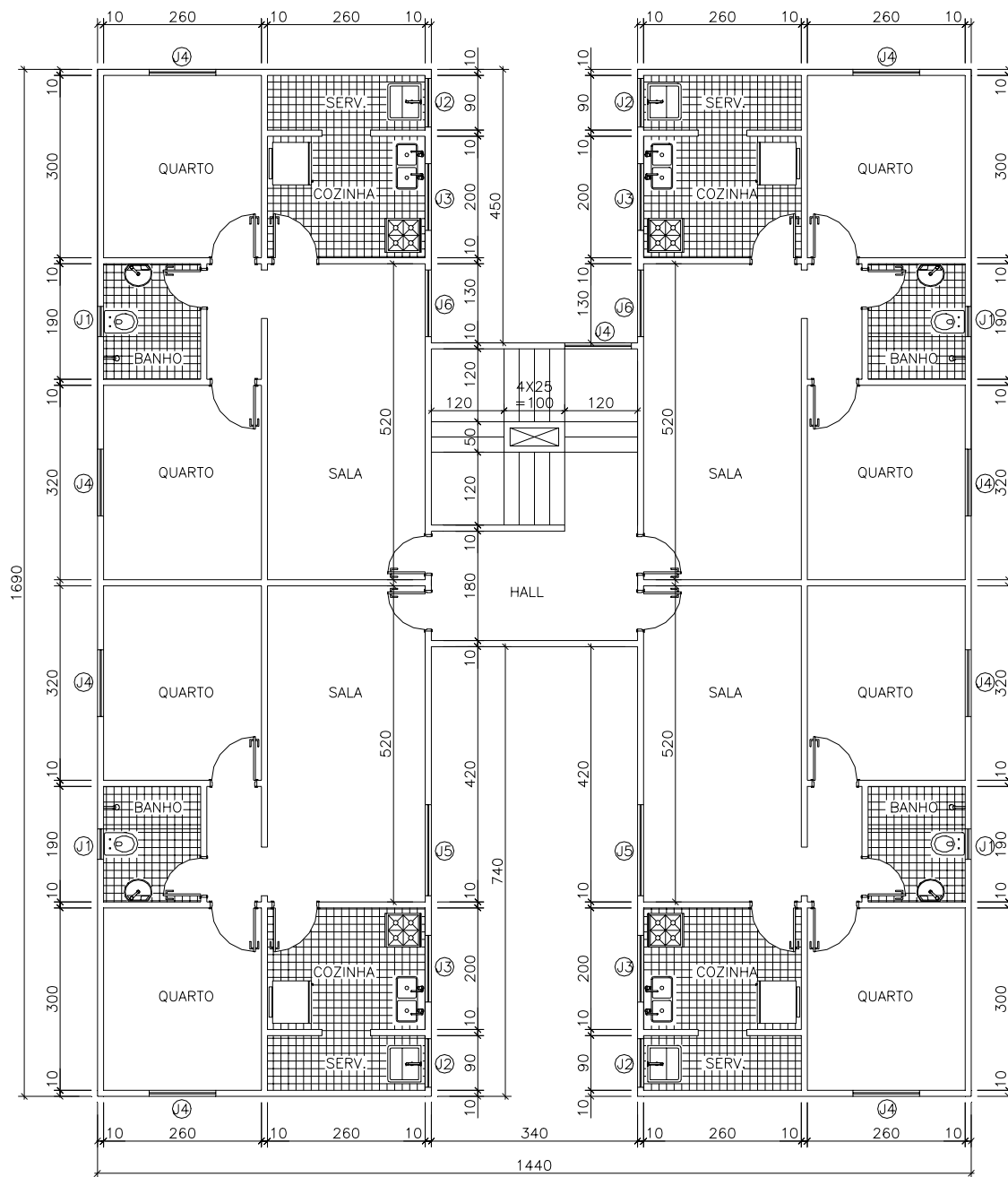


FIGURA A.1 – Residencial “SF” – Pavimento Tipo

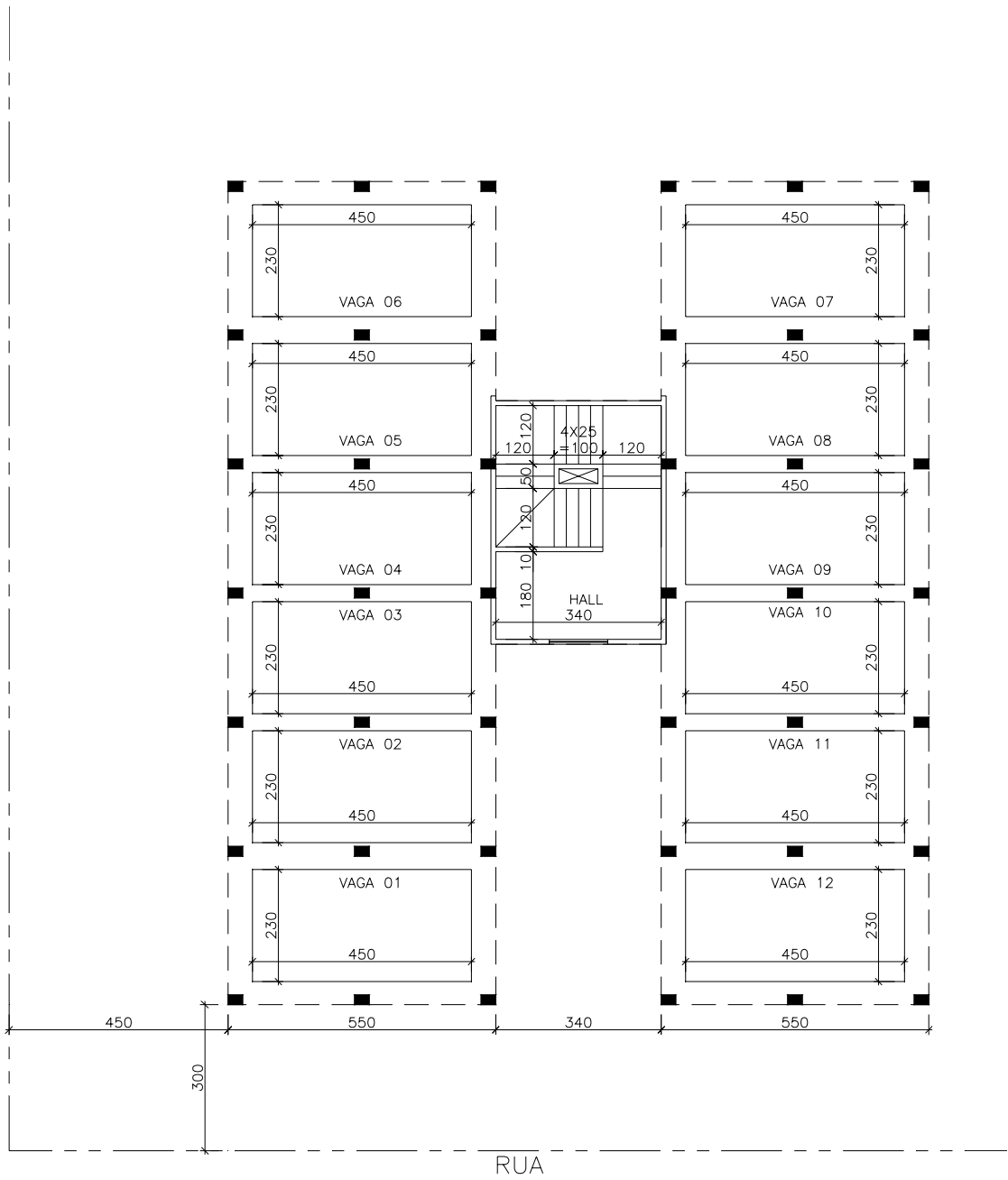


FIGURA A.2 – Residencial “SF” – Garagem

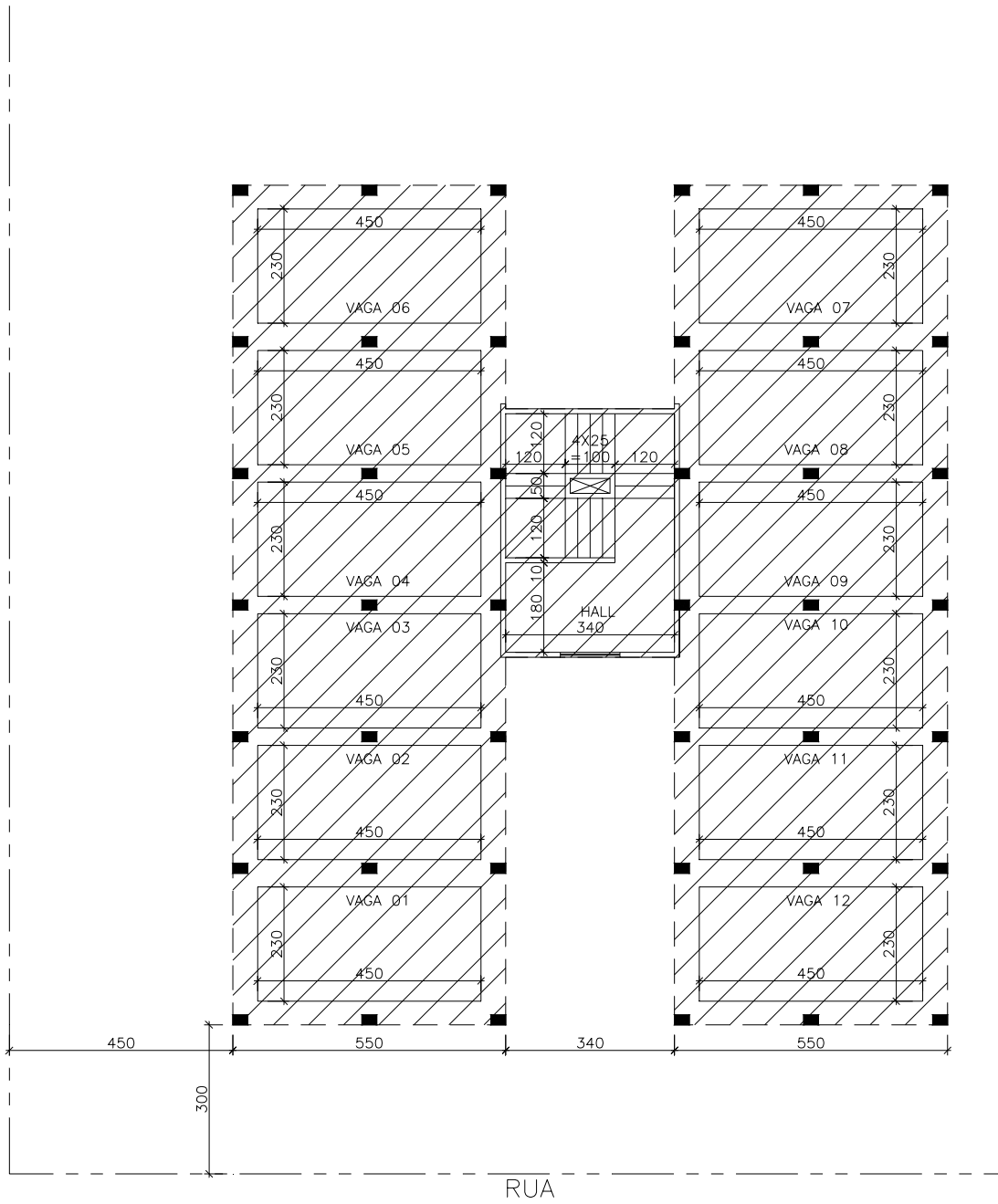


FIGURA A.3 – Residencial “SF” – Projeção do Pavimento Tipo sobre as garagens

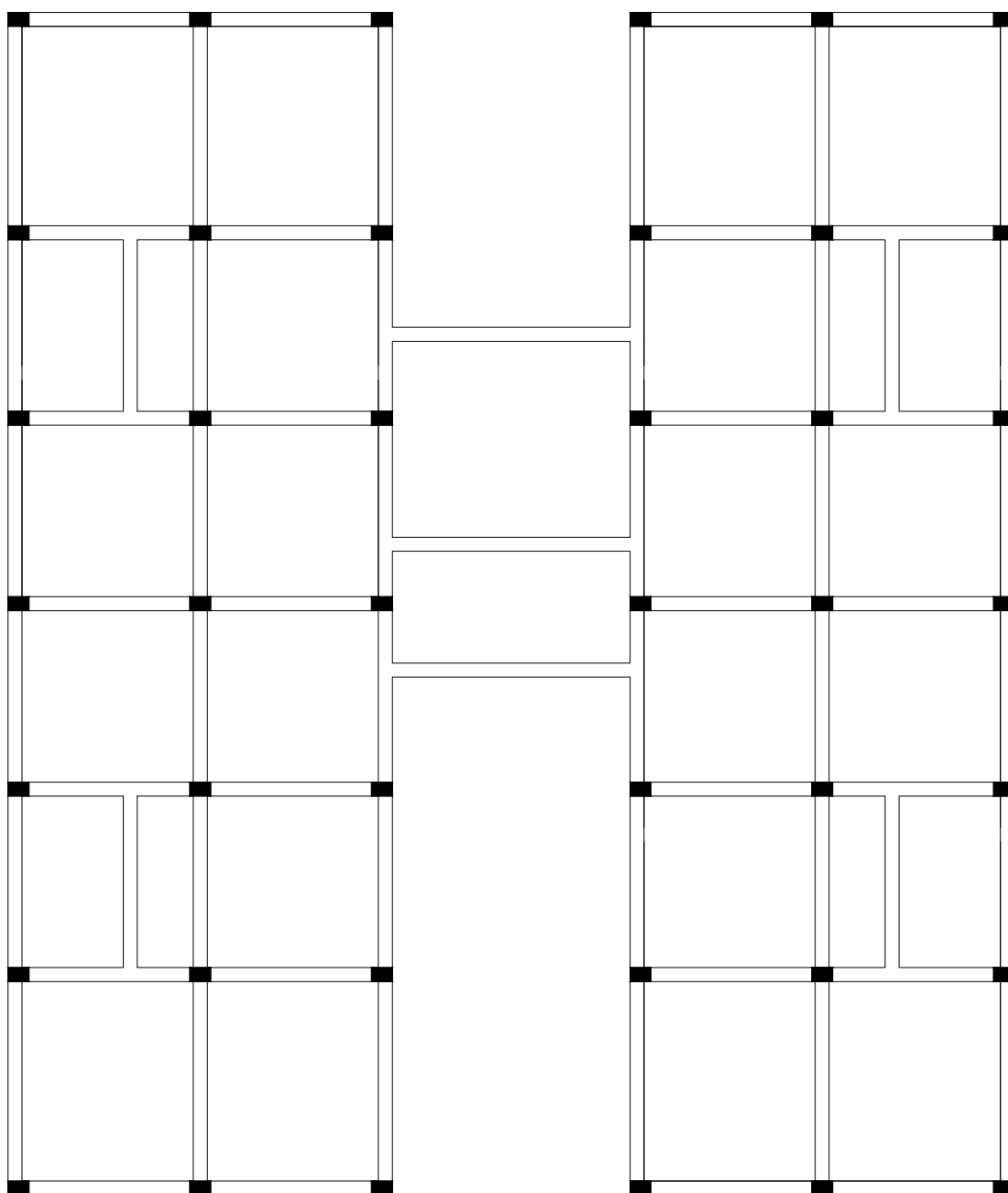


FIGURA A.4 – Residencial “SF” – Esquema do Vigamento do Pilotis

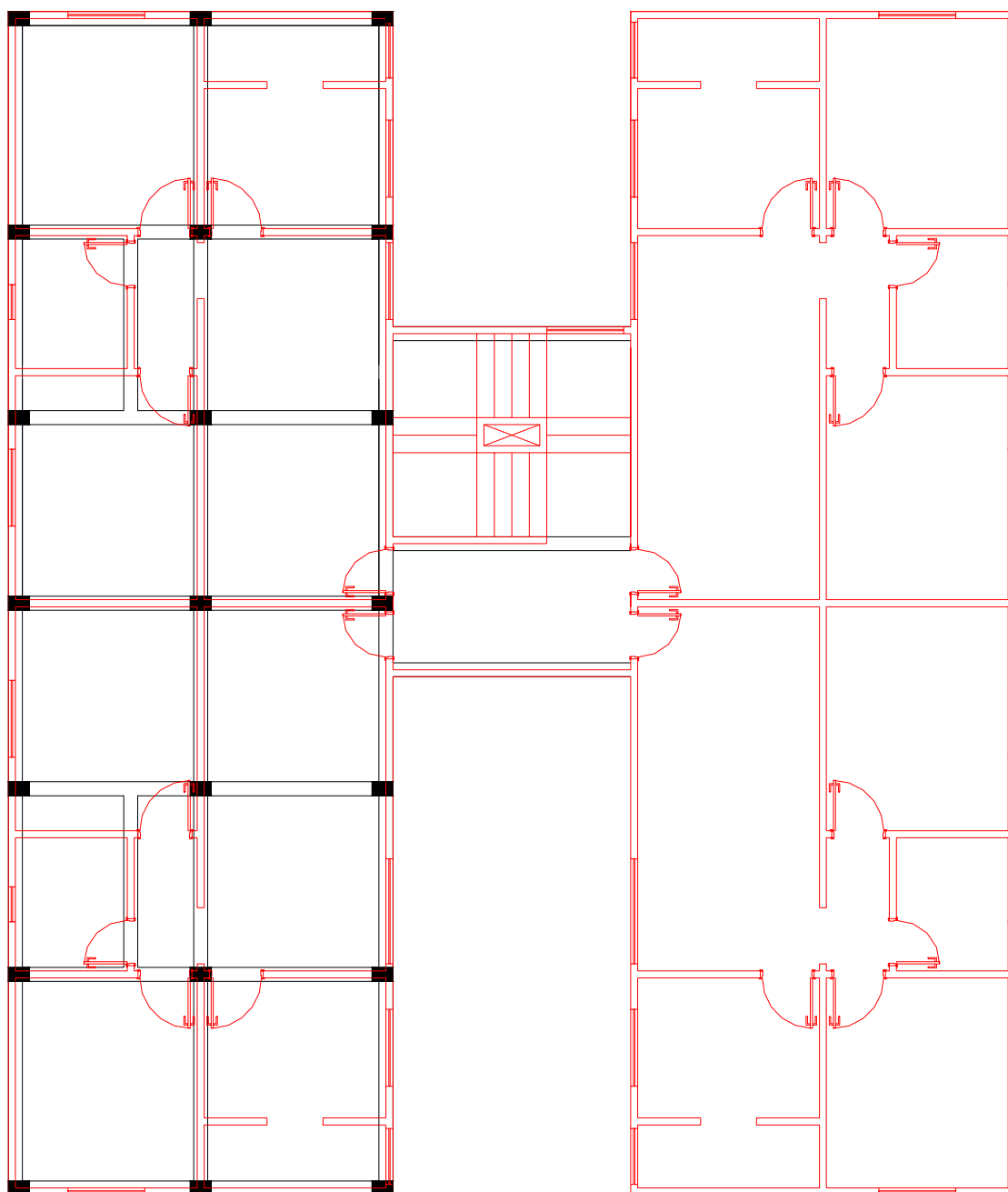


FIGURA A.5 – Residencial “SF” – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

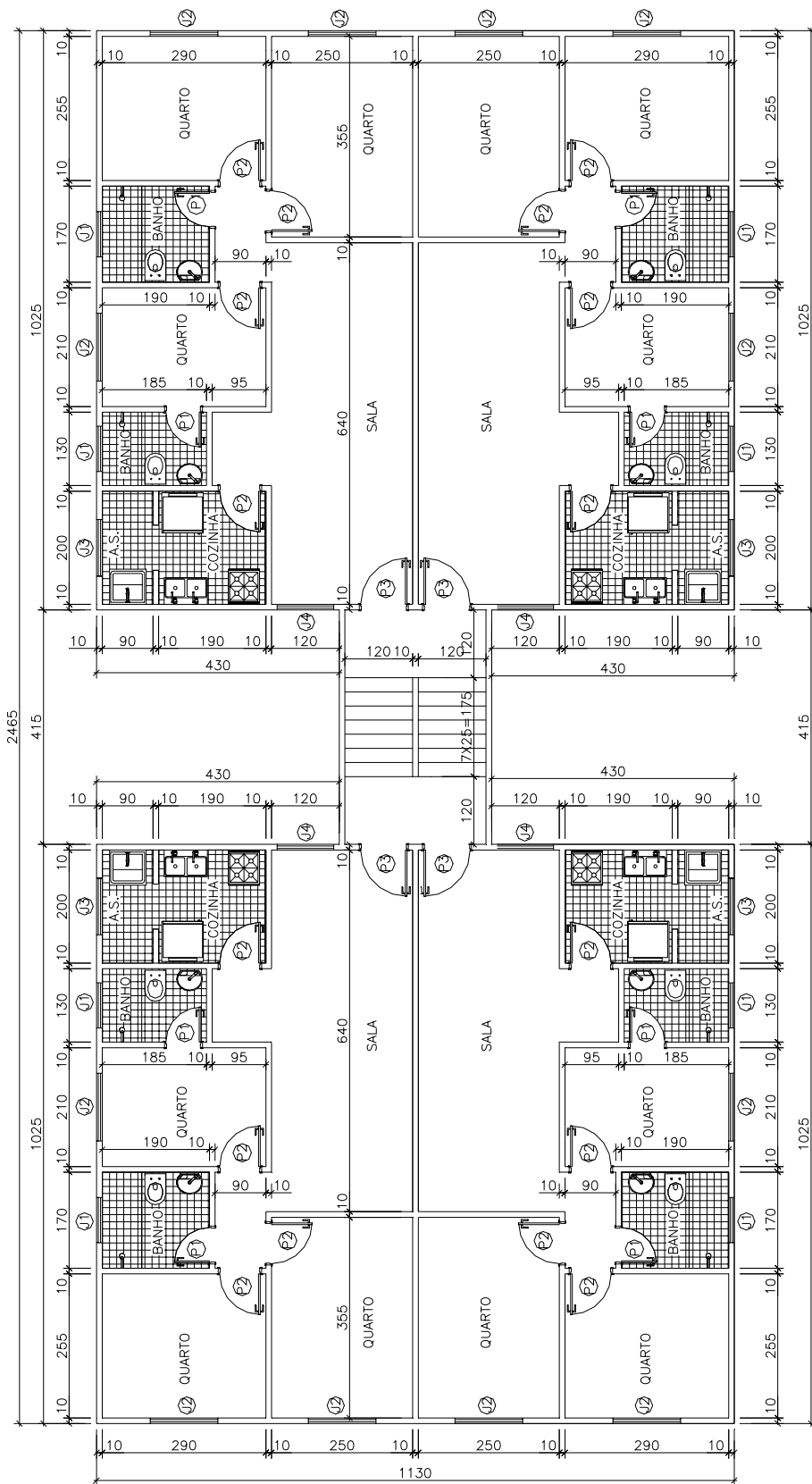


FIGURA A.6 – Residencial “G” – Pavimento Tipo

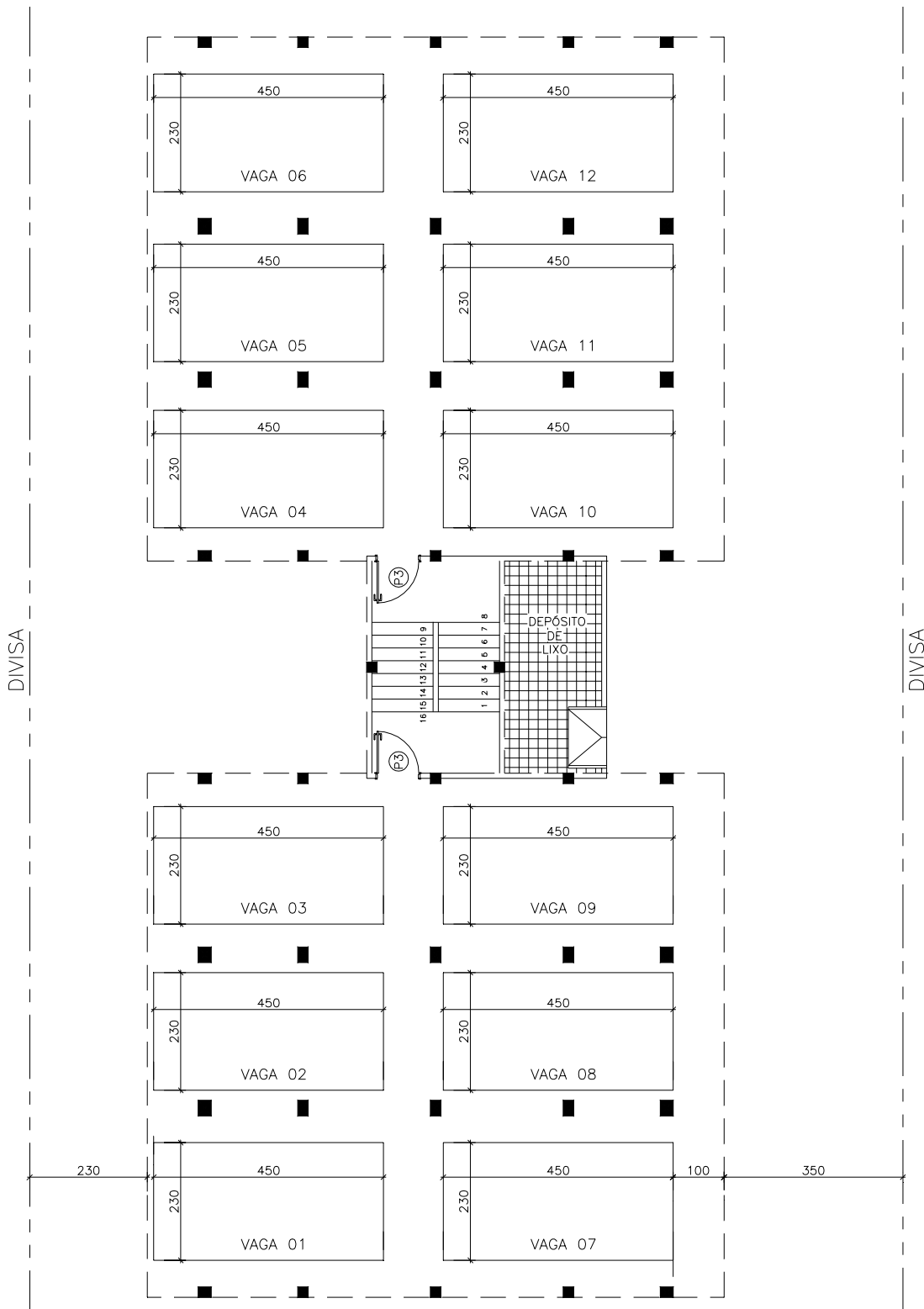


FIGURA A.7 – Residencial “G” – Garagem

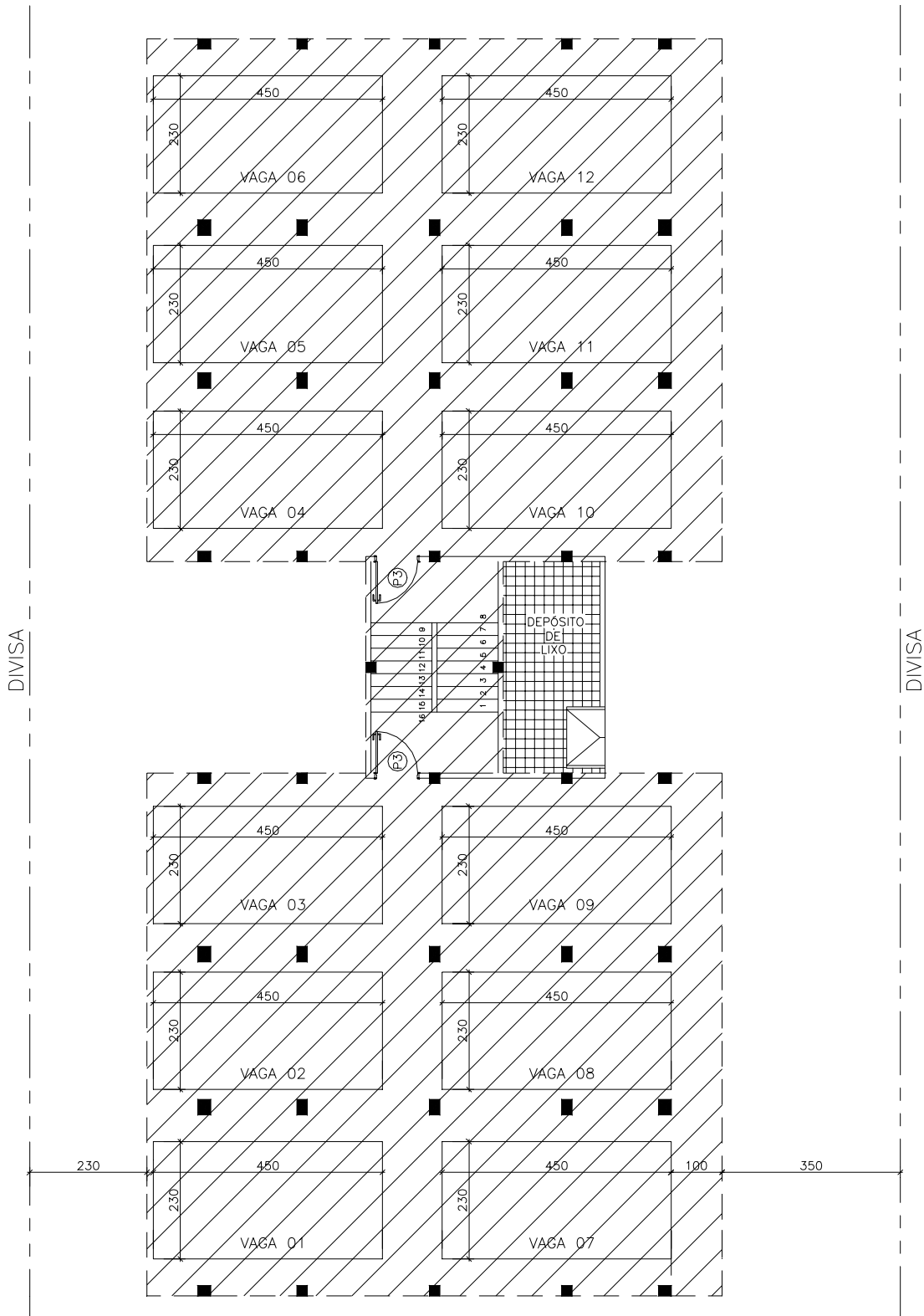


FIGURA A.8 – Residencial “G” – Projeção do pavimento tipo sobre as garagens

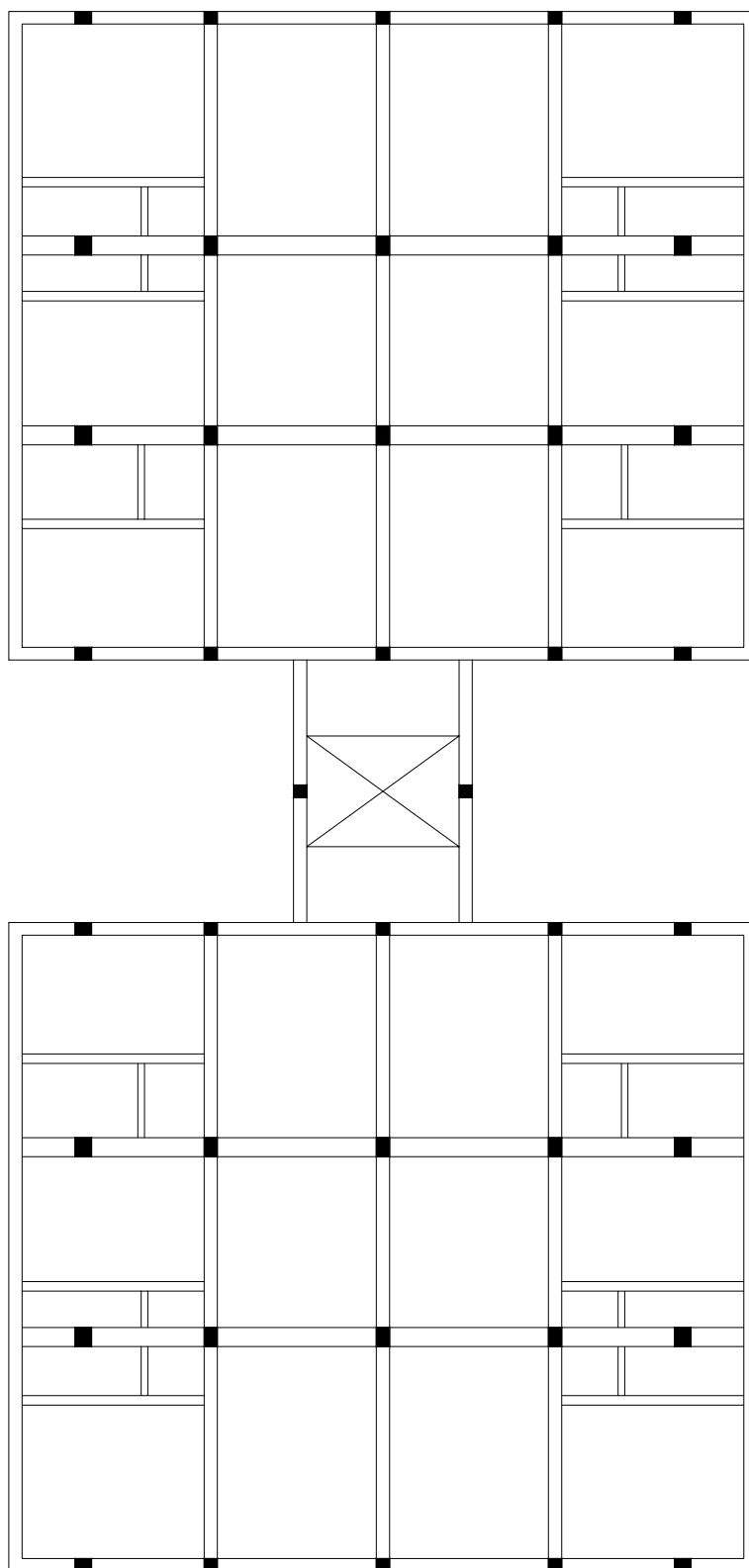


FIGURA A.9 – Residencial “G” – Esquema do Vigamento do Pilotis

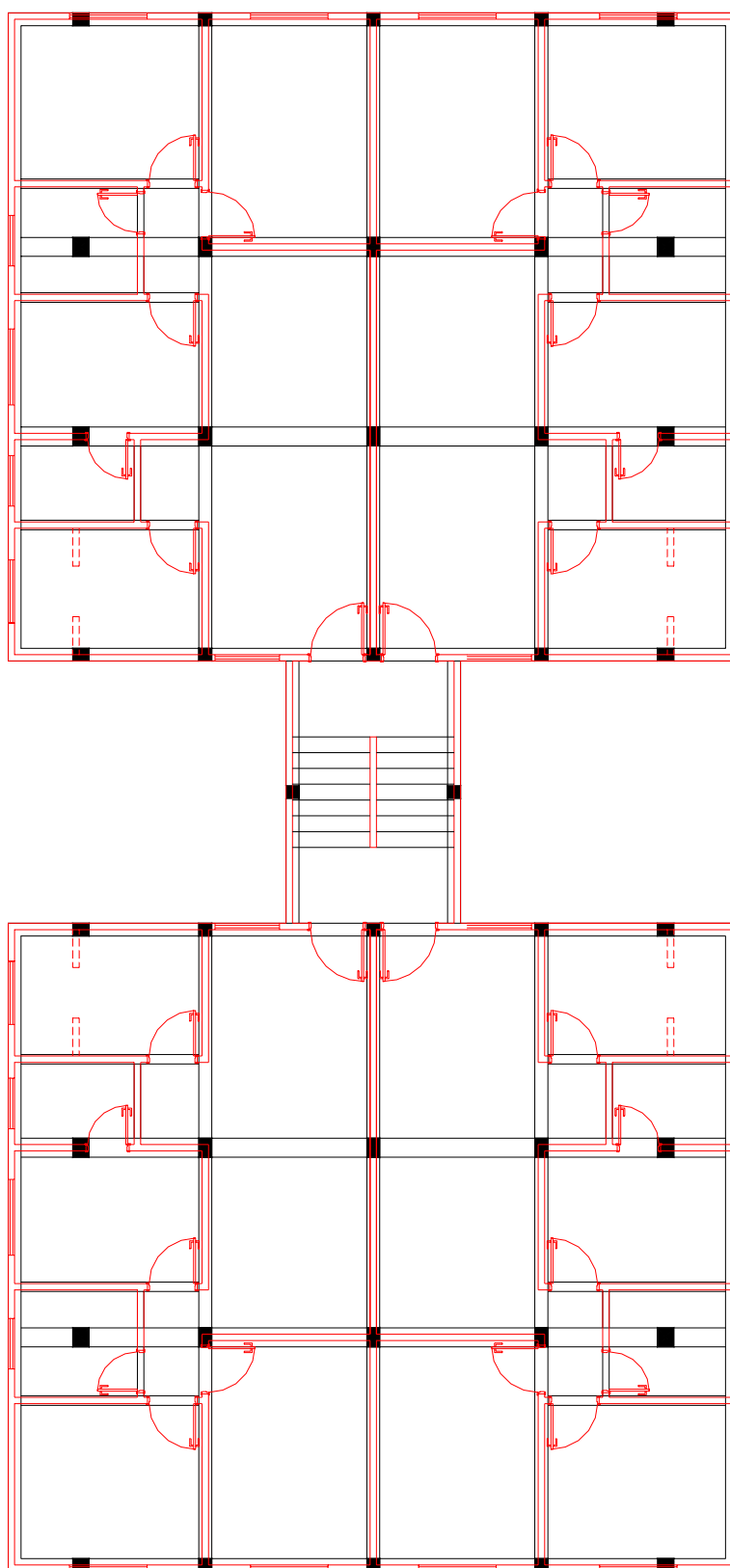


FIGURA A.10 – Residencial “G” – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a estrutura

Anexo B

Neste anexo, encontra-se a arquitetura esquemática de três prédios projetados em 2001/2002. Esses prédios, chamados “S-Bloco 1”, “J-Bloco 5” e “J-Bloco 4”, são citados nessa dissertação no item “I.1 – Histórico”.

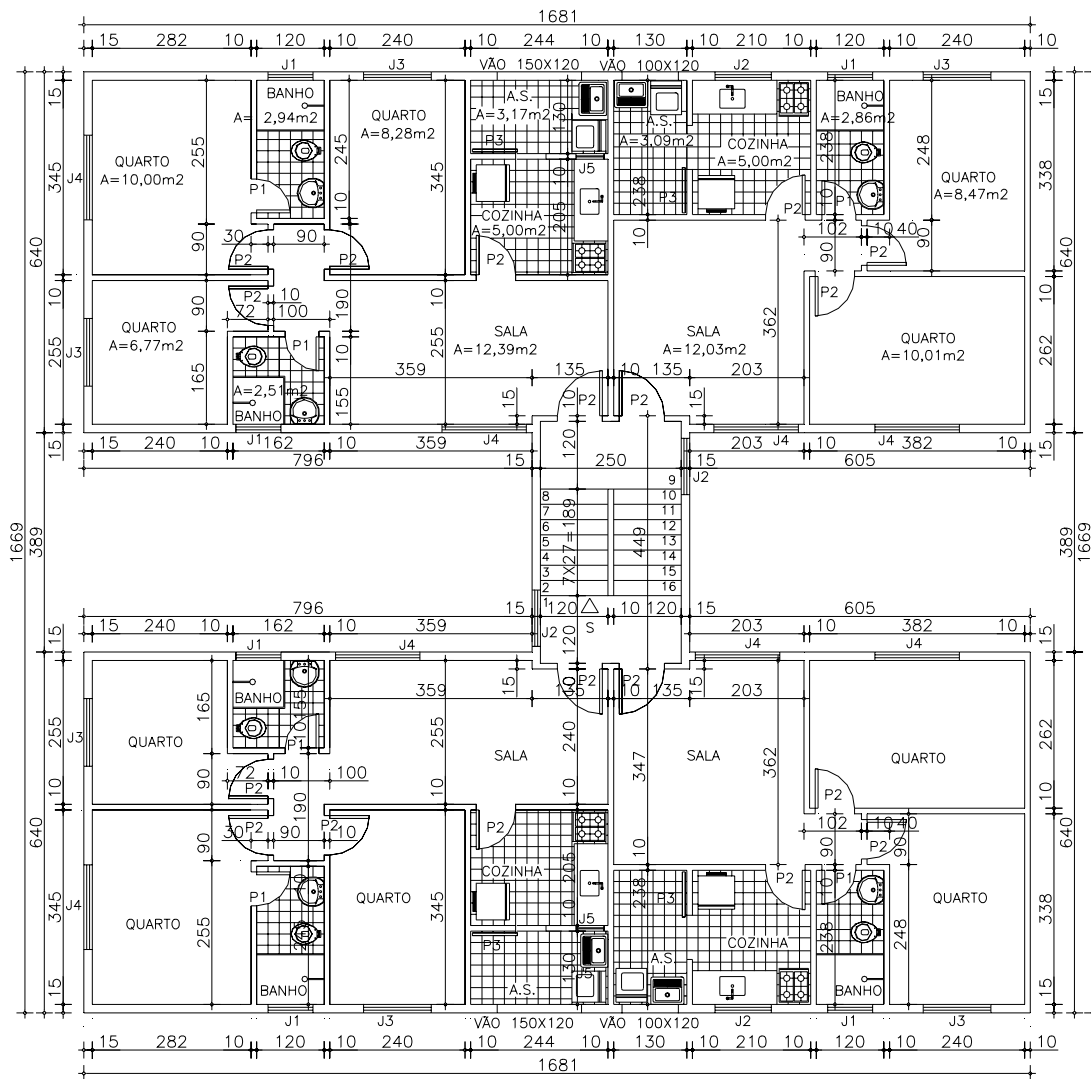


FIGURA B.1 – Residencial “S” – Pavimento tipo

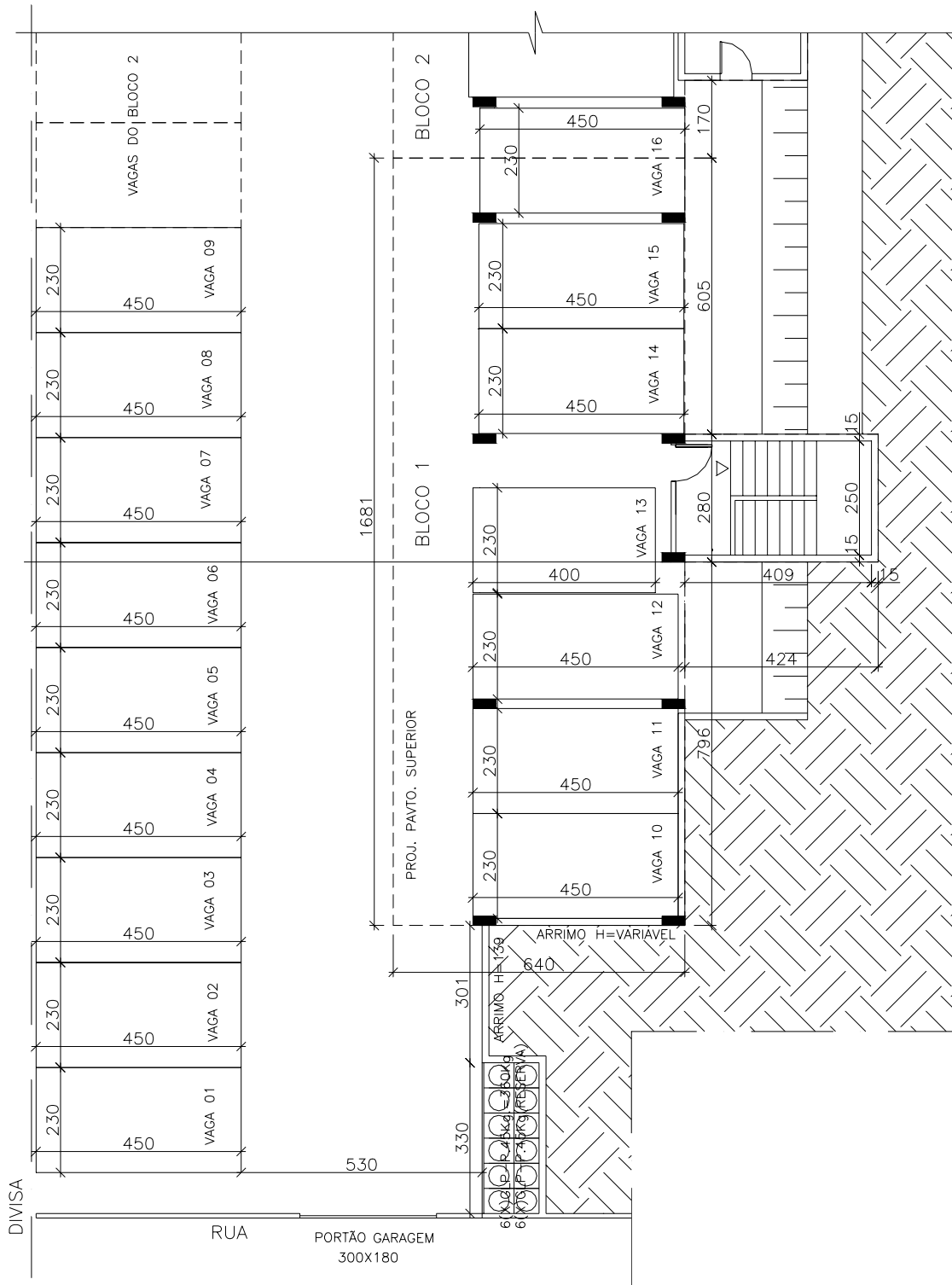


FIGURA B.2 – Residencial “S” – Garagem

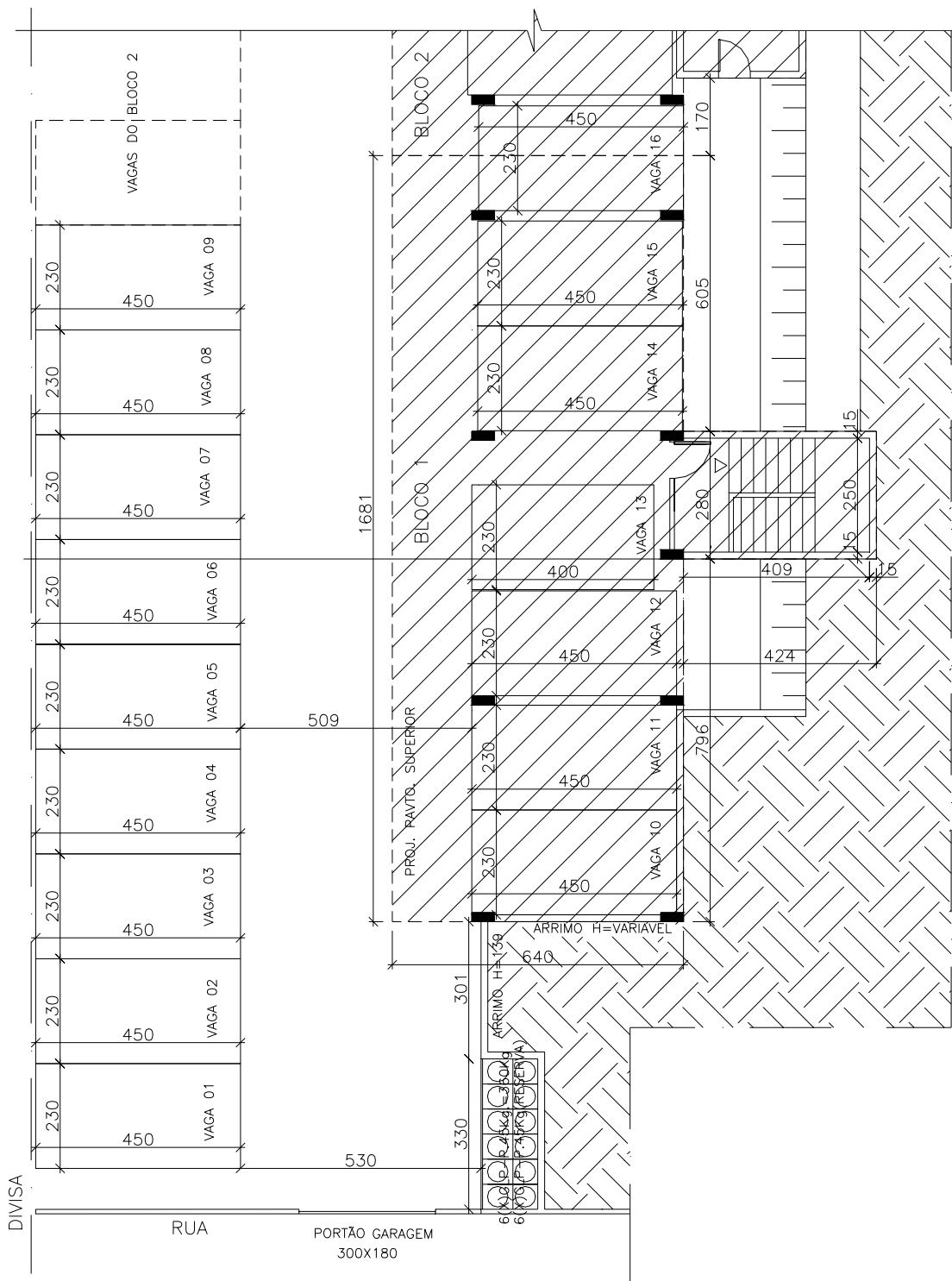


FIGURA B.3 – Residencial “S” – Projeção do pavimento tipo sobre as garagens

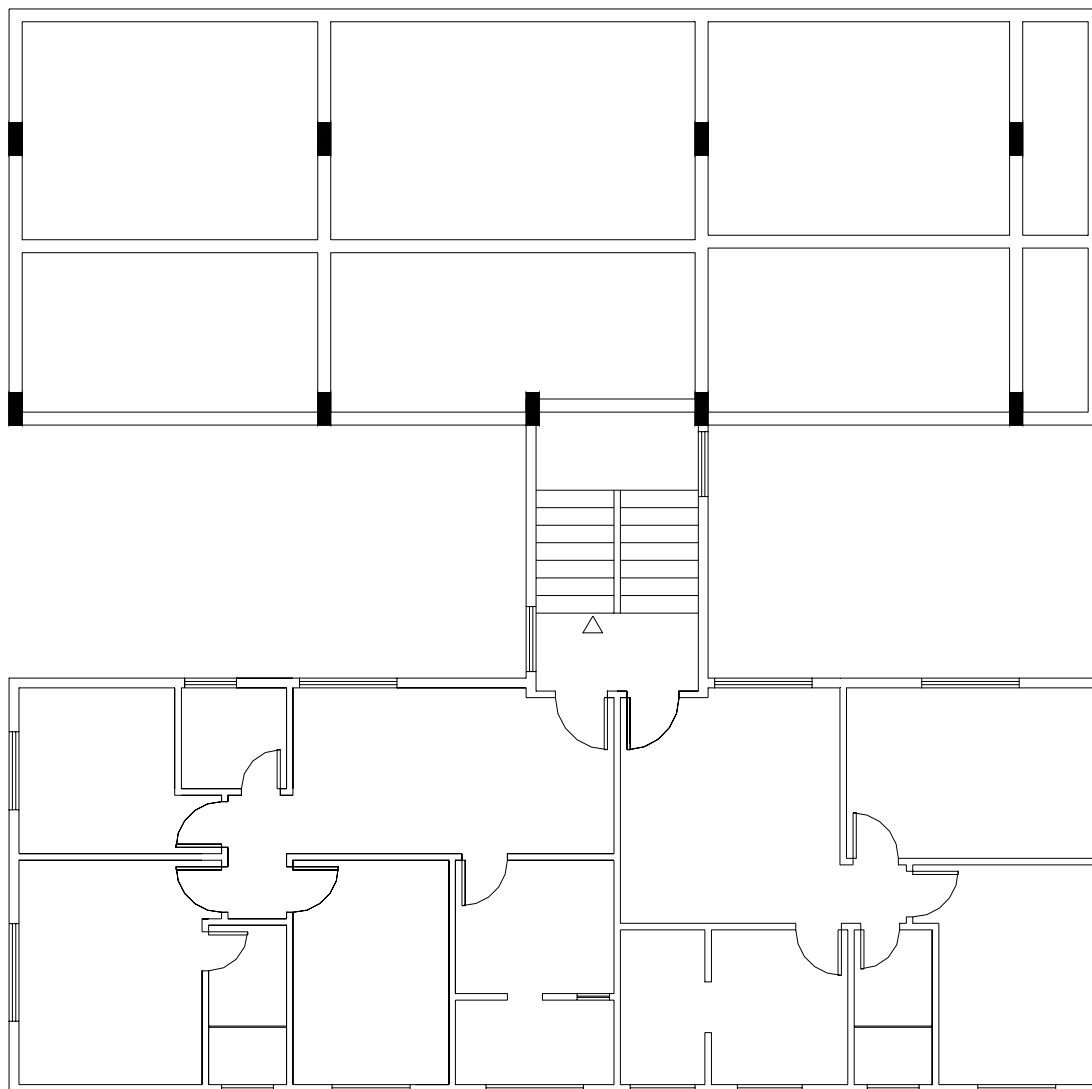


FIGURA B.4 – Residencial “S” – Primeira solução de vigamento do pilotis

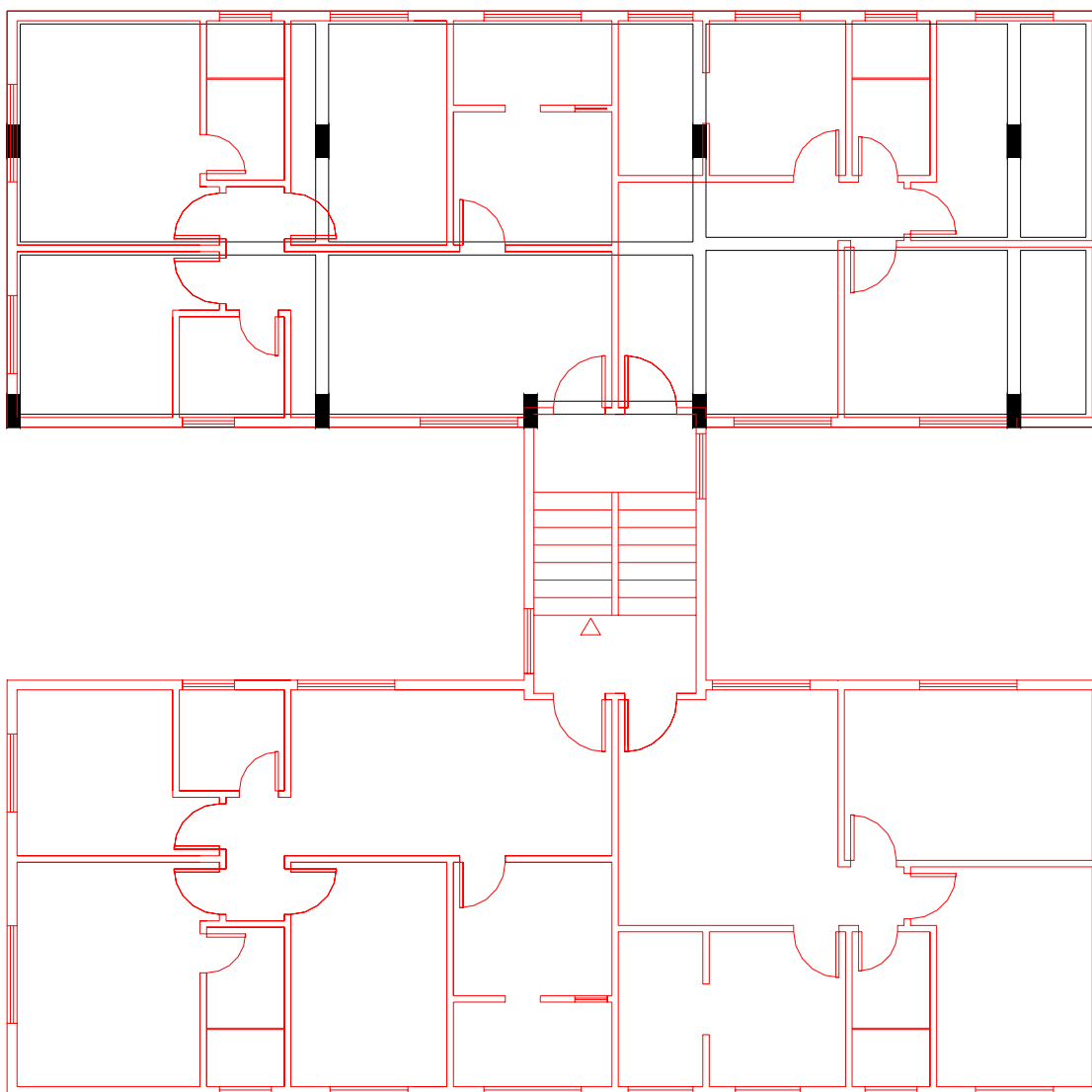


FIGURA B.5 – Residencial “S” – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a primeira solução de vigamento do pilotis

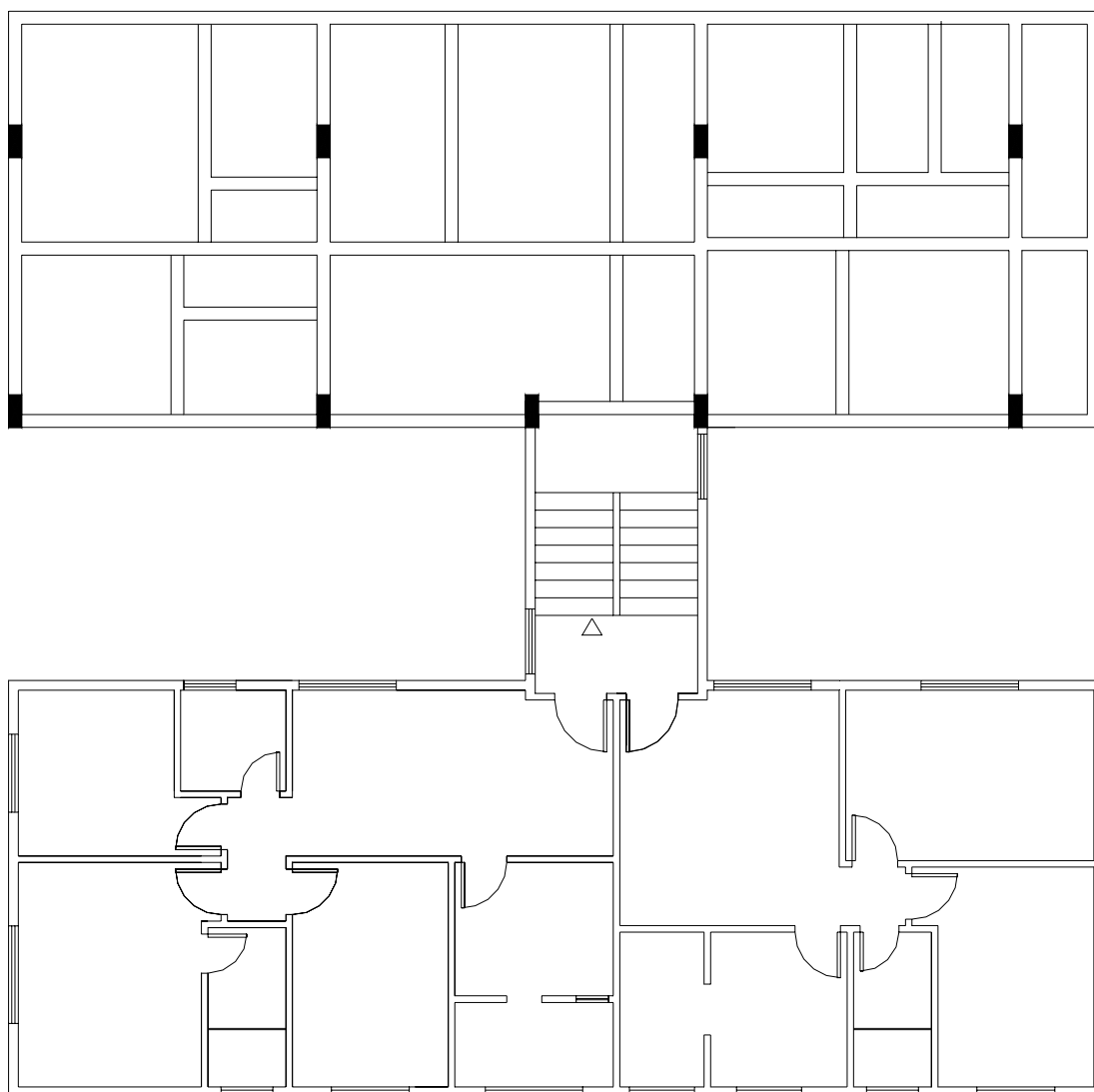


FIGURA B.6 – Residencial “S” – Segunda solução de vigamento do pilotis

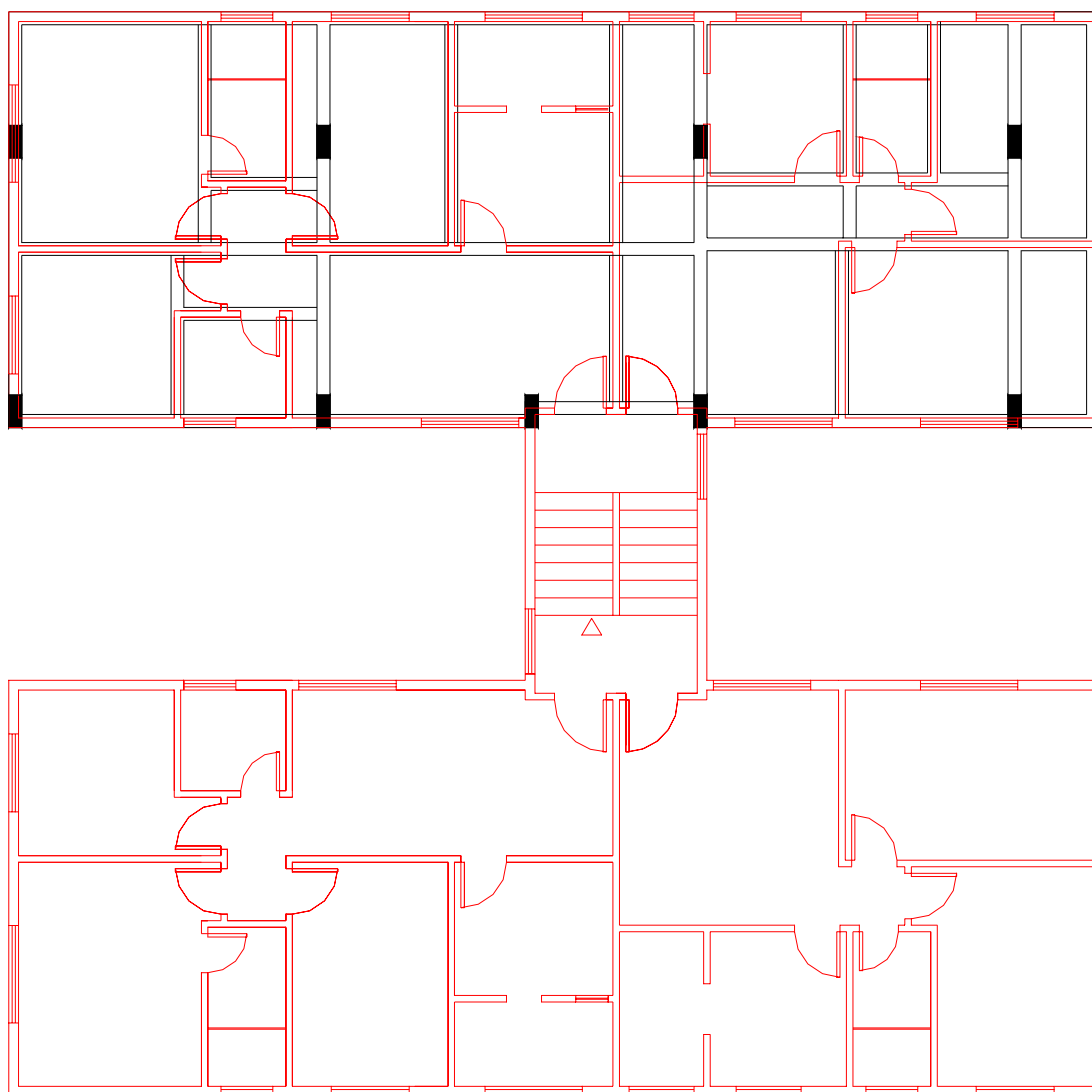


FIGURA B.7 – Residencial “S” – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a segunda solução de vigamento do pilotis

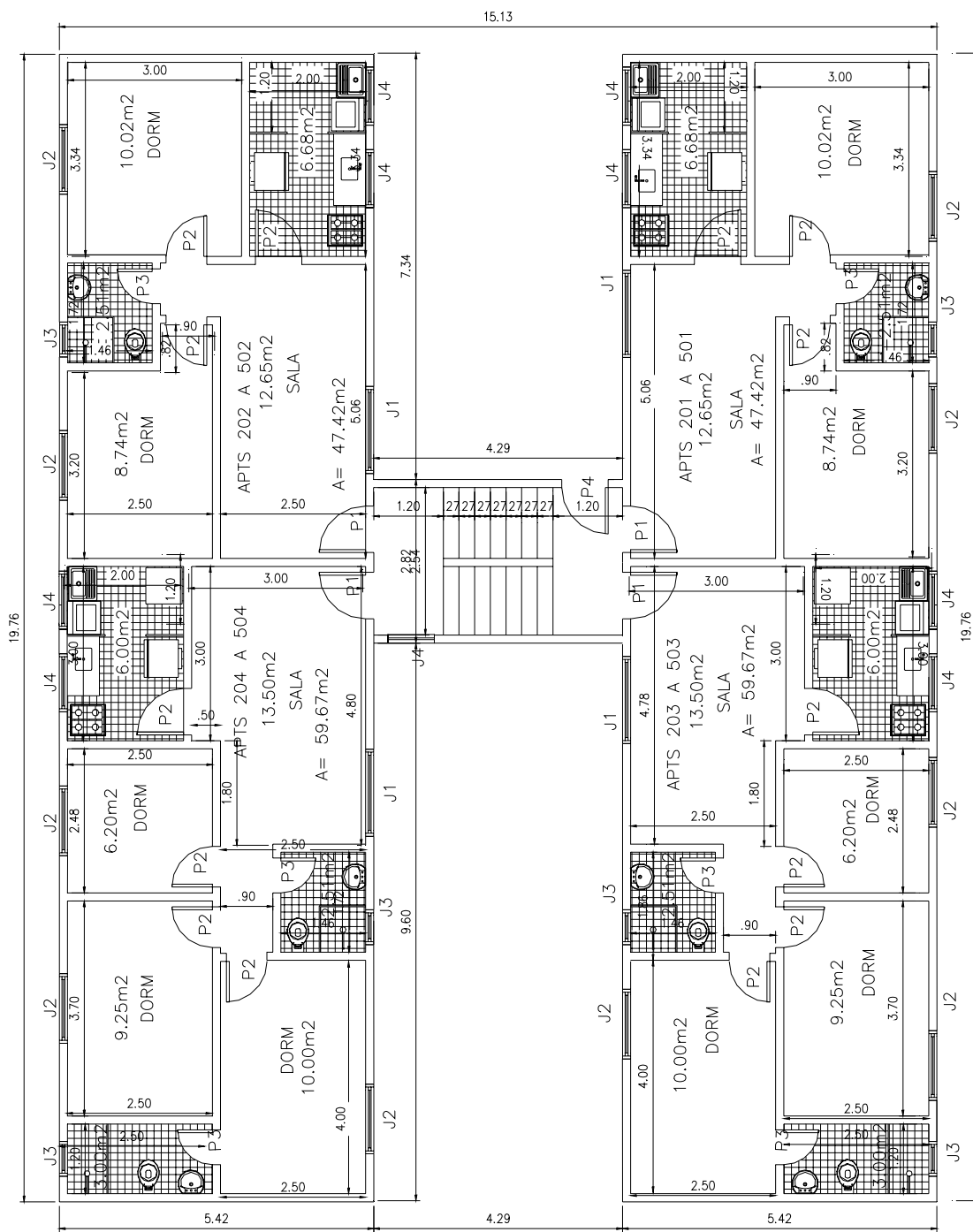


FIGURA B.8 – Residencial “J” – Bloco 5 – Pavimento tipo

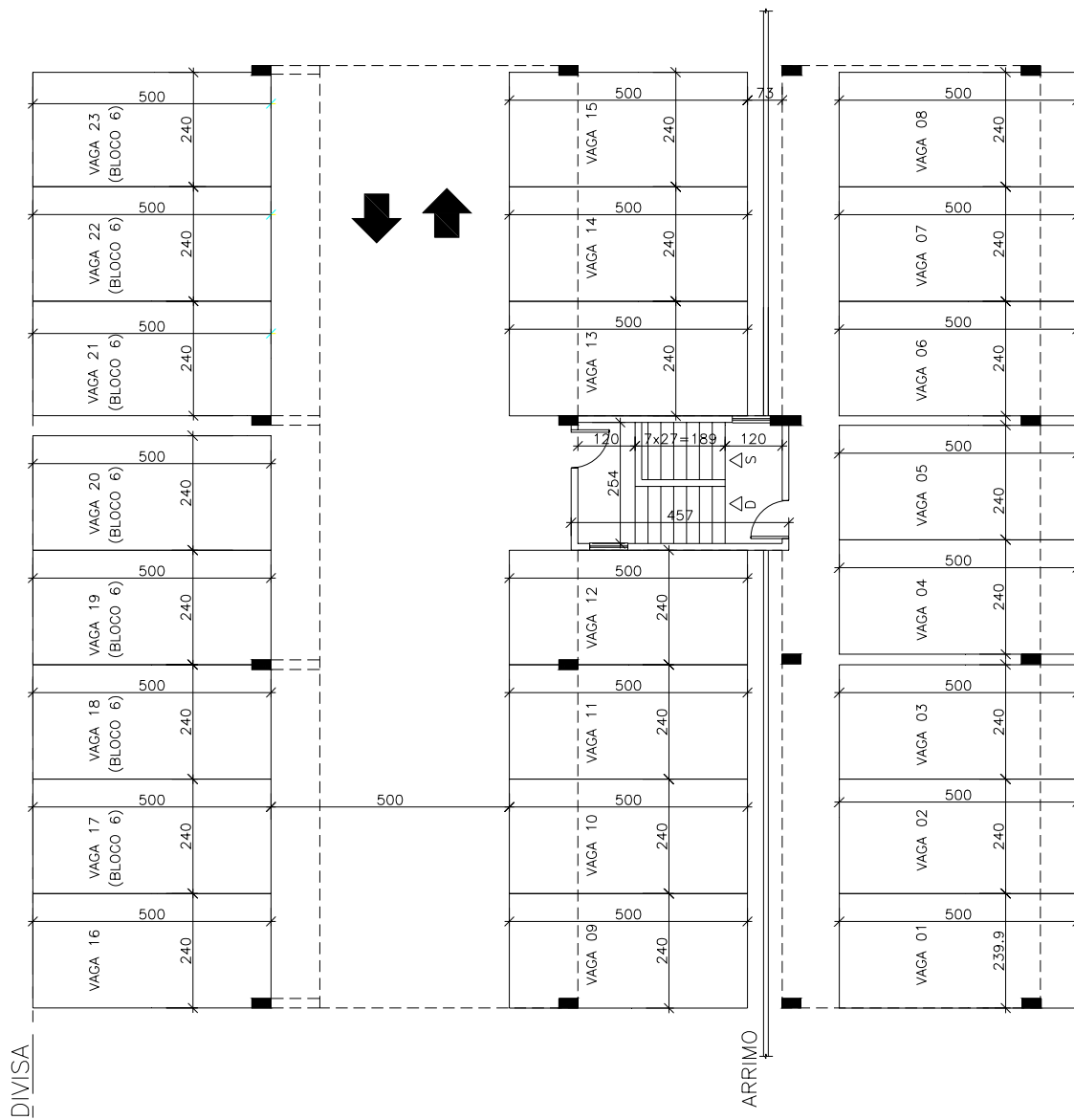


FIGURA B.9 – Residencial “J” – Bloco 5 – Garagem

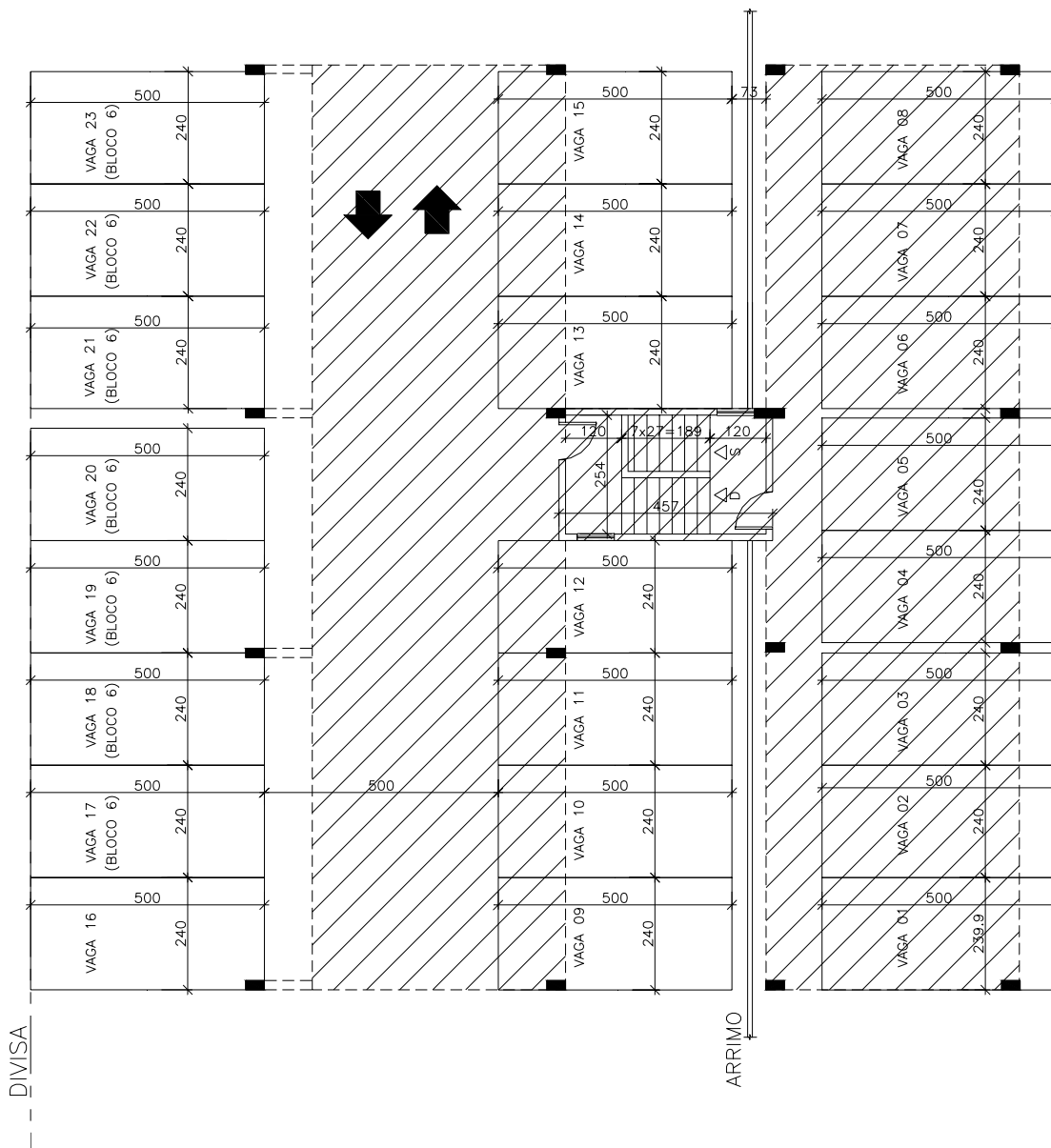


FIGURA B.10 – Residencial “J” – Bloco 5 – Projeção do pavimento tipo sobre as garagens

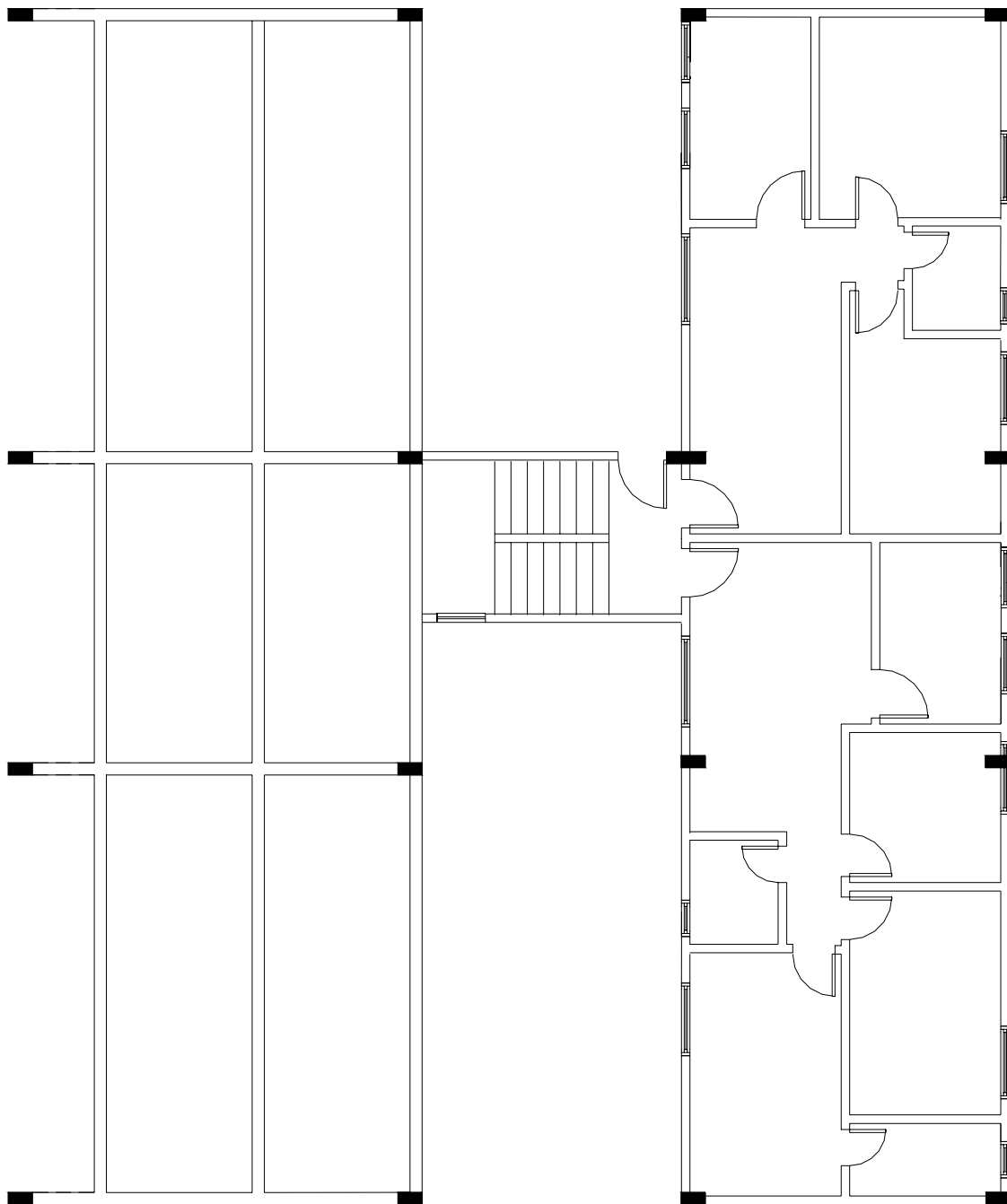


FIGURA B.11 – Residencial “J” – Bloco 5 – Primeira solução de vigamento de pilotis

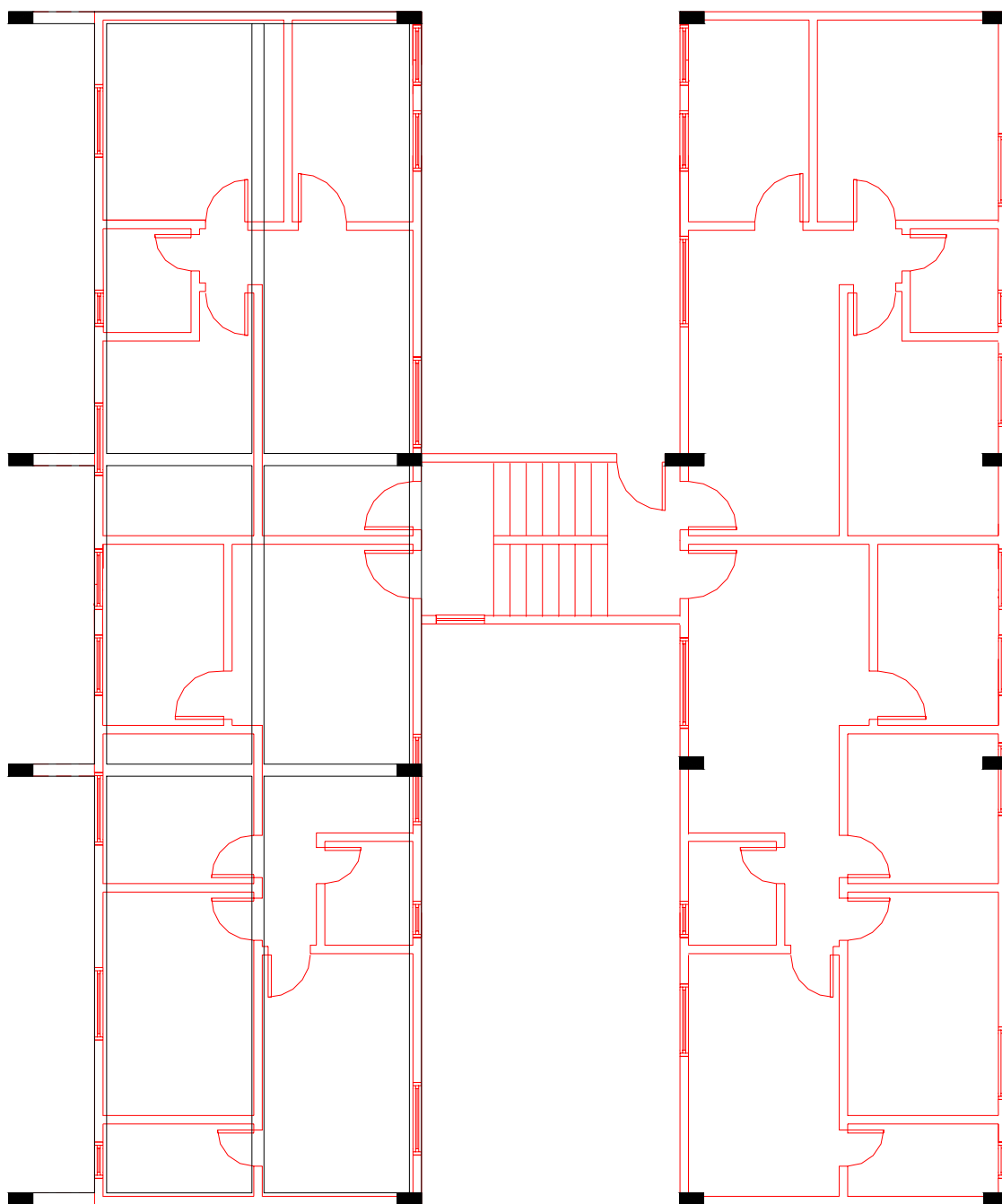


FIGURA B.12 – Residencial “J” – Bloco 5 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a primeira solução de vigamento de pilotis

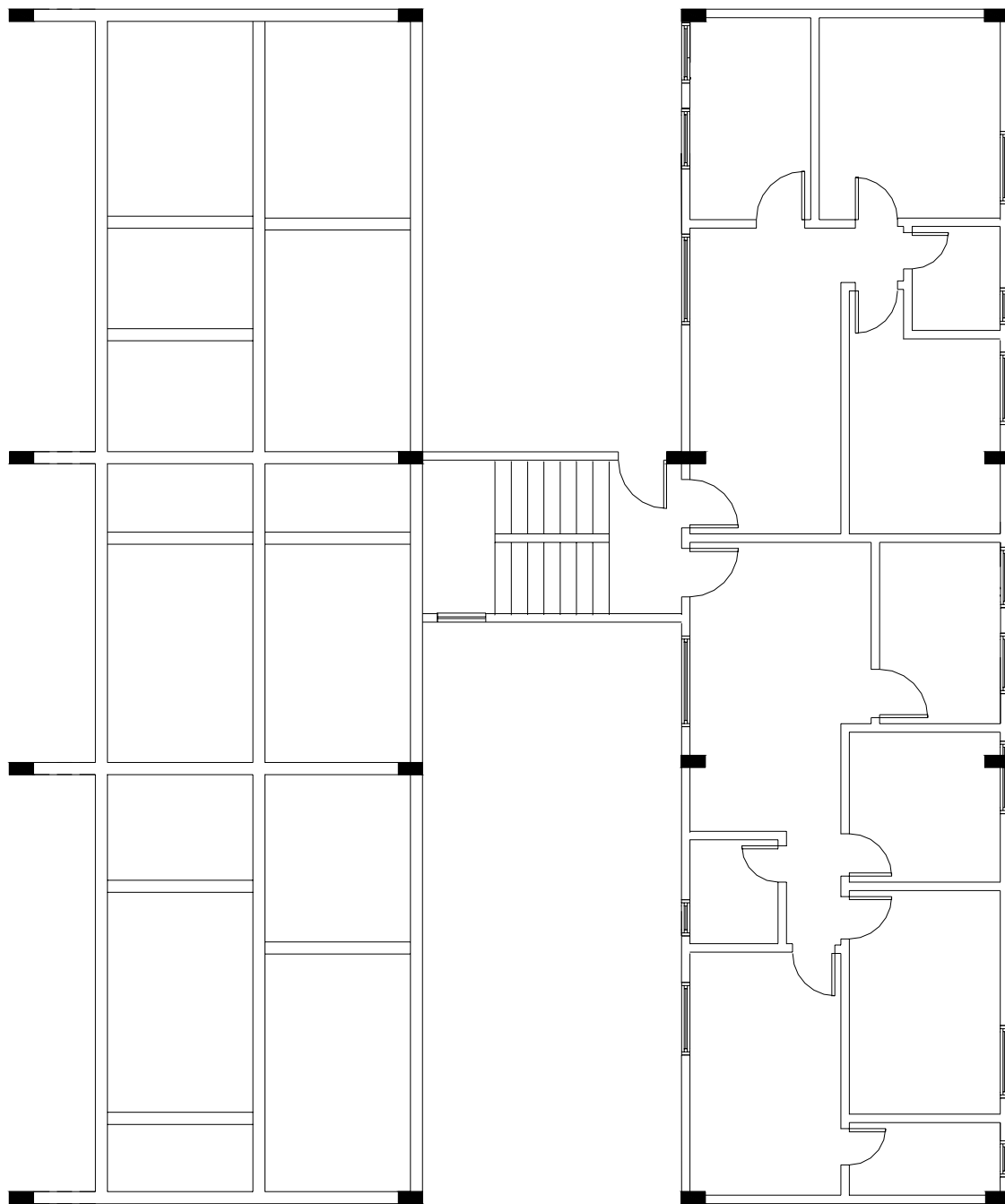


FIGURA B.13 – Residencial “J” – Bloco 5 – Segunda solução de vigamento de pilotis

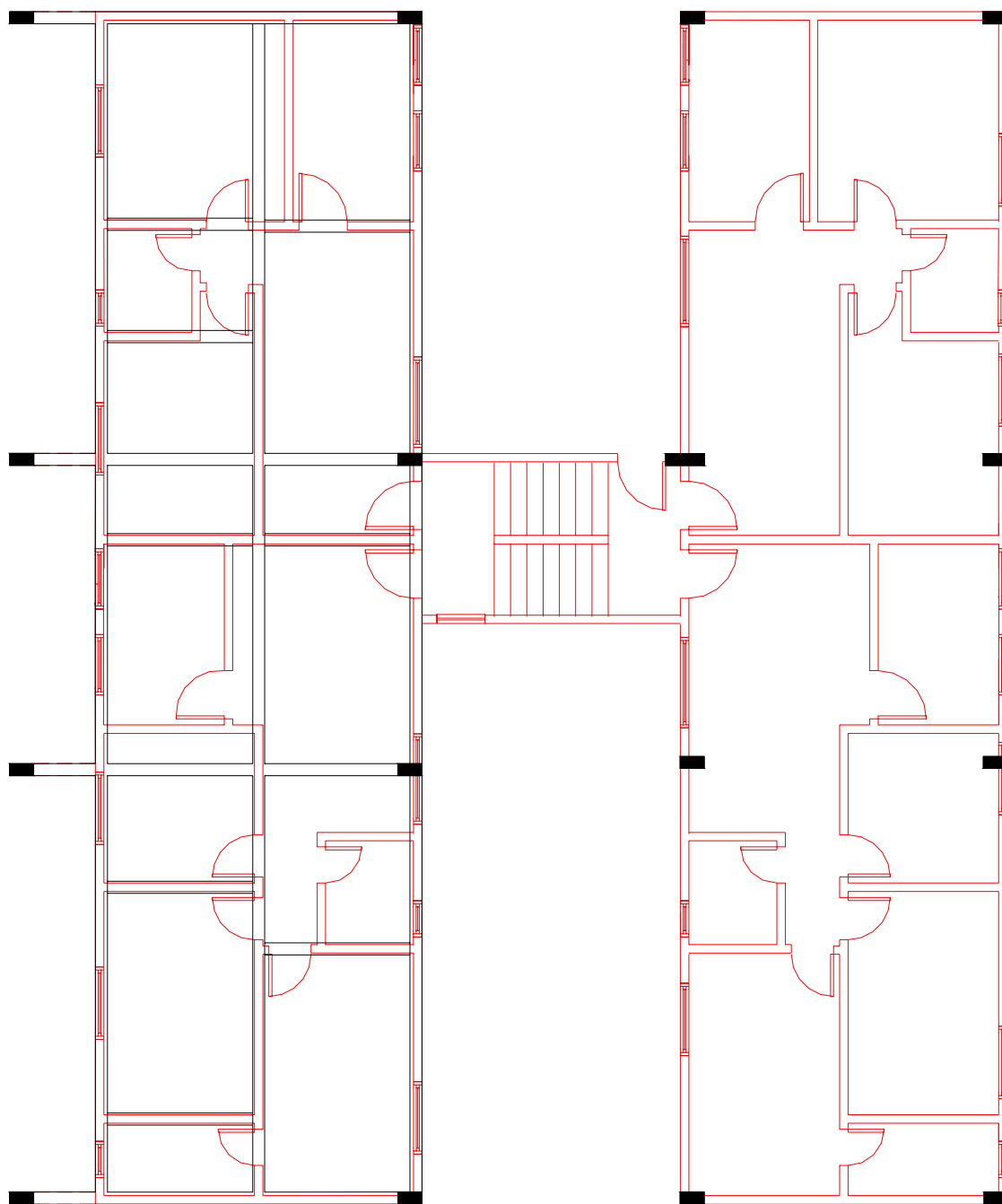


FIGURA B.14 – Residencial “J” – Bloco 5 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a segunda solução de vigamento de pilotis

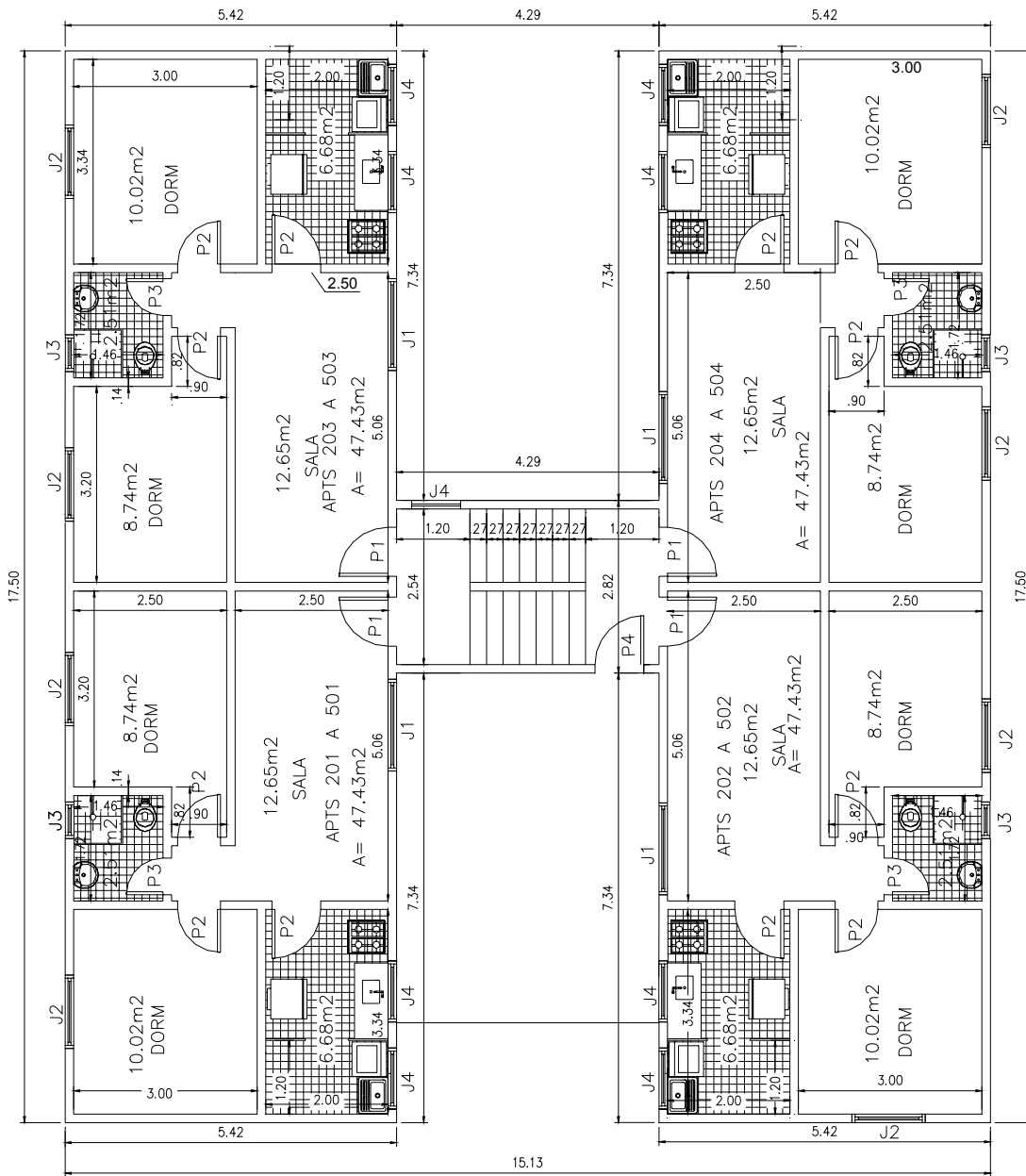


FIGURA B.15 – Residencial “J” – Bloco 4 – Pavimento tipo

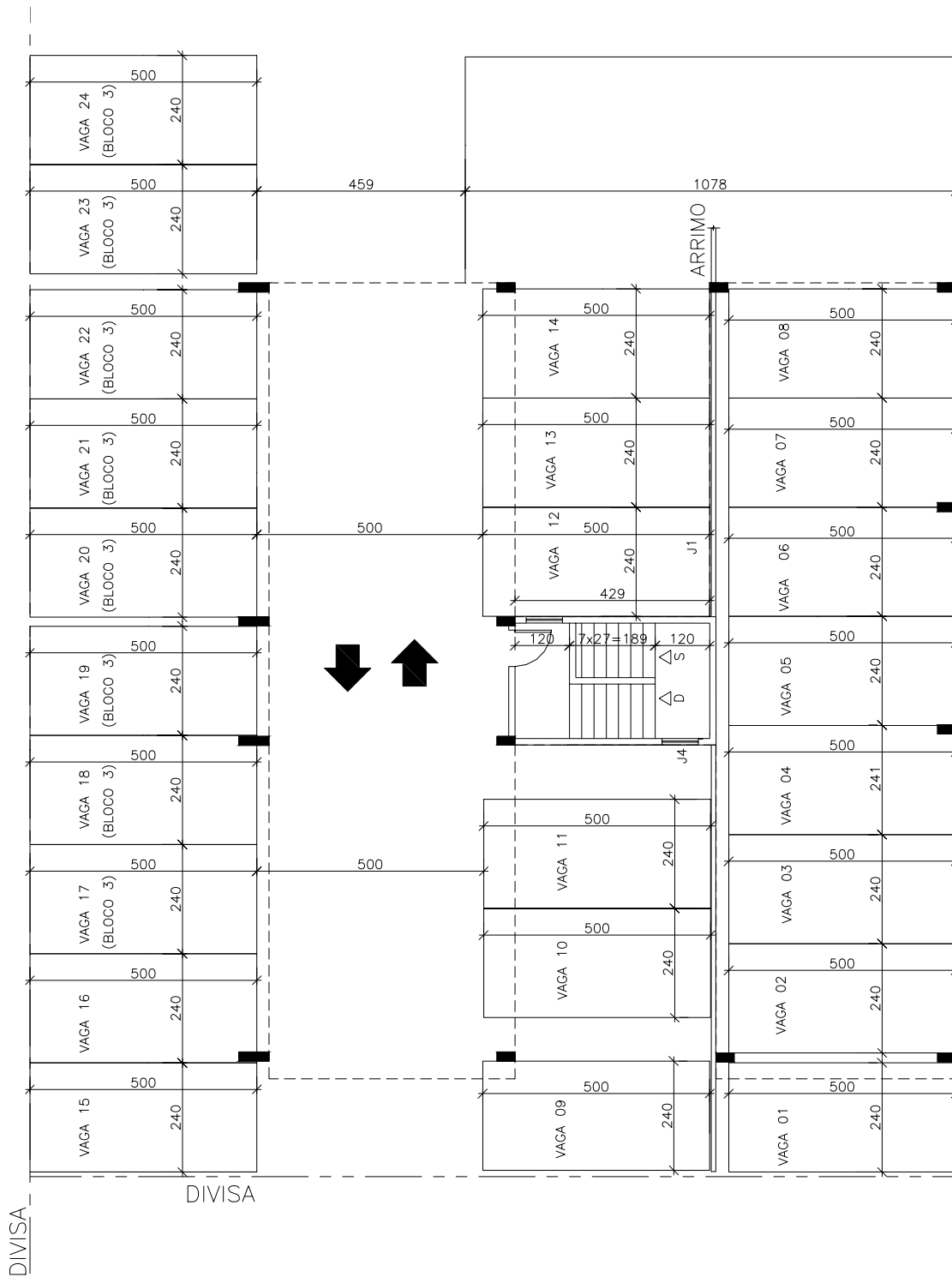


FIGURA B.16 – Residencial “J” – Bloco 4 – Garagem

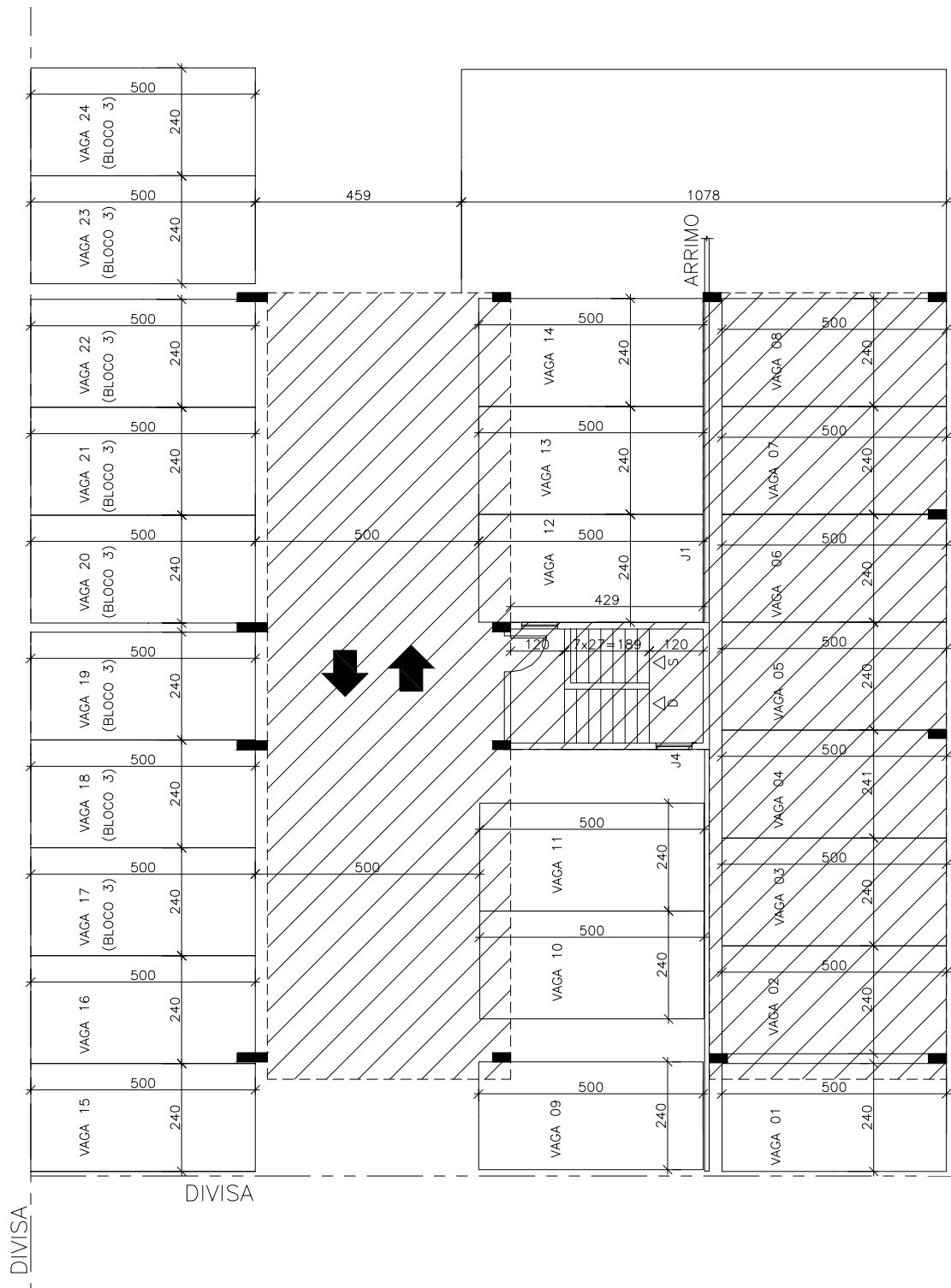


FIGURA B.17 – Residencial “J” – Bloco 4 – Projeção do pavimento tipo sobre as garagens

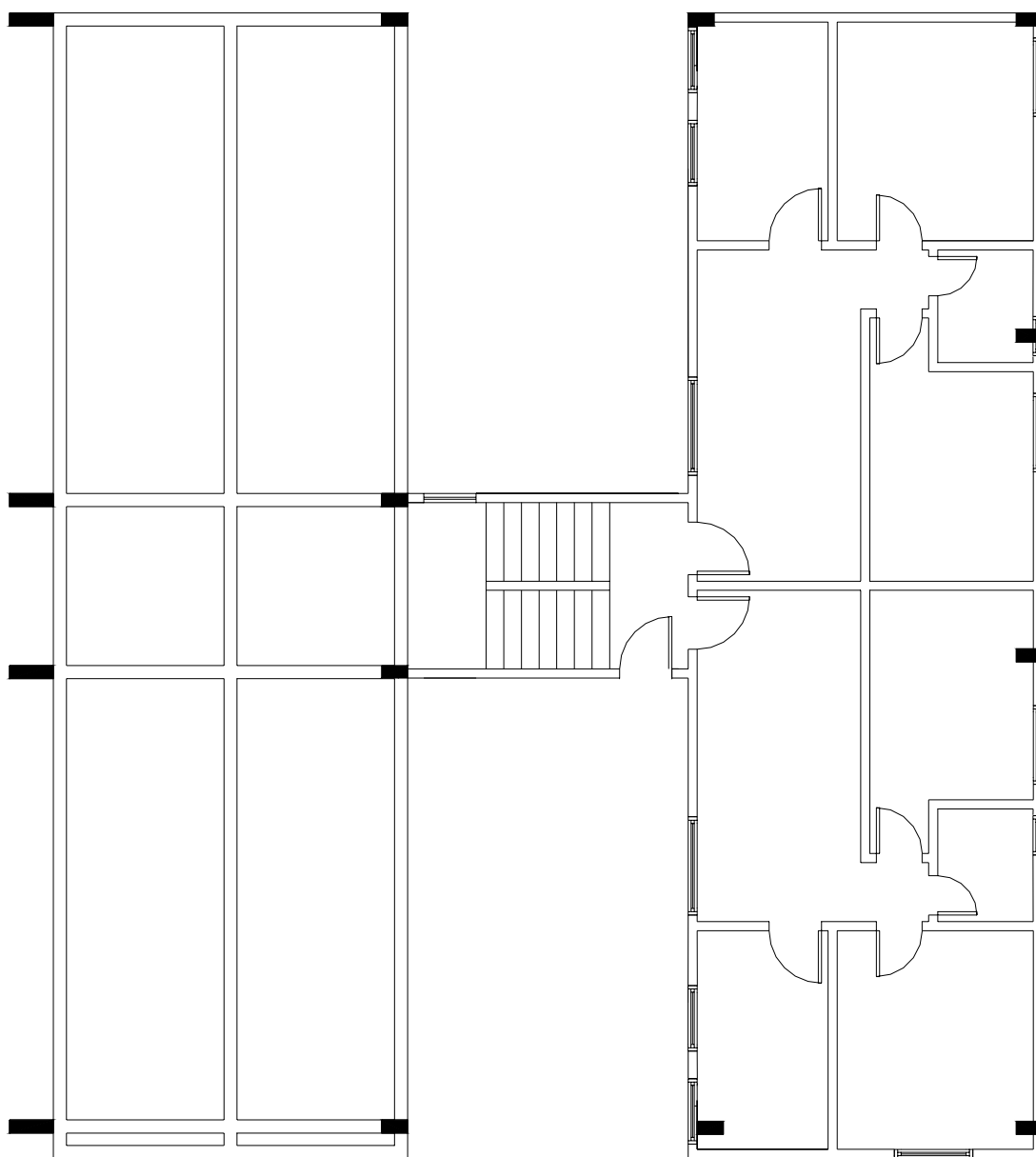


FIGURA B.18 – Residencial “J” – Bloco 4 – Primeira solução de vigamento de pilotis

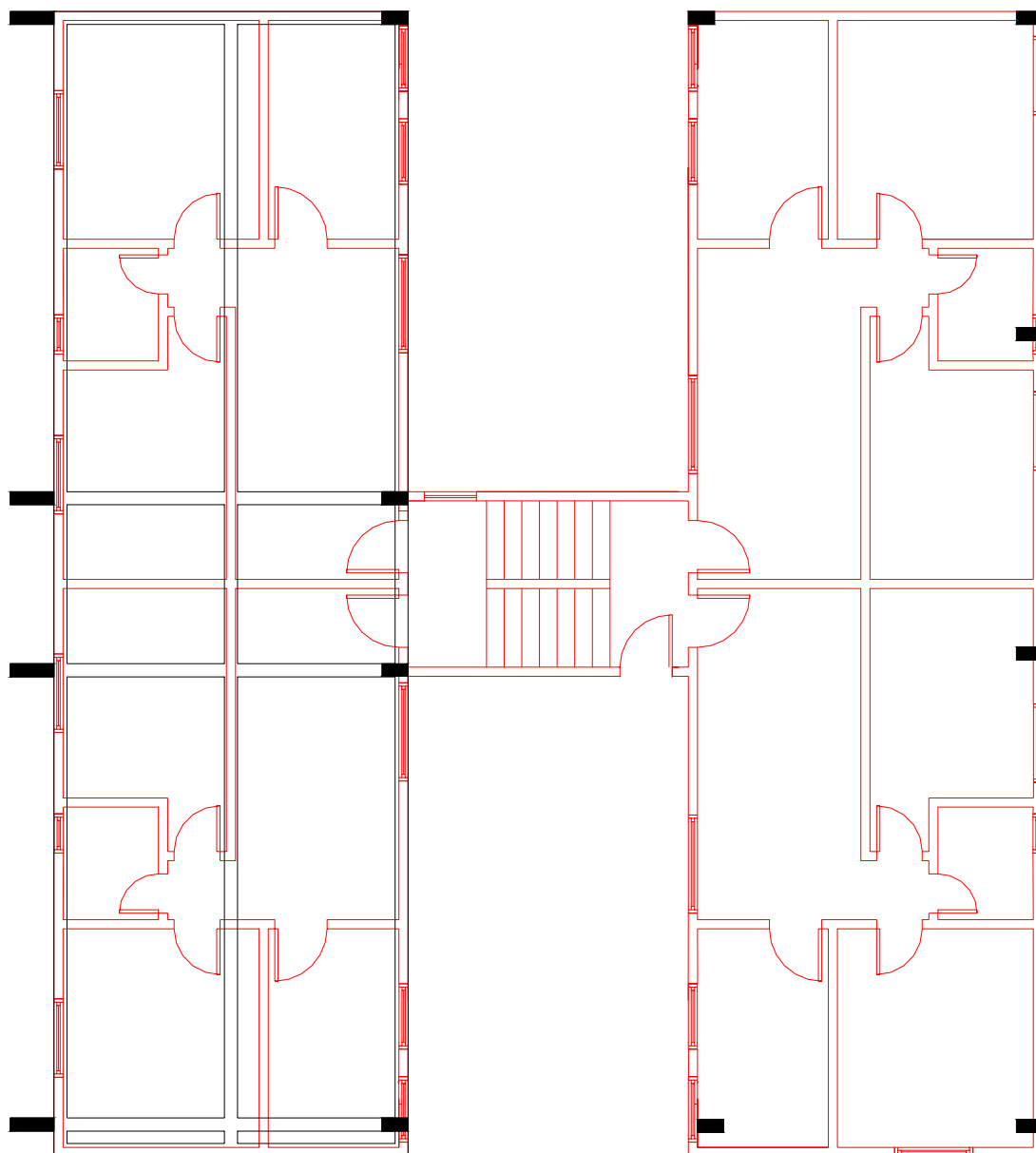


FIGURA B.19 – Residencial “J” – Bloco 4 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a primeira solução de vigamento de pilotis

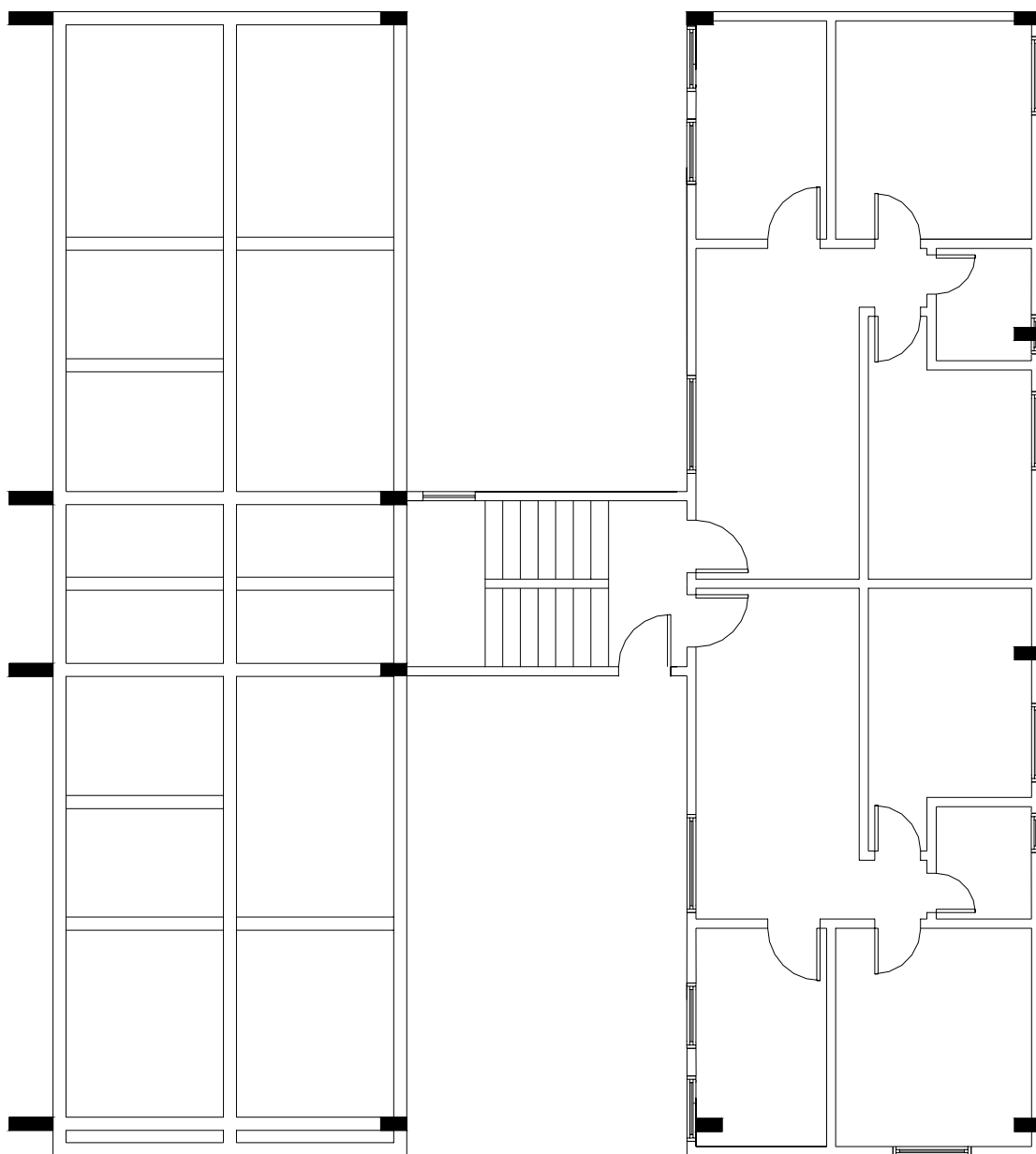


FIGURA B.20 – Residencial “J” – Bloco 4 – Segunda solução de vigamento de pilotis

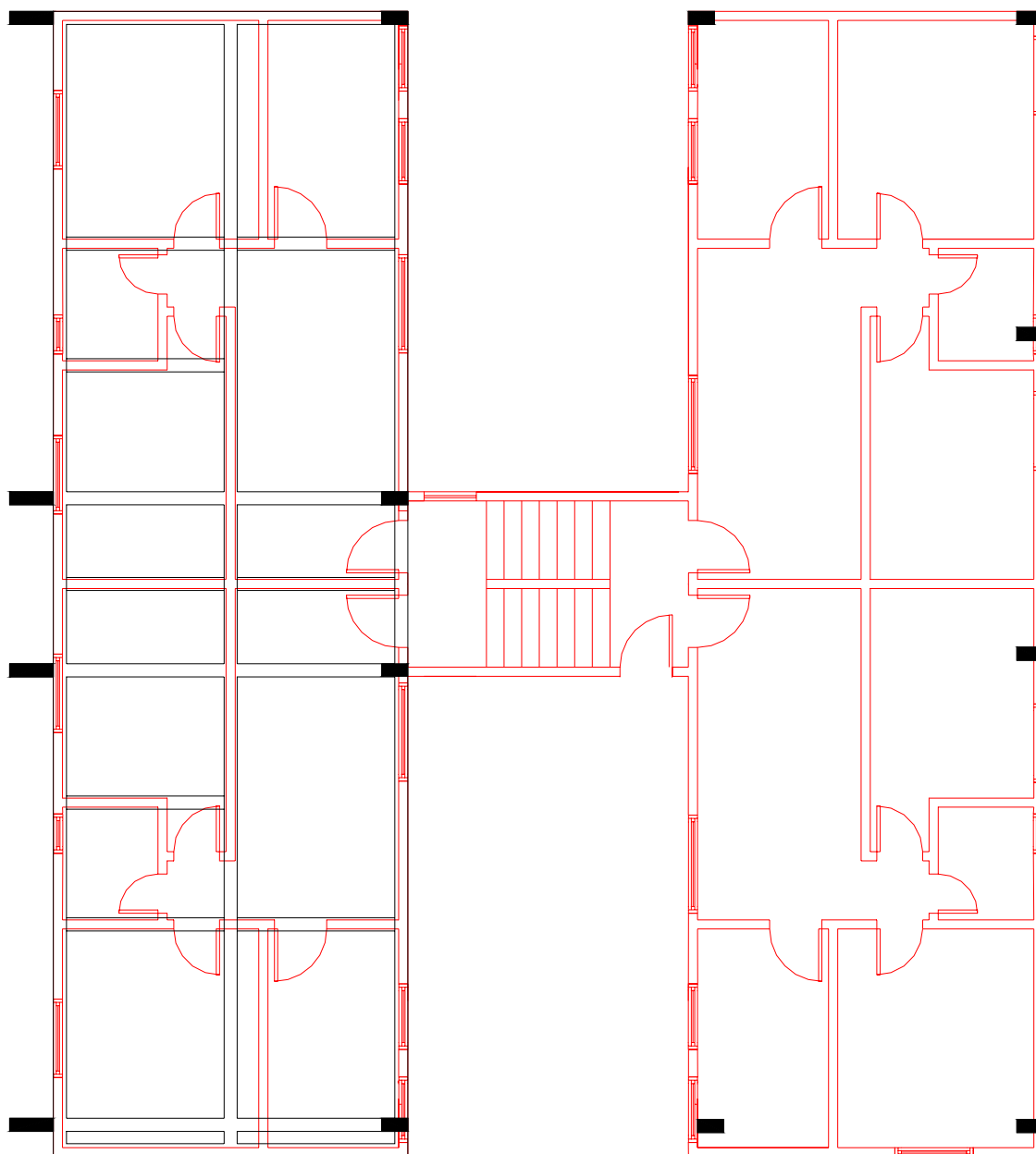


FIGURA B.21 – Residencial “J” – Bloco 4 – Superposição das alvenarias do pavimento tipo sobre a segunda solução de vigamento de pilotis

Anexo C

Neste anexo, encontram-se as armações de lajes, vigas e pilares do prédio “C”.

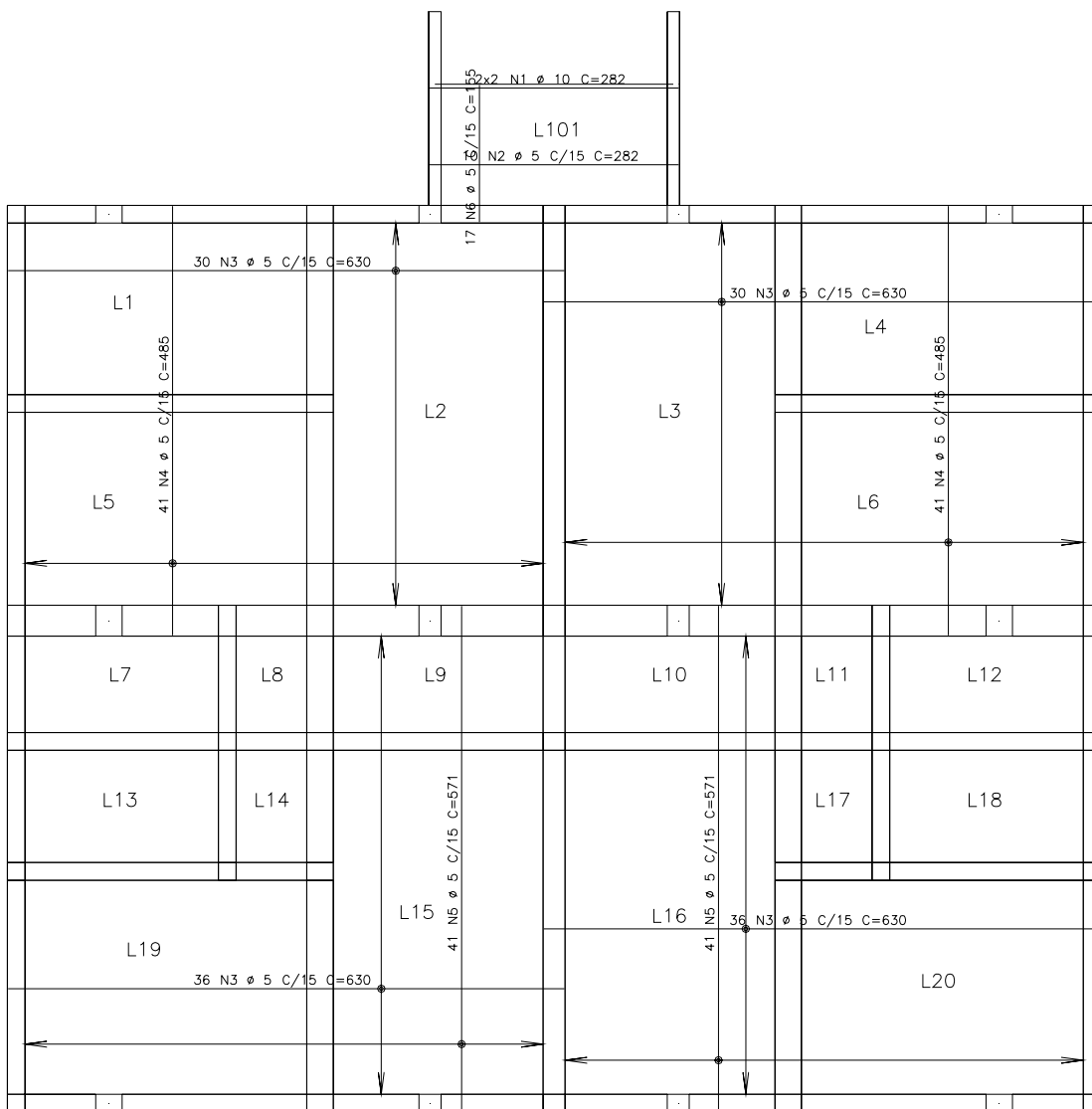


FIGURA C.1 – Prédio “C” – Opção 1 – Armação positiva das lajes

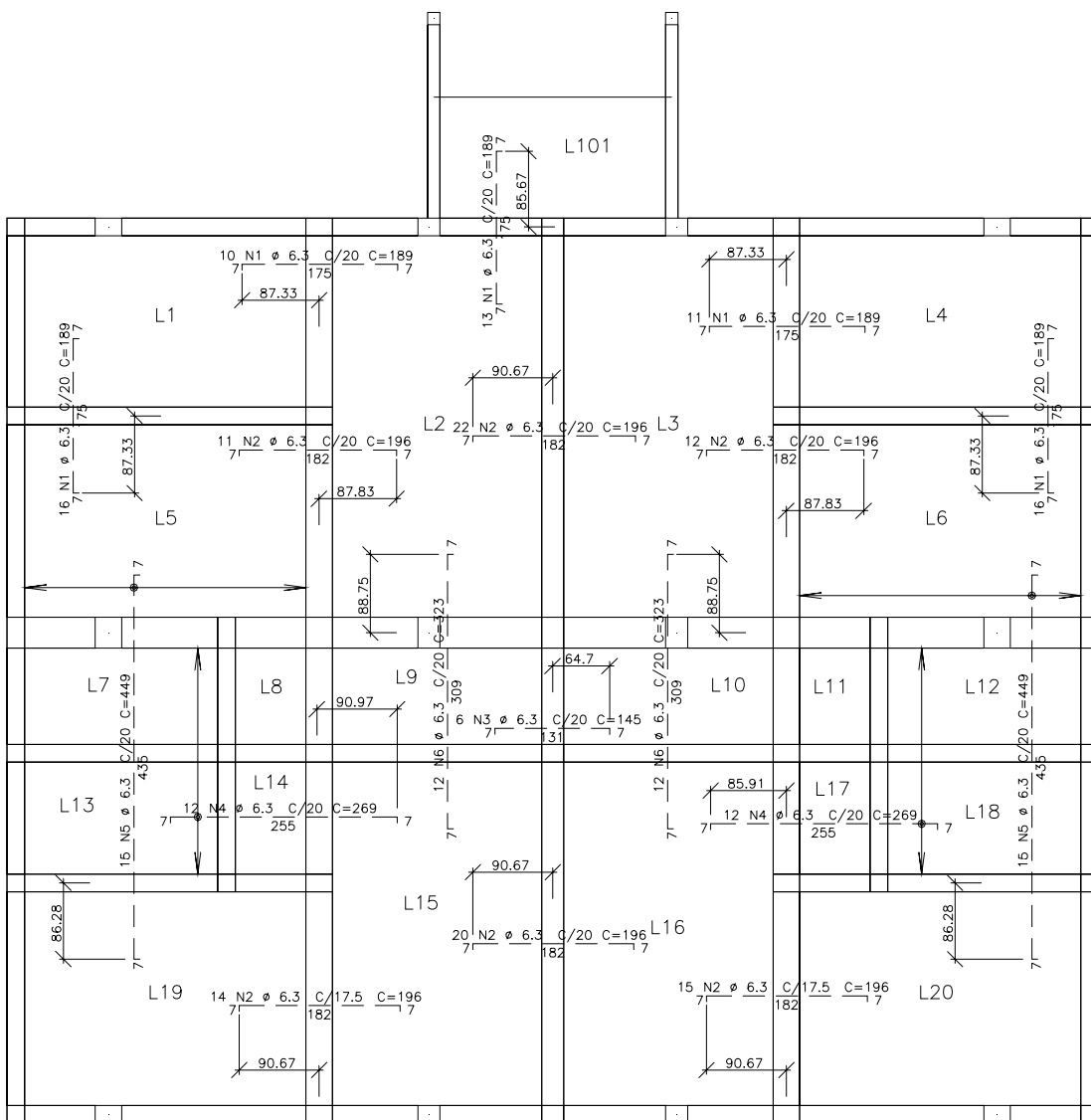


FIGURA C.2 – Prédio “C” – Opção 1 – Armação negativa das lajes

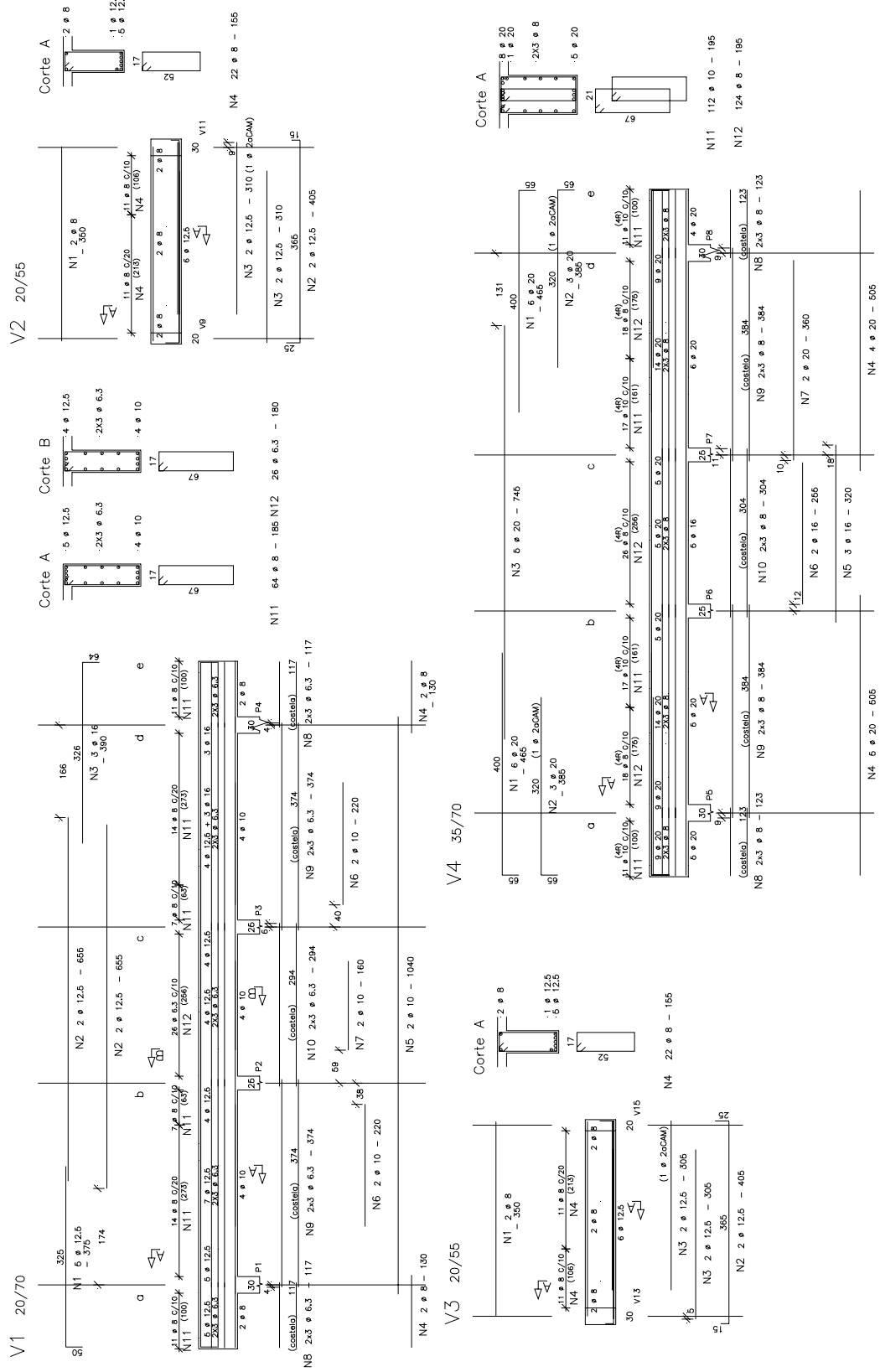


FIGURA C.3 – Prédio “C” – Opção 1 – Armação das vigas V1, V2, V3 e V4

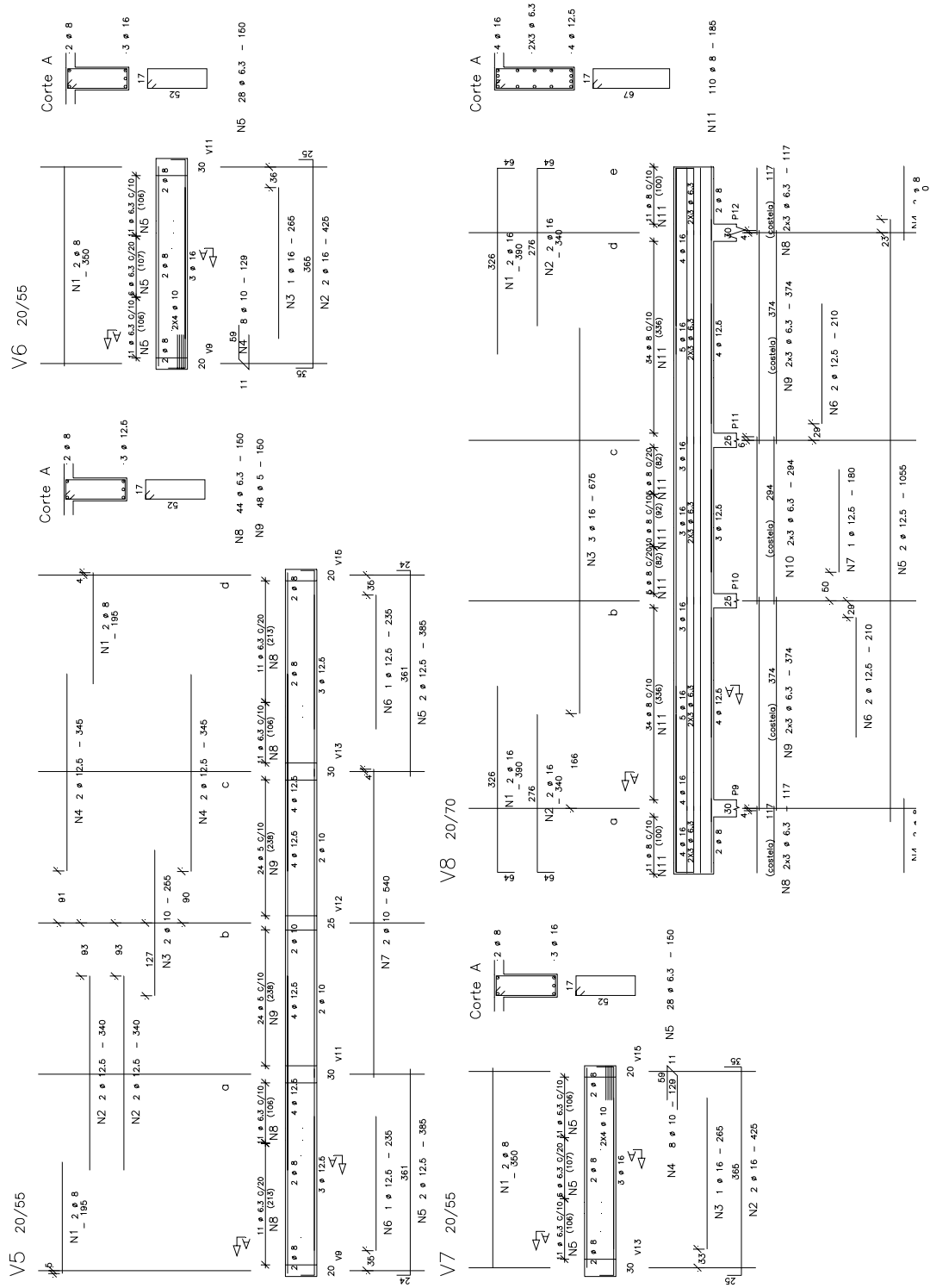


FIGURA C.4 – Prédio “C” – Opção “C” – Armação das vigas V5, V6, V7 e V8

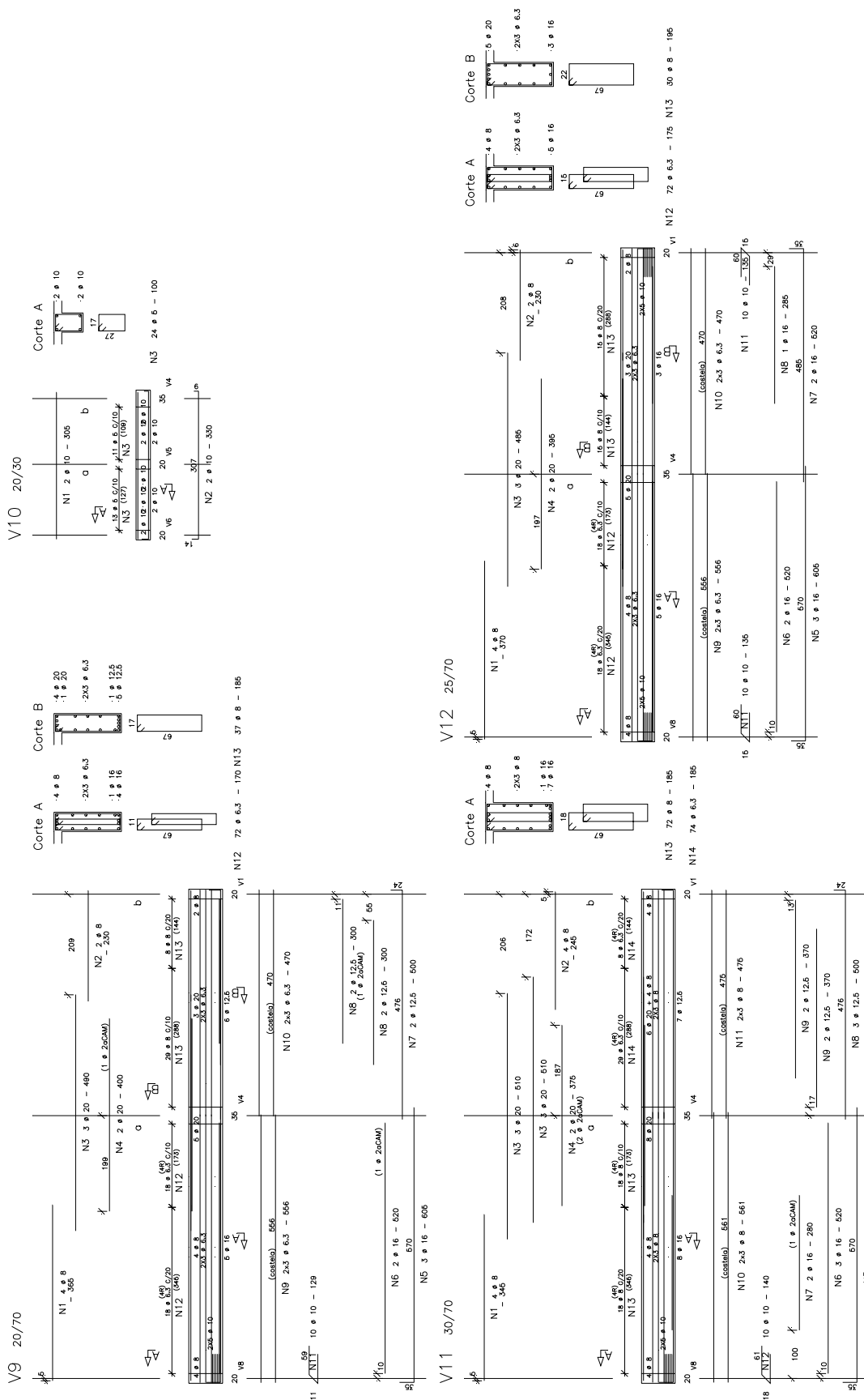


FIGURA C.5 – Prédio “C” – Opção 1 – Armação das vigas V9, V10, V11 e V12

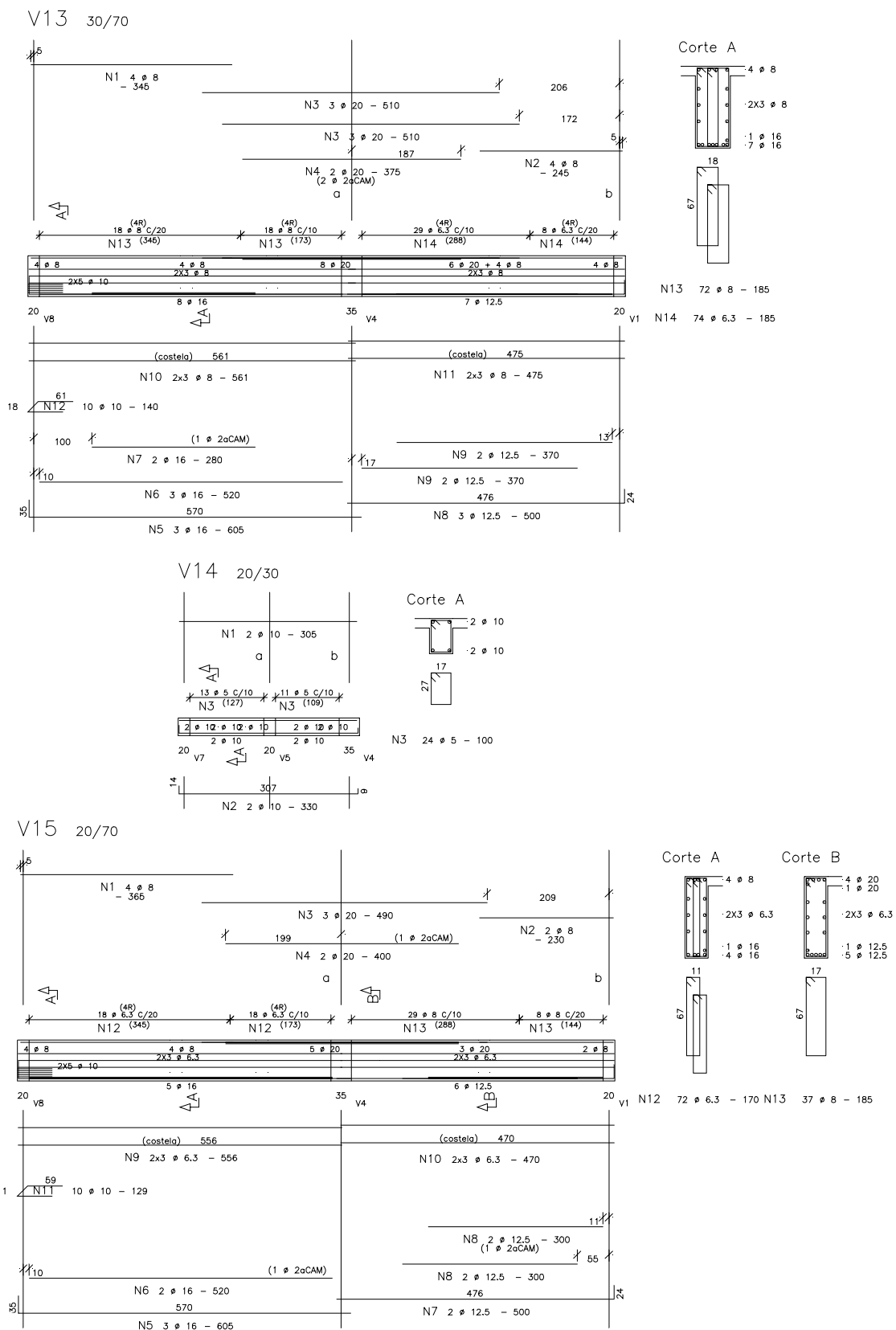


FIGURA C.6 – Prédio “C” – Opção 1 – Armação das vigas V13, V14 e V15

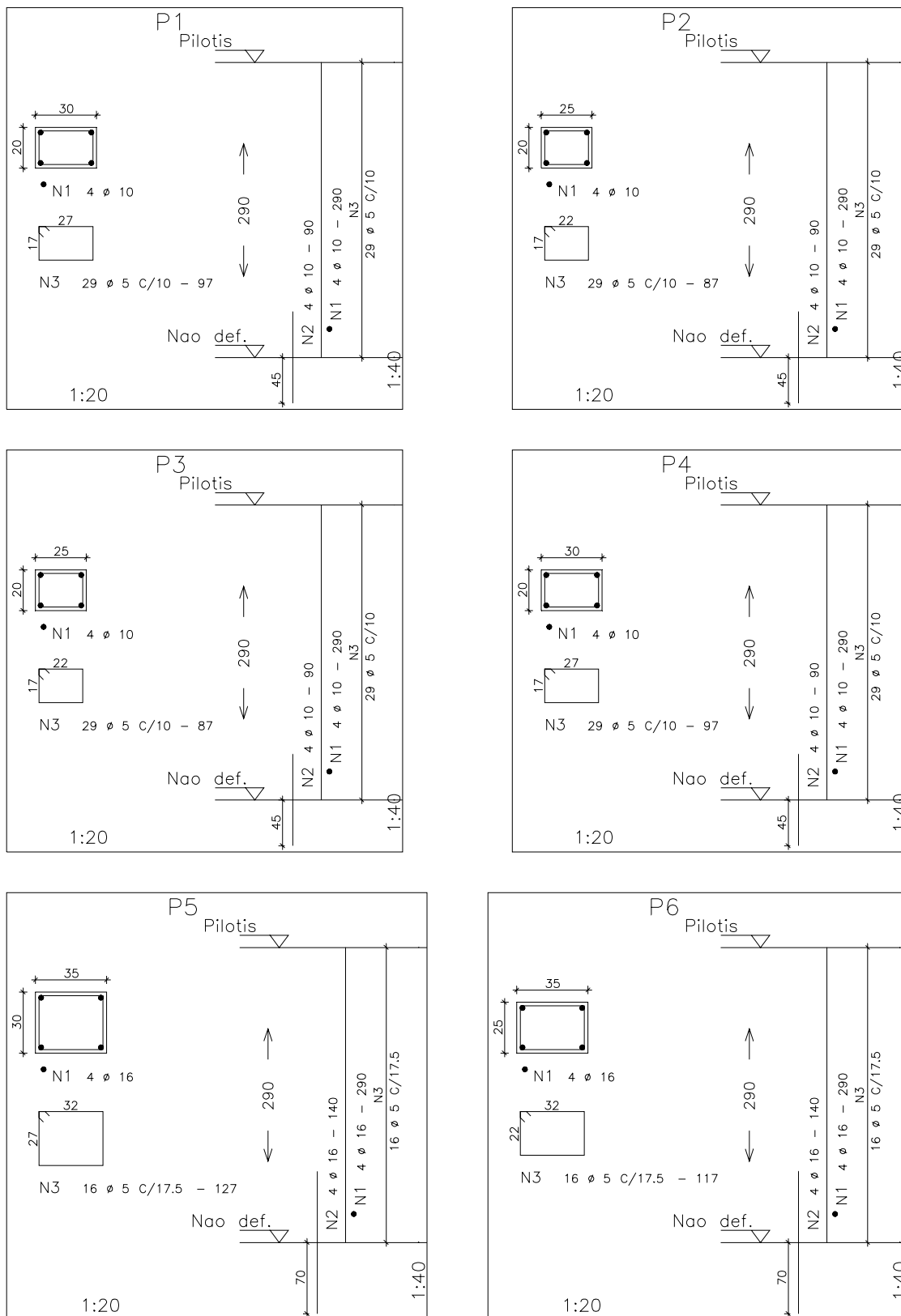


FIGURA C.7 – Prédio “C” – Opção 1 – Armação dos pilares P1 a P6

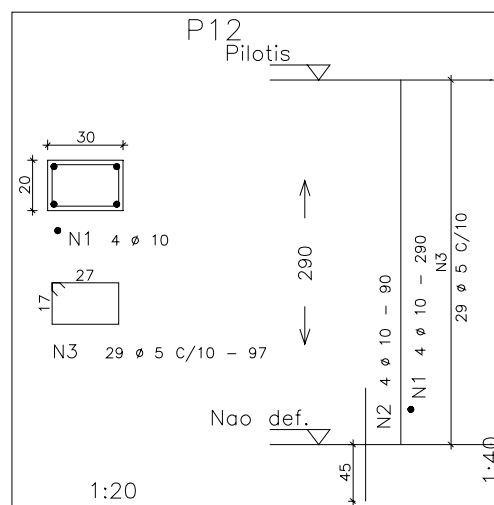
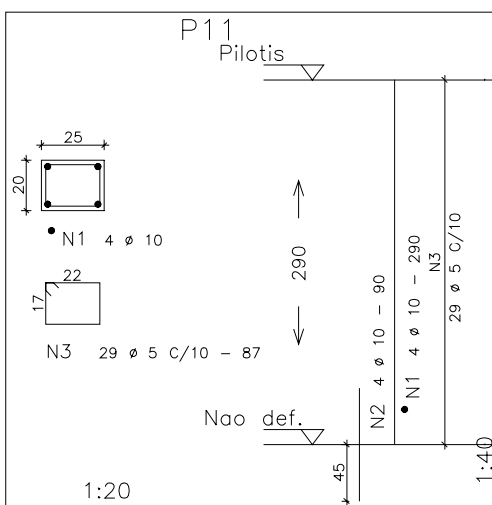
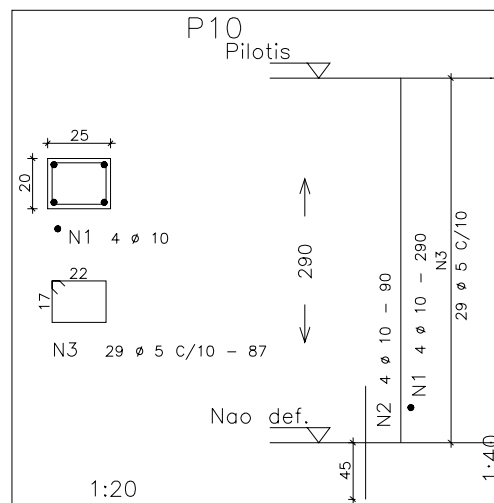
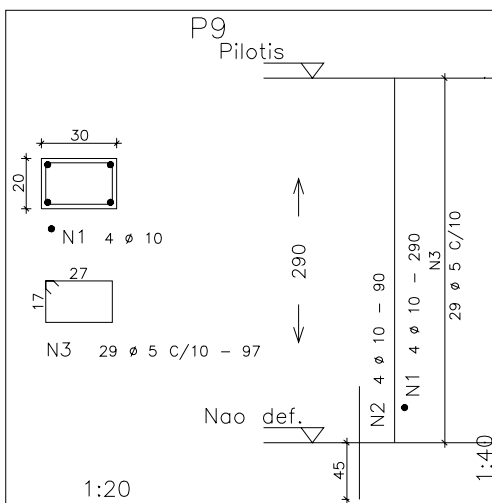
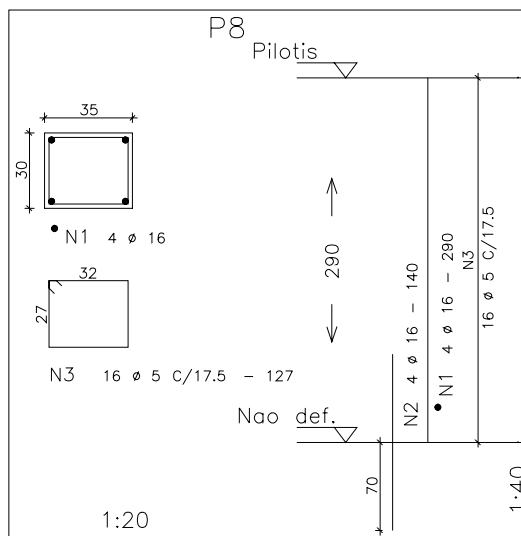
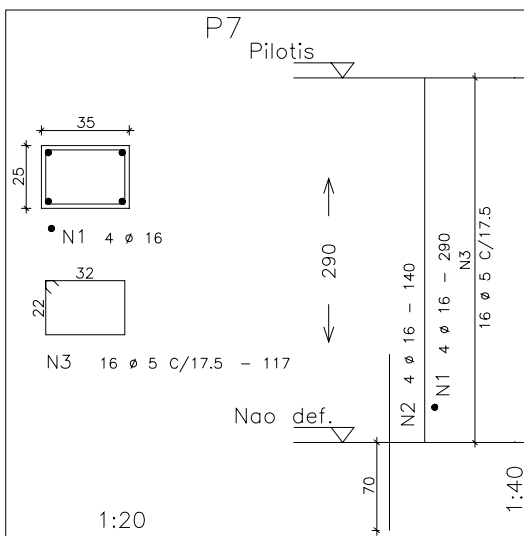


FIGURA C.8 – Prédio “C” – Opção 1 – Armação das pilares P7 a P12

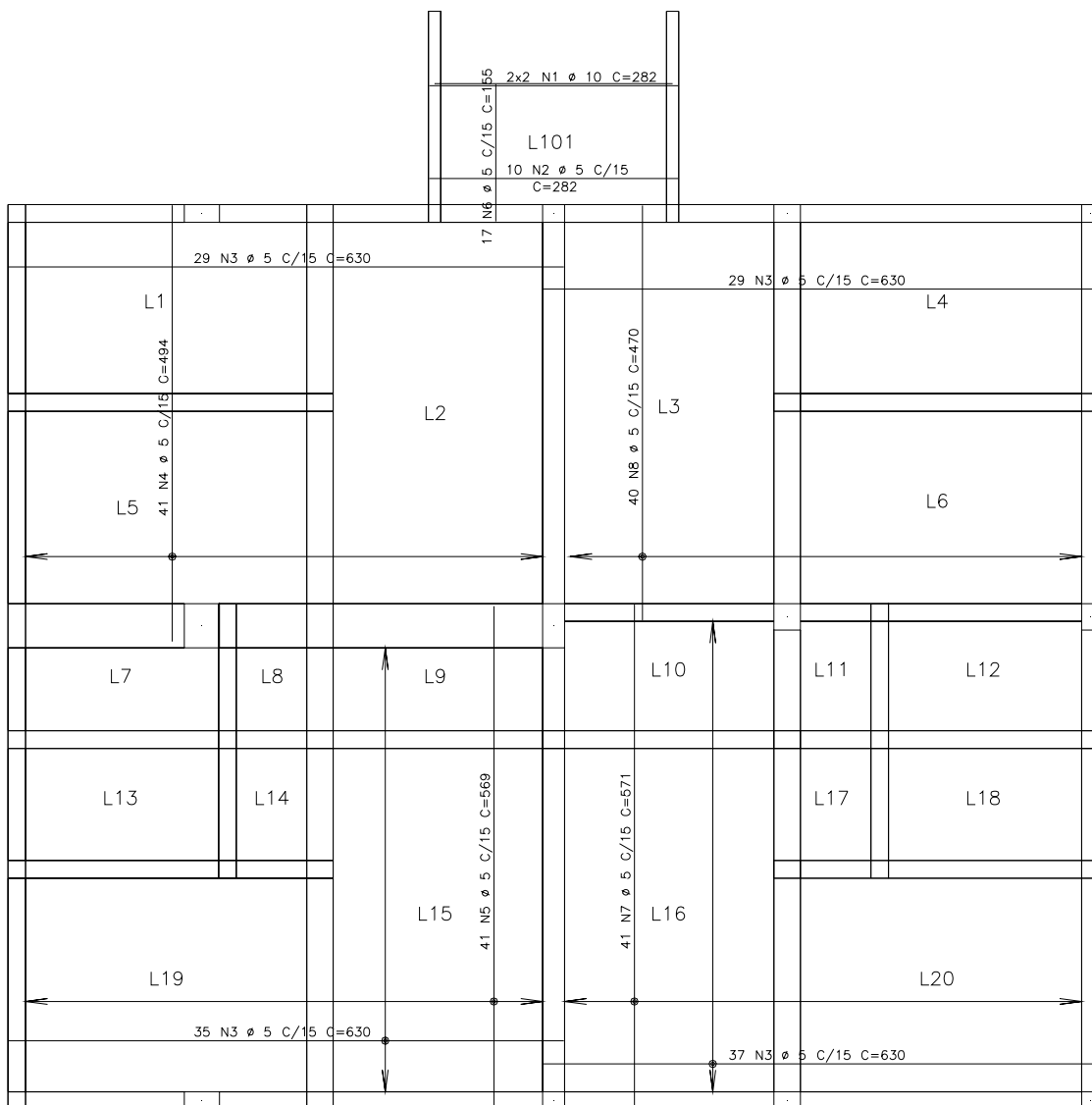


FIGURA C.9 – Prédio “C” – Opção 2 – Armação positiva das lajes

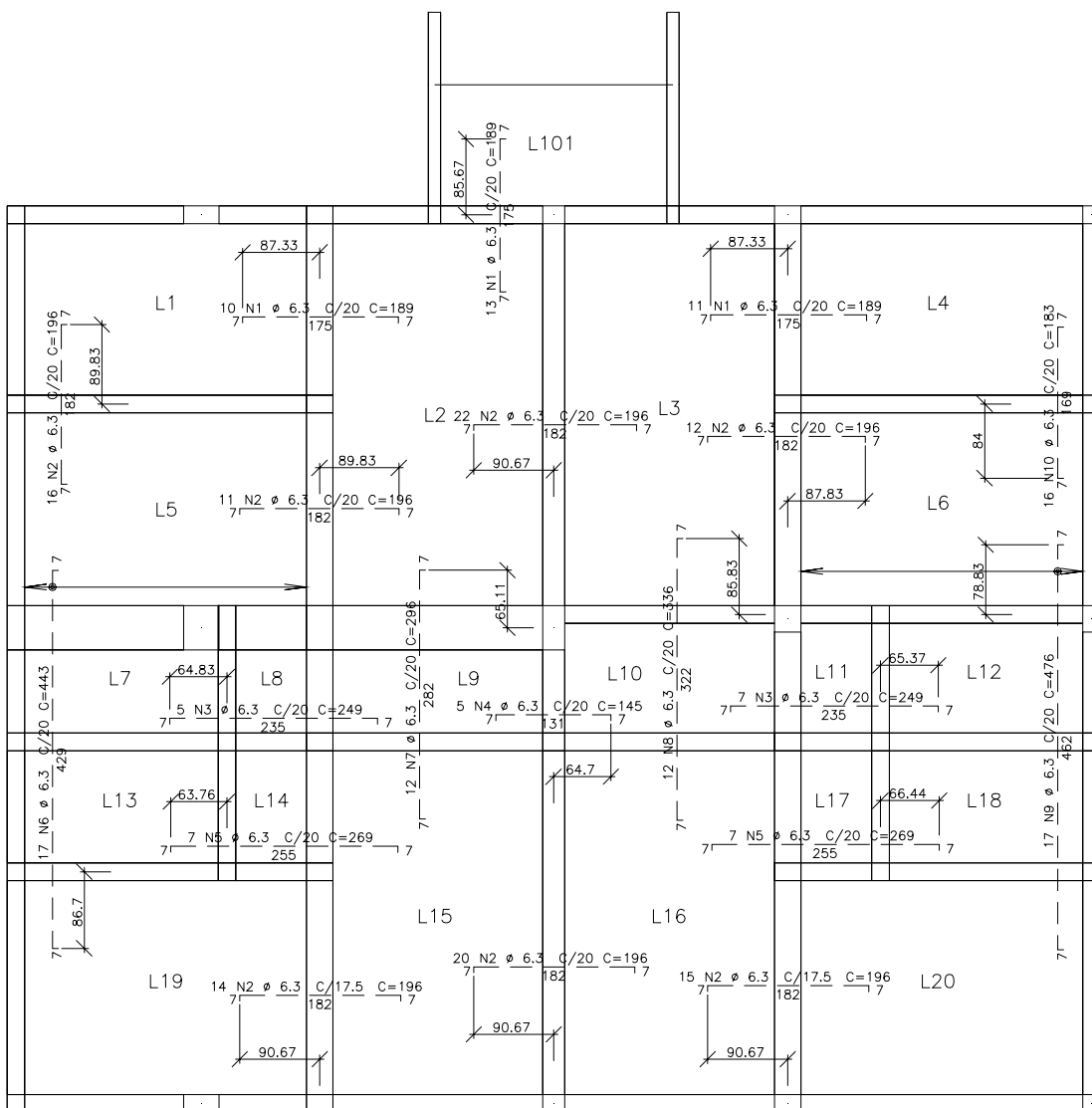


FIGURA C.10 – Prédio “C” – Opção 2 – Armação negativa das lajes

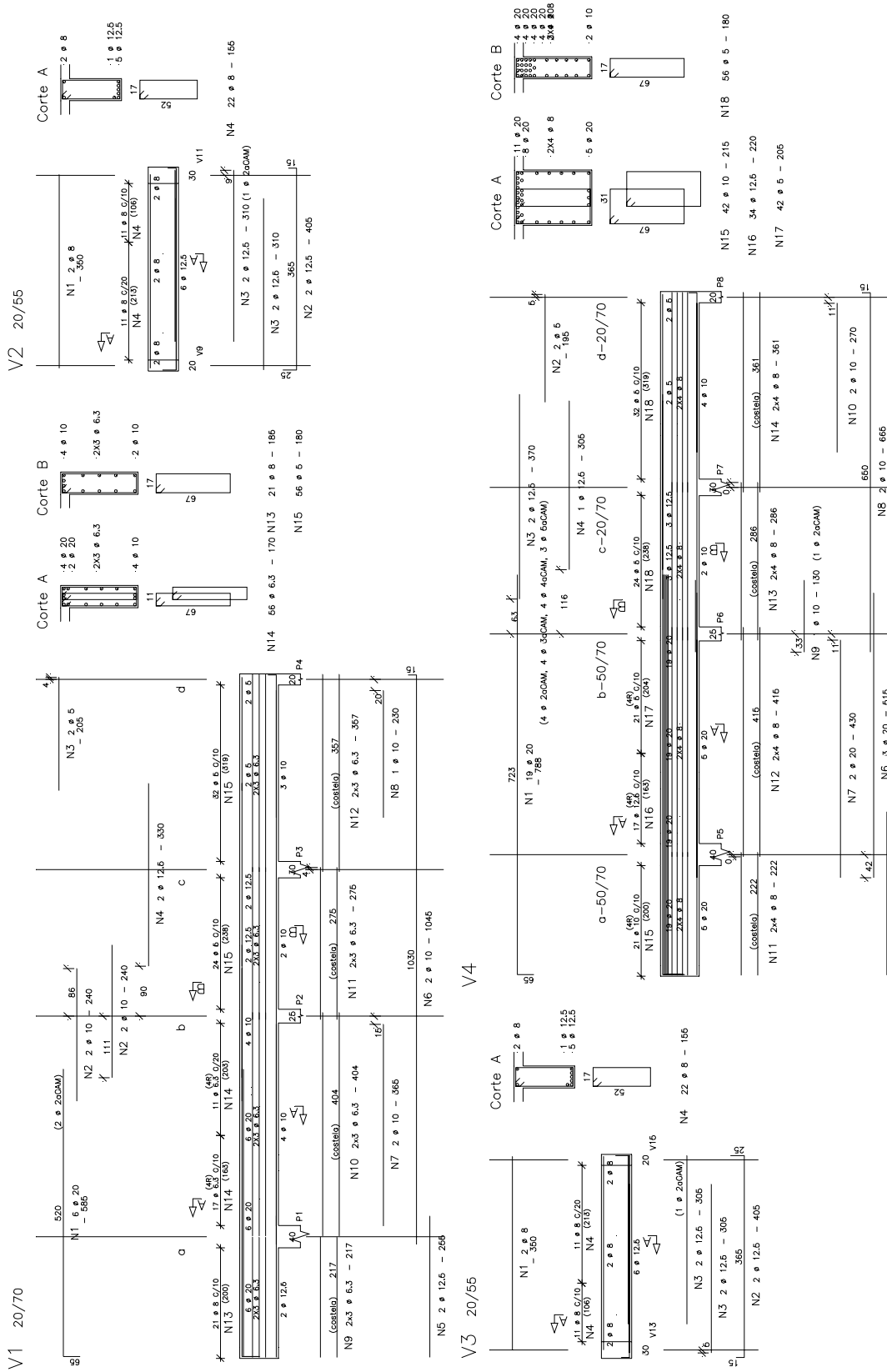


FIGURA C.11 – Prédio “C” – Opção 2 – Armações das vigas V1, V2, V3 e V4

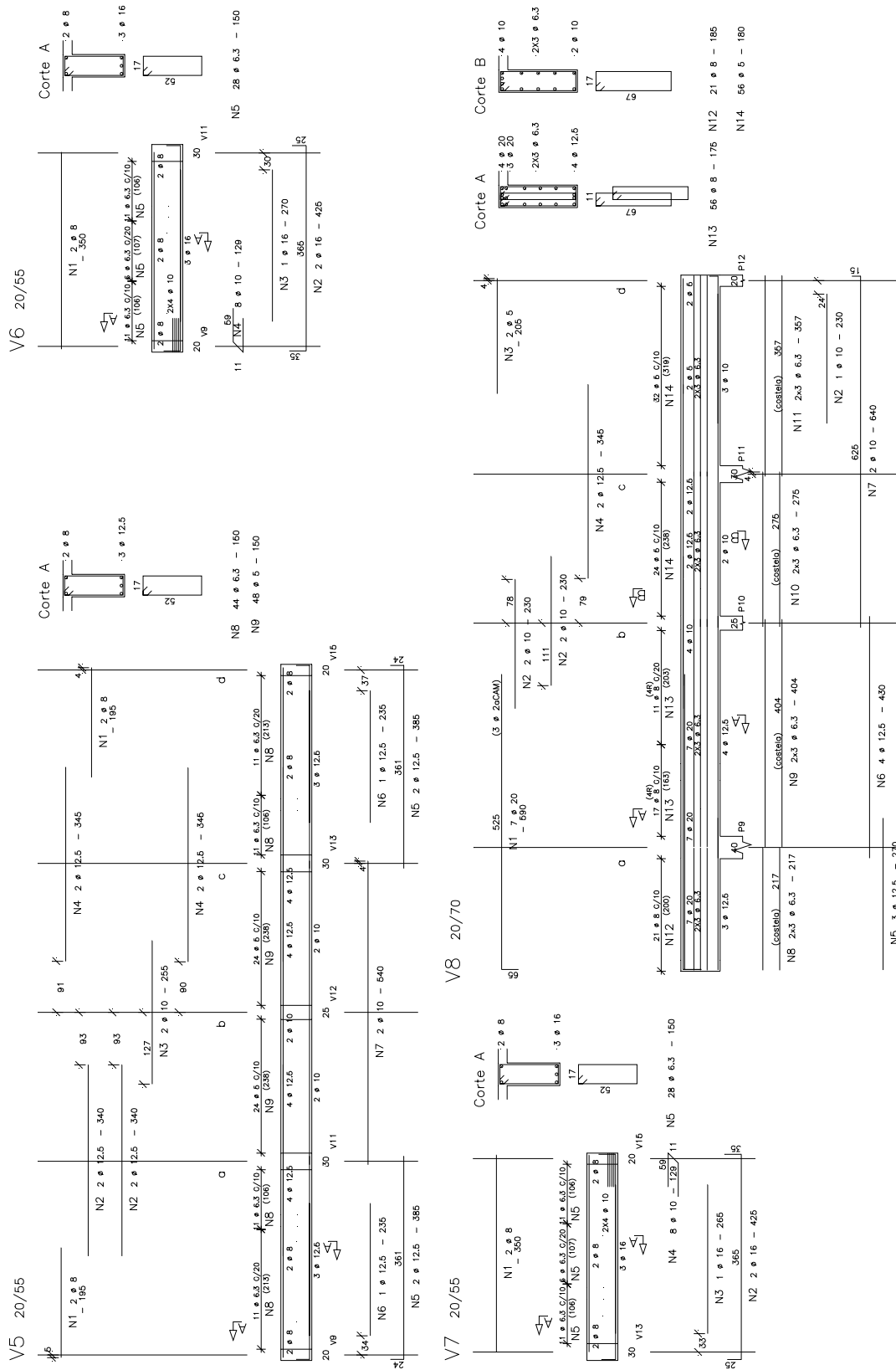


Figura C.12 – Prédio “C” – Opção 2 – Armação das vigas V5, V6, V7 e V8

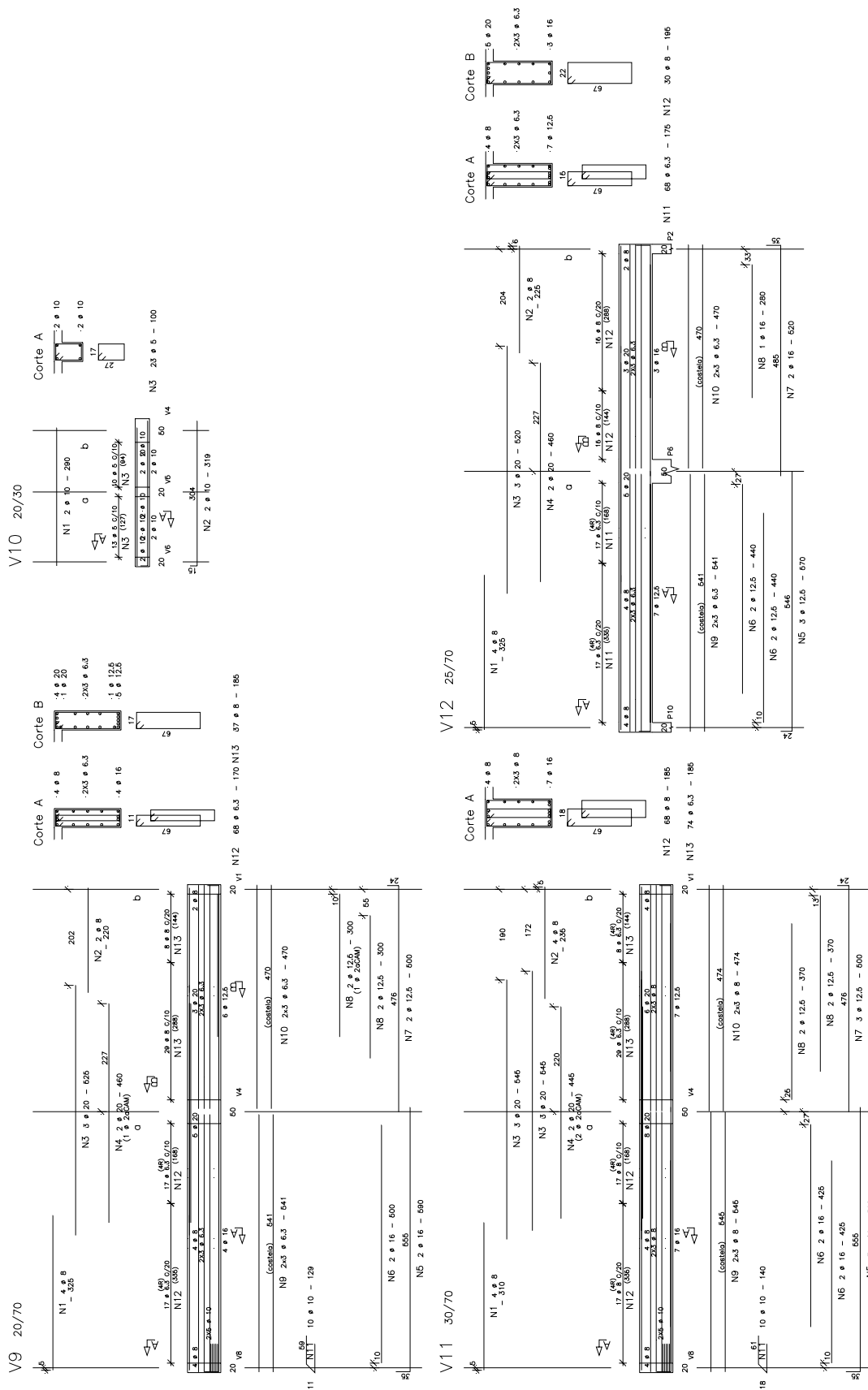
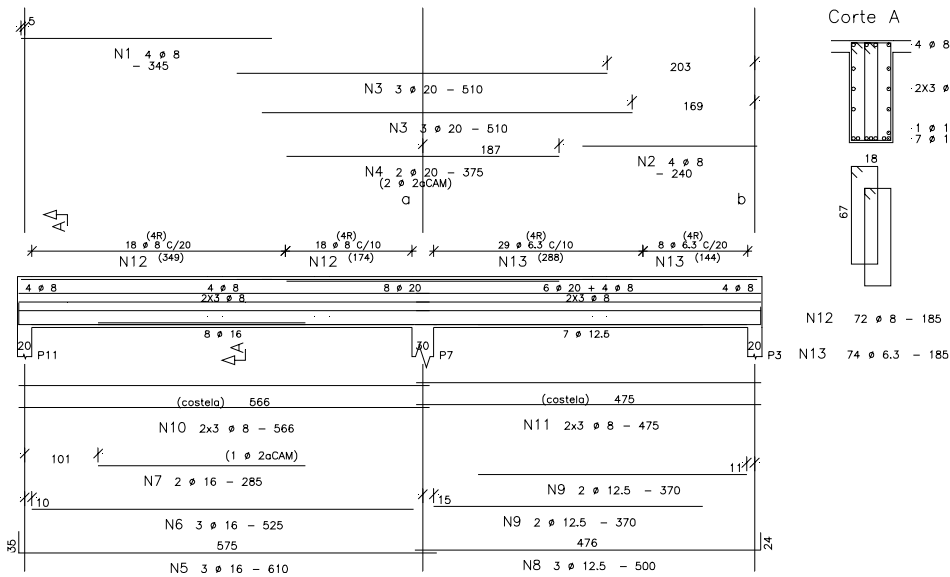
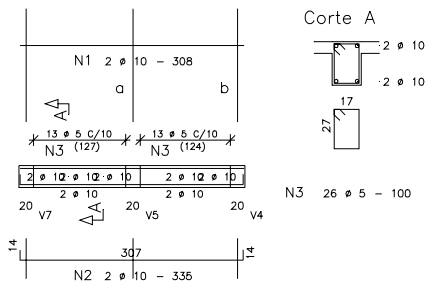


FIGURA C.13 – Prédio “C” – Opção 2 – Armação das vigas V9, V10, V11 e V12

V13 30/70



V14 20/30



V15 20/70

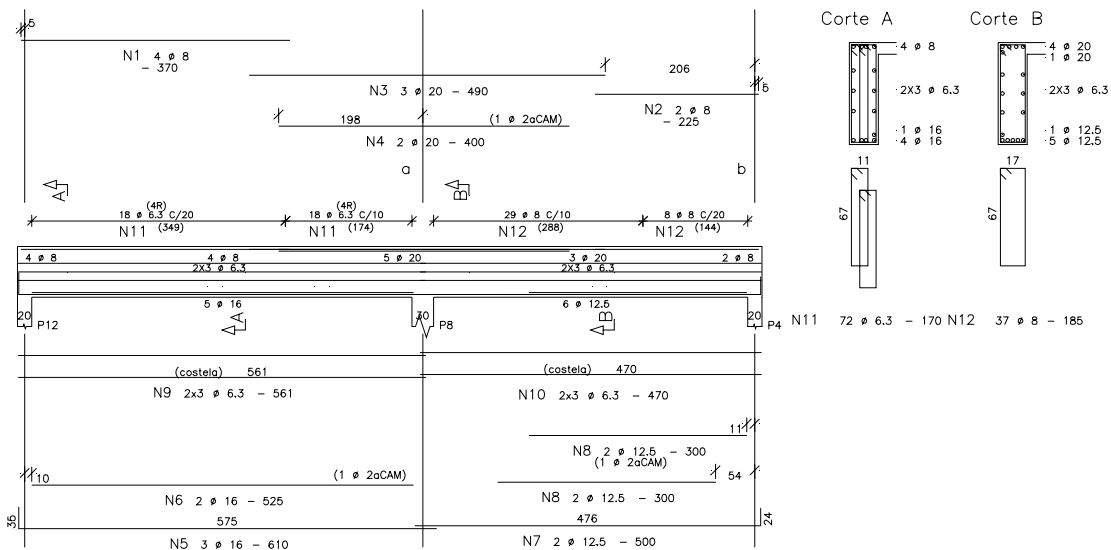


FIGURA C.14 – Prédio “C” – Opção 2 – Armação das vigas V13, V14 e V15

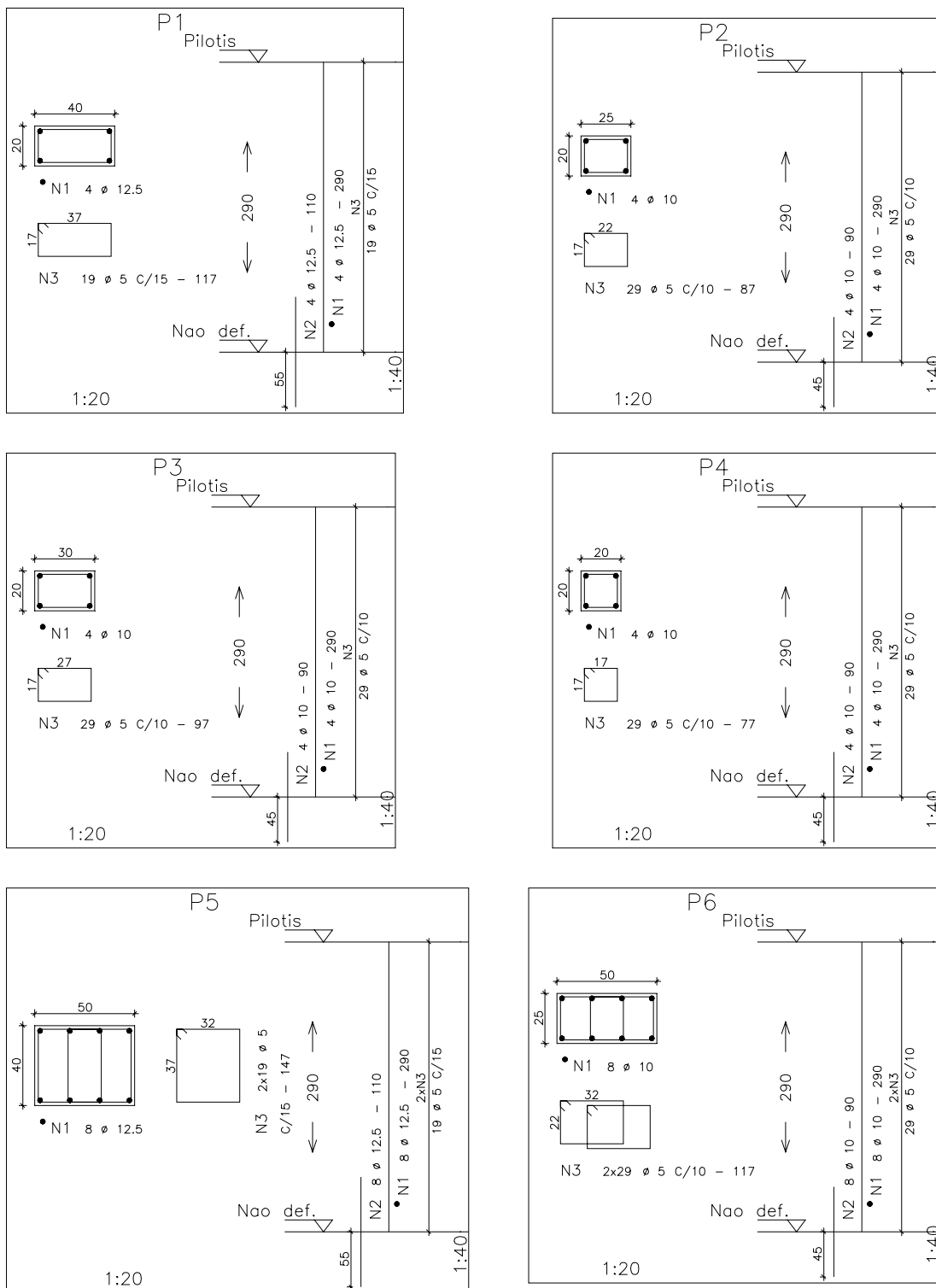


FIGURA C.15 – Prédio “C” – Opção 2 – Armação dos pilares P1 a P6

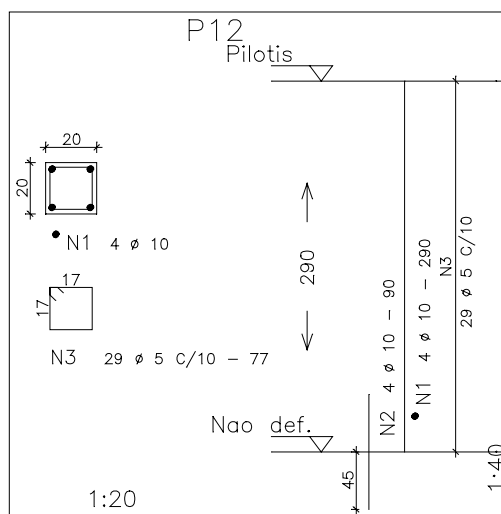
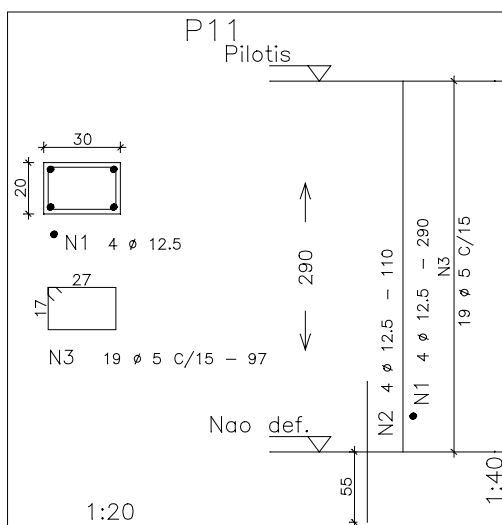
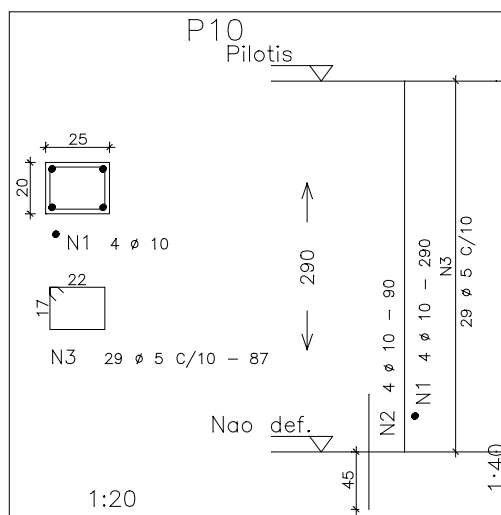
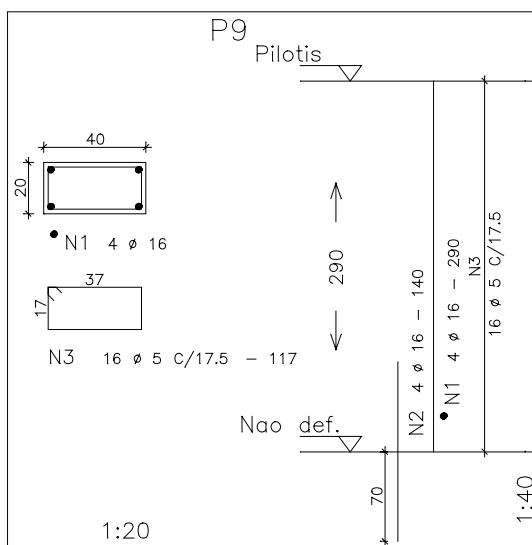
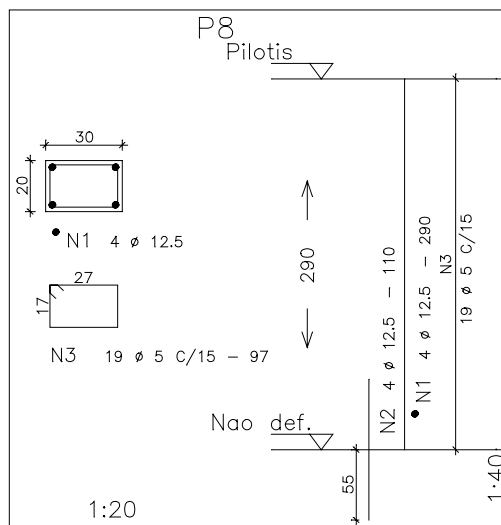
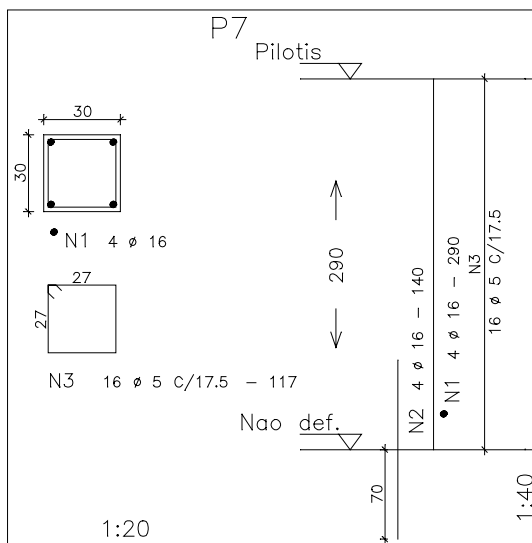


FIGURA C.16 – Prédio “C” – Opção 2 – Armação dos pilares P7 a P12

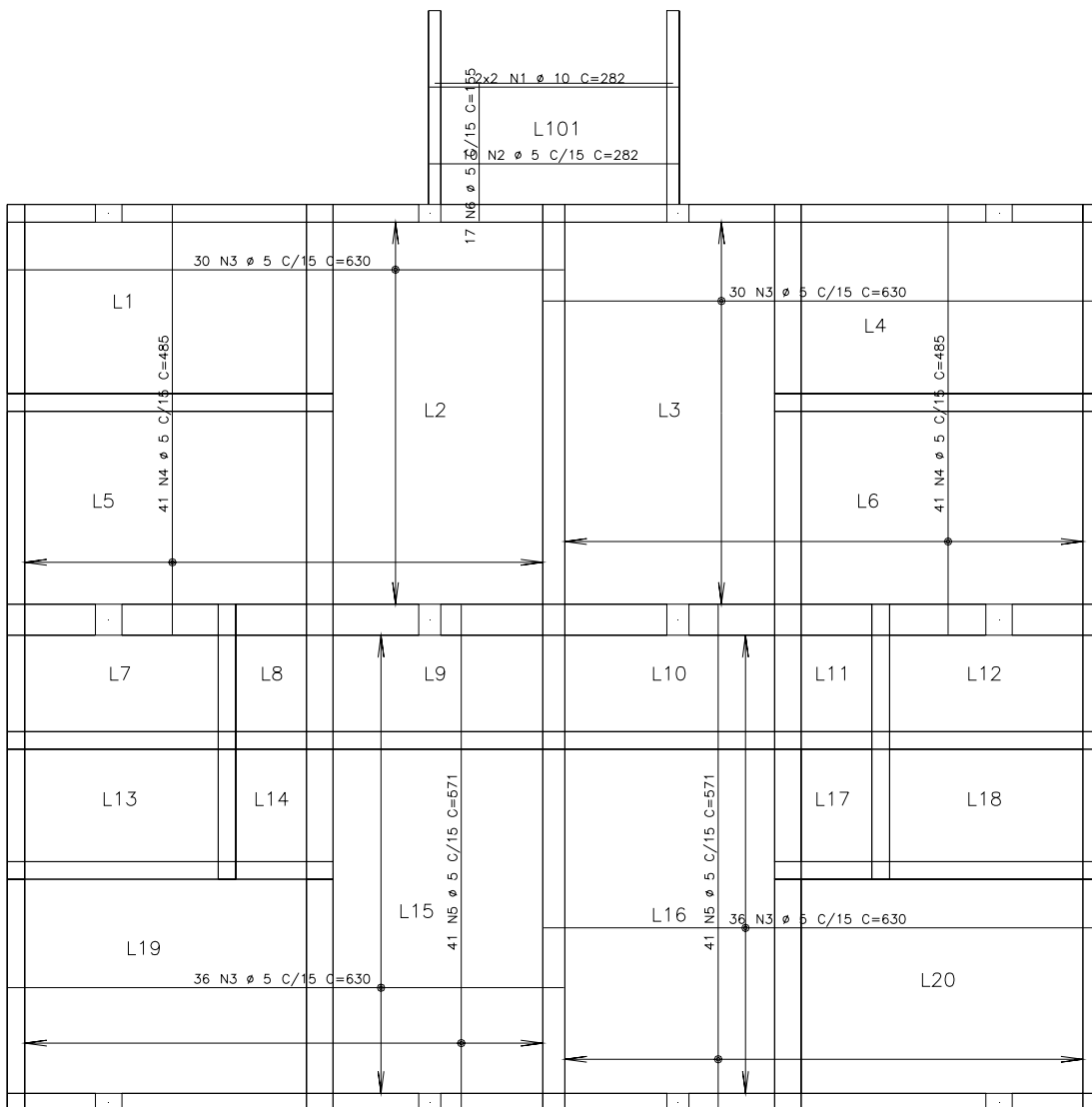


FIGURA C.17 – Prédio “C” – Opção 3 – Armação positiva das lajes

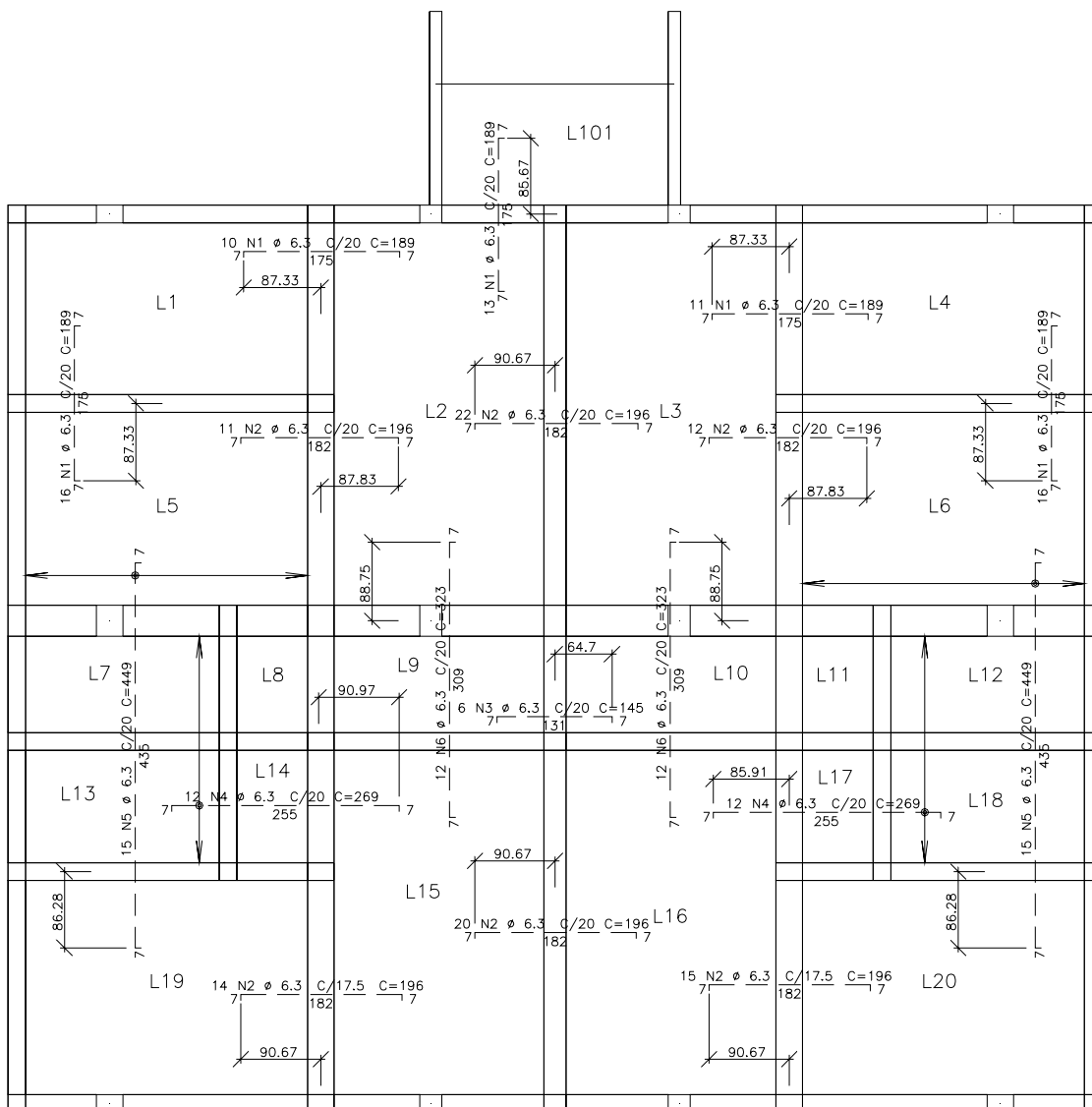


FIGURA C.18 – Prédio “C” – Opção 3 – Armação negativa das lajes

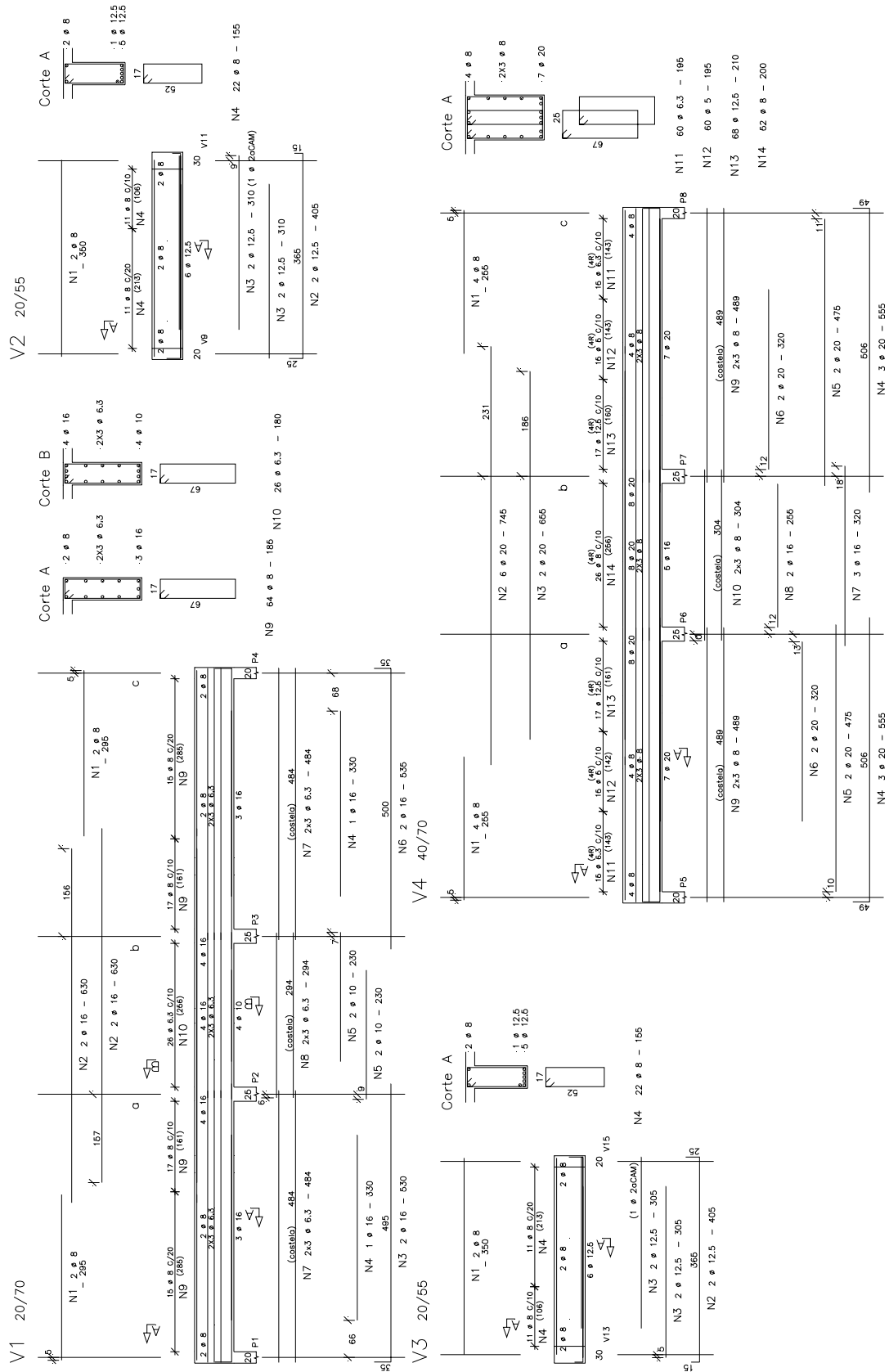


FIGURA C.19 – Prédio “C” – Opção 3 – Armadura das vigas V1, V2, V3 e V4

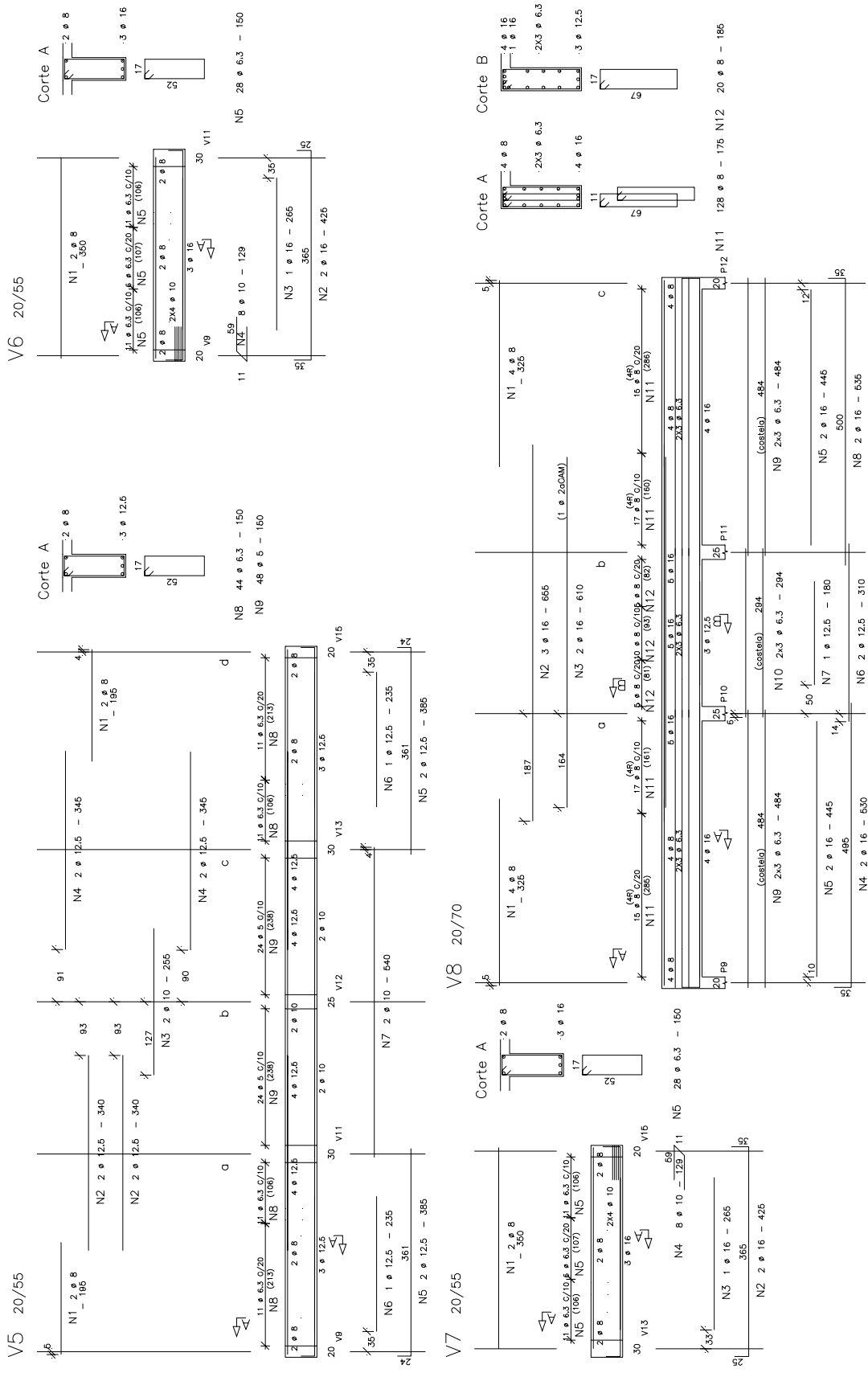


FIGURA C.20 – Prédio “C” – Opção 3 – Armadura das vigas V5, V6, V7 e V8

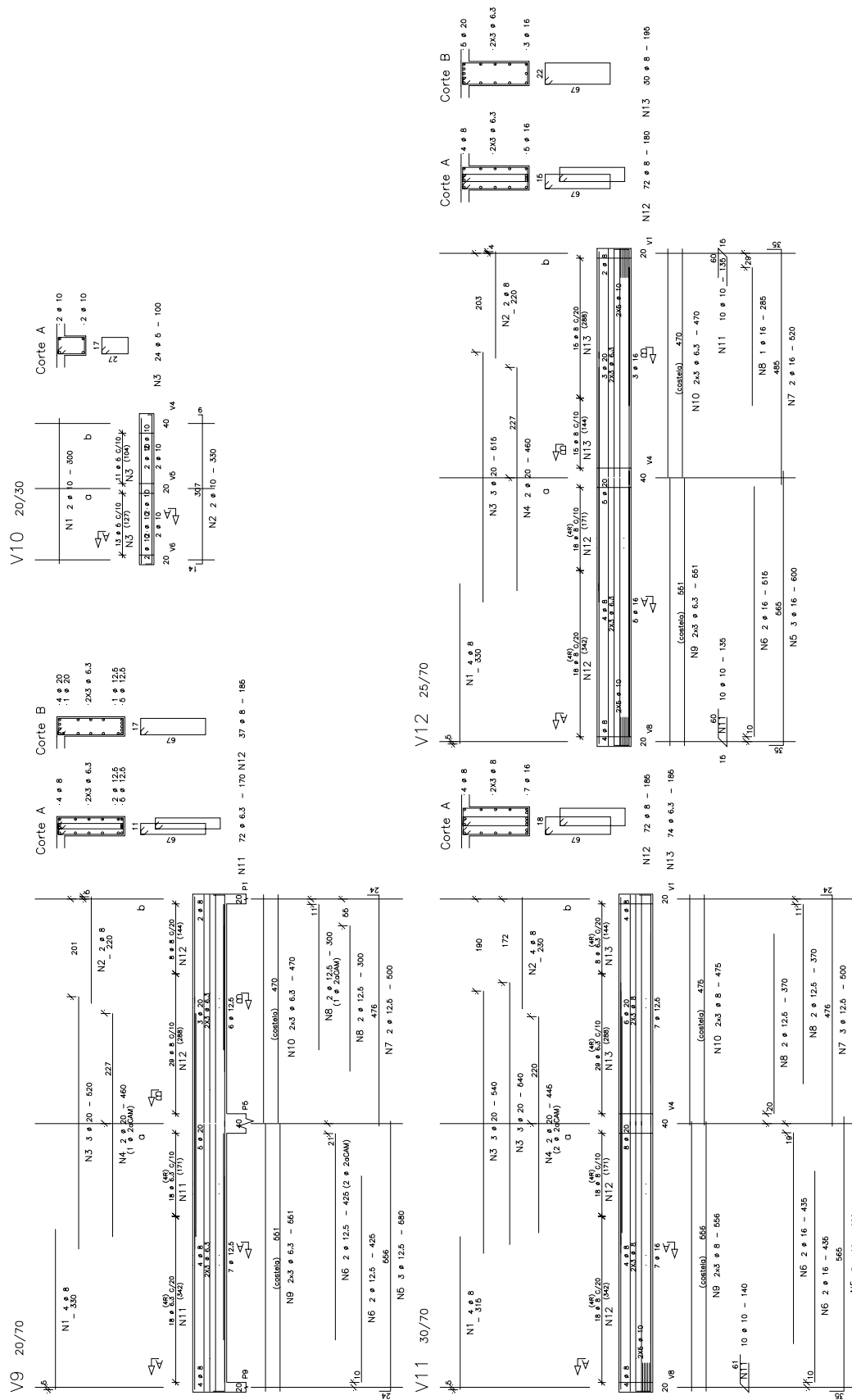
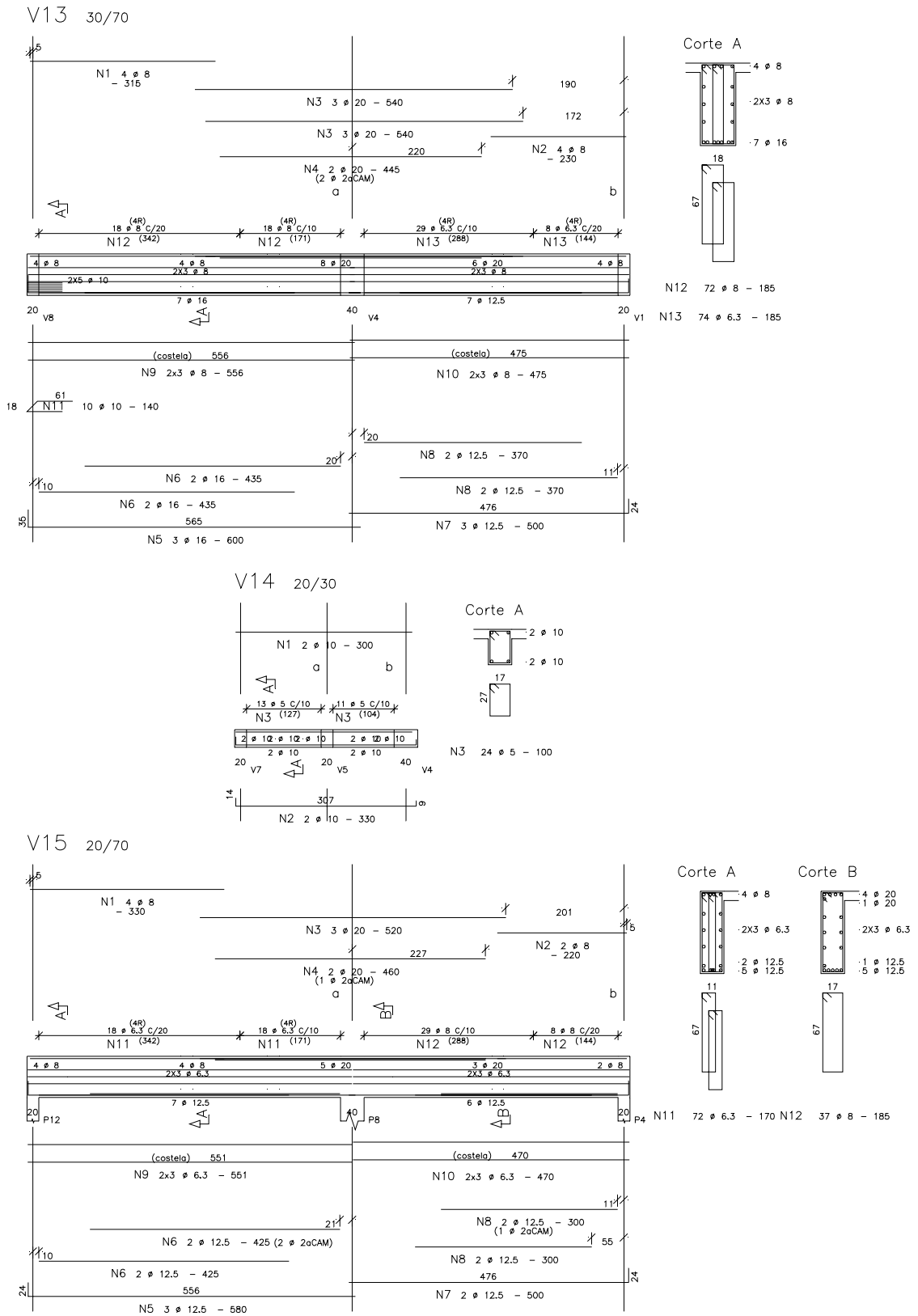


FIGURA C.21 – Prédio “C” – Opção 3 – Armação das vigas V9, V10, V11 e V12



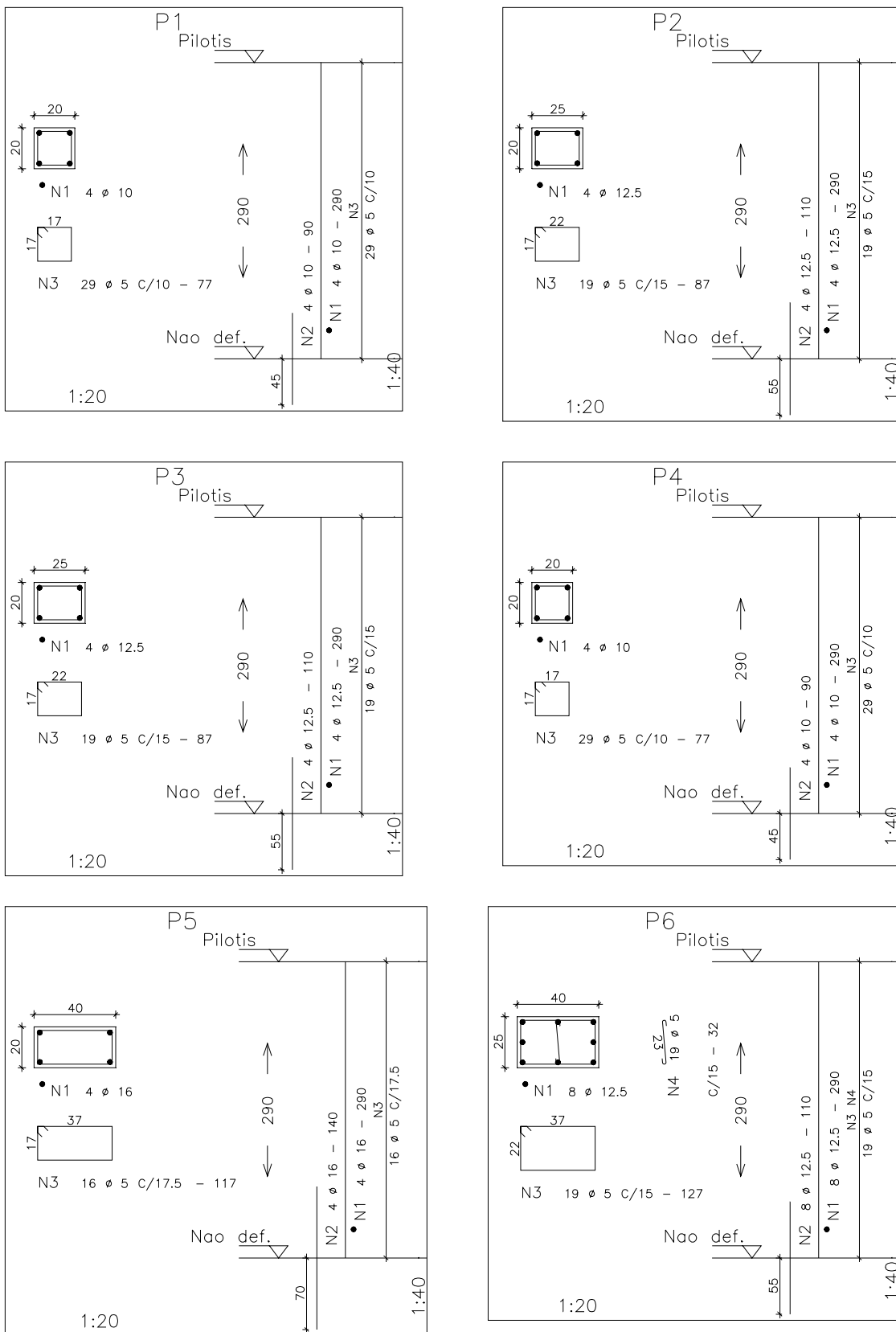


FIGURA C.23 – Prédio “C” – Opção 3 – Armação dos pilares P1 a P6

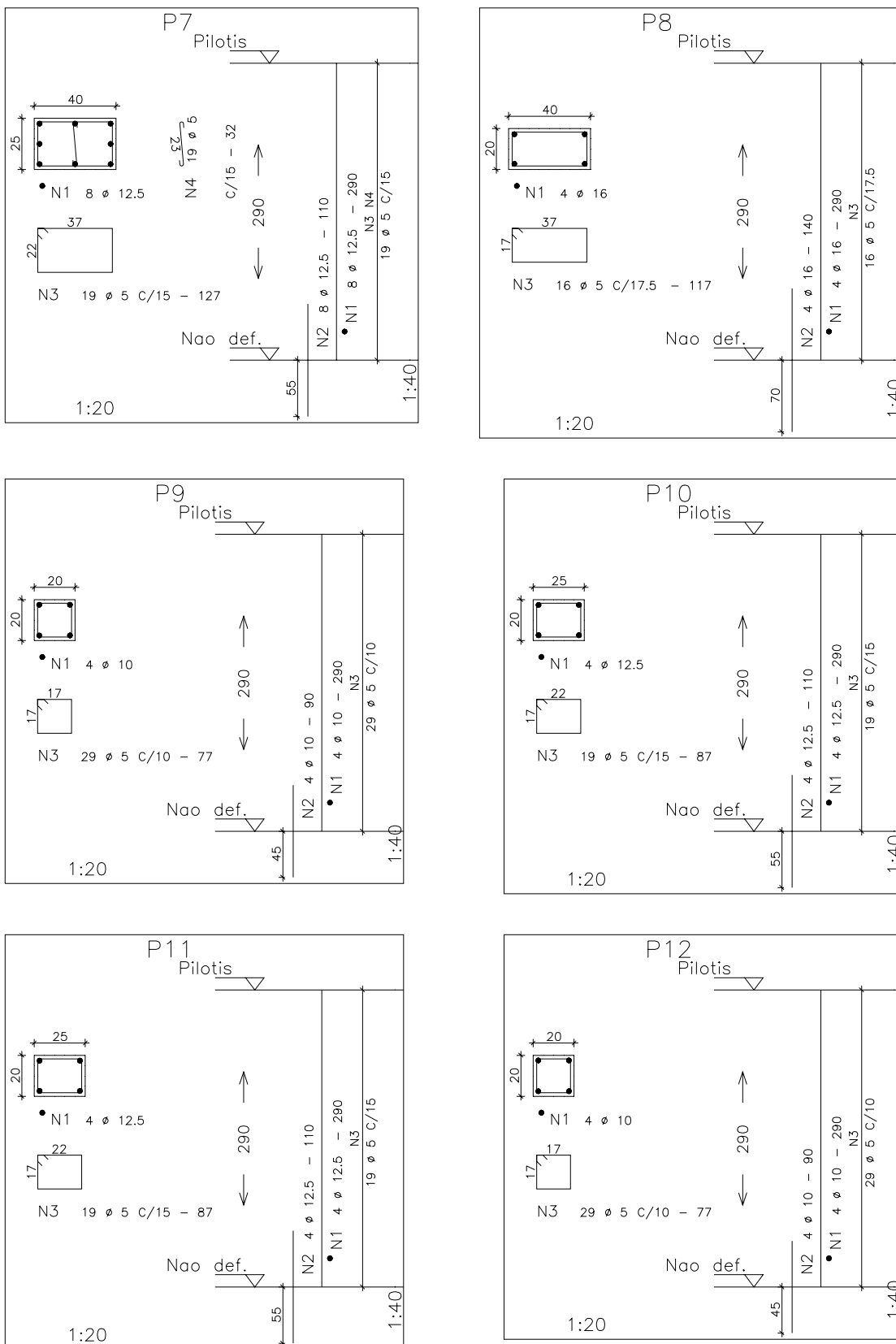


FIGURA C.24 – Prédio “C” – Opção 3 – Armação dos pilares P7 a P12

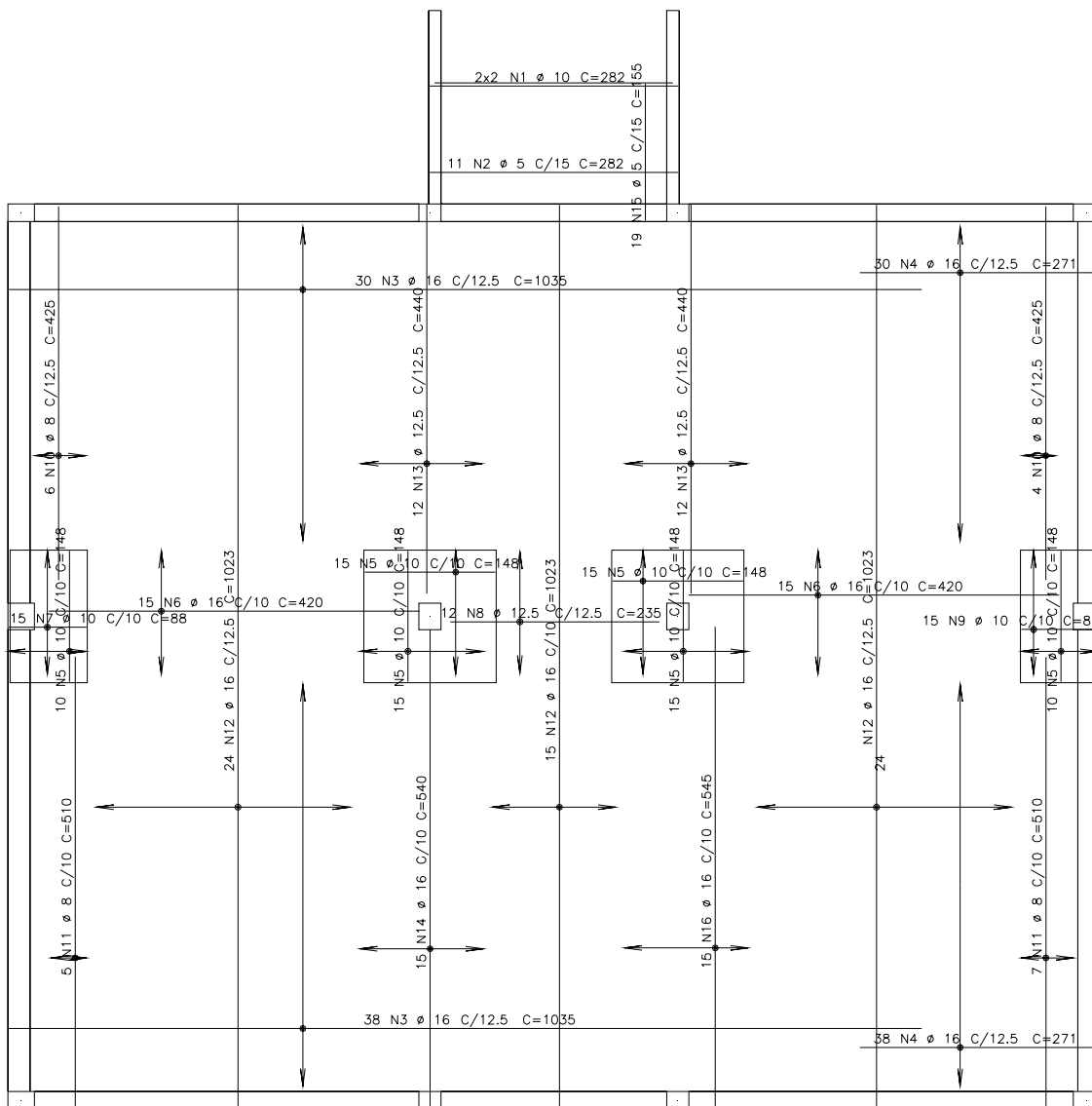


FIGURA C.25 – Prédio “C” – Opção 4 – Armação positiva das lajes

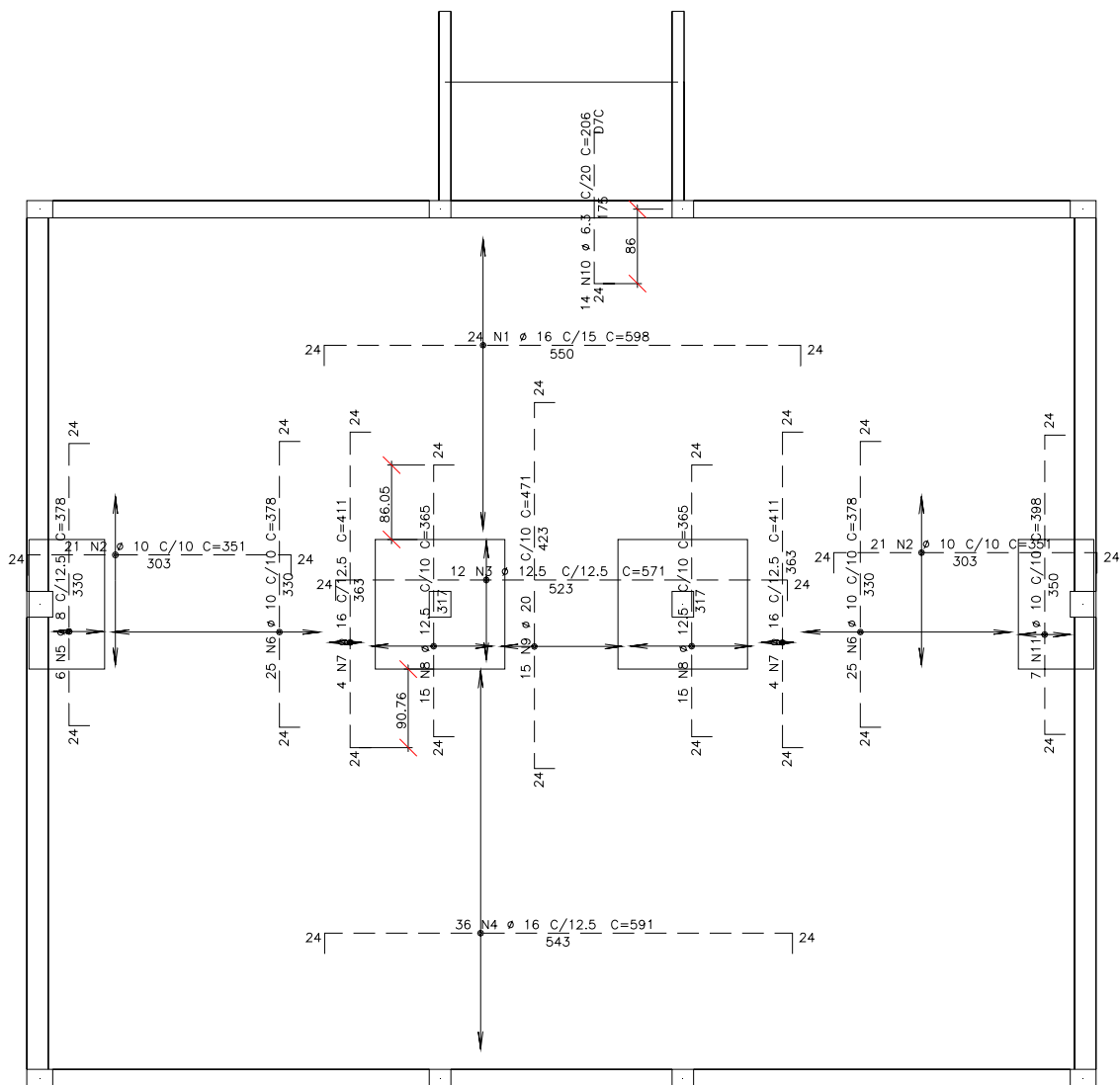


FIGURA C.26 – Prédio “C” – Opção 4 – Armação negativa das lajes

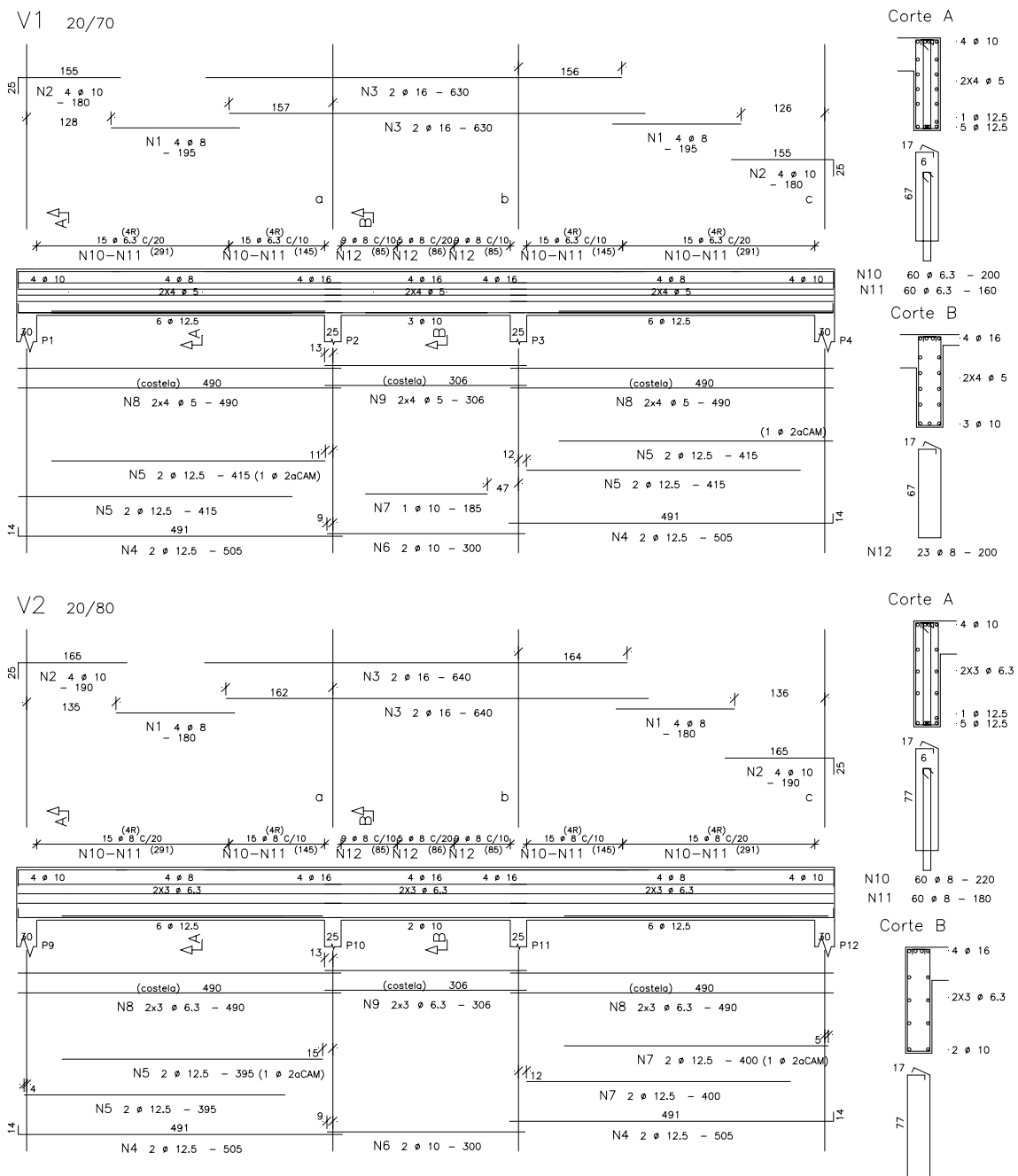
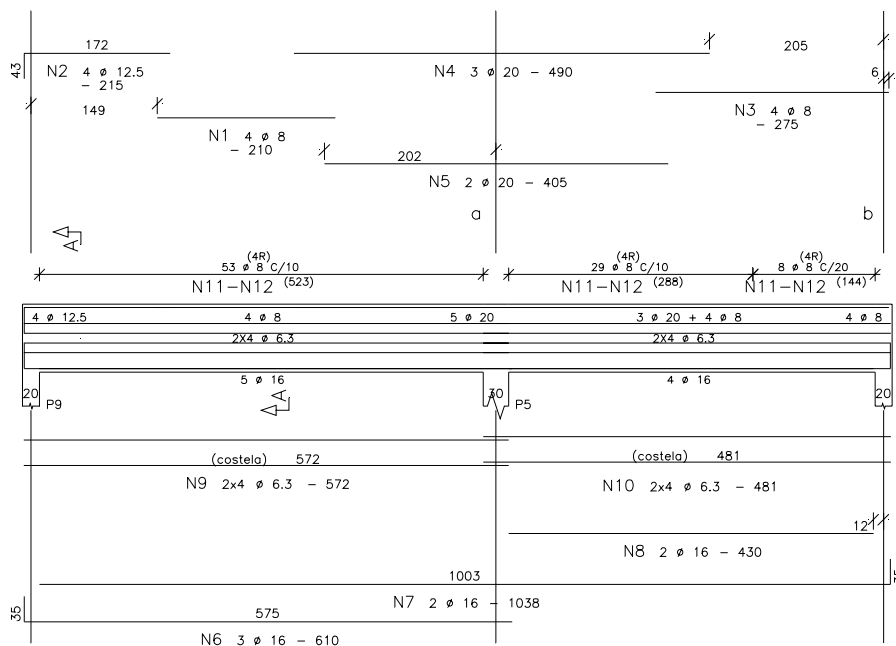
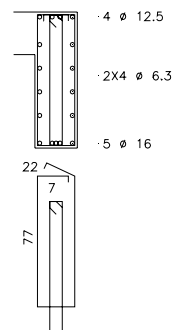


FIGURA C.27 – Prédio “C” – Opção 4 – Armação das vigas V1 e V2

V3 25/80

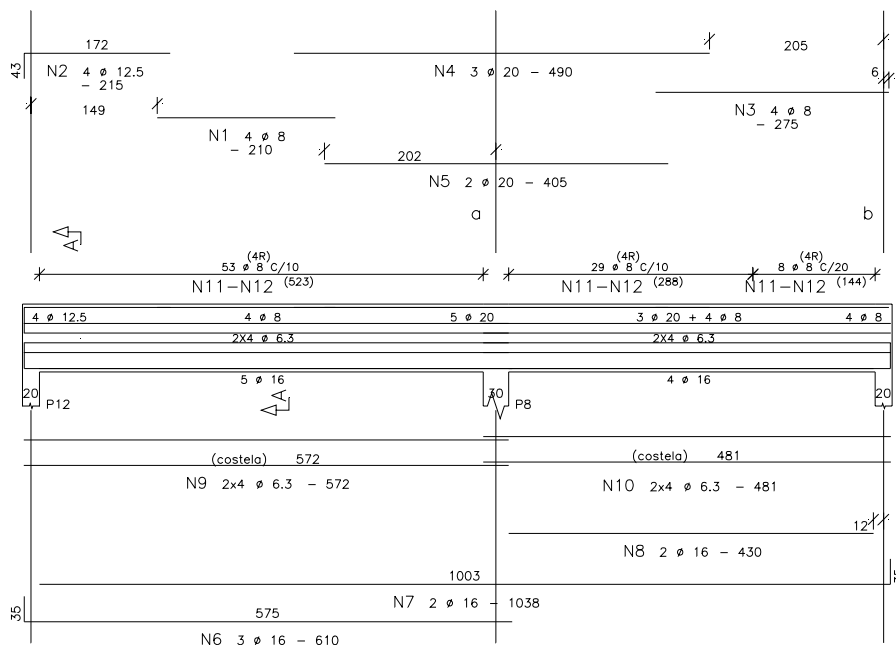


Corte A

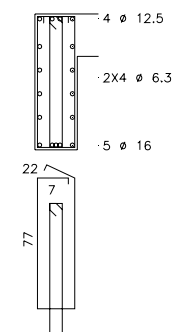


N11 90 φ 8 - 235
N12 90 φ 8 - 185

V4 25/80



Corte A



N11 90 φ 8 - 235
N12 90 φ 8 - 185

FIGURA C.28 – Prédio “C” – Opção 4 – Armação das vigas V3 e V4

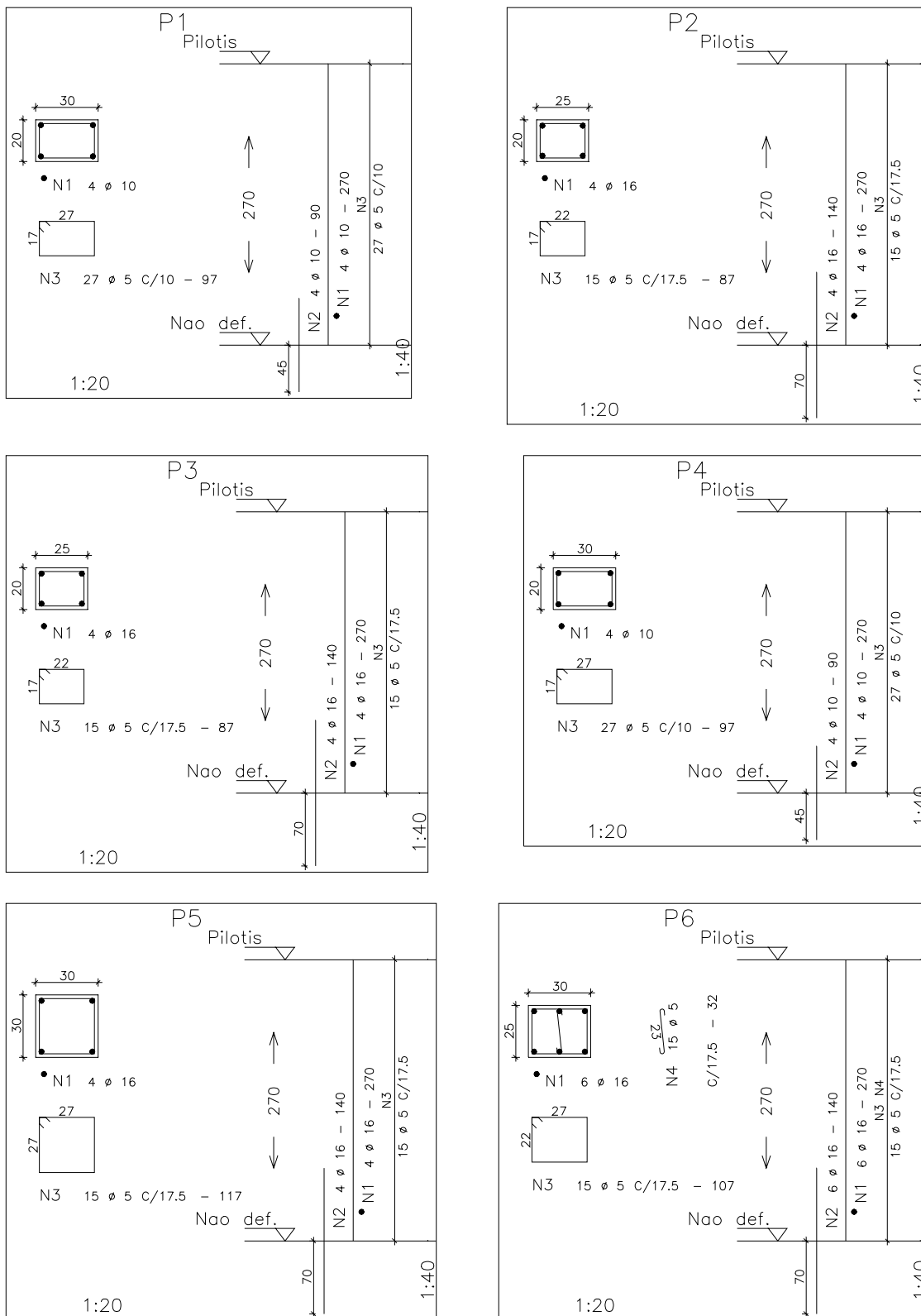


FIGURA C.29 – Prédio “C” – Opção 4 – Armação dos pilares P1 a P6

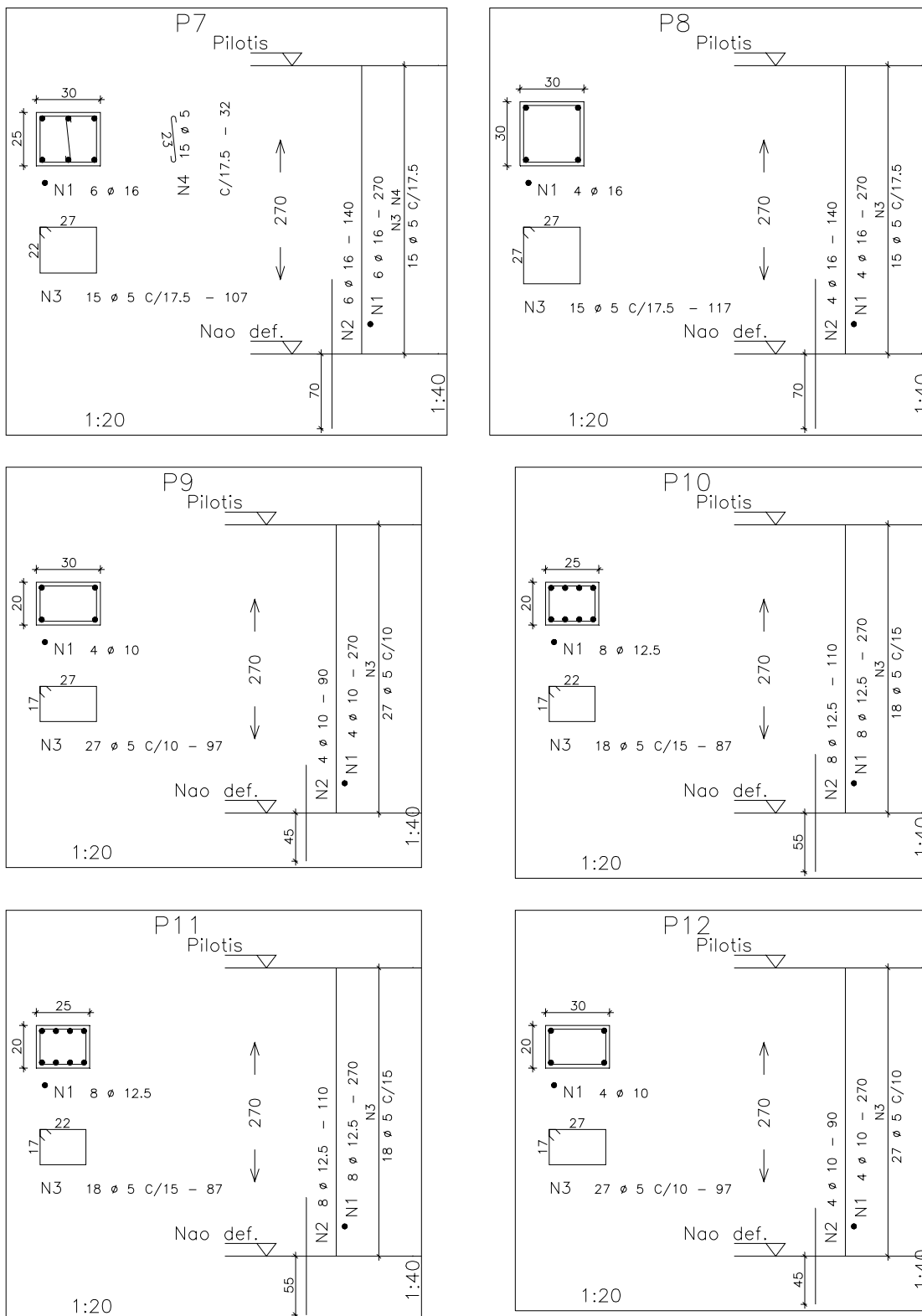


FIGURA C.30 – Prédio “C” – Opção 4 – Armação dos pilares P7 a P12

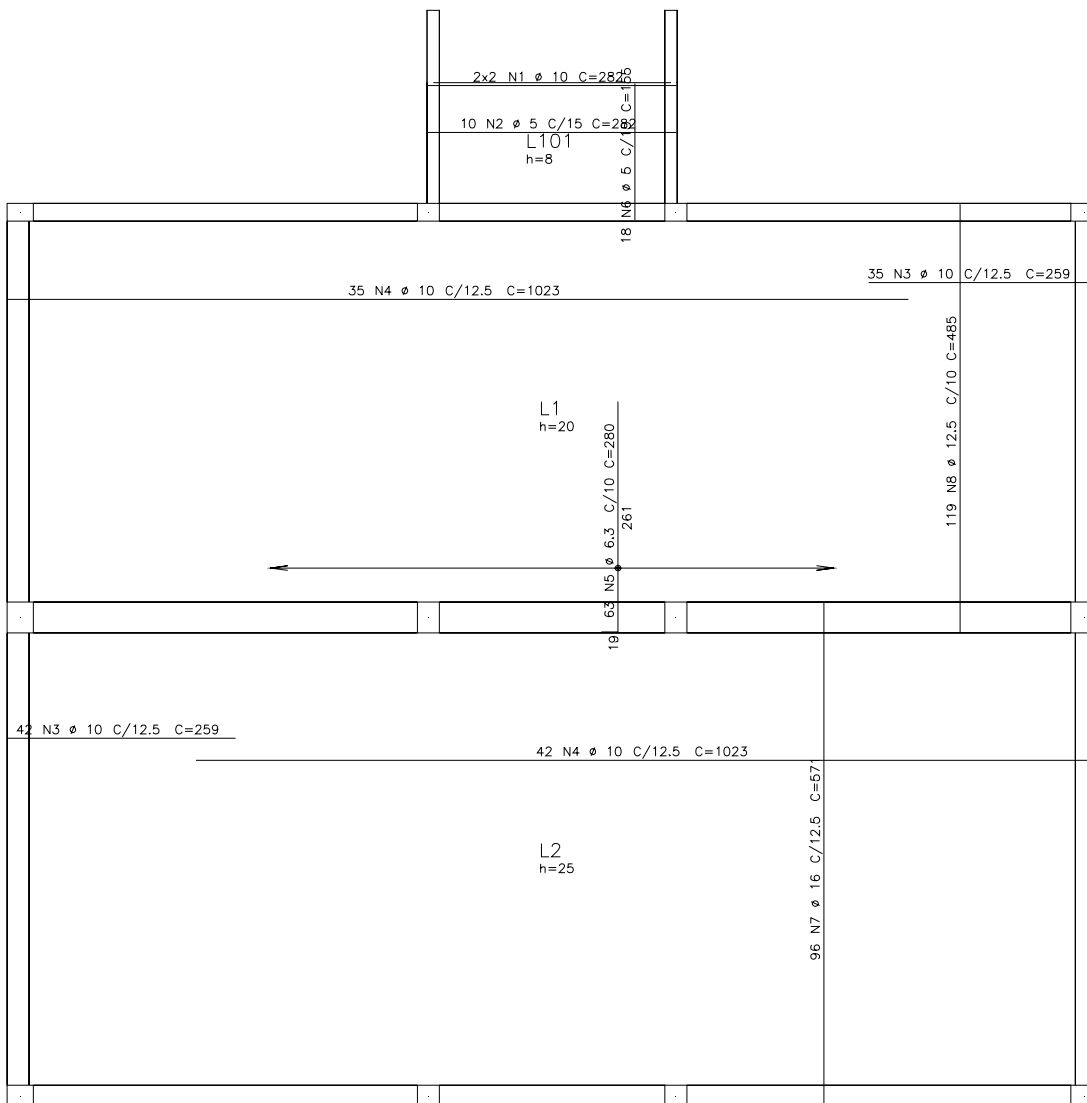


FIGURA C.31 – Prédio “C” – Opção 5 – Armação positiva das lajes

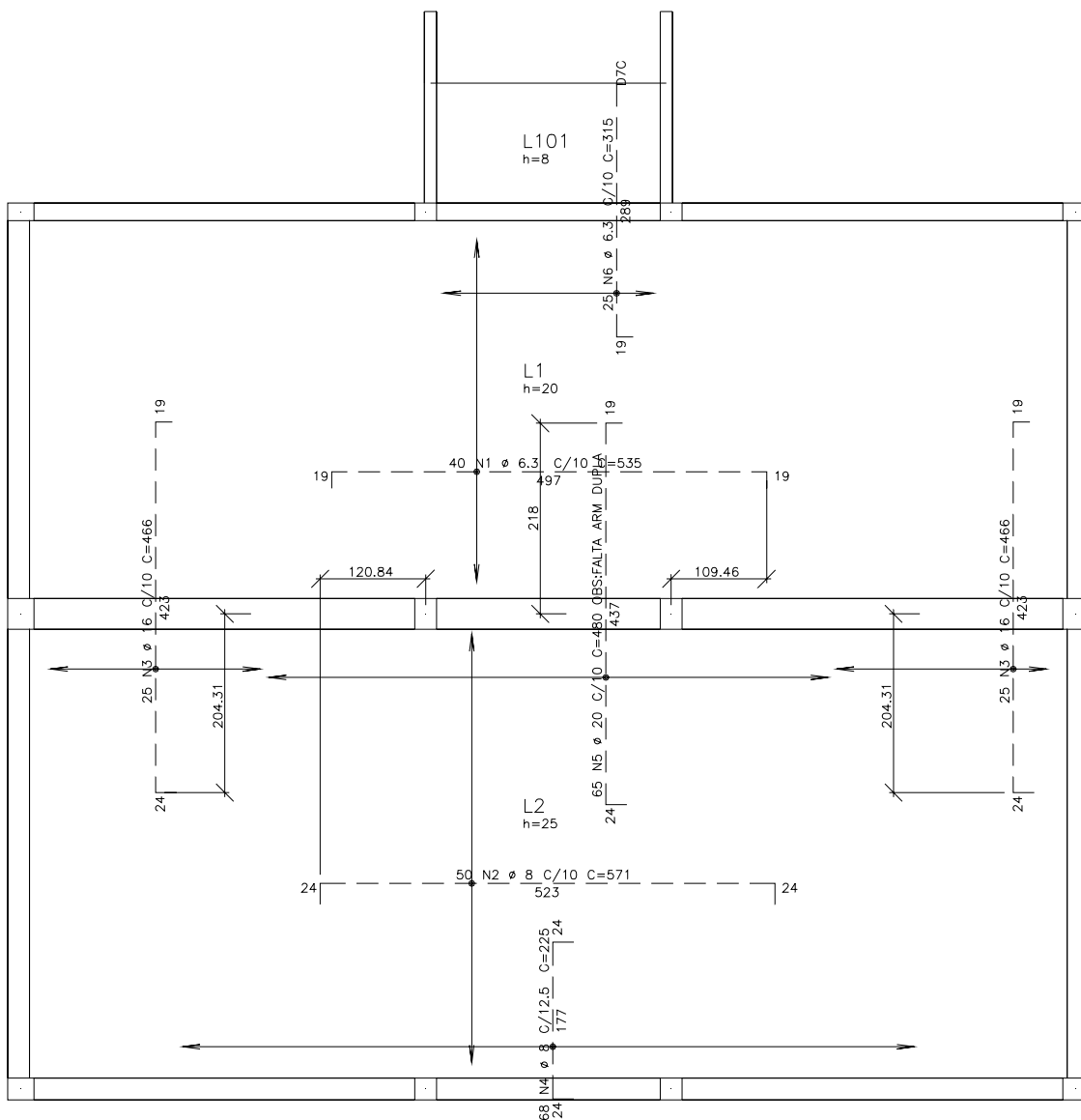


FIGURA C.32 – Prédio “C” – Opção 5 – Armação negativa das lajes

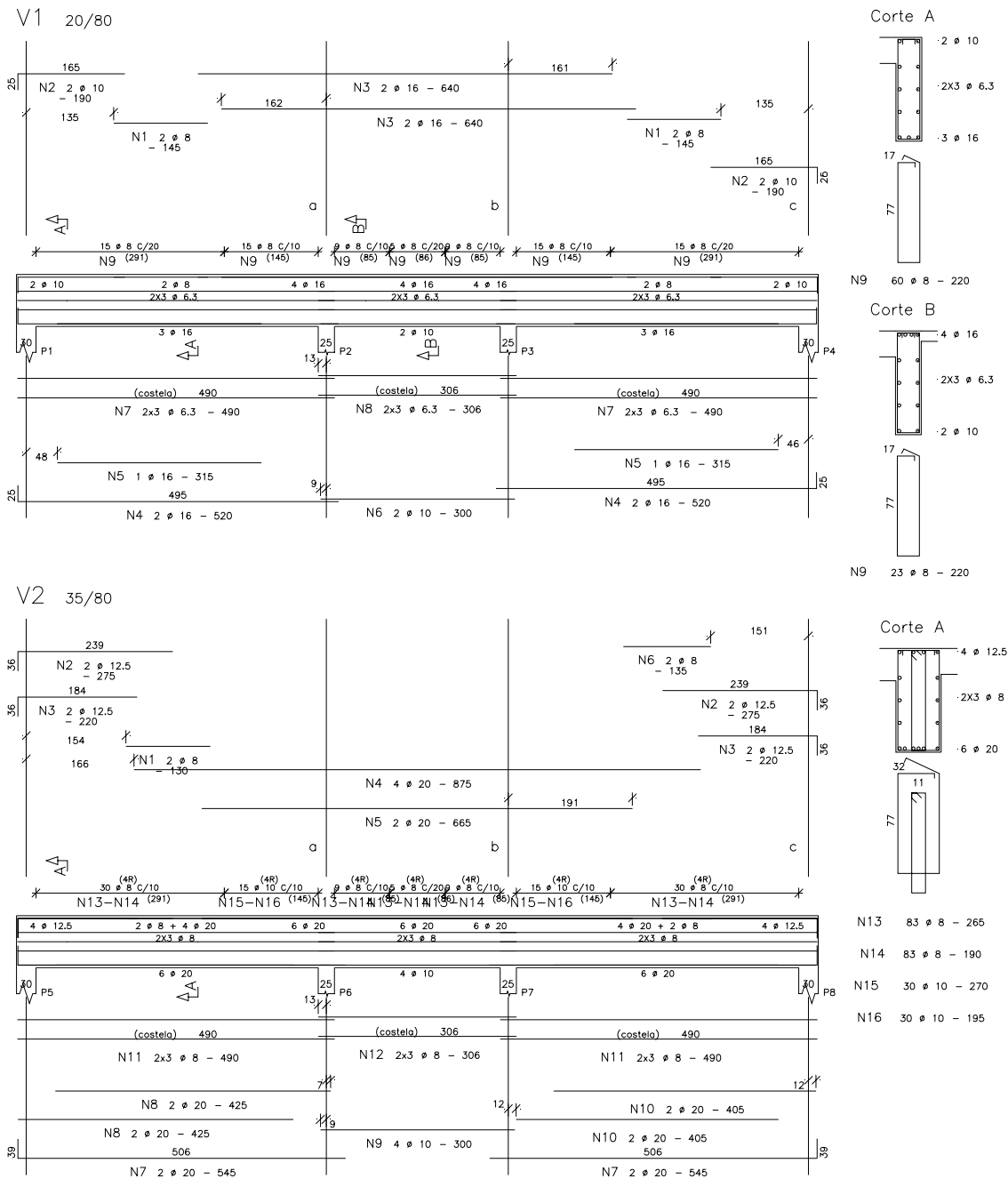


FIGURA C.33 – Prédio “C” – Opção 5 – Armação das vigas V1 e V2

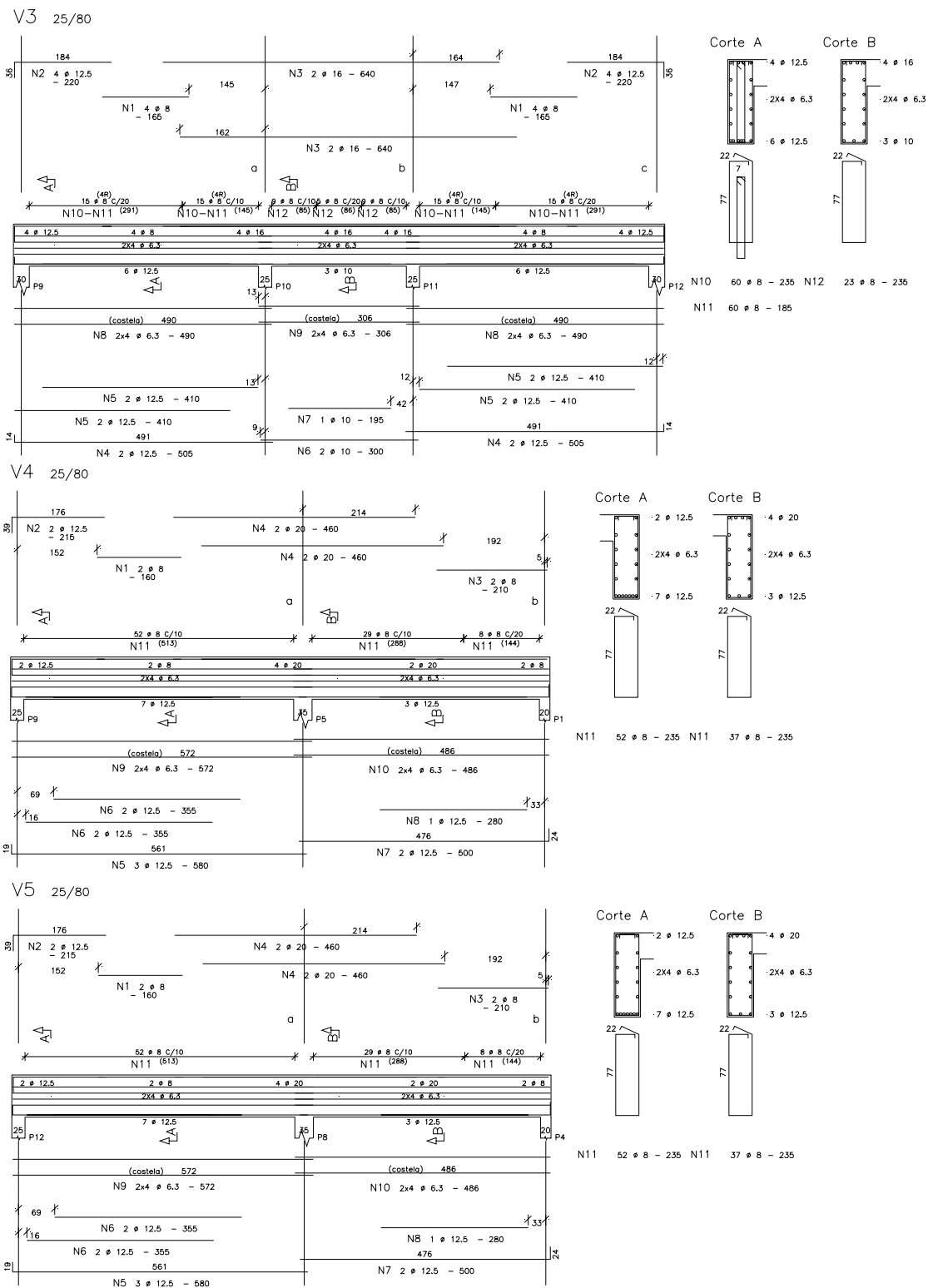


FIGURA C.34 – Prédio “C” – Opção 5 – Armação das vigas V3, V4 e V5

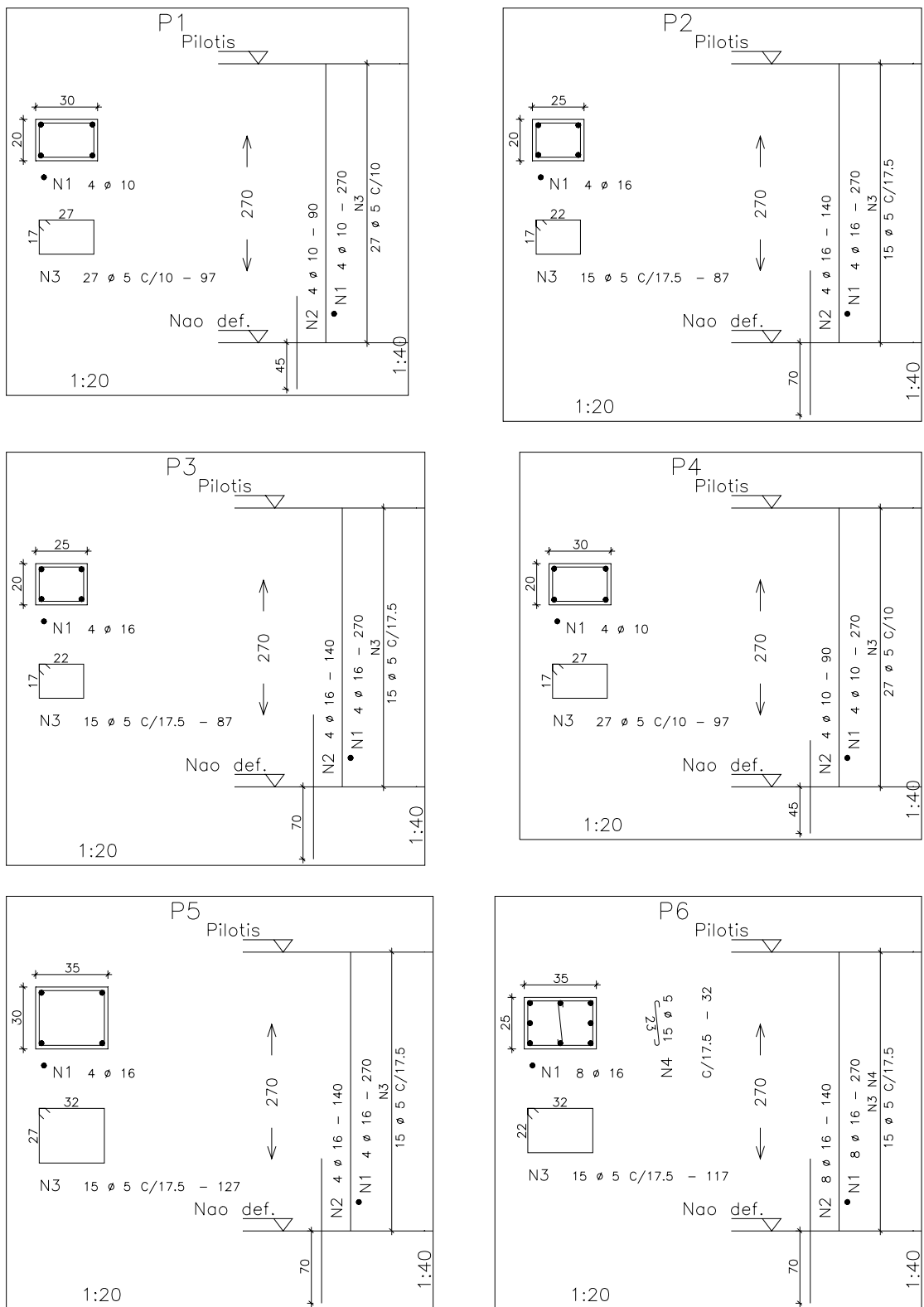


FIGURA C.35 – Prédio “C” – Opção 5 – Armação dos pilares P1 a P6

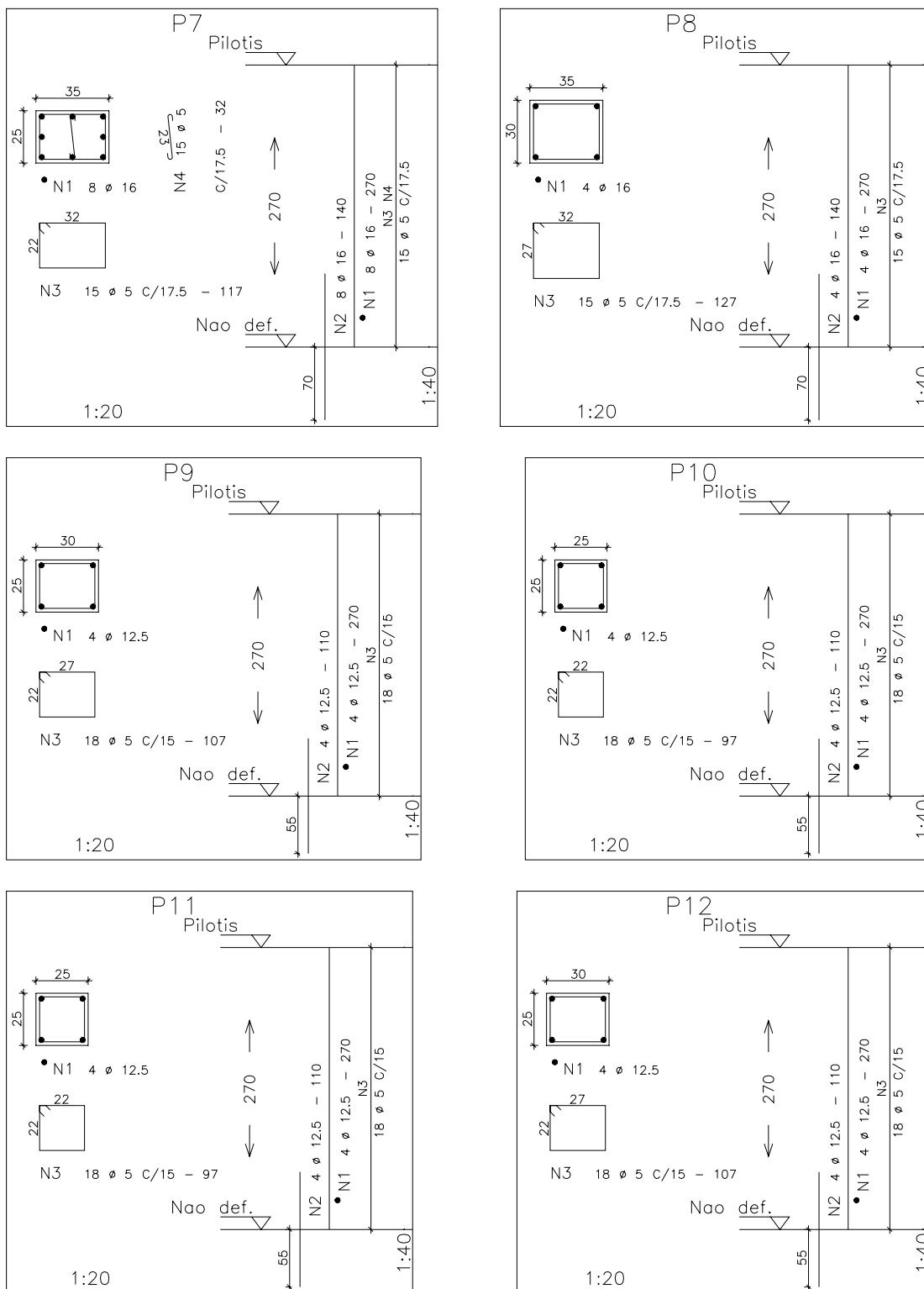


FIGURA C.36 – Prédio “C” – Opção 5 – Armação dos pilares P7 a P12