

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS DE SISTEMAS
ESTRUTURAIS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO ARMADO"**

Andréia Rodrigues da Silva

Dissertação apresentada ao Programa 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. Gilson Queiroz
DEES/UFMG

Prof. Dr. Hernani Carlos de Araújo
UFOP

Belo Horizonte, 30 de julho de 2002

ANEXOS

ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS DE SISTEMAS
ESTRUTURAIS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO ARMADO

Andréia Rodrigues da Silva

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS DE SISTEMAS
ESTRUTURAIS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO
ARMADO**

Andréia Rodrigues da Silva

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”

Orientador: Prof. Dr. Ney Amorim Silva

Belo Horizonte, julho de 2002

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e ao Daniel Cabrerisso.

AGRADECIMENTOS

A Deus e à minha amável mãezinha por estarem sempre junto a mim, amparando-me com infinito amor.

Ao Daniel Cabrerisso, que esteve ao meu lado em **todos** os momentos com grande carinho, compreensão e amor, apoiando-me e incentivando-me.

À minha adorável irmã Beatriz, pelo apoio e pela zelosa correção ortográfica.

À minha querida avó Áurea, pelo constante carinho.

Ao professor Ney Amorim Silva, que, através de sua orientação transmitiu-me informações valiosas e enriquecedoras, e pelo constante estímulo, confiança depositada, compreensão e palavras amigas.

Aos engenheiros Antônio Carlos, Marcelo Santos, Júnia Carla, Ana Margarida e José Celso, pelas prestimosas contribuições.

Ao engenheiro George Belloni, pelo suporte fornecido com grande presteza e atenção.

Ao engenheiro João Bagno, diretor da empresa PLANOR - Planejamento e Orçamentos de Obras, pelas relevantes colaborações.

À TQS Informática Ltda., pelo empréstimo do software e pelo suporte técnico prestado através dos engenheiros Armando e Luiz Aurélio.

Às empresas ATEX, SICAL e ASTRA e à ABCP, pelas informações prestadas.

Ao funcionário Eliezer Sampaio, do Laboratório de Mecânica Computacional – LAMEC, pelos auxílios prestados.

Aos professores (em especial ao Estevam Las Casas), funcionários (em especial à Renata) e colegas (em especial ao Késio Palácio e à Juliana Passagli) do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de estudo concedida.

À Dr^a Ana Lúcia Duarte Lima, pelo grande apoio e carinho.

A todos os familiares e amigos, em especial a Jener Paranhos, que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista e acreditaram no sucesso deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho, realiza-se um estudo comparativo de custos entre alguns sistemas estruturais utilizados para o cálculo e para o detalhamento de pavimentos de concreto armado. São analisados três pavimentos de edifícios distintos, variando-se em cada um deles o sistema estrutural utilizado. Inicialmente os três pavimentos são analisados considerando-se um sistema estrutural convencional, constituído de lajes maciças e vigas. Posteriormente, estes mesmos pavimentos são analisados como lajes lisas, maciças ou nervuradas. As lajes lisas nervuradas podem ter como materiais inertes blocos de poliestireno expandido (EPS) ou então blocos de concreto celular autoclavado. Finalmente, é feita uma análise usando-se como sistema estrutural lajes nervuradas cuja fôrma é obtida com moldes de polipropileno de formato tronco-piramidal. Para a análise estrutural, detalhamento e levantamento de quantitativos é utilizado um software comercial. Na composição final dos custos dos pavimentos para cada solução adotada, estão incluídos materiais, fôrmas, mão-de-obra e tempo de execução. Em função dos resultados obtidos, é realizada uma ampla análise comparativa, procurando-se explicar as diferenças encontradas entre os custos dos sistemas estruturais.

ABSTRACT

In this work a comparative study of cost among some described structural models for the analysis and design of reinforced concrete floors is performed. Three different floors of different building are the object of the analysis, each with a different structural system. In a first step, the floors are studied considering a conventional structural system, consisting of slabs and beams. Then, a second analysis is done using flat or waffle slabs. The slabs can be built using blocks of expanded polystyrene (EPS) or alternatively blocks of autoclaved aerated concrete as filling material. The last step is the analysis using as structural solution waffle slabs, with the formwork consisting of polypropylene of log-pyramidal shape. A commercial program is used for the structural analysis, design and determination of quantitative. Materials, formworks, workmanship and construction time are all included in the determination of the cost for each solution. The obtained results provide the basis for a detailed discussion of the cost differences among the examined solutions.

SUMÁRIO

<u>RESUMO.....</u>	<u>I</u>
---------------------------	-----------------

<u>ABSTRACT.....</u>	<u>II</u>
-----------------------------	------------------

<u>LISTA DE FIGURAS.....</u>	<u>VI</u>
-------------------------------------	------------------

<u>LISTA DE TABELAS</u>	<u>XV</u>
--------------------------------------	------------------

<u>1 INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
----------------------------------	-----------------

1.1 OBJETIVOS.....	3
---------------------------	----------

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
---	----------

<u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>6</u>
---	-----------------

2.1 ECONOMIA NO PROJETO ESTRUTURAL	6
---	----------

2.2 LAJES	8
------------------------	----------

2.2.1 CÁLCULO DOS ESFORÇOS NAS LAJES	9
---	----------

2.3 SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO ARMADO ABORDADOS NESTA DISSERTAÇÃO	15
--	-----------

2.3.1 SISTEMA ESTRUTURAL CONVENCIONAL	16
--	-----------

2.3.2	SISTEMA ESTRUTURAL CONSTITUÍDO POR LAJES NERVURADAS	17
2.3.3	SISTEMA ESTRUTURAL CONSTITUÍDO POR LAJES LISAS COM VIGAS DE BORDA ..	29

3 METODOLOGIA.....33

3.1	CAD/TQS®	33
3.2	MODELOS ESTRUTURAIS PARA PAVIMENTOS TRATADOS PELO CAD/TQS®	34
3.2.1	MODELO CONVENCIONAL.....	34
3.2.2	DEMAIS MODELOS	36
3.3	MODELO ESTRUTURAL ADOTADO NAS ANÁLISES	37
3.3.1	PARAMETRIZAÇÃO.....	37
3.3.2	DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO	42

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....45

4.1	EDIFÍCIOS ANALISADOS	45
4.2	PRIMEIRO EXEMPLO – DESCRIÇÕES GERAIS	46
4.2.1	CARGAS ATUANTES	46
4.2.2	FÔRMAS	47
4.2.3	DETALHAMENTO.....	49
4.2.4	CUSTOS.....	81
4.2.5	COMENTÁRIOS	88
4.3	SEGUNDO EXEMPLO – DESCRIÇÕES GERAIS	93
4.3.1	CARGAS ATUANTES	93
4.3.2	FÔRMAS	93
4.3.3	DETALHAMENTO.....	95
4.3.4	CUSTOS.....	95
4.3.5	COMENTÁRIOS	101
4.4	TERCEIRO EXEMPLO – DESCRIÇÕES GERAIS	104
4.4.1	CARGAS ATUANTES	105
4.4.2	FÔRMAS	105
4.4.3	DETALHAMENTO.....	105

4.4.4	CUSTOS.....	107
4.4.5	COMENTÁRIOS.....	112
4.5	FUNDAÇÕES.....	114

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 115

5.1	CONCLUSÕES.....	115
5.2	SUGESTÕES.....	117

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 118

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR..... 121

ANEXOS..... 122

ANEXO A..... 123

ANEXO B..... 139

ANEXO C..... 193

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Cálculo plástico	13
FIGURA 2.2 – Aplicações do EPS na construção civil (TÉCHNE, nº 1)	20
FIGURA 2.3 – Corte de bloco de concreto celular autoclavado com o uso de um serrote (catálogo SICAL)	24
FIGURA 2.4 – Posicionamento de bloco de concreto celular autoclavado nos espaços definidos pela armação (catálogo SICAL)	25
FIGURA 2.5 – Moldes em polipropileno sendo utilizados para compor fôrma de laje nervurada (catálogo ATEX)	27
FIGURA 2.6 – Escoramento dos moldes de polipropileno (catálogo ATEX)	27
FIGURA 2.7 – Escoramento dos moldes de polipropileno (catálogo ATEX)	28
FIGURA 2.8 – Vista acabada de laje nervurada constituída com moldes de polipropileno (catálogo ATEX)	28
FIGURA 2.9 – Laje lisa maciça (MELGES citado por ALBUQUERQUE)	30
FIGURA 2.10 – Laje lisa nervurada (MELGES citado por ALBUQUERQUE)	31
FIGURA 2.11 – Laje lisa nervurada com a presença de capitéis embutidos (catálogo ATEX)	31
FIGURA 3.1 – Vista em planta de duas vigas que chegam em um mesmo pilar	40
FIGURA 3.2 – Apoio das barras da grelha sobre pilar	41
FIGURA 4.1 – Fôrma do sistema estrutural convencional	48
FIGURA 4.2 – Armação positiva da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo simplificado	50
FIGURA 4.3 – Armação negativa da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo simplificado	51
FIGURA 4.4 – Armação complementar da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo simplificado	52
FIGURA 4.5 – Armação positiva da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo de grelha	53

FIGURA 4.6 – Armação negativa da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo de grelha	54
FIGURA 4.7 – Armação complementar da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo de grelha	55
FIGURA 4.8 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)	56
FIGURA 4.9 – Armação positiva horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)	57
FIGURA 4.10 – Armação positiva vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)	58
FIGURA 4.11 – Armação negativa horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)	59
FIGURA 4.12 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)	60
FIGURA 4.13 – Armação negativa vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)	61
FIGURA 4.14 – Armação positiva horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)	62
FIGURA 4.15 – Armação positiva vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)	63
FIGURA 4.16 – Armação negativa horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)	64
FIGURA 4.17 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)	65
FIGURA 4.18 – Armação negativa vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)	66
FIGURA 4.19 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS	67
FIGURA 4.20 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS	68
FIGURA 4.21 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS	69

FIGURA 4.22 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	70
FIGURA 4.23 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	71
FIGURA 4.24 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	72
FIGURA 4.25 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	73
FIGURA 4.26 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	74
FIGURA 4.27 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	75
FIGURA 4.28 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	76
FIGURA 4.29 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	77
FIGURA 4.30 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	78
FIGURA 4.31 – Armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	79
FIGURA 4.32 – Resumo da armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	80
FIGURA 4.33 – Consumo de fôrma dos diversos sistemas estruturais _____	84
FIGURA 4.34 – Consumo de concreto dos diversos sistemas estruturais _____	85
FIGURA 4.35 – Consumo de aço dos diversos sistemas estruturais _____	85
FIGURA 4.36 – Custo total dos diversos sistemas estruturais _____	86
FIGURA 4.37 – Custo percentual por etapa dos diversos sistemas estruturais _____	87
FIGURA 4.38 - Custo total incluindo revestimento dos diversos sistemas estruturais _____	88
FIGURA 4.39 – Consumo de aço, por peça, para os modelos simplificado e de grelha _____	90
FIGURA 4.40 – Fôrma do sistema estrutural convencional _____	94
FIGURA 4.41 – Consumo de fôrma dos diversos sistemas estruturais _____	98
FIGURA 4.42 – Consumo de concreto dos diversos sistemas estruturais _____	98

FIGURA 4.43 – Consumo de aço dos diversos sistemas estruturais _____	99
FIGURA 4.44 – Custo total dos diversos sistemas estruturais _____	99
FIGURA 4.45 – Custo percentual por etapa dos diversos sistemas estruturais _____	100
FIGURA 4.46 – Custo total incluindo revestimento dos diversos sistemas estruturais _____	101
FIGURA 4.47 – Fôrma do sistema estrutural convencional _____	106
FIGURA 4.48 – Consumo de fôrma dos diversos sistemas estruturais _____	109
FIGURA 4.49 – Consumo de concreto dos diversos sistemas estruturais _____	109
FIGURA 4.50 – Consumo de aço dos diversos sistemas estruturais _____	110
FIGURA 4.51 – Custo total para os diversos sistemas estruturais _____	110
FIGURA 4.52 – Custo percentual por etapa dos diversos sistemas estruturais _____	111
FIGURA 4.53 – Custo total incluindo revestimento dos diversos sistemas estruturais _____	112
FIGURA A.1 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	124
FIGURA A.2 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	125
FIGURA A.3 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	126
FIGURA A.4 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	127
FIGURA A.5 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	128
FIGURA A.6 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	129
FIGURA A.7 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	130
FIGURA A.8 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	131
FIGURA A.9 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	132
FIGURA A.10 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	133

FIGURA A.11 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	134
FIGURA A.12 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	135
FIGURA A.13 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	136
FIGURA A.14 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	137
FIGURA A.15 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	138
FIGURA B.1 – Fôrma do sistema estrutural convencional _____	140
FIGURA B.2 – Armação positiva da laje do sistema estrutural convencional _____	141
FIGURA B.3 – Armação negativa da laje do sistema estrutural convencional _____	142
FIGURA B.4 – Armação complementar da laje do sistema estrutural convencional _	143
FIGURA B.5 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça _____	144
FIGURA B.6 – Armação positiva horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça _____	145
FIGURA B.7 – Armação positiva vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça _____	146
FIGURA B.8 – Armação negativa horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça _____	147
FIGURA B.9 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça _____	148
FIGURA B.10 – Armação negativa vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça _____	149
FIGURA B.11 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (lajes comuns a todos os sistemas) _____	150
FIGURA B.12 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (lajes comuns a todos os sistemas) _____	151
FIGURA B.13 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS ou blocos de concreto celular autoclavado _____	152

FIGURA B.14 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	153
FIGURA B.15 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	154
FIGURA B.16 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	155
FIGURA B.17 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS (lajes comuns a todos os sistemas) _____	156
FIGURA B.18 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS (lajes comuns a todos os sistemas) _____	157
FIGURA B.19 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	158
FIGURA B.20 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	159
FIGURA B.21 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	160
FIGURA B.22 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	161
FIGURA B.23 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	162
FIGURA B.24 – Armação da viga faixa 6 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	163
FIGURA B.25 – Armação da viga faixa 7 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	164
FIGURA B.26 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	165
FIGURA B.27 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	166
FIGURA B.28 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	167

FIGURA B.29 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado (lajes comuns a todos os sistemas)	168
FIGURA B.30 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado (lajes comuns a todos os sistemas)	169
FIGURA B.31 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado	170
FIGURA B.32 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado	171
FIGURA B.33 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado	172
FIGURA B.34 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado	173
FIGURA B.35 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado	174
FIGURA B.36 – Armação da viga faixa 6 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado	175
FIGURA B.37 – Armação da viga faixa 7 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado	176
FIGURA B.38 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	177
FIGURA B.39 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	178
FIGURA B.40 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	179
FIGURA B.41 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	180
FIGURA B.42 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno (lajes comuns a todos os sistemas)	181
FIGURA B.43 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno (lajes comuns a todos os sistemas)	182

FIGURA B.44 – Armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	183
FIGURA B.45 – Resumo da armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno. _____	184
FIGURA B.46 – Armação de cisalhamento da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	185
FIGURA B.47 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	186
FIGURA B.48 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	187
FIGURA B.49 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	188
FIGURA B.50 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	189
FIGURA B.51 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	190
FIGURA B.52 – Armação da viga faixa 6 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	191
FIGURA B.53 – Armação da viga faixa 7 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	192
FIGURA C.1 – Fôrma do sistema estrutural convencional _____	194
FIGURA C.2 – Armação positiva da laje do sistema estrutural convencional _____	195
FIGURA C.3 – Armação negativa da laje do sistema estrutural convencional _____	196
FIGURA C.4 – Armação complementar da laje do sistema estrutural convencional _	197
FIGURA C.5 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	198
FIGURA C.6 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	199
FIGURA C.7 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	200
FIGURA C.8 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	201

FIGURA C.9 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS (lajes comuns a todos os sistemas)	202
FIGURA C.10 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS (lajes comuns a todos os sistemas)	203
FIGURA C.11 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	204
FIGURA C.12 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	205
FIGURA C.13 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	206
FIGURA C.14 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	207
FIGURA C.15 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno (lajes comuns a todos os sistemas)	208
FIGURA C.16 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno (lajes comuns a todos os sistemas)	209
FIGURA C.17 – Armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	210
FIGURA C.18 – Resumo da armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno	211

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Relação entre tipo e peso específico do EPS (TÉCHNE, nº 50) _____	18
TABELA 2.2 – Dimensões dos blocos de concreto celular autoclavado usados como materiais inertes em lajes nervuradas (catálogo SICAL) _____	24
TABELA 4.1 – Custo do sistema estrutural convencional calculado através do modelo simplificado _____	82
TABELA 4.2 – Custo do sistema estrutural convencional calculado através do modelo de grelha _____	82
TABELA 4.3 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm) _____	82
TABELA 4.4 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm) _____	83
TABELA 4.5 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	83
TABELA 4.6 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	83
TABELA 4.7 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	84
TABELA 4.8 – Comparativo de custos dos sistemas estruturais, em relação ao sistema executado com fôrmas de polipropileno _____	91
TABELA 4.9 – Custo do sistema estrutural convencional calculado através do modelo simplificado _____	96
TABELA 4.10 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça _____	96
TABELA 4.11 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS _____	96
TABELA 4.12 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado _____	97

TABELA 4.13 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	97
TABELA 4.14 – Comparativo de custos dos sistemas estruturais, em relação ao sistema executado com fôrmas de polipropileno _____	103
TABELA 4.15 – Custo do sistema estrutural convencional calculado através do modelo simplificado _____	108
TABELA 4.16 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada, cujo material inerte são blocos de EPS _____	108
TABELA 4.17 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno _____	108
TABELA 4.18 – Comparativo de custos dos sistemas estruturais, em relação ao sistema executado com fôrmas de polipropileno _____	114

1

INTRODUÇÃO

Os cálculos estruturais, até o início da década de 70, eram manuais. Os engenheiros utilizavam réguas de cálculo e diversas tabelas como ferramentas de trabalho. O f_{ck} utilizado naquela época era limitado a 15 MPa e as estruturas dos edifícios eram compostas por pilares, vigas e lajes de pequenas dimensões. Ao se conceber a estrutura, tinha-se em mente a economia das peças isoladamente. Vigas e lajes eram dimensionadas de forma que as seções fossem suficientes para obter armaduras econômicas. Os pilares sofriam reduções de seções ao longo do edifício a fim de economizar-se concreto. As reações das lajes eram obtidas através de tabelas e lançadas nas vigas, que eram calculadas como contínuas. As reações das vigas eram lançadas nos pilares, fazendo-se, posteriormente, o somatório de cargas nas fundações.

Vários fatores contribuíam para que as estruturas daquela época fossem mais rígidas, a destacar:

- o dimensionamento das lajes era feito através dos esforços calculados pelas tabelas baseadas na teoria da elasticidade, com predominância dos valores dos momentos negativos, resultando em lajes pouco deformáveis devido à sua considerável espessura;
- as vigas eram dimensionadas de forma a obter armaduras simples à flexão, buscando-se economia. A consequência disso é que se obtinha vigas com razoáveis seções e pouco deformáveis;

- como existiam poucos subsolos, as tensões admissíveis do solo eram mais baixas, o que acarretava fundações com maior rigidez;
- a altura total dos edifícios era menor;
- as alvenarias contribuía, em parte, como elementos de travamento da estrutura.

Em meados da década de 70, surgiram as calculadoras portáteis e as máquinas programáveis, possibilitando o desenvolvimento de pequenos programas que executavam rotinas tradicionais de cálculo. Grandes computadores passaram a ser utilizados em análises mais complexas, porém, para estruturas convencionais, tais máquinas eram economicamente inviáveis.

Na década de 80, o cálculo das lajes pelo método das linhas de ruptura tornou-se mais difundido. Tal método gerava momentos negativos menores, acarretando lajes mais esbeltas. A resistência do concreto passou a ser de 18 MPa, os vãos aumentaram, a quantidade de pilares reduziu e a rigidez das estruturas como um todo diminuiu. Os programas que calculavam esforços devidos ao vento passaram a ser mais utilizados. Nesta época, a consideração de tais esforços era feita através de modelos simplificados de pórticos planos.

No início da década de 90, os programas já se apresentavam bem desenvolvidos, haja vista que os mesmos calculavam os esforços solicitantes, detalhavam e desenhavam vigas, lajes, pilares e fundações. Os microcomputadores já eram utilizados em análises mais refinadas, tais como modelos de pórtico espacial para análise global da estrutura e de grelha plana e elementos finitos para análise de pavimentos. Intensificou-se a utilização de lajes lisas, maciças e nervuradas, contribuindo ainda mais para a diminuição da rigidez das estruturas. Na segunda metade da década de 90, os sistemas computacionais evoluíram de tal forma que se tornou possível a geração automatizada de modelos tridimensionais das estruturas, permitindo a análise da estabilidade global e a obtenção mais realista de esforços atuantes devidos às ações horizontais. Esta evolução podia ser percebida também na análise de pavimentos, com a criação de modelos automatizados para a análise através do método dos elementos finitos. Com a evolução dos sistemas computacionais, o engenheiro pôde usar o tempo que despendia

em tarefas de cálculo, detalhamento e desenho em análises estruturais mais apuradas. As ações do vento nos edifícios passaram a ser consideradas como corriqueiras, uma vez que os edifícios passaram a ter alturas cada vez maiores. O uso de concreto de maior resistência tornou-se muito difundido. Atualmente, é comum que as resistências variem entre 25 e 50 MPa. Intensificou-se o uso de lajes protendidas com cordoalhas não aderentes, aumentando-se os vãos.

Observando-se este breve histórico da evolução da construção civil e do cálculo estrutural, pode-se concluir que as estruturas estão cada vez menos rígidas e que o enfoque da concepção das estruturas mudou muito em relação à década de 70. Deve-se salientar que a elaboração deste histórico foi baseada em um artigo enviado à lista de discussões vinculada à TQS, cujos autores são COVAS e SILVA (2002). Atualmente, a grande exigência em relação à compatibilização de projetos, à diminuição do espaço útil e à necessidade de um grande número de vagas de garagem aumenta o grau de complexidade da concepção de uma estrutura.

Percebe-se a evolução da construção civil também através do emprego de novas técnicas e de novos materiais, quais sejam:

- divisórias em gesso acartonado;
- painéis pré-moldados de fachada;
- grandes centrais de ar condicionado;
- utilização de moldes de polipropileno para lajes nervuradas;
- utilização de lajes treliçadas pré-moldadas, entre outros.

1.1 Objetivos

Com o desenvolvimento da tecnologia da construção civil e da informática, possibilitando análises mais refinadas de estruturas, tornou-se viável a utilização dos seguintes sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado:

- lajes lisas;
- lajes nervuradas;
- lajes protendidas.

Diante desta diversidade de opções de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado, que o engenheiro possui ao conceber uma estrutura, um dos fatores mais relevantes para se decidir qual deles adotar é o econômico. Com a finalidade de fornecer subsídios para tal escolha é que se desenvolveu esse trabalho. Deve-se deixar claro, entretanto, que não se tem a pretensão de estabelecer o melhor sistema estrutural e sim de apresentar conclusões baseadas nos resultados obtidos através de análises, para que sirvam de referência na elaboração de anteprojetos.

Concebeu-se diversas opções de sistemas estruturais para cada pavimento analisado. Estes pavimentos foram dimensionados e detalhados empregando-se como ferramenta o CAD/TQS[®], um poderoso software utilizado nacionalmente em escritórios de projetos de estruturas. Em seguida, foram computados os quantitativos (volume de concreto, área de fôrma e materiais) e realizada uma comparação entre os custos dos diversos sistemas estruturais, para três pavimentos distintos analisados.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica, metodologia, exemplos de aplicação e considerações finais.

No segundo capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica. São citados aspectos importantes a serem analisados visando à economia nos projetos estruturais. Em seguida, tem-se uma breve exposição das teorias de lajes, onde são descritos os métodos de cálculo de esforços e de deslocamentos das lajes mais usuais. E, finalmente, são listados os sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado analisados neste trabalho, salientando-se as vantagens e as desvantagens de cada um.

No terceiro capítulo, apresenta-se a metodologia do trabalho. Inicia-se com uma sucinta descrição do software, CAD/TQS[®], utilizado na elaboração desta dissertação. Em seguida, são enumerados e explicados os modelos estruturais para cálculo de pavimentos tratados pelo software, além de se fazer breve descrição de alguns critérios adotados nos cálculos.

No quarto capítulo, são descritos os três pavimentos analisados e citados dados tais como cargas utilizadas no cálculo, f_{ck} , área do pavimento etc. São mostrados as fôrmas e os detalhamentos das lajes para cada sistema estrutural analisado. Apresentam-se os custos referentes a cada sistema e diversas planilhas comparativas, fazendo-se, então, considerações a respeito destes resultados.

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

No Anexo A, são mostrados apenas os detalhamentos das vigas-faixa do primeiro pavimento analisado, uma vez que a maior parte dos mesmos foi apresentada ao longo do trabalho. Nos Anexos B e C, são mostradas as fôrmas e os detalhamentos dos demais pavimentos analisados.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Economia no Projeto Estrutural

O engenheiro, ao conceber uma estrutura, deve levar em consideração vários fatores, entre os quais pode-se destacar:

- compatibilização entre o projeto estrutural e o arquitetônico, principalmente no que se refere ao aspecto estético e funcional deste último;
- compatibilização entre o projeto estrutural e os projetos complementares (elétrico, hidro-sanitário, incêndio etc.);
- ordem de grandeza das cargas atuantes na estrutura;
- métodos construtivos e infra-estrutura da região;
- custos.

Após criteriosa análise destes fatores, o sistema estrutural adotado deve ser o mais econômico possível. Conforme COSTA citado por ALBUQUERQUE (1999), “a evolução do processo construtivo começa pela qualidade dos projetos, e entre os projetos elaborados para a construção civil, destaca-se o estrutural. O projeto estrutural, individualmente, responde pela etapa de maior representatividade do custo total da construção (15% a 20% do custo total). Justifica-se então um estudo prévio para escolha do sistema estrutural a ser adotado, pois se sabe que uma redução de 10% no custo da estrutura pode representar, no custo total, uma diminuição de 2%. Em termos práticos,

2% do custo total corresponde à execução de toda etapa de pintura ou a todos os serviços de movimento de terra, soleiras, rodapés, peitoris e cobertura juntos”.

Inicialmente, os engenheiros pensavam que uma estrutura econômica era aquela que possuísse um baixo consumo de concreto e de aço. Atualmente, entretanto, sabe-se que apesar destes fatores serem importantes para a economia da estrutura, eles não são os únicos e tampouco decisivos para esta análise. A padronização é requisito básico para que se atinja menores custos, alta produtividade e melhor qualidade na construção civil. Segundo ABECE citado por ALBUQUERQUE (1999), “... com a estrutura padronizada, todos os outros elementos que serão construídos sobre ela seguem automaticamente o padrão preestabelecido no projeto estrutural”. A padronização das fôrmas, que representam em média 30% do custo da estrutura, gera grande produtividade, diminuindo mão-de-obra e tempo de execução, e, ainda, possibilita um maior reaproveitamento das mesmas. A fim de se atingir a padronização, deve ser evitada uma variação nas espessuras das lajes de um mesmo pavimento, assim como das seções das vigas e dos pilares. “Variações nas dimensões do pilar nos diversos pavimentos, além de dificultar a fôrma, às vezes aumenta o consumo de aço” ALBUQUERQUE (1999).

Ao se mensurar o custo de uma estrutura, além do volume de concreto, do peso de aço e da área de fôrmas, devem ser levados em consideração os seguintes itens:

- tempo despendido na execução;
- materiais empregados especificamente no sistema estrutural adotado;
- mão-de-obra;
- reutilização das fôrmas.

Há, na literatura técnica, vários estudos envolvendo sistemas estruturais para pavimentos em concreto armado, porém de maneira isolada. Poucos trabalhos fazem comparação entre os custos dos sistemas estruturais e quando a realizam é de maneira simplificada, levando-se em consideração apenas o consumo de concreto, de aço e de

fôrmas. Sabe-se, porém, que mão-de-obra, tempo de execução e materiais específicos são relevantes na composição dos custos de um determinado sistema estrutural.

2.2 Lajes

Lajes são estruturas laminares, solicitadas predominantemente por cargas normais a seu plano médio. Nos edifícios, as lajes aparecem como pisos e forros, lajes de escadas e fundos e tampas de caixas d'água. Além disso, as cortinas de contenção e paredes de caixas d'água são corriqueiramente tratadas como lajes. São, em sua maioria, retangulares e as bordas podem ser engastadas, simplesmente apoiadas ou livres. As cargas possíveis de atuarem nas lajes são:

- distribuídas em superfícies como, por exemplo, peso próprio, revestimentos, pessoas, móveis, veículos e utensílios;
- distribuídas em linhas, como é o caso de alvenarias descarregando diretamente sobre lajes;
- concentradas como pilares nascendo em lajes.

A NBR-6120 (1980) fixa as cargas para cálculo de estruturas de edificações. Para lajes, a carga distribuída por área p é composta somando-se a parcela de carga permanente (g) com a parcela de carga accidental (q). Logo, $p = g + q$.

Segundo o projeto de revisão da NBR-6118 (2000), “ações permanentes são as que ocorrem com valores constantes durante toda a vida da construção. Também são consideradas como permanentes as ações que crescem no tempo tendendo a um valor limite constante”. As principais ações permanentes diretas, que podem atuar sobre as lajes, são peso próprio, revestimentos e enchimentos. As alvenarias apoiadas diretamente sobre a laje também constituem ações permanentes, embora estejam distribuídas por metro linear.

Ainda conforme o projeto de revisão da NBR-6118 (2000), “as ações variáveis diretas são constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção, pela ação do vento e da chuva, devendo-se respeitar as prescrições feitas por normas específicas”.

2.2.1 Cálculo dos Esforços nas Lajes

- a) Quando se calcula o pavimento sem se considerar a interação entre os elementos (vigas e lajes), os esforços e os deslocamentos nas lajes podem ser obtidos através do cálculo elástico ou do plástico.

Cálculo elástico

No cálculo elástico, resolve-se a equação diferencial parcial do quarto grau, mostrada a seguir, para diversas condições de contorno.

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \frac{2\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = -\frac{p}{D} \quad (1)$$

Esta equação clássica interpreta muito bem o comportamento de lajes em concreto armado.

Onde, ω = deslocamento na direção vertical;

p = carga uniformemente distribuída;

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = \text{rigidez à flexão da laje, considerando-se a mesma constituída}$$

de material isótropo; h é a espessura da laje e E e ν são, respectivamente, o módulo de deformação longitudinal e o coeficiente de Poisson para o concreto.

Como a resolução manual desta equação é extremamente trabalhosa, pode-se obter soluções aproximadas através de recursos do cálculo numérico, empregando-se séries de Fourier para placas, integração numérica, MDF (método das diferenças finitas), MEF (método dos elementos finitos) e MEC (método dos elementos de contorno). Devido a

essa dificuldade, são utilizadas, normalmente, nos escritórios de projeto e nas escolas de engenharia, tabelas que foram obtidas aplicando-se a teoria da elasticidade para os tipos mais usuais de lajes.

Citam-se algumas “limitações” deste método:

- as lajes são calculadas isoladamente, sem levar em consideração a existência das outras lajes, vigas e pilares. Segundo IKEDA (2000), “as soluções tabeladas que levam em conta as peças estruturais adjacentes são raras”. Fazem-se necessários, portanto, alguns reajustes no cálculo, como é o caso da compatibilização de momentos fletores negativos;
- não se considera a flexibilidade das vigas de apoio;
- “resultados experimentais têm mostrado que lajes armadas em duas direções fissuram bastante a cargas abaixo da carga máxima. Quando a fissuração começa, a rigidez de partes da laje diminui e não podemos mais supor a laje com um comportamento linear e elástico. Momentos fletores baseados na teoria da elasticidade nos dizem pouco sobre como a laje está se comportando”. IKEDA (2000).

Cálculo plástico

O comportamento das lajes de concreto armado pode ser avaliado segundo a FIGURA 2.1.a, em que se apresenta o gráfico carga x deslocamento, para uma laje quadrada simplesmente apoiada submetida a um carregamento crescente e uniformemente distribuído. No início do carregamento, antes do aparecimento da primeira fissura (em torno de 30% da carga de ruptura), o comportamento da laje é elástico, trecho OA da FIGURA 2.1.a. No final do trecho OA e início do trecho AB da FIGURA 2.1.a, aparecem as primeiras fissuras das faces inferior e superior da laje, que podem ser representadas pela FIGURA 2.1.b.

Com o aumento da carga e a formação das fissuras, a rigidez da laje diminui, havendo uma redistribuição dos esforços, representada pelo trecho AB da FIGURA 2.1.a e pela FIGURA 2.1.c. Neste trecho, o comportamento das armaduras é ainda linear.

Aumentando-se a carga chega-se a um ponto em que ocorre a plastificação da armadura na face inferior, acompanhada do esmagamento do concreto na face superior. Esta situação representa o final do trecho CD da FIGURA 2.1.a e está ilustrada na FIGURA 2.1.d, em que também é mostrada a configuração simplificada de ruptura da laje. Quando ocorre a plastificação da armadura, a laje apresenta grandes acréscimos de flecha para pequenos acréscimos de carga, até o ponto em que não mais se consegue aplicar acréscimos de carga. Este é o ponto correspondente a carga de ruptura da laje, e o momento correspondente é o de ruptura.

O trecho BC é um trecho de transição entre a fase elástica das armaduras, acompanhadas de fissuração no concreto (trecho AB), e a fase de plastificação propriamente dita representada pelo trecho CD. Nesta última fase, as primeiras fissuras se espalham de forma aproximadamente linear, formando um mecanismo de colapso de forma simplificada poliédrica (FIGURA 2.1.d).

Existe um método de cálculo para lajes baseado no comportamento plástico, ou rígido-plástico do material, quando se desprezam as deformações elásticas (FIGURA 2.1.e), que permite a avaliação da carga de ruptura para lajes de concreto armado. Este método é normalmente chamado de método plástico ou rígido-plástico, ou método das linhas de ruptura, ou finalmente método das charneiras plásticas.

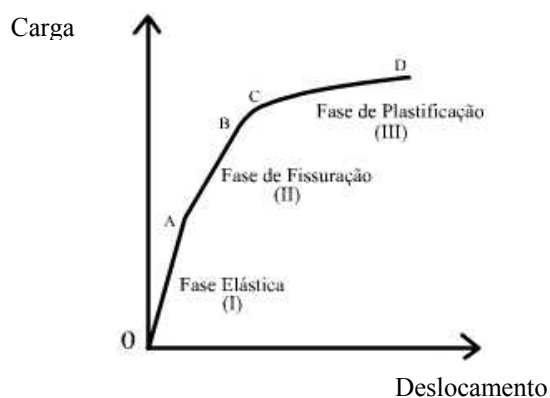
As charneiras plásticas foram inicialmente desenvolvidas por dois dinamarqueses, INGERSLEV (1921) que trabalhou com o método das forças nodais (equilíbrio de nós) e JOHANSEN (1932) que trabalhou com o método da energia, que é mais geral e se baseia no equilíbrio entre o trabalho interno realizado pelas charneiras e o trabalho externo das cargas aplicadas.

As hipóteses gerais do método das linhas de ruptura são:

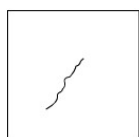
- as armaduras devem ser suficientemente fracas (sub-armadas) para que a ruptura ocorra por escoamento da armadura. Formação de mecanismo hipostático antes do colapso;

- as regiões entre as charneiras plásticas permanecem em regime elástico. Admitindo-se o material rígido-plástico, a forma da superfície média da laje torna-se poliédrica. Charneiras retas delimitando regiões planas;
- os momentos fletores positivos “ m ” e os negativos “ m' ” correspondentes à formação das charneiras e denominados “momentos de plastificação” são admitidos constantes ao longo dessas charneiras;
- não se consideram os esforços de membrana provenientes do impedimento dos deslocamentos no plano da laje (arqueamento e membrana tracionada).

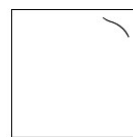
As duas primeiras limitações citadas no cálculo elástico também se aplicam ao cálculo plástico.



a) Comportamento das lajes

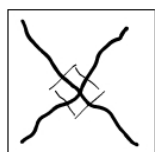


Face inferior

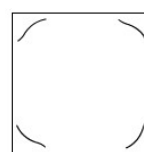


Face superior

b) Fase elástica (trecho I)

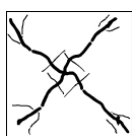


Face inferior

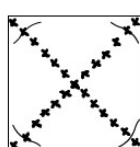


Face superior

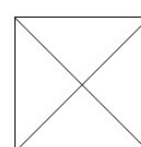
c) Fase de fissuração (trecho II)



Face inferior

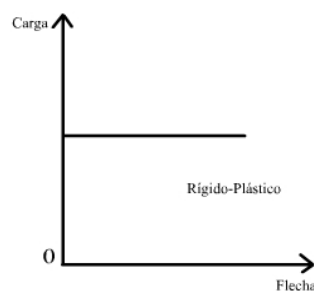
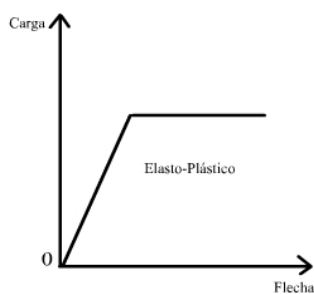


Face superior



Configuração simplificada de ruptura

d) Fase de plastificação (trecho III)



e) Materiais elasto-plástico e rígido-plástico

FIGURA 2.1 – Cálculo plástico

- b) Quando se considera a interação entre vigas e lajes, não há a decomposição da estrutura do pavimento em partes e, portanto, é necessário recorrer a métodos numéricos para a obtenção de esforços e de deslocamentos nas lajes. Os métodos mais usados são método das diferenças finitas, método dos elementos finitos e analogia de grelha, usado no software CAD/TQS[®].

Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos permite a análise de lajes em condições de carregamento, espessura e forma irregulares e variadas condições de contorno. Este método é aplicado também em análises não-lineares e modelagem de comportamentos complexos. Aplica-se, ainda, em lajes de grandes dimensões, com presença de aberturas e para diversas condições de contorno, além de realizar a simulação automática da continuidade dos painéis das lajes.

Este método consiste em dividir a estrutura em elementos de dimensões finitas, como elementos quadrangulares e triangulares, e estabelecer, para um certo número de nós, a relação entre os esforços e os deslocamentos. Em geral, estes nós são os vértices dos elementos. A partir desta relação, em cada elemento, monta-se um sistema de equações algébricas lineares com a contribuição de todos os elementos, que após a imposição das condições de contorno é resolvido, obtendo-se os deslocamentos nodais. De posse destes valores, pode-se obter deslocamentos, deformações e tensões no interior de qualquer elemento.

Existem alguns fatores que dificultam o uso do método dos elementos finitos em escritório de projetos de estruturas:

- diversidade de elementos. Existem vários elementos de flexão de placas com diversos formatos, configurações e restrições nodais. Conforme IKEDA (2000), “os mais conhecidos são os elementos quadriláteros desenvolvidos por Clough-Felippa e por Fraeijs de Veubeke, e o elemento retangular com 12 graus de liberdade

desenvolvido por Adini, Clough e Melosh, entre outros”. Cabe ao usuário a escolha dos melhores elementos e malhas para cada situação;

- ausência de familiaridade com o método dos elementos finitos. Nas escolas de engenharia, este assunto é abordado com muita superficialidade. Porém, para que se realizem análises confiáveis, utilizando-se este método, é necessário razoável conhecimento teórico e prático, além de uma certa experiência;
- custo da mão-de-obra elevado, por ser uma análise em que se exige alto grau de qualificação.
- receio do uso de modelagens que consideram a fissuração do concreto.

Analogia de Grelha

Conforme IKEDA (2000), Hillerborg realizou uma simplificação da teoria da elasticidade, desconsiderando-se o momento de torção na laje. Conseqüentemente, pode-se analisar a laje como um sistema de faixas, normalmente dispostas em 2 direções ortogonais. Os momentos podem ser calculados pelo equilíbrio das faixas utilizando-se os recursos da estática.

A técnica de Analogia de Grelha trabalha com elementos lineares, mais especificamente com elementos de barra, reduzindo a resolução da estrutura a um problema de análise matricial que é a resolução de uma grelha. Neste método, faz-se a substituição da placa por uma malha equivalente de vigas. Ao se fazer tal substituição, deve-se garantir que a placa e o reticulado equivalente deformem-se de modo idêntico e apresentem os mesmos esforços ao serem submetidos a um mesmo carregamento.

2.3 Sistemas Estruturais para Pavimentos de Concreto Armado Abordados nesta Dissertação

Os sistemas estruturais analisados nesta dissertação são:

- sistema estrutural convencional constituído de lajes maciças;

- sistema estrutural convencional constituído de lajes nervuradas;
- sistema estrutural constituído de lajes lisas maciças;
- sistema estrutural constituído de lajes lisas nervuradas.

Existem, ainda, outros sistemas estruturais para pavimentos tais como, lajes pré-moldadas (lajes treliçadas, lajes com vigotas e lajes alveolares), lajes protendidas com monocordoalhas engraxadas e lajes com fôrmas metálicas incorporadas (steel deck). Estes sistemas não serão abordados para não tornar este trabalho demasiadamente extenso.

2.3.1 Sistema Estrutural Convencional

Neste sistema estrutural, as lajes maciças apóiam-se sobre vigas, que, por sua vez, apóiam-se em pilares. É o sistema mais antigo usado em pavimentos de concreto armado. Antigamente, os vãos limitavam-se, em média, a 5 m, isto ocorria devido à baixa resistência do concreto e às hipóteses simplificadoras dos modelos estruturais utilizados.

Segundo o item 6.1.1.1 da NBR-6118 (1980), a espessura mínima para as lajes é:

- a) 5 cm em lajes de cobertura não em balanço;
- b) 7 cm em lajes de piso e lajes em balanço;
- c) 12 cm em lajes destinadas a passagem de veículos.

Este sistema confere à estrutura razoável rigidez, tanto no plano do pavimento como espacialmente devido à presença de uma quantidade maior de vigas. Espacialmente, há uma maior formação de pórticos, que proporcionam rigidez à estrutura de contraventamento. O pavimento apresenta menores deformações, pois a laje contribui para o aumento da rigidez das vigas. Outra vantagem deste sistema é que, por ser muito antigo, a mão-de-obra é bem treinada. Para grandes vãos, este sistema estrutural não é muito indicado, já que as lajes passam a necessitar de espessuras cada vez maiores para vencer os vãos. Com o aumento da espessura, há um conseqüente aumento do peso

próprio da laje e do consumo de concreto, inviabilizando economicamente tal sistema. Devido à presença de grande quantidade de vigas, as fôrmas tornam-se muito recortadas, aumentando o consumo das mesmas e diminuindo, assim, o reaproveitamento e a produtividade na execução. Apresenta, ainda, grande consumo de concreto.

Com a evolução da tecnologia da construção e da informática, tornou-se possível o uso de sistemas estruturais mais arrojados, como é o caso de lajes nervuradas e lisas.

2.3.2 Sistema Estrutural Constituído por Lajes Nervuradas

Conforme o item 3.3.2.10 da NBR-6118 (1980), lajes nervuradas são “... as lajes cuja zona de tração é constituída por nervuras entre as quais podem ser postos materiais inertes, de modo a tornar plana a superfície externa...”. Ao se discretizar a zona tracionada em nervuras, há uma grande economia em volume de concreto e, conseqüentemente, redução do peso próprio da laje, além de se obter lajes com maior inércia para um mesmo volume de concreto. Todas estas vantagens contribuem para que este sistema estrutural seja usado para vencer grandes vãos.

Os materiais inertes mais usados são os blocos de EPS (poliestireno expandido) e de CCA (concreto celular autoclavado). São utilizados, embora em menor escala, tijolos cerâmicos, já que incorporam maior peso próprio à estrutura. Pode-se também optar pela não colocação de materiais inertes. Neste caso, são usadas fôrmas apropriadas para moldar a laje nervurada. Serão mostradas a seguir algumas características dos blocos de EPS e concreto celular autoclavado e das fôrmas utilizadas para moldar as lajes nervuradas.

a) EPS

Definição

É uma matéria-prima revolucionária na área da construção civil. EPS é sigla padronizada pela ISO - International Organization for Standardization para o poliestireno expansível. No Brasil, é mais conhecido como isopor, marca registrada de uma empresa. Descoberto pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz em 1949, na Alemanha, este derivado do petróleo é um monômero polimerizado em meio aquoso, que recebe uma adição de gás pentano (inofensivo à natureza) – agente expensor. O EPS é industrializado em “pérolas” milimétricas, capazes de expandir-se até 50 vezes quando expostas ao vapor d’água. O resultado é uma espuma rígida formada por 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. Em 1 m³ de EPS há 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar, que impedem a passagem de líquidos como a água.

Propriedades

Do ponto de vista prático, para o uso na construção civil, a microarquitetura confere a ele as seguintes propriedades:

- baixo peso específico. Existem três tipos distintos de EPS:

TABELA 2.1 – Relação entre tipo e peso específico do EPS (TÉCHNE, n^o 50)

Tipo	Peso específico
1	varia entre 13 e 16 kgf/m ³
2	varia entre 16 e 20 kgf/m ³
3	varia entre 20 e 25 kgf/m ³

- baixa condutividade térmica e acústica;
- boa resistência mecânica;
- é um material inerte e reciclável. Os produtos fabricados com EPS podem ser remodelados para aplicações que não exijam aparência e características mecânicas homogêneas (caixões perdidos para lajes, por exemplo). Não contém e não produz CFC (clorofluorcarbonados), portanto, é um material não poluente.

Aplicações na construção civil

A timidez com que os fabricantes de EPS exercitaram seu marketing para a construção civil fez com que a sua utilização ficasse limitada, embora esteja em crescimento exponencial, mostrando-se numa grande tendência para o futuro. As principais aplicações do EPS na construção civil são:

- isolamento térmico para telhados, paredes, forros e pisos (é aplicado sob pisos de materiais “frios” como cerâmica e pedra, gerando conforto aos pés do usuário);
- isolamento acústico. Usado nos pisos flutuantes para evitar que as vibrações de impacto sejam transmitidas para os outros pavimentos;
- impermeabilização de lajes;
- juntas de concretagem e de dilatação;
- concreto leve, substituindo o agregado graúdo. É aplicado em situações que não se exigem grandes resistências mecânicas, como é o caso de regularização de lajes, elementos pré-fabricados, elementos tipo “móveis” (bancos para ambientes externos, balcões), etc;
- fundações em obras pesadas (rodovias, portos, píer), substituindo solos de baixa resistência mecânica e reduzindo, também, o peso de aterros em solos instáveis;
- contenção de encostas, utilizando-se grandes blocos;
- drenagem em estruturas de contenção;
- painéis divisórios e autoportantes;
- alvenarias: é um sistema de blocos encaixáveis de EPS lançado há pouco tempo no Brasil. São blocos vazados, que funcionam como fôrmas para a concretagem das paredes;
- fôrmas para concreto: os blocos de EPS podem servir como complemento de fôrmas de madeira, quando houver dificuldades para a fabricação de fôrmas muito recortadas;
- caixão perdido para lajes industrializadas;
- enchimentos: construção de casas e de clubes, inclusive piscinas, banheiros e refeitórios;

- lajes pré-fabricadas: diminuição do peso e conseqüentemente redução do custo. Há, também, uma diminuição do escoramento e de carga nas fundações. A necessidade de fôrmas é eliminada;
- enchimento de lajes nervuradas: há uma redução significativa do peso próprio da laje.

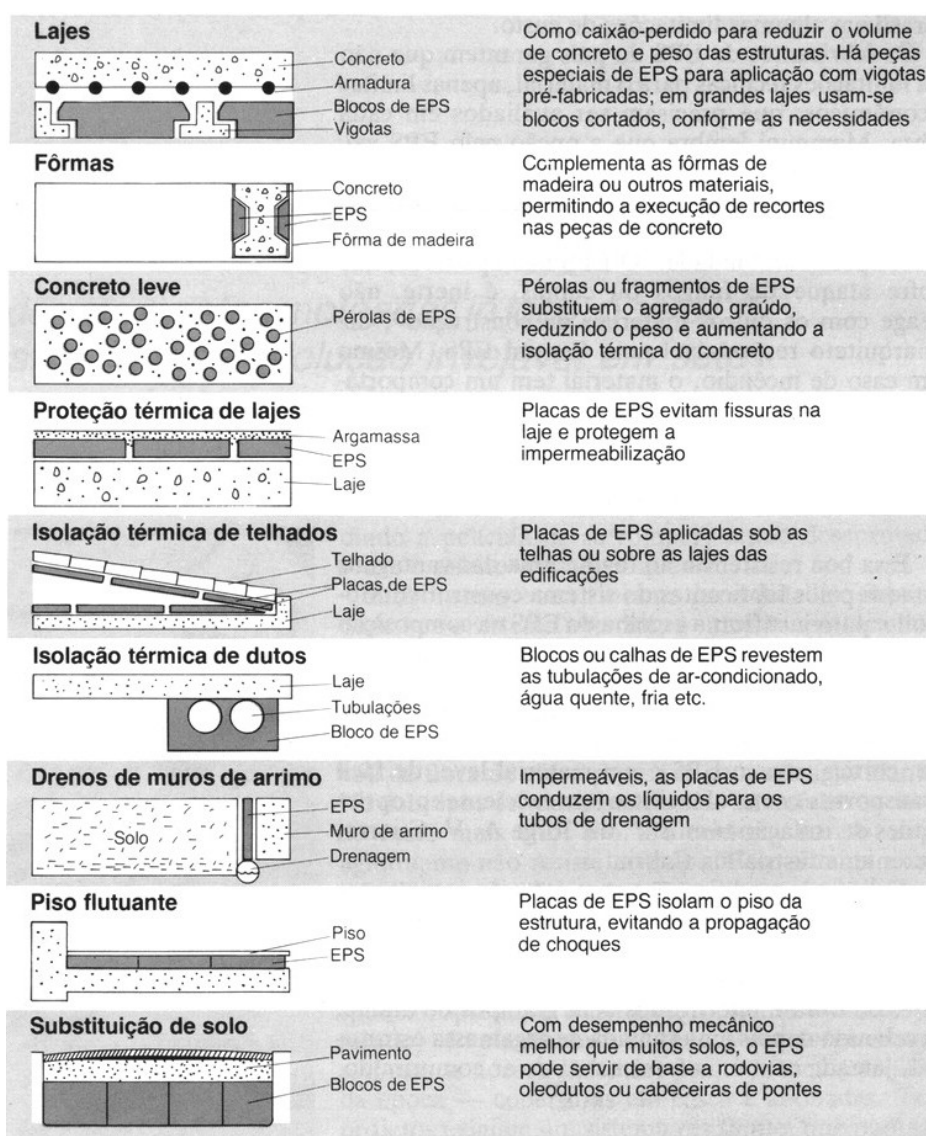


FIGURA 2.2 – Aplicações do EPS na construção civil (TÉCHNE, nº 1)

Vantagens do emprego do EPS em lajes nervuradas

- por apresentar baixo peso específico, o EPS proporciona uma significativa redução do peso próprio da estrutura e conseqüentemente economia em aço, concreto e na fundação. Essa sua propriedade favorece o seu manuseio, tanto no transporte vertical quanto no horizontal, acarretando economia de mão-de-obra. Tudo isso aumenta a produtividade, diminui o tempo de execução e reduz mão-de-obra;
- EPS para preenchimento de lajes nervuradas é produzido em grandes blocos, permitindo recortes nas dimensões desejadas. Os cortes no EPS são muito fáceis de serem feitos (com uso de facas ou de serrotes, por exemplo) e não há perda devido a quebras. Há, também, facilidade em executar cortes para passagem de tubulações utilizando-se, por exemplo, um secador quente;
- por ser um material que possui baixa absorção de água, não prejudica a cura do concreto;
- proporciona maior conforto acústico, pois há uma redução de ruídos entre pavimentos;
- é um material seguro, pois em caso de incêndio não propaga chamas (classe F), ou seja, tem um comportamento auto-extingüível, liberando apenas vapor d'água na queima;
- não apodrece, não mofa, não serve de alimento para microrganismos;
- pode ser estocado naturalmente ao tempo;
- custo acessível.

Em síntese, o EPS possui as seguintes vantagens:

- para o engenheiro de estruturas, possibilita a execução de estruturas leves, gerando redução no custo dos materiais (concreto, aço e madeira) nos diversos elementos estruturais: lajes, vigas, pilares e fundações;
- para o construtor, gera facilidade no transporte horizontal e vertical das peças, proporcionando redução do volume de mão-de-obra e aumento de produtividade;

- para o arquiteto, fornece condições de construções com amplos vãos livres, desfrutando de conforto térmico acompanhado de redução no consumo de energia elétrica;
- para o proprietário, resulta em construções mais econômicas e mais confortáveis.

Desvantagens do emprego do EPS em lajes nervuradas

- por apresentar baixo peso específico, o processo de concretagem torna-se mais difícil;
- incorporam carga permanente à laje, quando comparado com fôrmas constituídas de moldes de polipropileno;
- o EPS não pode receber diretamente o revestimento. O revestimento da face inferior da laje deve ser feito com chapisco, utilizando-se um aditivo de base acrílica (PVA), que estabeleça a ponte de ligação estável entre o EPS e os materiais de natureza cristalina (chapisco).

b) concreto celular autoclavado

Definição

O concreto celular autoclavado foi desenvolvido na Suécia em 1924, quando o engenheiro Ivar Eklund e o professor Lennart Forsén iniciaram pesquisas a partir de argamassa de cimento e de areia. Segundo a NBR-13.438 (1995), o concreto celular autoclavado é “concreto leve, obtido através de um processo industrial, constituído por materiais calcários (cimento, cal ou ambos) e materiais ricos em sílica, granulados finamente. Esta mistura é expandida através da utilização de produtos formadores de gases, água e aditivos, se for o caso, sendo submetidos à pressão e temperatura através de vapor saturado. O concreto celular autoclavado contém células fechadas, aeradas e uniformemente distribuídas”. Deve, ainda, possuir peso específico na faixa de 300 a 1000 kgf/m³. Uma empresa mineira produz o concreto celular autoclavado a partir de uma mistura de cimento, cal, areia, agente expensor (pó de alumínio) e água. A areia,

com alto teor de quartzo, é refinada em um moinho de bolas, via úmida, até atingir a granulometria adequada. Após perfeita homogeneização dos materiais, deposita-se a mistura em moldes. O alumínio reage com os componentes alcalinos do cimento, liberando gás hidrogênio. A liberação deste gás expande a mistura, formando inúmeras pequenas bolhas de ar, dispersas igualmente em toda a massa do material. A cura final do material ocorre em autoclaves, durante um período de, aproximadamente, 10 horas, em ambiente de vapor saturado à pressão de 12 atmosferas, originando um silicato de cálcio tetrahidratado.

Os produtos de concreto celular autoclavado são classificados conforme sua resistência à compressão e seu peso específico.

Propriedades

- os blocos de concreto celular autoclavado, usados para preenchimento de lajes nervuradas, apresentam elevada resistência mecânica. Sua resistência mínima à ruptura por compressão é de 15 kgf/cm²;
- estes blocos possuem reduzido peso específico. O valor usado para cálculo estrutural é de 500 kgf/m³;
- é um produto incombustível;
- apresenta baixa condutividade térmica e acústica;
- não degradam nem alteram sua composição ao longo dos anos, sendo imunes ao ataque de parasitas ou de cupins;
- não contém substâncias tóxicas ou agentes nocivos à saúde ou ao meio ambiente.

Aplicações na construção civil

- painéis armados para laje e para vedação;
- blocos para vedação e estruturais;
- canaletas;
- vergas e contra-vergas;
- blocos para enchimento de lajes nervuradas e pré-fabricadas.

Vantagens do emprego do concreto celular autoclavado em lajes nervuradas

- devido ao seu reduzido peso específico, os blocos de concreto celular autoclavado proporcionam uma redução do peso próprio da estrutura e carga nas fundações, acarretando diminuição nos custos;
- facilita a execução da armação, concretagem e instalações, pois pode ser facilmente serrado ou cortado e é de fácil manuseio (ver dimensões na TABELA 2.2), proporcionando redução de mão-de-obra;
- pode receber diretamente o revestimento final;
- os blocos são posicionados facilmente nos espaços definidos pela armação, não necessitando fixação adicional para a concretagem.

TABELA 2.2 – Dimensões dos blocos de concreto celular autoclavado usados como materiais inertes em lajes nervuradas (catálogo SICAL)

DIMENSÕES (cm)					
Comprimento	60	60	60	40	30
Largura	30	37,5	60	40	30
Espessura	A partir de 10 cm modulado em 2,5 cm até o máximo de 60 cm				



FIGURA 2.3 – Corte de bloco de concreto celular autoclavado com o uso de um serrote (catálogo SICAL)

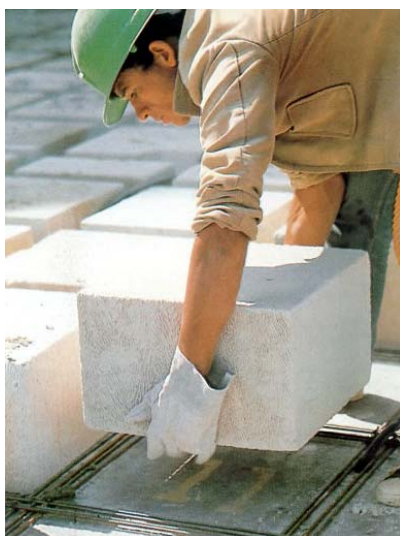


FIGURA 2.4 – Posicionamento de bloco de concreto celular autoclavado nos espaços definidos pela armação (catálogo SICAL)

Desvantagem do emprego do concreto celular autoclavado em lajes nervuradas

- incorpora carga permanente à laje.

c) fôrmas de polipropileno

Definição

São moldes, em polipropileno, desenvolvidos especialmente para construção de lajes nervuradas. Esta tecnologia foi desenvolvida na Inglaterra há mais de 30 anos e é utilizada hoje em mais de 30 países, inclusive no Brasil. Eles são comercializados por algumas empresas em regime de locação e por outras em regime de vendas. Segundo informações de uma empresa que comercializa moldes para lajes nervuradas em regime de venda, a vida útil de cada molde é de 100 utilizações e em apenas 13, o construtor já reaverá o capital empregado na compra, comparando-se com o preço de locação praticado no mercado. Optou-se, neste trabalho, pelos moldes comercializados em regime de locação.

Propriedades

São reforçadas internamente, garantindo deformações mínimas na concretagem.

Aplicações na construção civil

Servem de molde para construção de lajes nervuradas. Ver FIGURA 2.5, FIGURA 2.6 e FIGURA 2.7.

Vantagens do emprego de fôrmas de polipropileno em lajes nervuradas

- não incorporam peso à laje;
- eliminam a necessidade do uso de compensado e inertes. Com isso, contribuem para a preservação ambiental, já que reduzem o uso de madeira para a laje;
- atendem a diversos tipos de projetos, pois são encontradas com diversas dimensões e alturas;
- por serem leves (o peso da unidade varia de 2 a 13 kgf), facilitam o manuseio na obra;
- a montagem e a desforma são extremamente fáceis, uma vez que podem ser apoiadas diretamente sobre o escoramento;
- a laje apresenta boa estética após executada, não sendo necessária a aplicação de nenhum revestimento, ver FIGURA 2.8;
- fácil desforma manual, sem necessidade de utilização de ar comprimido.

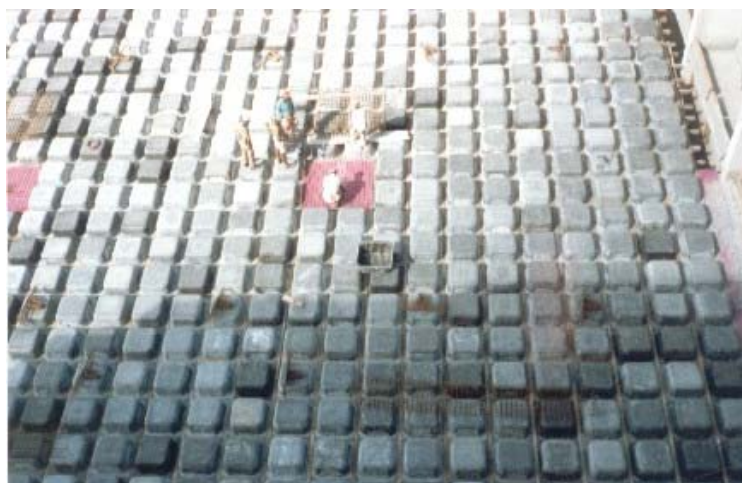


FIGURA 2.5 – Moldes em polipropileno sendo utilizados para compor fôrma de laje nervurada (catálogo ATEX)



FIGURA 2.6 – Escoramento dos moldes de polipropileno (catálogo ATEX)



FIGURA 2.7 – Escoramento dos moldes de polipropileno (catálogo ATEX)



FIGURA 2.8 – Vista acabada de laje nervurada constituída com moldes de polipropileno (catálogo ATEX)

Desvantagens do emprego de fôrmas de polipropileno em lajes nervuradas

Alguns arquitetos não aprovam o uso deste sistema pelo fato de a face inferior da laje não apresentar uma superfície plana, acarretando a necessidade do emprego de forros, aumentando o custo do sistema.

2.3.3 Sistema Estrutural Constituído por Lajes Lisas com Vigas de Borda

Conforme BRANCO citado por ALBUQUERQUE (1999), “as lajes-cogumelo foram introduzidas por Turner, em 1905, nos Estados Unidos da América, país onde ocorreu também o primeiro acidente grave com este tipo de estrutura: o desabamento do Prest – O– Lite Building, em Indianápolis, Indiana, em dezembro de 1911, matando nove pessoas e ferindo gravemente vinte”.

Segundo o projeto de revisão da NBR-6118 (2000), “lajes cogumelo são lajes apoiadas diretamente em pilares, com capitéis, enquanto lajes lisas são as apoiadas nos pilares sem capitéis”.

Conforme MELGES citado por ALBUQUERQUE (1999), “o fenômeno da punção de uma placa é basicamente a sua perfuração devida às altas tensões de cisalhamento, provocadas por forças concentradas ou agindo em pequenas áreas. Nos edifícios com lajes-cogumelo, esta forma de ruína pode se dar na ligação da laje com os pilares, onde a reação do pilar pode provocar a perfuração da laje”. A função do capitel é conferir maior rigidez à ligação entre laje e pilar.

A verificação da punção, conforme a NBR-6118 (1980), é feita segundo o método da superfície de controle, ou seja, calcula-se a tensão nominal de cisalhamento em uma determinada superfície de controle. Uma vez calculada esta tensão e de posse da resistência do concreto, pode-se fazer a verificação da punção.

Um dos benefícios do uso de lajes sem vigas (lisa ou cogumelo) é a grande liberdade de layout dos pavimentos devida à presença de vigas apenas na periferia dos mesmos. Uma

das grandes vantagens das lajes lisas sobre as lajes-cogumelo é a ausência de recortes nas fôrmas, o que proporciona grande produtividade na obra. Isto explica o emprego cada vez maior de lajes lisas em edifícios em detrimento às lajes cogumelo que, devido à presença de capitéis, deixam de ser um sistema estrutural vantajoso.

Conforme ALBUQUERQUE (1999), “com a utilização mais freqüente das lajes lisas, observou-se que a utilização de vigas nas bordas do pavimento trazia uma série de vantagens, sem com isso prejudicar o conceito da ausência de recortes na fôrma do pavimento:

- não prejudicam a arquitetura;
- formam pórticos para resistir às ações laterais;
- impedem deslocamentos excessivos nas bordas;
- eliminam a necessidade de verificação de punção em alguns pilares”.

Segundo a NBR-6118 (1980), o cálculo de lajes sem vigas pode ser feito através de pórticos múltiplos, respeitando-se algumas restrições. Porém, com a evolução da informática, atualmente são utilizados processos mais elaborados, tais como elementos de contorno, diferenças finitas e método dos elementos finitos.

As lajes lisas podem ser maciças ou nervuradas. Caso sejam nervuradas, é feito em torno do pilar o que se chama de capitel embutido, ou seja, uma região de concreto maciça para enrijecer a ligação entre a laje e o pilar.

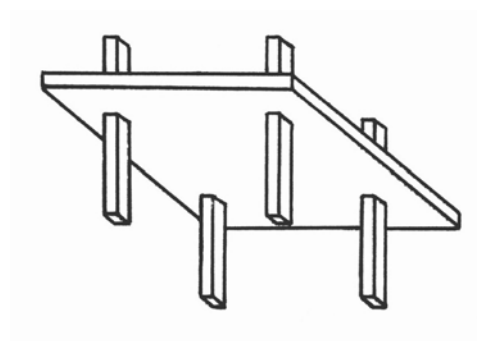


FIGURA 2.9 – Laje lisa maciça (MELGES citado por ALBUQUERQUE)

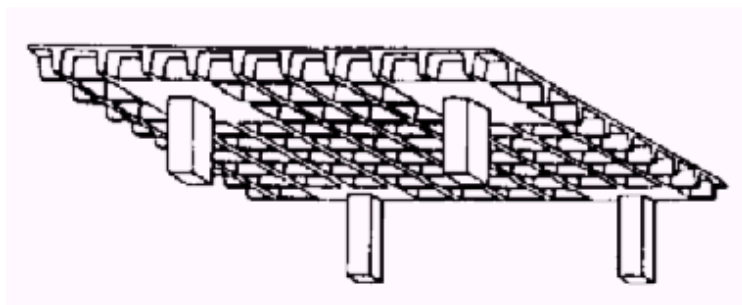


FIGURA 2.10 – Laje lisa nervurada (MELGES citado por ALBUQUERQUE)



**FIGURA 2.11 – Laje lisa nervurada com a presença de capitéis embutidos
(catálogo ATEX)**

Como as lajes lisas são indicadas para vencer grandes vãos, a laje lisa maciça torna-se antieconômica devido ao alto consumo de concreto.

As estruturas constituídas por lajes lisas têm como vantagem a simplicidade na execução e retirada das fôrmas, visto que as únicas regiões onde são realizados recortes é no encontro da laje com os pilares. Com isso, há um menor consumo de madeira, redução de mão-de-obra e maior aproveitamento da fôrma. Há, ainda, maior facilidade

na concretagem devida à existência de um único pano. Outra vantagem, esta mais subjetiva, porém não menos importante, é o grande apelo comercial, proporcionado por este sistema estrutural, que gera uma incrível liberdade de definição de espaços internos. Entretanto, a menor quantidade de vigas reduz o número de pórticos e, portanto, a rigidez da estrutura. O cálculo destas lajes é mais rebuscado (deve-se verificar a punção nas lajes) e a armação é mais complexa, em especial, na região dos pilares, o que resulta, neste sistema, na necessidade de uma maior qualificação não só do engenheiro de estruturas bem como da mão-de-obra.

3

METODOLOGIA

3.1 CAD/TQS[®]

O software CAD/TQS[®] é “um sistema integrado para projetos de estruturas tridimensionais de concreto armado, que inclui o cálculo matricial espacial de solicitações, deslocamentos, dimensionamento, detalhamento e desenho para os elementos de lajes, vigas, pilares, sapatas e blocos”, conforme manuais do CAD/TQS[®] (2000).

Este software vem evoluindo continuamente ao longo dos últimos dezessete anos. A prova disto é que são disponibilizadas novas versões para os usuários freqüentemente. Estas versões contêm inovações, tais como novos critérios de cálculo, detalhamento e desenho. Além destas alterações, também há o aperfeiçoamento constante dos modelos matemáticos, tornando-os cada vez mais próximos dos modelos físicos. É o caso da consideração da não linearidade geométrica para pórticos espaciais, verificação de pilares esbeltos por processo exato não linear (física e geométrica) e cálculo de lajes através do modelo de grelha, levando-se em consideração a não linearidade física do concreto armado. Uma das grandes e talvez mais significativas alterações que o software já sofreu foi o lançamento, em 2000, da versão 8.0 para ambiente Windows[®], pois, até então, era usado no sistema operacional MS-DOS[®]. A interface com o usuário tornou-se excepcionalmente amigável e a operação do software mais simples e rápida. Neste ano, 2002, foi lançada a versão 9.0, que trouxe alterações bastante significativas,

em especial no lançamento da estrutura. Esta versão possui um novo “modelador estrutural”, que otimiza o tempo despendido para o lançamento da estrutura. Além do aprimoramento dos comandos já existentes, há ainda novos comandos que facilitam não só o aprendizado para os novos usuários do software, bem como agiliza a operação de lançamento da estrutura para usuários antigos. Como exemplo das inovações da versão 9.0, tem-se a visualização tridimensional de uma ou mais fôrmas simultaneamente, sem a necessidade de processamento da estrutura.

A entrada de dados é feita graficamente, pavimento a pavimento. Para cada pavimento, fornece-se as dimensões dos elementos estruturais e seus carregamentos de uma maneira bem simples.

A versão utilizada para a elaboração deste trabalho é a 8.3, portanto em ambiente Windows[®].

3.2 Modelos Estruturais para Pavimentos Tratados pelo CAD/TQS[®]

Há diversas opções de modelos estruturais para pavimentos ao utilizar-se o software CAD/TQS[®]. O engenheiro deve ter discernimento para escolher o modelo que seja mais adequado a cada estrutura. O software disponibiliza os seguintes modelos estruturais para cálculo de pavimentos: convencional, grelha e elementos finitos.

3.2.1 Modelo Convencional

O modelo convencional ou simplificado é o mais usado em edificações. Trata-se do modelo em que as lajes apóiam-se sobre as vigas contínuas, que se apóiam em pilares. O cálculo das reações das lajes é feito segundo um processo geométrico baseado no critério 3.3.2.9 da NBR-6118 (1980). Conforme PEREZ (1999), “levando-se em consideração as condições de contorno, divide-se a laje isolada em triângulos e trapézios, obtendo-se partição semelhante a um diagrama de telhado. As reações de apoio são obtidas a partir das áreas destes triângulos e trapézios, nos quais um dos lados é o apoio e os demais são ‘linhas de ruptura’. Por fim, admite-se que estas reações

estejam distribuídas uniformemente ao longo dos respectivos apoios”. O sistema determina os esforços através dos processos elásticos ou plásticos, mediante consulta a tabelas de cálculo de lajes retangulares. Os apoios das lajes são sempre rígidos, ou seja, não se considera a flexibilidade das vigas e as mesmas são consideradas retangulares, independentemente da geometria.

Para lajes de grandes dimensões e de formato qualquer, este modelo convencional é excessivamente simplificado. Segundo os manuais do CAD/TQS[®] (2000), tal modelo “permite o cálculo rápido de lajes através de hipótese simplificadoras, devendo ser usado exclusivamente para lajes de pequenas dimensões e comportamento bem conhecido. Em lajes de maiores dimensões, que interagem com o resto da estrutura de maneira não trivial, como lajes planas maciças e nervuradas com ou sem capitel, ou em fôrmas onde as vigas não podem ser consideradas como apoios rígidos, recomenda-se o cálculo mais apurado através dos modelos de grelha ou elementos finitos”.

Obviamente, os esforços e deslocamentos das lajes são influenciados pela flexibilidade das vigas. MAZZILI citado por PEREZ (1999) “estudou amplamente este assunto e sugere um critério prático para projeto de estruturas de edifícios e pontes. Foram definidos três índices:

- índice de flexibilidade da laje:

$$I_l = \frac{h^3 \sqrt{ab}}{12(1-\nu)} \quad (2)$$

onde: h = espessura da laje (cm)

a = maior lado da laje (cm)

b = menor lado da laje (cm)

ν = 0,2 (coeficiente de Poisson do concreto)

- índice de flexibilidade da viga:

$$I_v = \frac{bh^3}{12} \quad (3)$$

onde: b = largura da viga (cm)

h = altura da viga (cm)

- índice relativo laje/viga:

$$I_{LV} = \frac{I_L}{I_V} \quad (4)$$

Mazzili constatou que para lajes cujas vigas de apoio são tais que o valor de I_{LV} é muito menor que 1 a teoria das linhas de ruptura é válida. Já para lajes cujas vigas de apoio são tais que I_{LV} é maior que 1 não é recomendável o uso da teoria das linhas de ruptura”.

3.2.2 Demais Modelos

Nos modelos de grelha e elementos finitos, todo o pavimento é calculado “por processo matricial, com deslocamentos verticais de vigas e lajes compatibilizados”, conforme manuais do CAD/TQS® (2000), ou seja, os elementos estruturais do pavimento trabalham solidariamente. Estes dois modelos matemáticos representam melhor o modelo físico, principalmente para lajes de grandes dimensões, pois levam em consideração a interação entre os elementos (lajes e vigas), reproduzindo, assim, o comportamento monolítico dos pavimentos de concreto armado. Trabalhos recentes desenvolvidos no Brasil levam em consideração tal comportamento, entre eles pode-se destacar os realizados por CARBONARI, G. et alii e MAZZILLI citados por BARBOZA (1992) e também na sua própria dissertação, BARBOZA (1992). Nestes estudos, percebe-se a discrepância entre os resultados ao se analisar a laje isoladamente ou considerando-se a interação entre os elementos.

a) modelo de grelha

No modelo de grelha, faz-se a discretização das lajes em barras, substituindo-se a placa por uma malha equivalente de vigas. Para as lajes nervuradas, as nervuras por si só formam tal malha.

b) modelo de elementos finitos

No modelo de elementos finitos, faz-se a discretização das lajes em elementos de placas que podem ser quadrangulares ou triangulares.

3.3 Modelo Estrutural Adotado nas Análises

O modelo estrutural adotado para o cálculo dos sistemas estruturais constituídos de lajes lisas maciças e nervuradas foi o de grelha. Para o sistema estrutural convencional com lajes maciças, o modelo adotado foi o simplificado, visto que neste sistema a laje apresenta um comportamento mais conhecido. O módulo do programa referente ao cálculo, utilizando o método dos elementos finitos, não foi disponibilizado junto ao pacote cedido pela empresa TQS Informática Ltda. para a realização deste trabalho.

3.3.1 Parametrização

Uma das vantagens do uso do software CAD/TQS[®] é a possibilidade da definição de inúmeros critérios de cálculo, dimensionamento, detalhamento e desenho da estrutura. O engenheiro sente-se mais seguro, uma vez que tem um grande conhecimento e, até mesmo, controle do que está sendo realizado pelo software, além de ser possível definir a modelagem de cálculo. Serão citados alguns desses critérios a título de exemplificação.

a) deformação lenta

Utilizando-se o modelo de grelha é possível simular a deformação lenta através de combinações adequadas de casos de carregamentos. Para tanto, é necessário definir os carregamentos permanentes e acidentais da laje separadamente. Conforme o item 4.2.3.1 da NBR-6118 (1980), para a determinação das deformações das peças fletidas, permite-se o Estádio I para lajes, podendo proceder de acordo com o item B para ações de longa duração: “Para levar em conta o efeito de deformação lenta, permite-se avaliar a flecha final devida às ações de longa duração, aplicadas logo após o término da construção, como o produto do valor da flecha imediata respectiva pela relação das curvaturas final e inicial na seção de maior momento em valor absoluto, calculadas através de

$$\frac{1}{r} = \frac{|\epsilon_c| + \epsilon_s}{d} \quad (5)$$

fazendo ϵ_c final igual a três vezes o valor de ϵ_c inicial e ϵ_s constante e igual ao seu valor inicial”, onde ϵ_c e ϵ_s são, respectivamente, a deformação máxima de compressão do concreto e a deformação da armadura tracionada, sendo d a altura útil da seção. Logo:

$$y_\infty^g = k y_o^g \quad (6)$$

$$k = \frac{\left(\frac{1}{r}\right)_\infty}{\left(\frac{1}{r}\right)_o} \quad (7)$$

Onde y_o^g e y_∞^g são as flechas devidas às cargas permanentes (g) no tempo “o” (zero) e “∞” (infinito), respectivamente, e k é a relação entre as curvaturas final e inicial da seção.

Com, $\epsilon_{s,\infty} = \epsilon_{s,o} = \epsilon_s$ e $\epsilon_{c,\infty} = 3\epsilon_{c,o}$ e considerando-se no Estádio I $\epsilon_s \cong |\epsilon_{c,o}|$ tem-se:

$$k = \frac{|\epsilon_{c,\infty}| + \epsilon_{s,\infty}}{|\epsilon_{c,o}| + \epsilon_{s,o}} = \frac{|3\epsilon_{c,o}| + \epsilon_s}{|\epsilon_{c,o}| + \epsilon_s} = 2 \quad (8)$$

Portanto:

$$y_{\infty}^g = 2y_o^g \quad (9)$$

A flecha final deve levar em consideração também a parcela do carregamento acidental “q”, que não deve sofrer a influência da deformação lenta e conforme o item 5.4.2.2 da NBR-6118 (1980), para edifícios residenciais, pode-se escrever:

$$y_{\infty} = y_{\infty}^g + 0,7y_o^q = 2y_o^g + 0,7y_o^q \quad (10)$$

A expressão (10) equivale a adotar como carregamento final para o cálculo das flechas na laje, no tempo infinito, a seguinte expressão:

$$p_{\infty} = 2g + 0,7q \quad (11)$$

Então, para simular a deformação lenta na laje basta criar um caso de carregamento que seja a soma de duas parcelas: duas vezes o carregamento permanente e 0,7 vez o carregamento acidental. O módulo de deformação longitudinal do concreto adotado foi calculado através da seguinte fórmula:

$$E = 0,9 \times 6600 \sqrt{f_{ck} + 3,5} \text{ (MPa)} \quad (12)$$

Para as lajes calculadas através do modelo simplificado não é possível fazer combinações de carregamento. Portanto, o artifício usado para a simulação da deformação lenta foi dividir o valor do módulo de deformação longitudinal do concreto encontrado através da fórmula (12) por um fator igual a:

$$\frac{2g + 0,7q}{g + q} \quad (13)$$

Para cada pavimento, adotou-se, simplificadamente, um mesmo fator para todas as lajes, tomando-se para o cálculo do fator valores de g e q que acarretassem maior flecha nas lajes.

b) rigidez de apoio

- os coeficientes de mola dos pilares são calculados através da expressão $\frac{4xExI}{lxREDMOL}$. REDMOL, na expressão anterior, representa um fator redutor da constante de mola. O valor default deste fator é 4, porém adotou-se 10. Este valor foi adotado após consultas a alguns engenheiros que já possuem certa experiência no módulo GRELHA e afirmam que a adoção do valor 4 resulta em momentos exagerados na conexão entre vigas e pilares;
- considerou-se o pilar indeslocável axialmente por julgar que esta simplificação não afetaria substancialmente os resultados;
- o modelo adotado para apoios de vigas em pilares considera que cada viga possui um apoio independente no pilar, com seu respectivo coeficiente de mola. Esta escolha tem por objetivo não permitir a continuidade de esforços às vigas como na FIGURA 3.1:

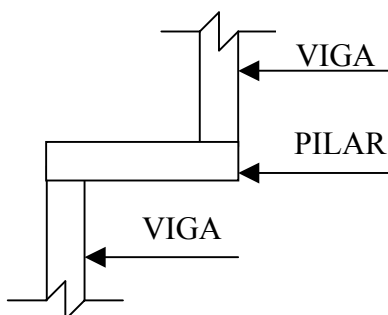


FIGURA 3.1 – Vista em planta de duas vigas que chegam em um mesmo pilar

Caso contrário, o software ligaria todas as vigas através de barras rígidas a um único apoio no centro geométrico do pilar, permitindo a continuidade de esforços.

Para as lajes lisas, o modelo escolhido considera que todas as barras da grelha que chegam em um pilar são ligadas continuamente ao centro geométrico do mesmo, através de barras rígidas. Neste apoio central é desprezada a rigidez à flexão do pilar. Ver FIGURA 3.2.

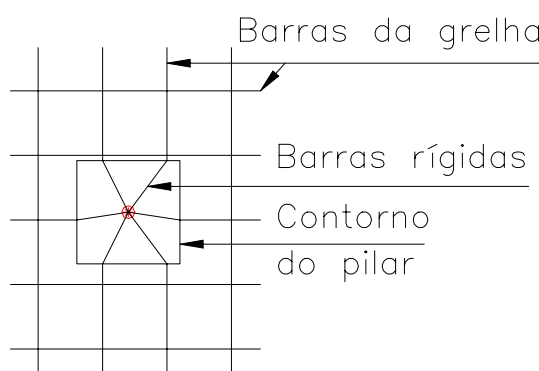


FIGURA 3.2 – Apoio das barras da grelha sobre pilar

c) inércia das vigas

- as vigas foram consideradas retangulares para cálculo de deformações;
- desprezou-se a rigidez à torção das vigas.

d) barras da grelha que representam as lajes

- adotou-se uma distância de 25 cm para a discretização das barras da laje;
- as nervuras, no caso de lajes nervuradas, foram dimensionadas levando-se em consideração a contribuição da laje (capeamento);
- desprezou-se a rigidez à torção das barras das lajes para levar em consideração a fissuração.

Comentou-se, até este ponto, a parametrização do módulo GRELHA. Realizou-se, também, um exaustivo trabalho para os módulos LAJES e VIGAS, que não será apresentado devido ao grande volume de informações. Todas as etapas de cálculo e detalhamento foram realizadas respeitando-se as prescrições da NBR-6118 (1980).

Para o cálculo dos deslocamentos nas lajes, foi respeitado o limite prescrito pela norma NBR-6118 (1980) no item 4.2.3.1 alínea C, que é 1/300 do vão teórico. Em alguns casos, este valor pode causar danos à alvenaria, porém, como não se possuía o correto posicionamento das mesmas e por este assunto fugir do objetivo do trabalho, desprezou-se esta análise.

O cálculo dos deslocamentos nas vigas foi feito conforme o item 4.2.3.1 da NBR-6118 (1980), usando-se o Estádio II e ações aplicadas logo após o término da construção. Com isto, a flecha final pode ser dada por:

$$y = y_{\infty}^g + y_{\infty}^q = \left(1 + 2 \frac{x_{II}}{d}\right) y_o^g + 0,7 y_o^q \quad (14)$$

onde x_{II} é a profundidade da linha neutra no Estádio II. Adotando-se $x_{II}=0,75x_{III}$ e $g=0,8p$ e tomando-se valores médios para x_{III} (profundidade da linha neutra no Estádio III), chega-se num valor de y dado pela eq. (14), que é equivalente a adotar o módulo de deformação dado pela eq. (12) multiplicado por 0,7.

3.3.2 Dimensionamento e Detalhamento

Para o cálculo da armação positiva das lajes nervuradas, considerou-se que o capeamento contribui na inércia das nervuras e obedeceu-se às prescrições da NBR-6118 (1980) para o cálculo da largura colaborante.

Segundo o item 3.3.2.10 da NBR-6118 (1980) para lajes nervuradas, “a resistência da mesa à flexão deverá ser verificada sempre que a distância livre entre nervuras superar 50 cm...”. Para as lajes nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno analisadas

nesta dissertação, esta distância excede 50 cm, logo, neste caso, houve a necessidade de verificação das mesas. Adotou-se armadura mínima para as mesmas, detalhando-se com telas soldadas. Conforme o mesmo item da NBR-6118 (1980), “as nervuras deverão ser verificadas a cisalhamento, como vigas, se a distância livre entre elas for superior a 50 cm e como laje em caso contrário”. Para as lajes nervuradas preenchidas com EPS e concreto celular autoclavado, as nervuras foram verificadas como laje, uma vez que esta distância é sempre 50 cm e não houve a necessidade de armá-las ao cisalhamento. Já para as lajes nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno apenas para o segundo exemplo houve necessidade de se detalhar alguns trechos mais solicitados ao cisalhamento.

As áreas de aço necessárias para combater os momentos negativos das lajes nervuradas foram calculadas para a pior situação, ou seja, adotou-se a maior área entre os valores obtidos para os momentos nas regiões maciças (vigas-faixa) e os obtidos para as regiões onde a seção resistente é constituída apenas pelas nervuras.

Há uma grande diversidade de dimensões de moldes em polipropileno para lajes nervuradas disponíveis no mercado. Foram escolhidos moldes que constituíssem lajes com inércias suficientes para garantir que os deslocamentos não ultrapassassem o limite prescrito pela norma NBR-6118 (1980) no item 4.2.3.1 alínea C. Alguns moldes não se adequam aos exemplos desta dissertação por terem formato retangular, visto que estes são indicados para lajes armadas em uma só direção.

O cobrimento adotado para as lajes foi de 0,5 cm para o processo simplificado, considerando-se lajes no interior de edifícios com concreto revestido utilizando argamassa de espessura mínima de 1 cm. Neste processo, o software faz o cálculo da altura útil automaticamente em função das bitolas adotadas para detalhamento de cada laje e do cobrimento fornecido. Para o cálculo da altura útil das lajes calculadas através do modelo de grelha, considerou-se a altura total subtraída de 1 cm, pois, neste caso, a área de aço foi calculada utilizando-se um programa em que se fornece a altura útil, largura da seção e o f_{ck} . Para as vigas, adotou-se um cobrimento de 2,0 cm (vigas ao ar

livre) para cálculo e detalhamento visando ao aumento da durabilidade das vigas de borda, que ficam expostas a condições ambientais desfavoráveis.

Como o objetivo deste estudo é análise de pavimentos, os pilares não foram dimensionados. Adotou-se uma taxa fixa de armação apenas para estimar-se o quantitativo de aço destes elementos.

Respeitou-se as dimensões mínimas para pilares. No caso das lajes lisas, o item 6.1.3.1 da NBR-6118 (1980) estabelece que a menor dimensão para os pilares não cintados não deve ser inferior a 30 cm, nem a $1/15$ da sua altura livre, “devendo ainda a espessura em cada direção não ser inferior a $1/20$ da distância entre eixos dos pilares nessa direção”.

4

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 Edifícios Analisados

Selecionou-se três edifícios distintos e de cada um foi escolhido um pavimento para ser analisado. Neste capítulo, serão apresentados para cada pavimento, separadamente, a fôrma, o detalhamento das lajes e os custos para cada sistema estrutural estudado.

Foram realizadas algumas alterações na configuração original de cada exemplo, a fim de facilitar o detalhamento dos pavimentos.

O peso próprio dos elementos estruturais é automaticamente calculado pelo software, considerando-se para o concreto um peso específico de 25 kN/m^3 . Para o cálculo do peso próprio dos materiais inertes, adotou-se $0,2 \text{ kN/m}^3$ para os blocos EPS e 5 kN/m^3 para os blocos de concreto celular autoclavado. Para o cálculo de cargas de alvenaria, utilizou-se tijolo cerâmico furado, cujo peso específico é 13 kN/m^3 . Não foram consideradas cargas horizontais devidas ao vento, pois este estudo limita-se a pavimentos.

Nos segundo e terceiro exemplos, há lajes de pequenas dimensões em relação às demais. Como a análise destas lajes não é relevante para este estudo, adotou-se um mesmo detalhamento independentemente do sistema estrutural. Para o sistema estrutural

convencional constituído por lajes maciças, foram detalhadas todas as lajes em um mesmo desenho; já para outros sistemas, a armação das lajes de dimensões reduzidas encontra-se em um desenho à parte com a seguinte legenda: lajes comuns a todos os sistemas.

Algumas figuras que serão apresentadas adiante têm na sua legenda a descrição de armadura complementar, que se refere às armaduras de canto das lajes destinadas a combater os momentos volventes. Conforme o item 3.3.2.8 da NBR-6118 (1980), “... deverão ser dispostas duas armaduras, uma superior paralela à bissetriz e outra inferior, a ela perpendicular, cada uma delas com área da seção transversal não inferior à metade da máxima no centro da laje. Essas armaduras deverão estender-se até a distância, medida a partir das faces dos apoios, igual a um quinto do vão menor”.

4.2 Primeiro Exemplo – Descrições Gerais

O primeiro exemplo é o pavimento-tipo de um edifício comercial construído em Belo Horizonte. Apresenta lajes de grandes dimensões com geometria bem comportada. O sistema estrutural original deste pavimento é o convencional com lajes nervuradas, cuja fôrma é de polipropileno. Hipoteticamente, considerou-se o edifício constituído de 10 pavimentos-tipo cujo pé direito é de 3,13 m, para a composição final do custo. A área de cada pavimento é aproximadamente 575 m² e o concreto utilizado tem o f_{ck} de 25 MPa. Apenas neste exemplo, o sistema convencional foi calculado através de dois modelos: o simplificado e o de grelha, a fim de comparar os resultados obtidos nos referidos modelos.

4.2.1 Cargas Atuantes

Antes de descrever as cargas atuantes no pavimento, é importante salientar que as unidades tratadas pelo software são tf e m. Nas lajes, considerou-se uma sobrecarga de 0,2 tf/m², que é a sobrecarga para edifícios comerciais, segundo a NBR-6120 (1980). Considerou-se, ainda, 0,1 tf/m² de revestimento e 0,2 tf/m² de alvenaria, supondo-a distribuída por área, visto que não se dispunha da arquitetura para uma correta locação

de tais cargas. Apenas as vigas perimetrais foram carregadas, pela mesma razão citada anteriormente, com 1 tf/m de alvenaria.

4.2.2 Fôrmas

A seguir está apresentada a fôrma deste exemplo, concebida como sistema estrutural convencional composto de lajes maciças.

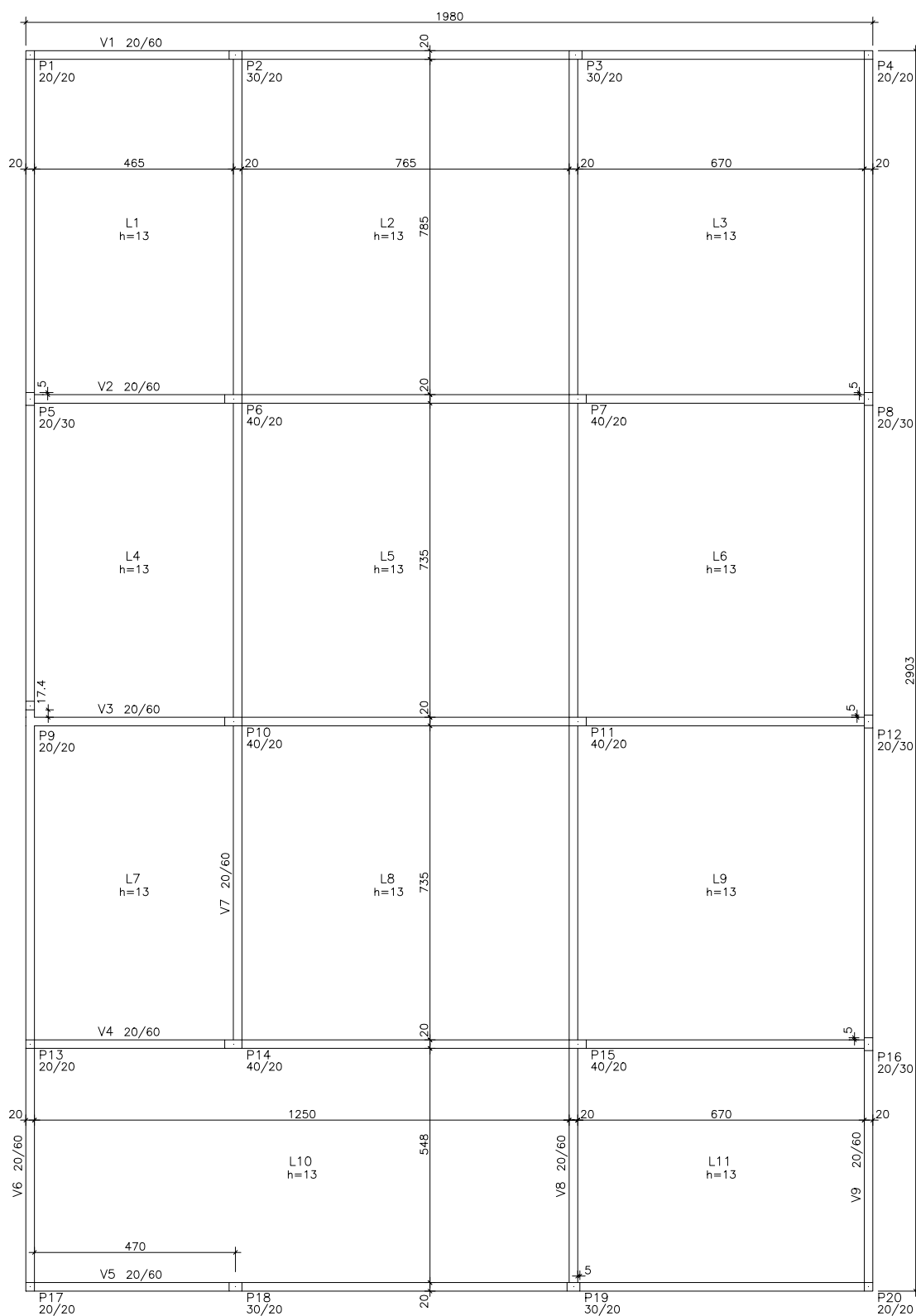


FIGURA 4.1 – Fôrma do sistema estrutural convencional

4.2.3 Detalhamento

Este pavimento foi analisado para os seguintes sistemas estruturais:

- lajes convencionais maciças;
- lajes lisas maciças;
- lajes lisas nervuradas, cujo material inerte são blocos de EPS;
- lajes lisas nervuradas, cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado;
- lajes lisas nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno.

A seguir, estão apresentadas as fôrmas e as armações das lajes de cada sistema estrutural analisado. Os detalhamentos das vigas-faixa das lajes nervuradas encontram-se no Anexo A.

31 N2 ϕ 6.3 C/15 C=640	L1 h=13	51 N4 ϕ 8 C/15 C=640	L2 h=13	45 N4 ϕ 8 C/15 C=640	L3 h=13
45 N1 ϕ 8 C/17.5 C=385		53 N3 ϕ 10 C/15 C=625		63 N5 ϕ 8 C/12.5 C=550	
31 N6 ϕ 6.3 C/15 C=600	L4 h=13	44 N8 ϕ 8 C/17.5 C=600	L5 h=13	39 N8 ϕ 8 C/17.5 C=600	L6 h=13
37 N1 ϕ 8 C/20 C=385		74 N7 ϕ 6.3 C/10 C=625		42 N5 ϕ 8 C/17.5 C=550	
31 N6 ϕ 6.3 C/15 C=600	L7 h=13	44 N8 ϕ 8 C/17.5 C=600	L8 h=13	67 N6 ϕ 6.3 C/10 C=600	L9 h=13
37 N1 ϕ 8 C/20 C=385		74 N7 ϕ 6.3 C/10 C=625		42 N5 ϕ 8 C/17.5 C=550	
100 N10 ϕ 10 C/12.5 C=450	L10 h=13	37 N9 ϕ 6.3 C/15 C=1270		39 N12 ϕ 8 C/17.5 C=450	L11 h=13
				37 N11 ϕ 6.3 C/15 C=550	

FIGURA 4.2 – Armação positiva da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo simplificado

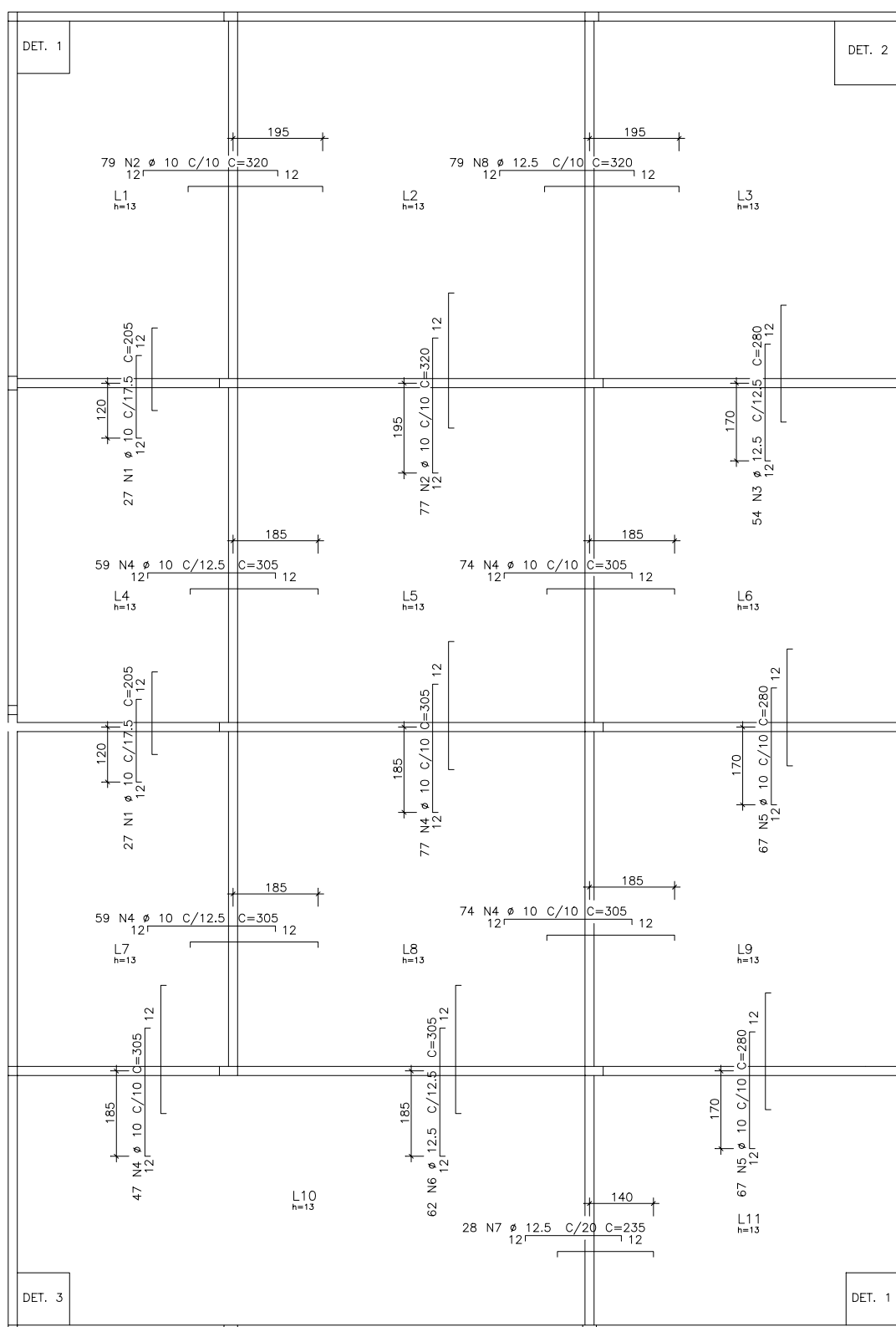


FIGURA 4.3 – Armação negativa da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo simplificado

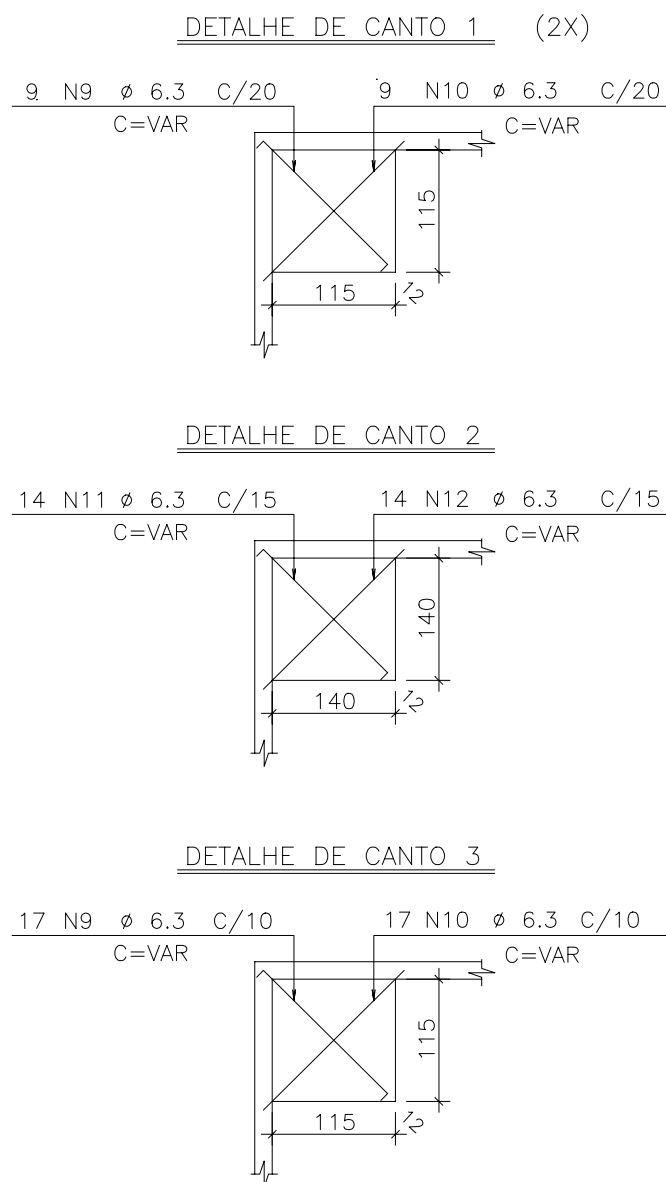


FIGURA 4.4 – Armação complementar da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo simplificado

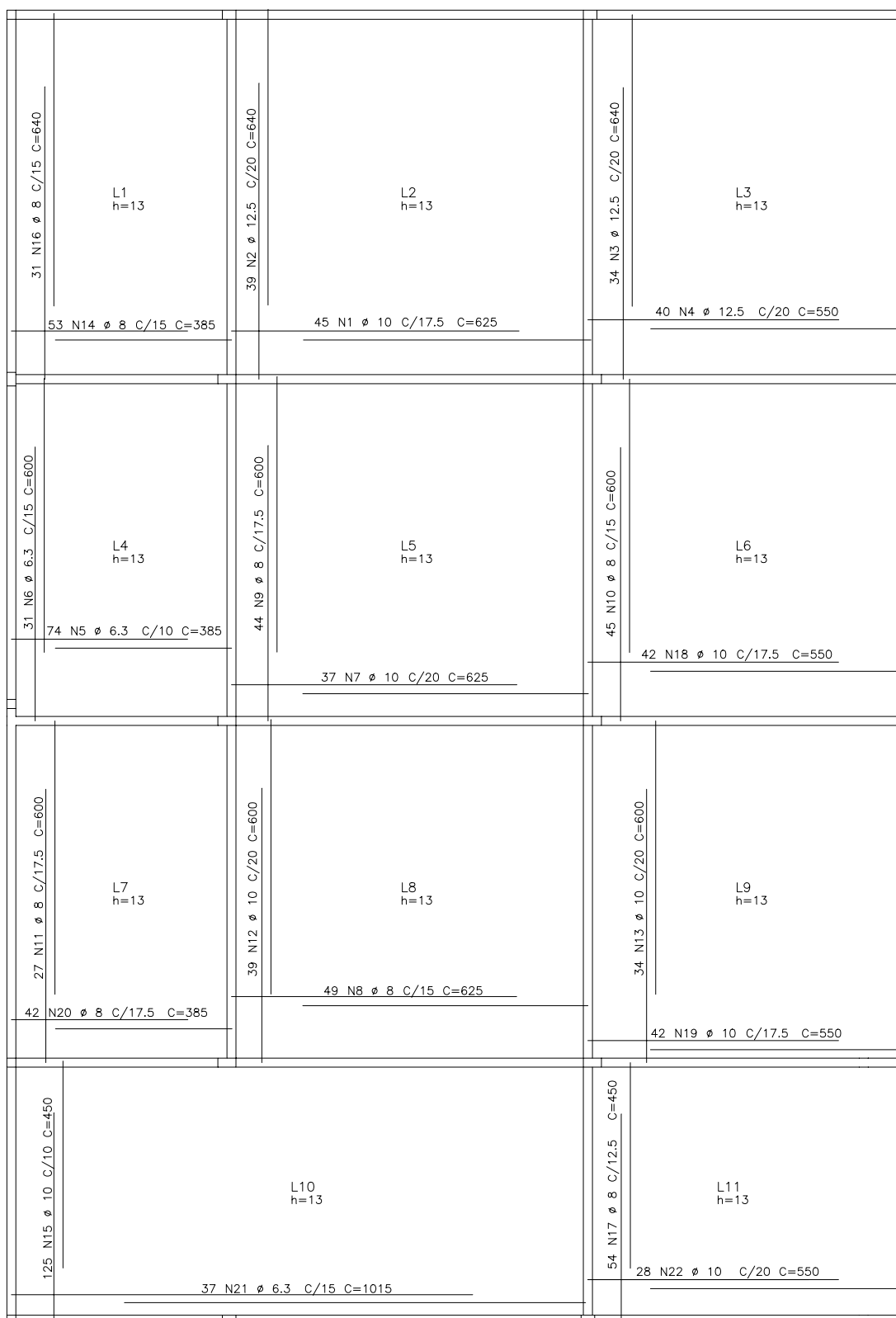


FIGURA 4.5 – Armadura positiva da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo de grelha

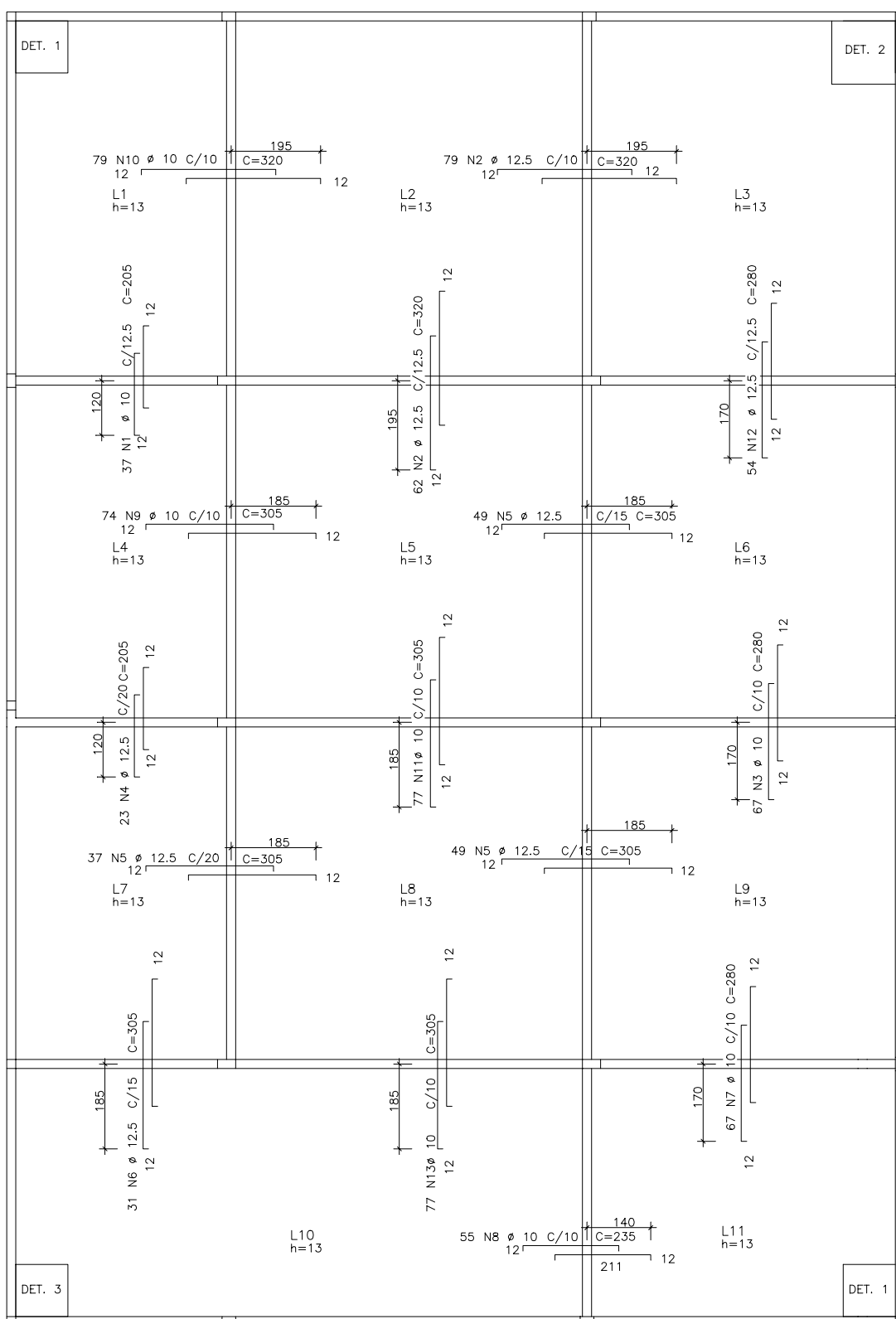


FIGURA 4.6 – Armação negativa da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo de grelha

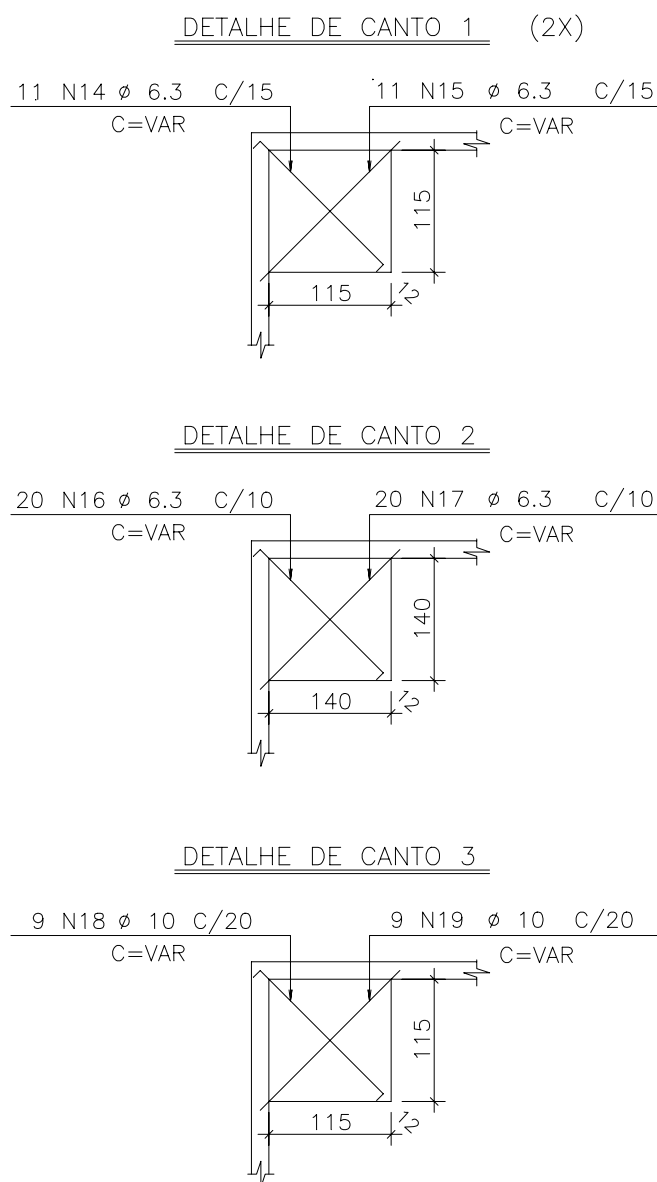


FIGURA 4.7 – Armação complementar da laje do sistema estrutural convencional calculada através do modelo de grelha

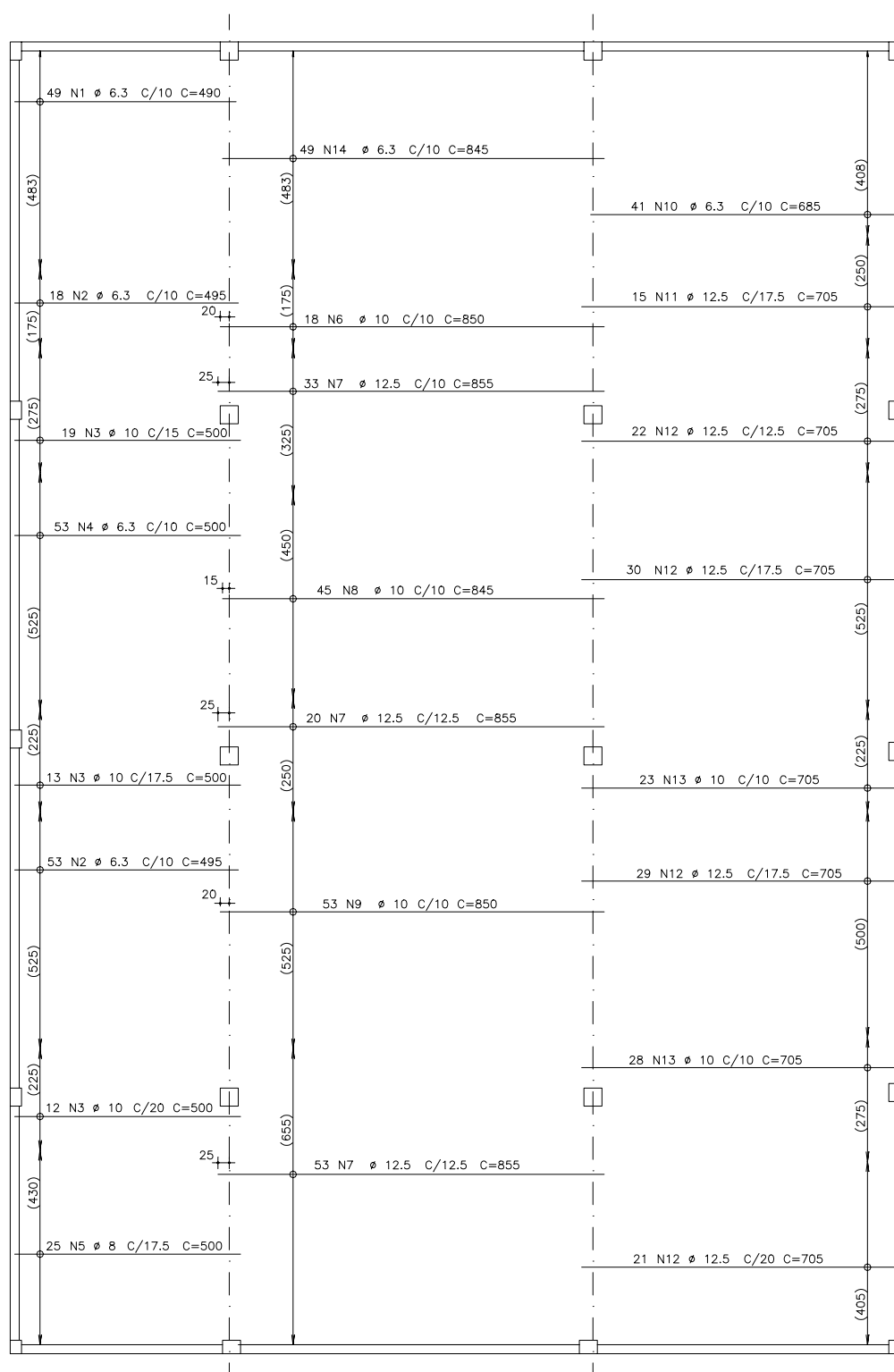


FIGURA 4.9 – Armadura positiva horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)

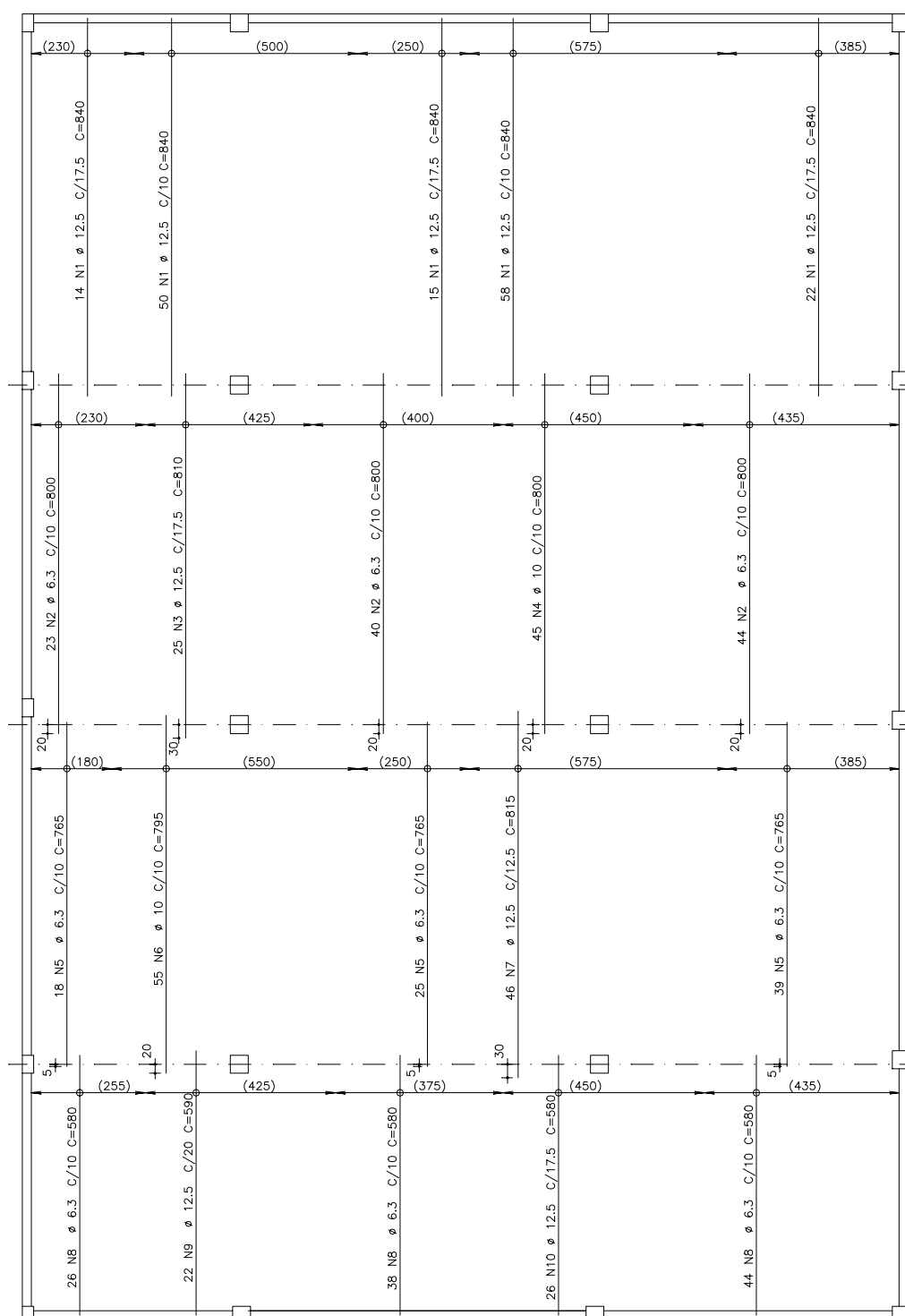


FIGURA 4.10 – Armação positiva vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)

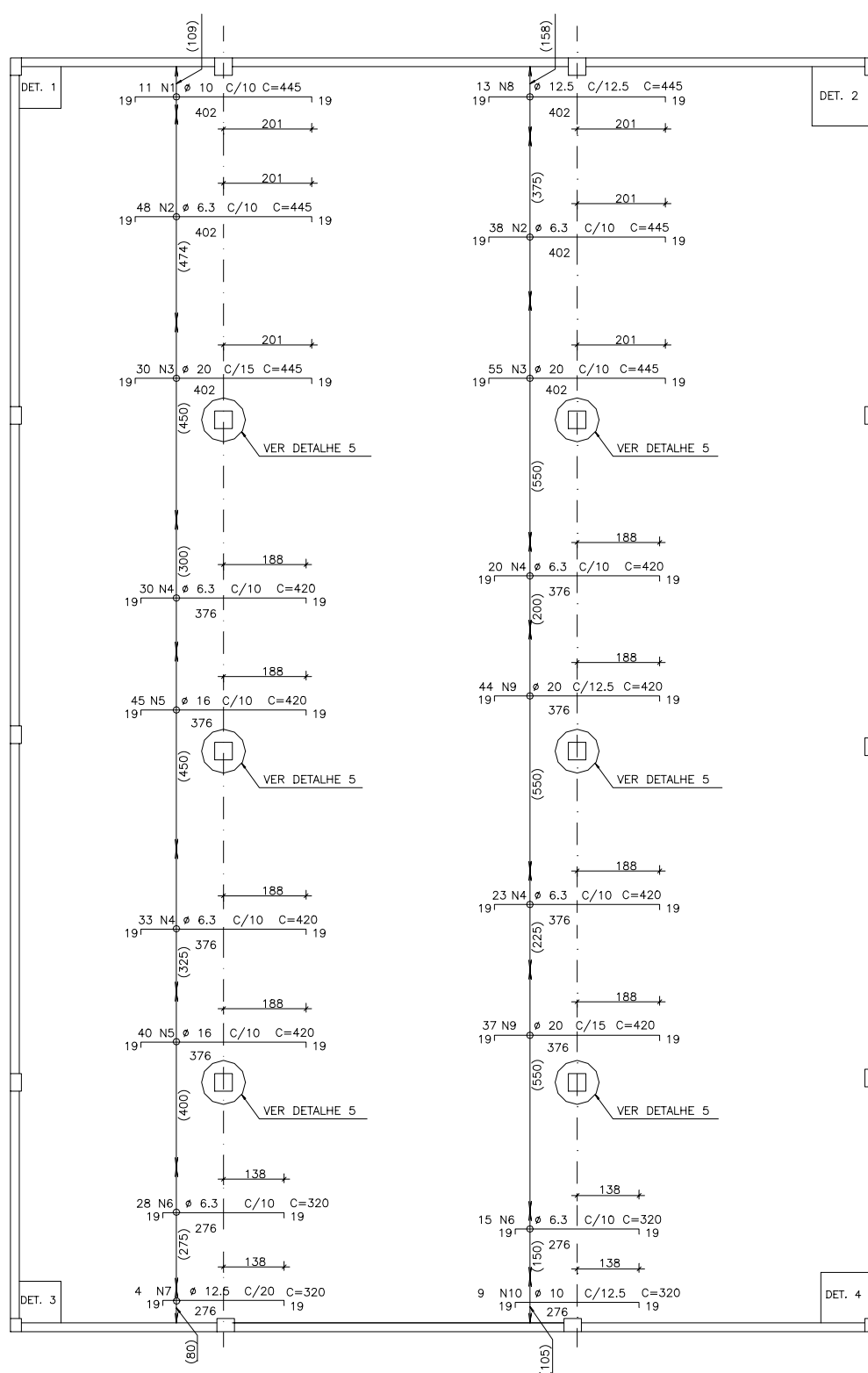


FIGURA 4.11 – Armação negativa horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)

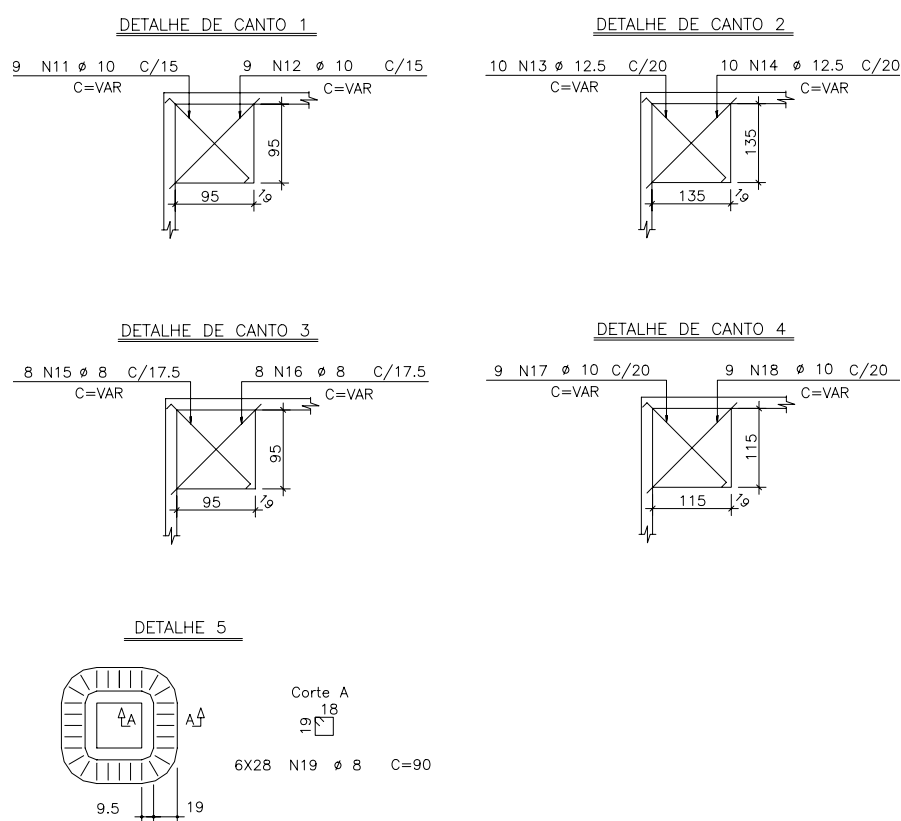


FIGURA 4.12 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)

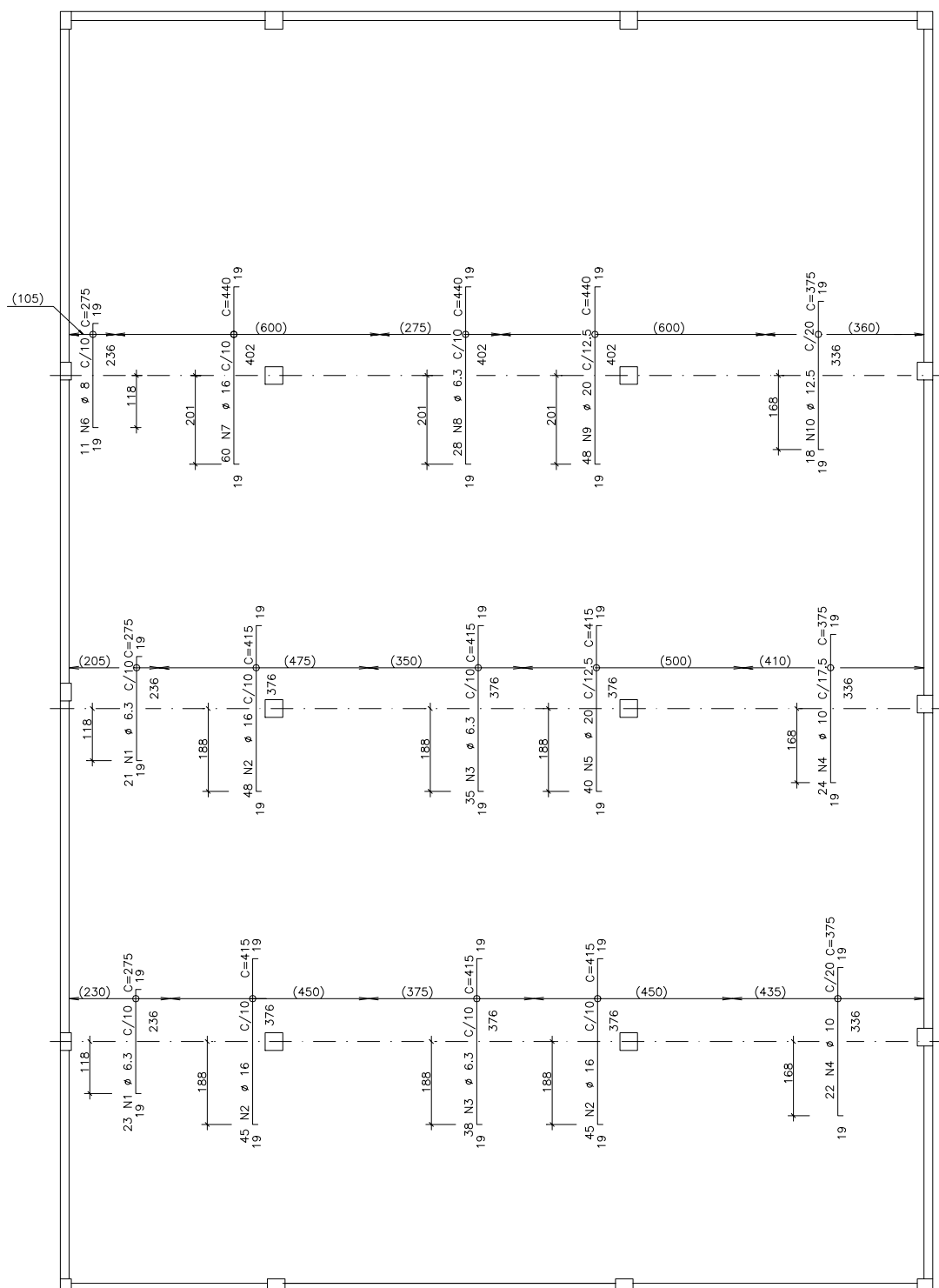


FIGURA 4.13 – Armação negativa vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)

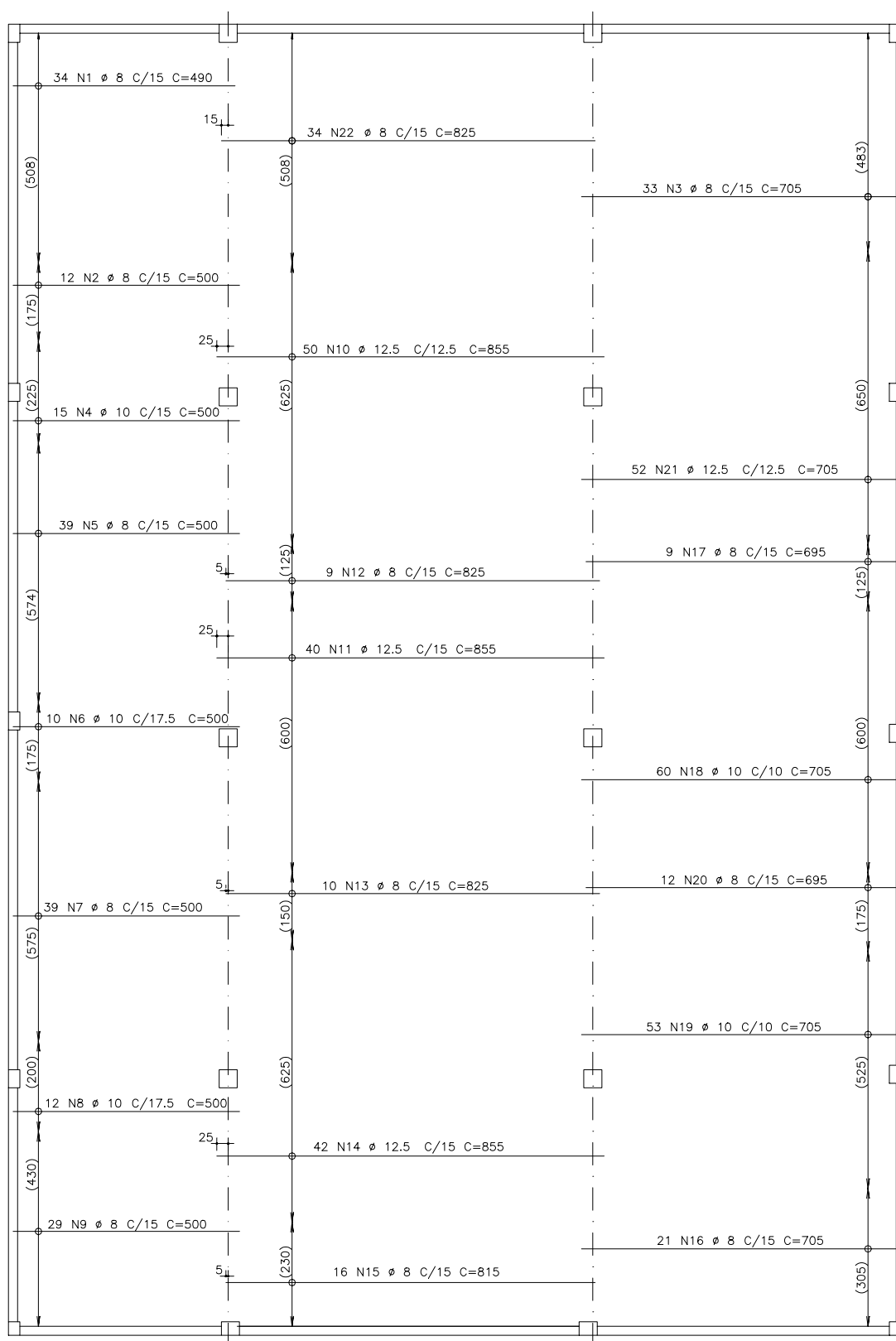


FIGURA 4.14 – Armadura positiva horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)

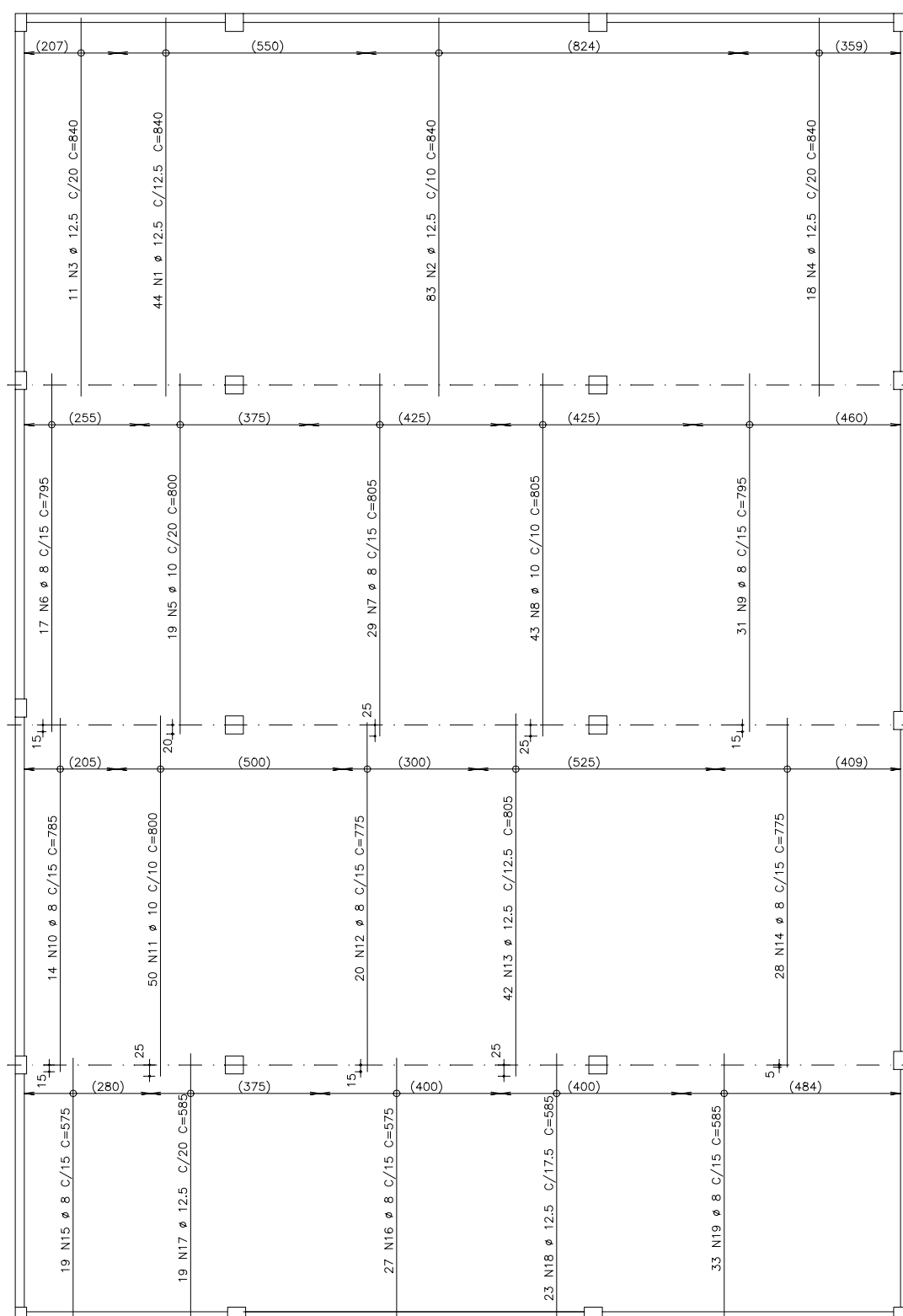


FIGURA 4.15 – Armação positiva vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)

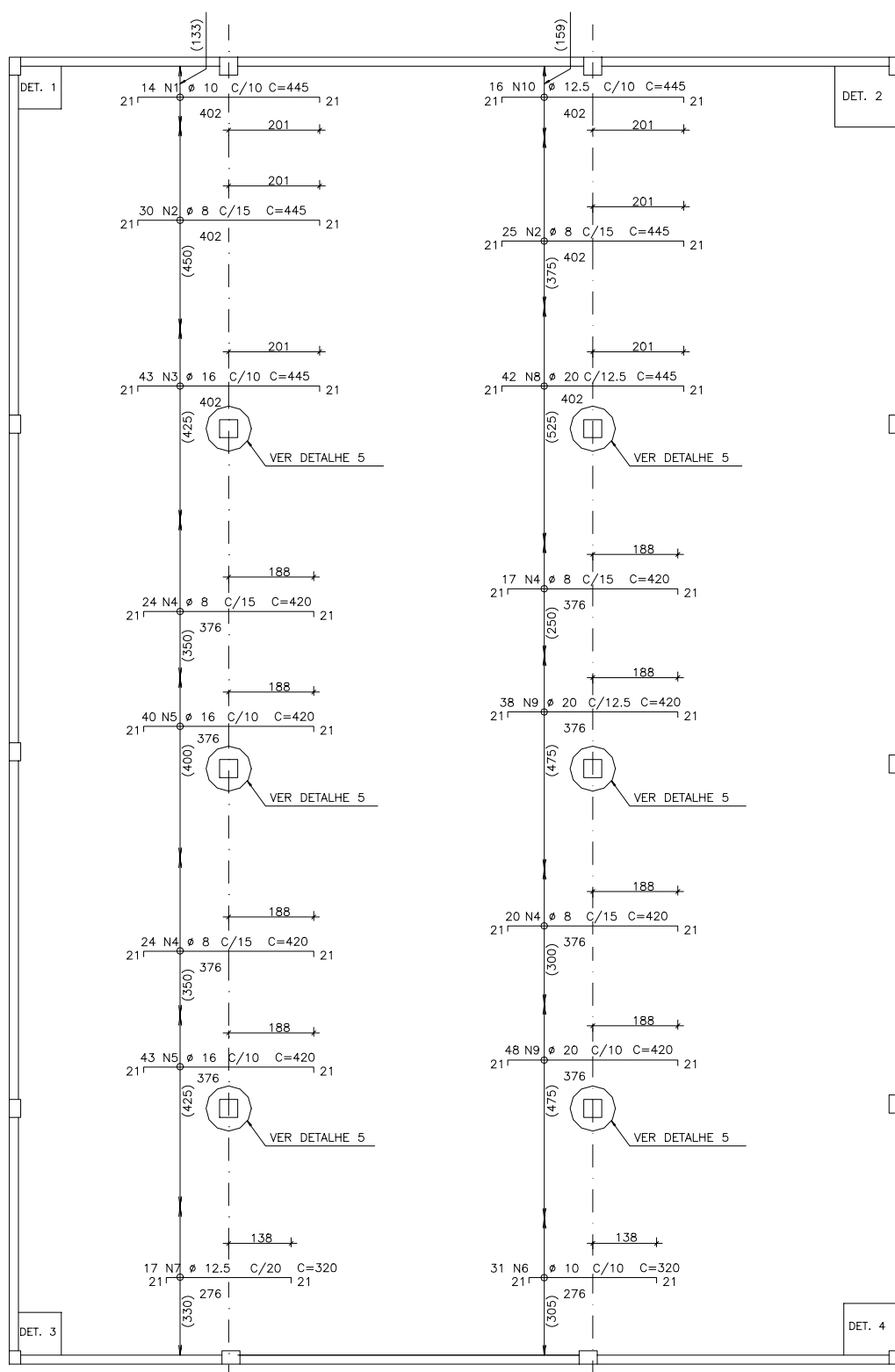


FIGURA 4.16 – Armação negativa horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)

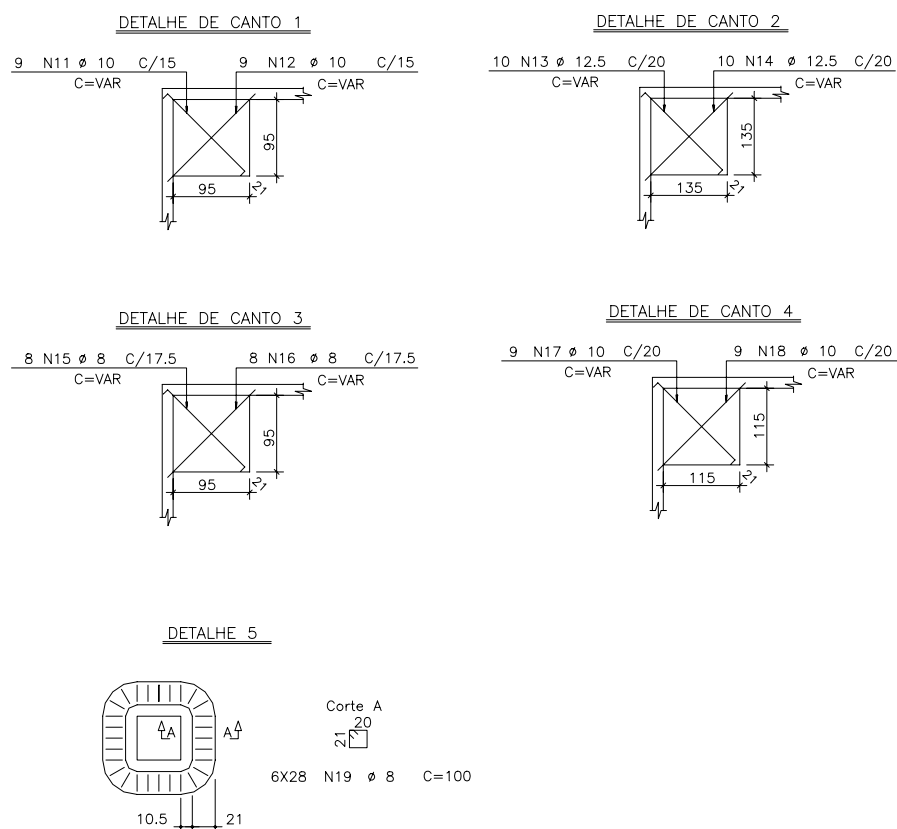


FIGURA 4.17 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)

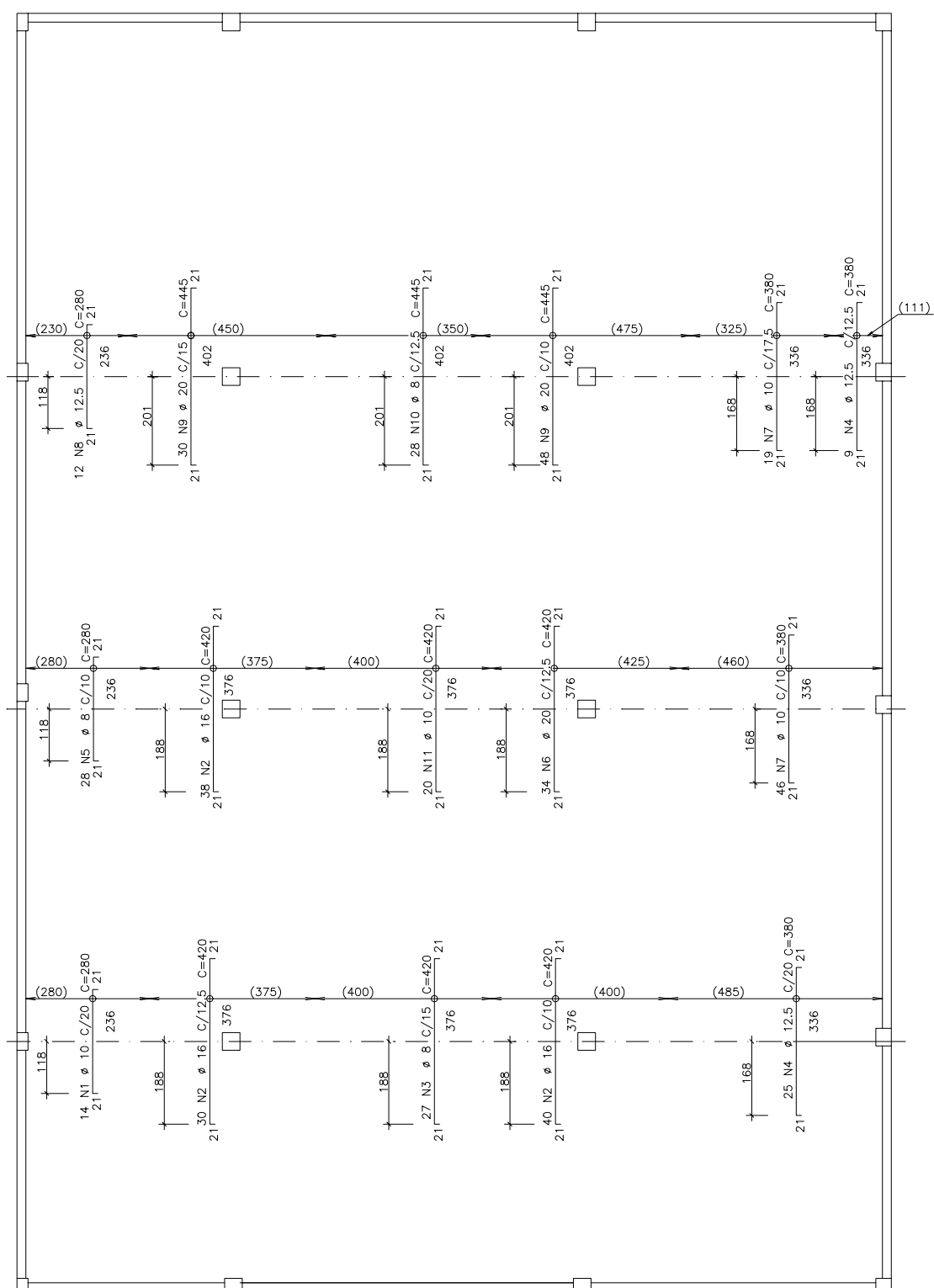


FIGURA 4.18 – Armação negativa vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)

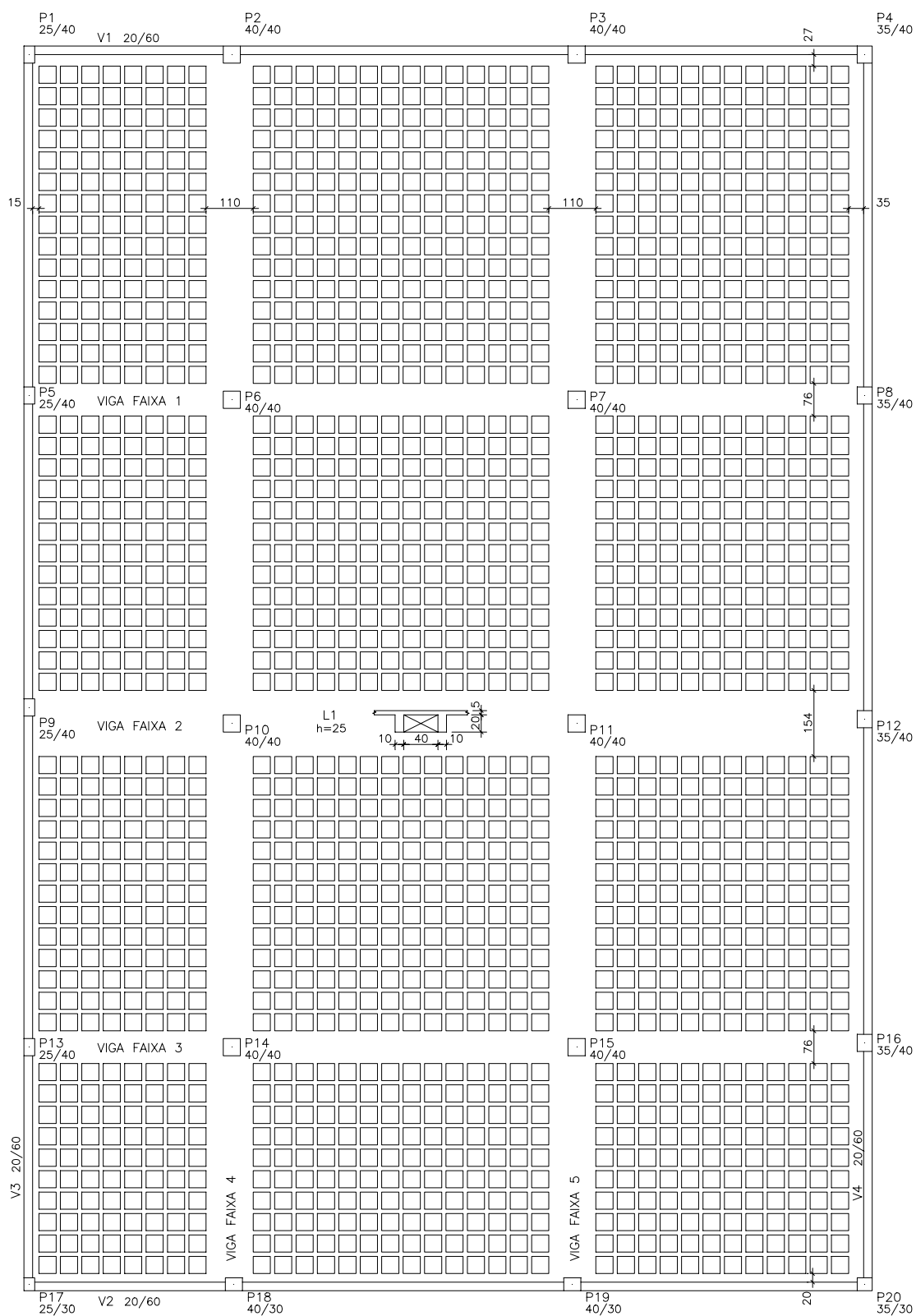


FIGURA 4.19 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

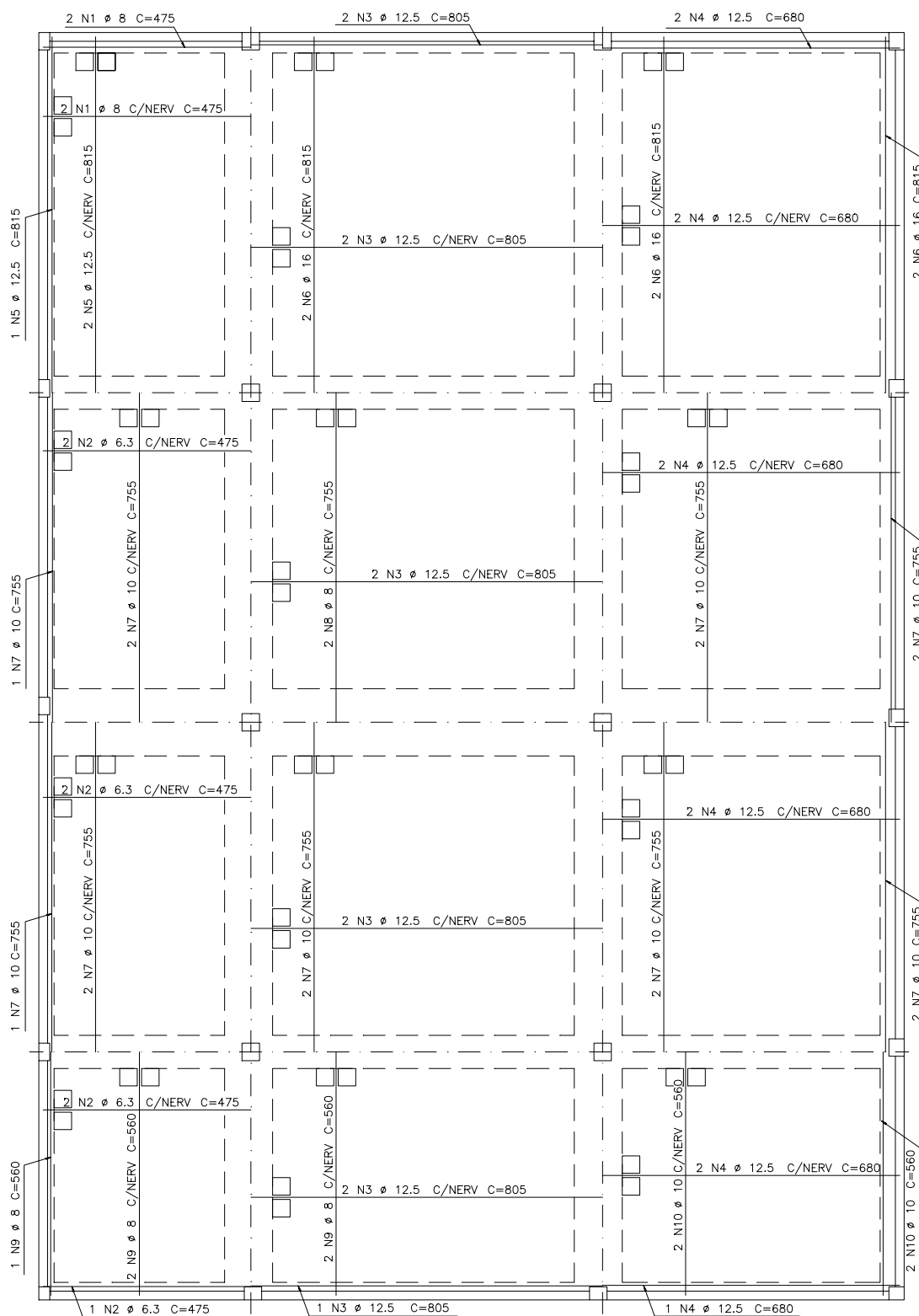


FIGURA 4.20 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

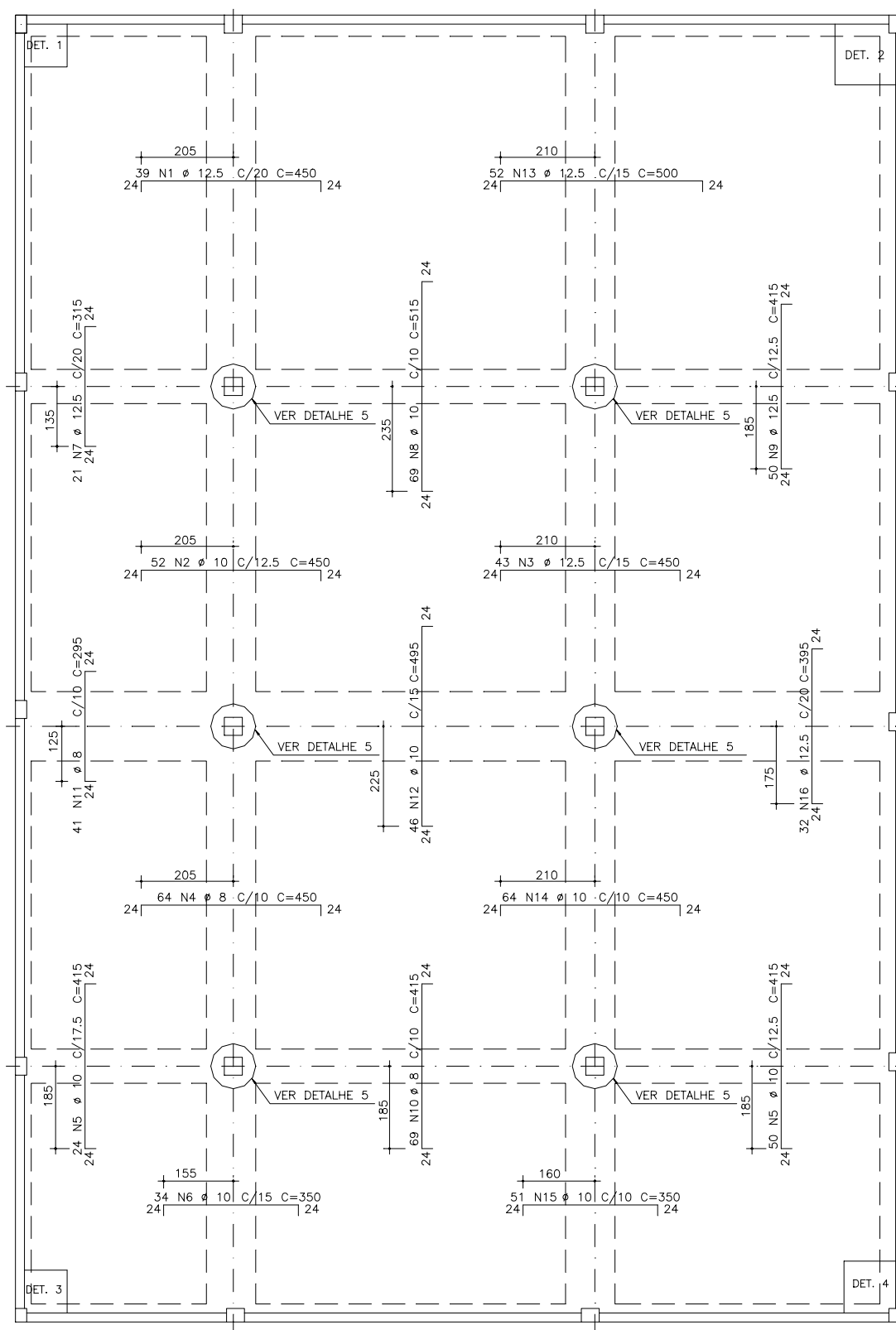


FIGURA 4.21 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

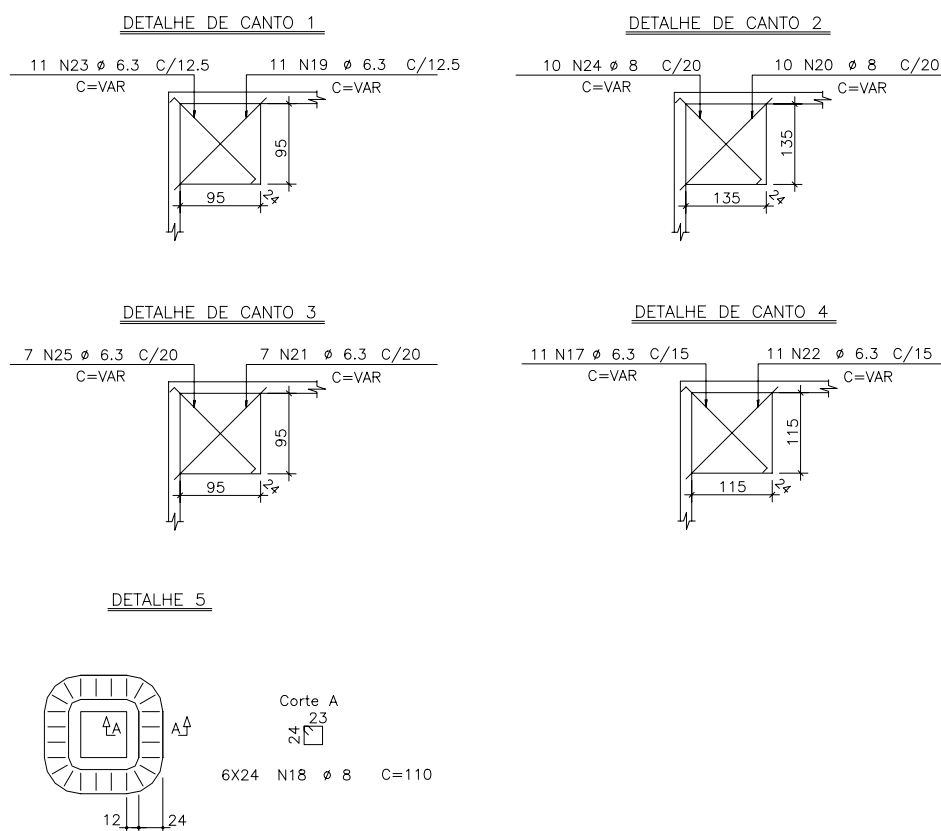


FIGURA 4.22 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

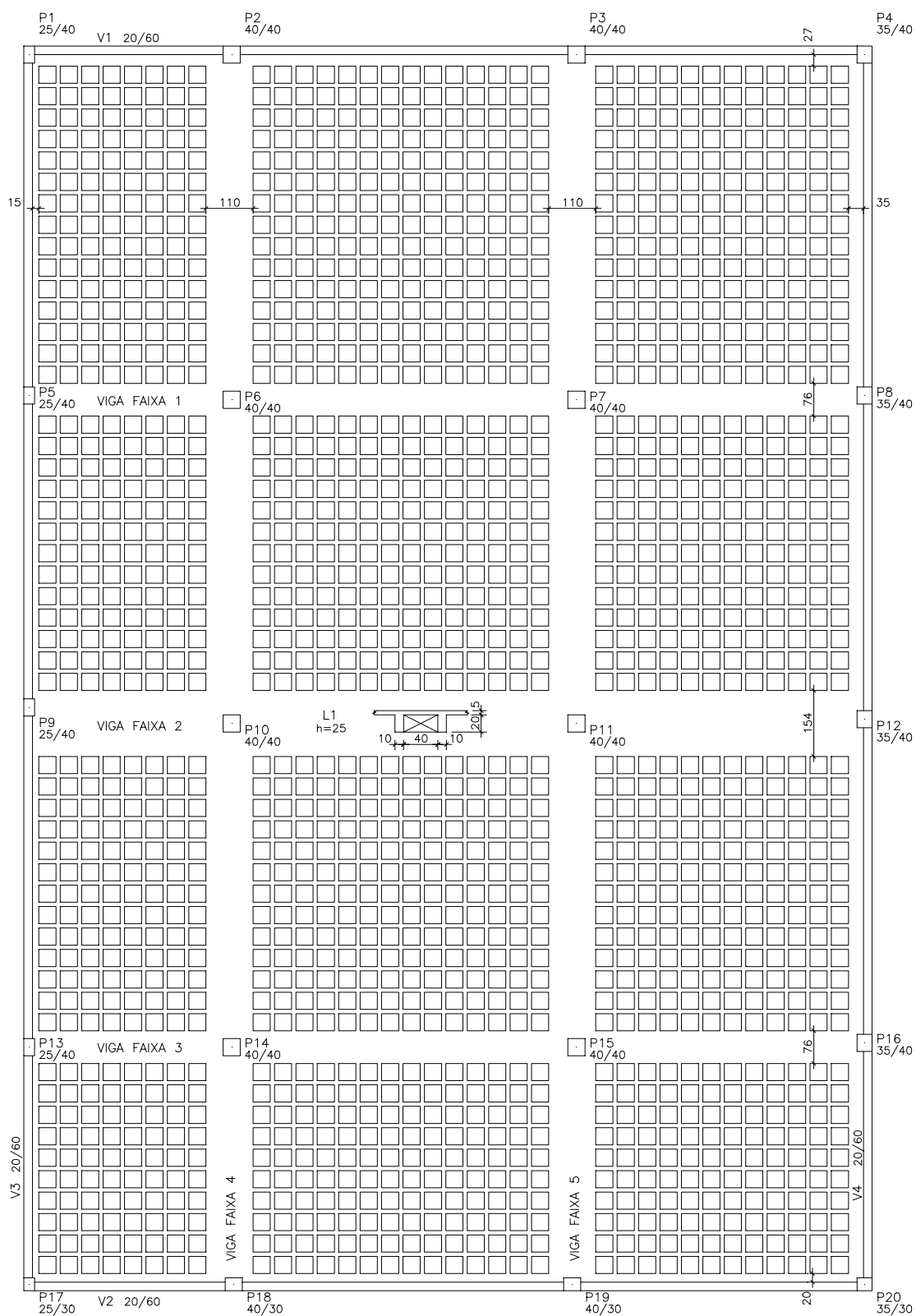


FIGURA 4.23 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

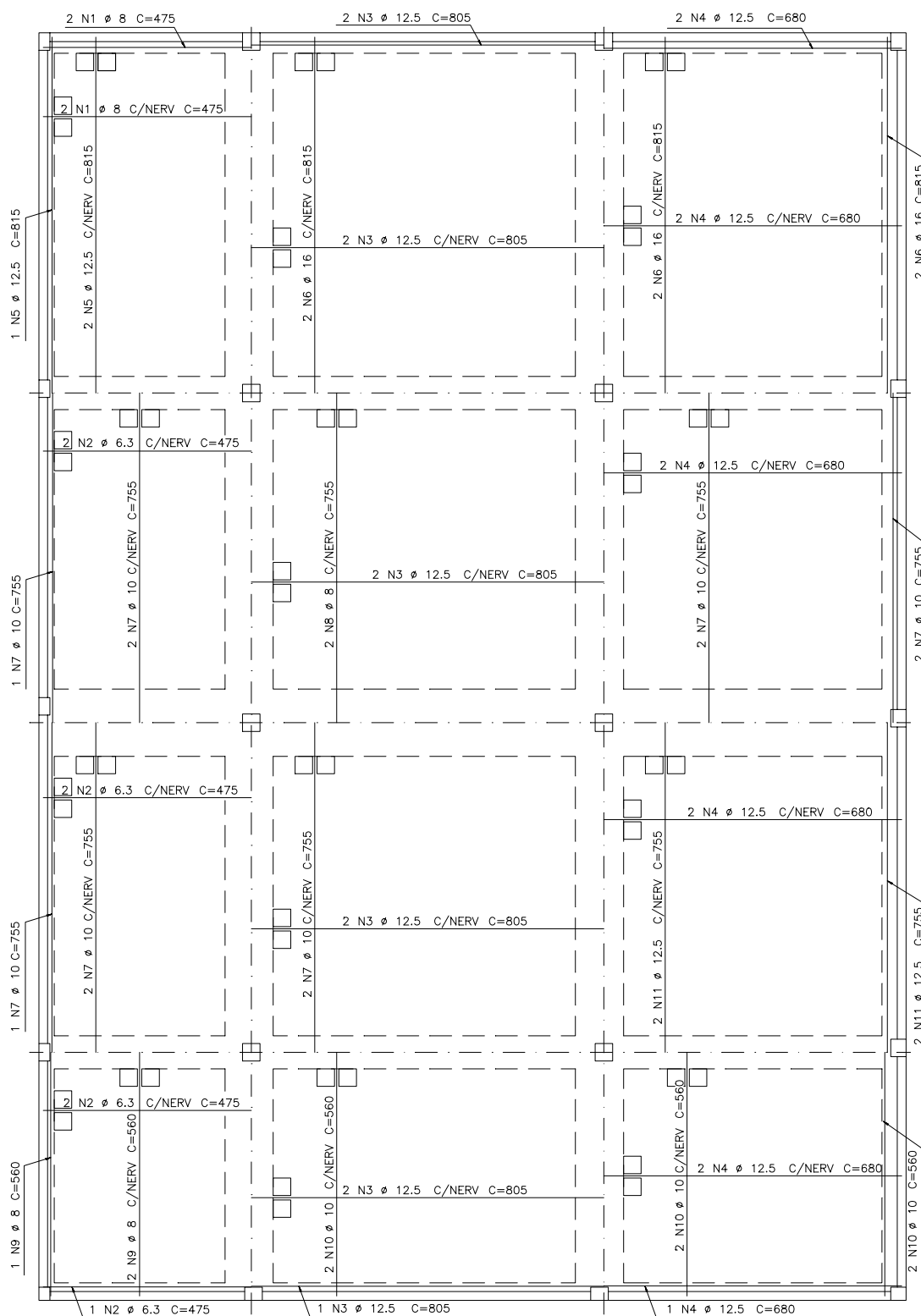


FIGURA 4.24 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

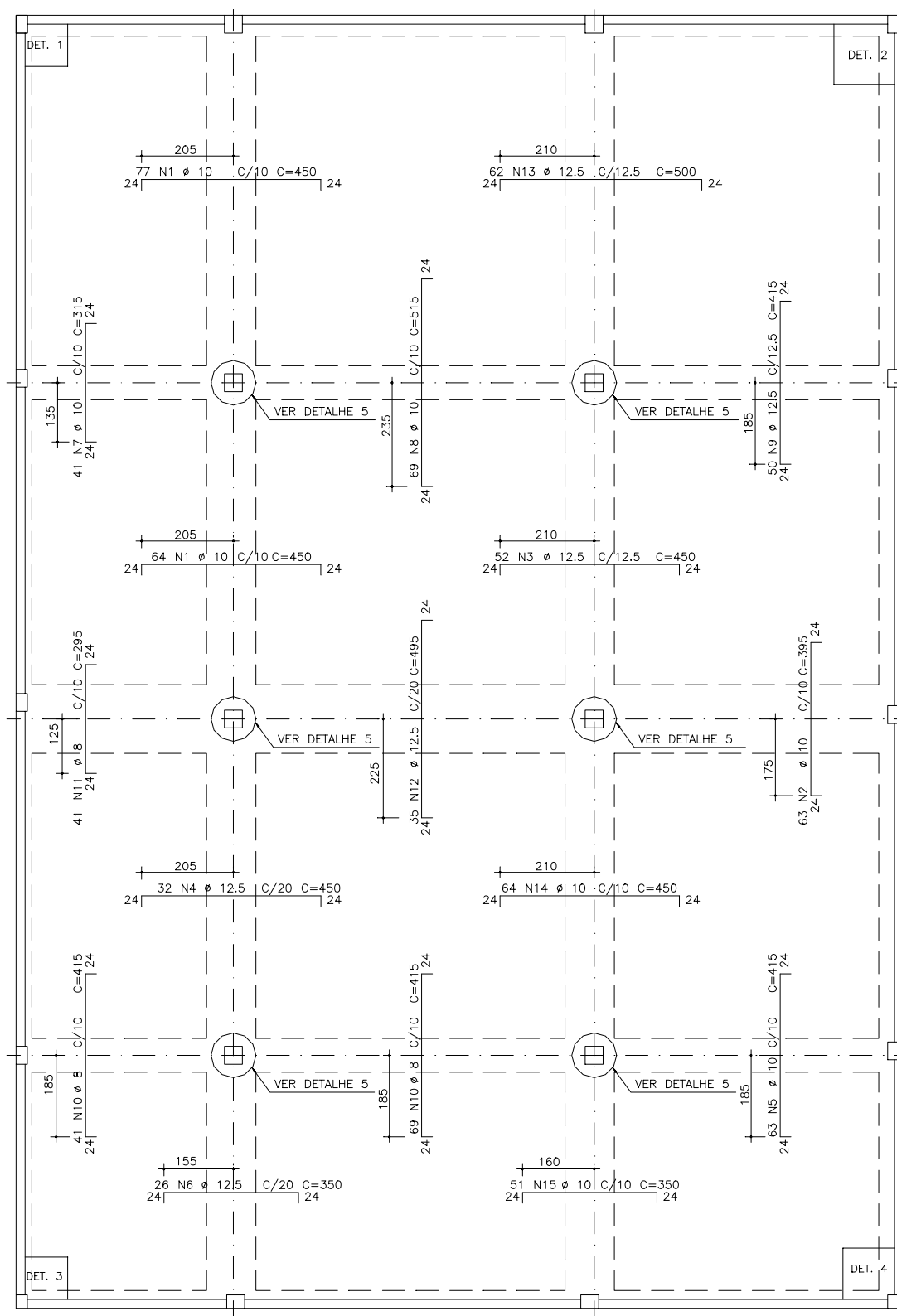


FIGURA 4.25 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

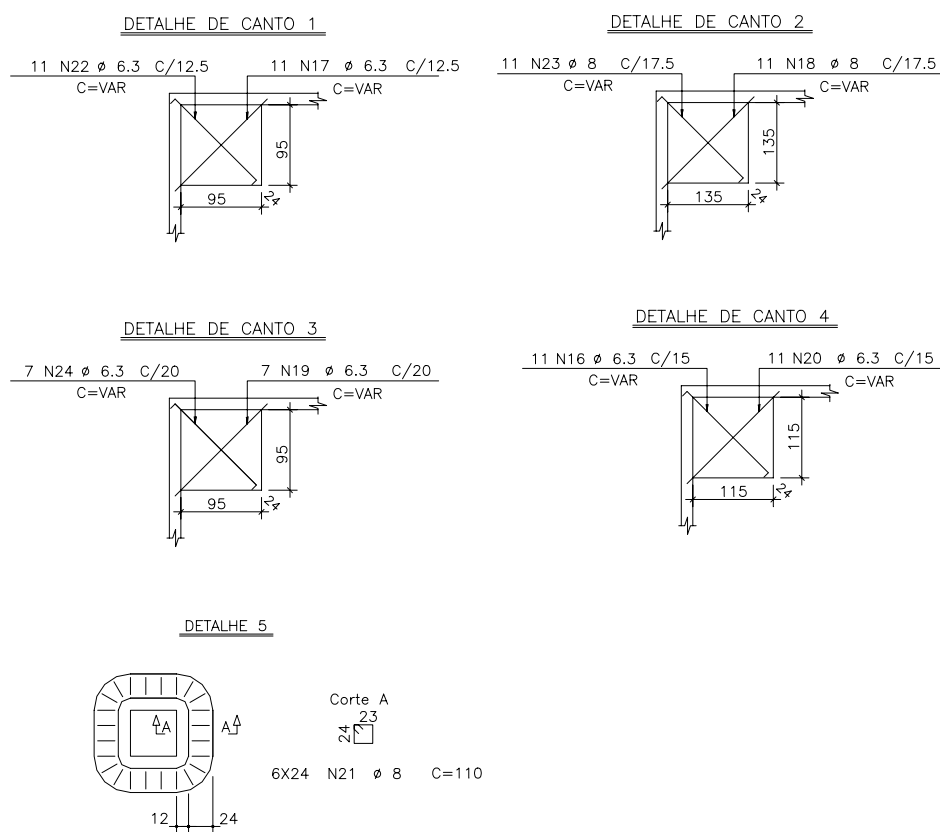


FIGURA 4.26 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

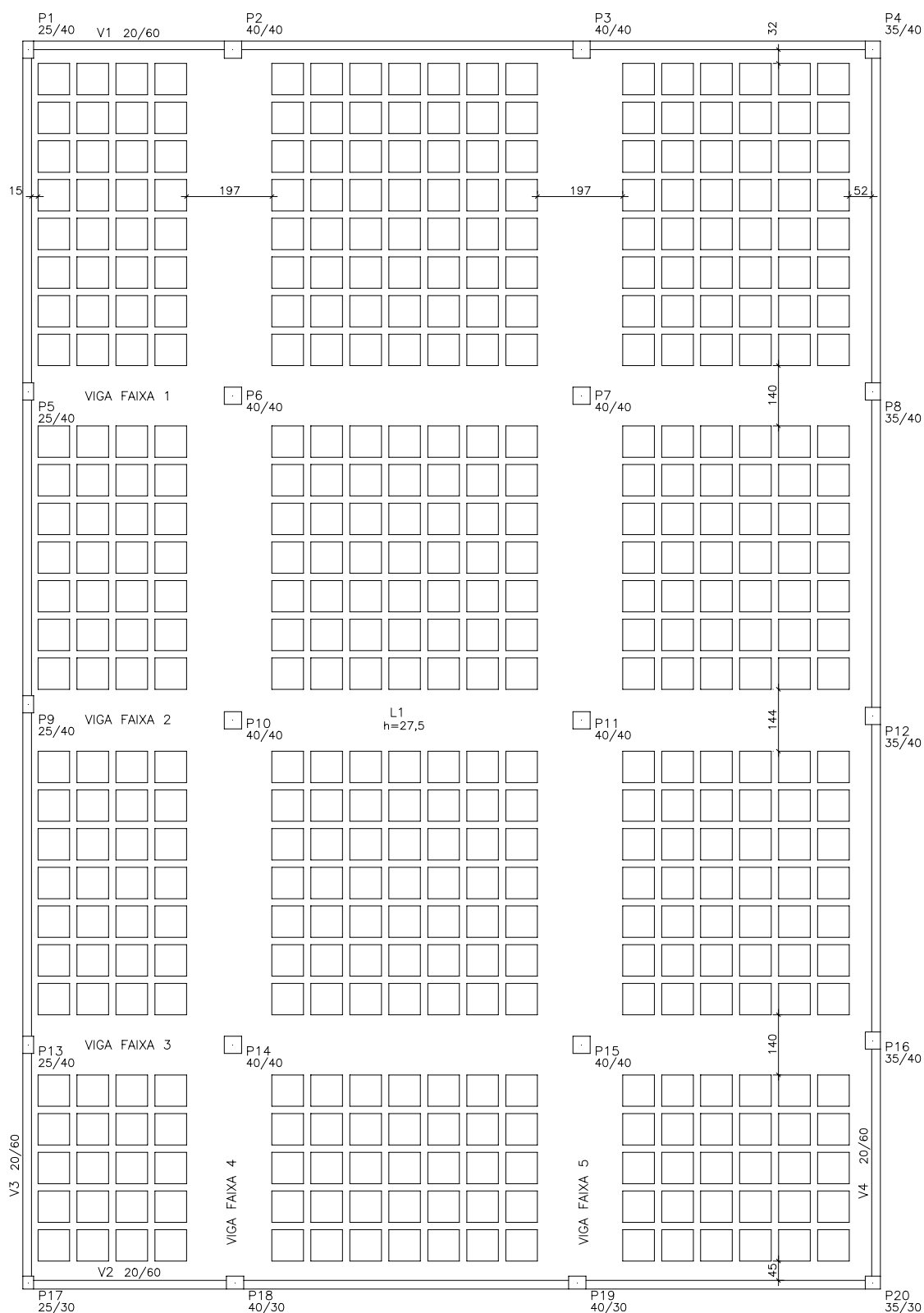


FIGURA 4.27 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

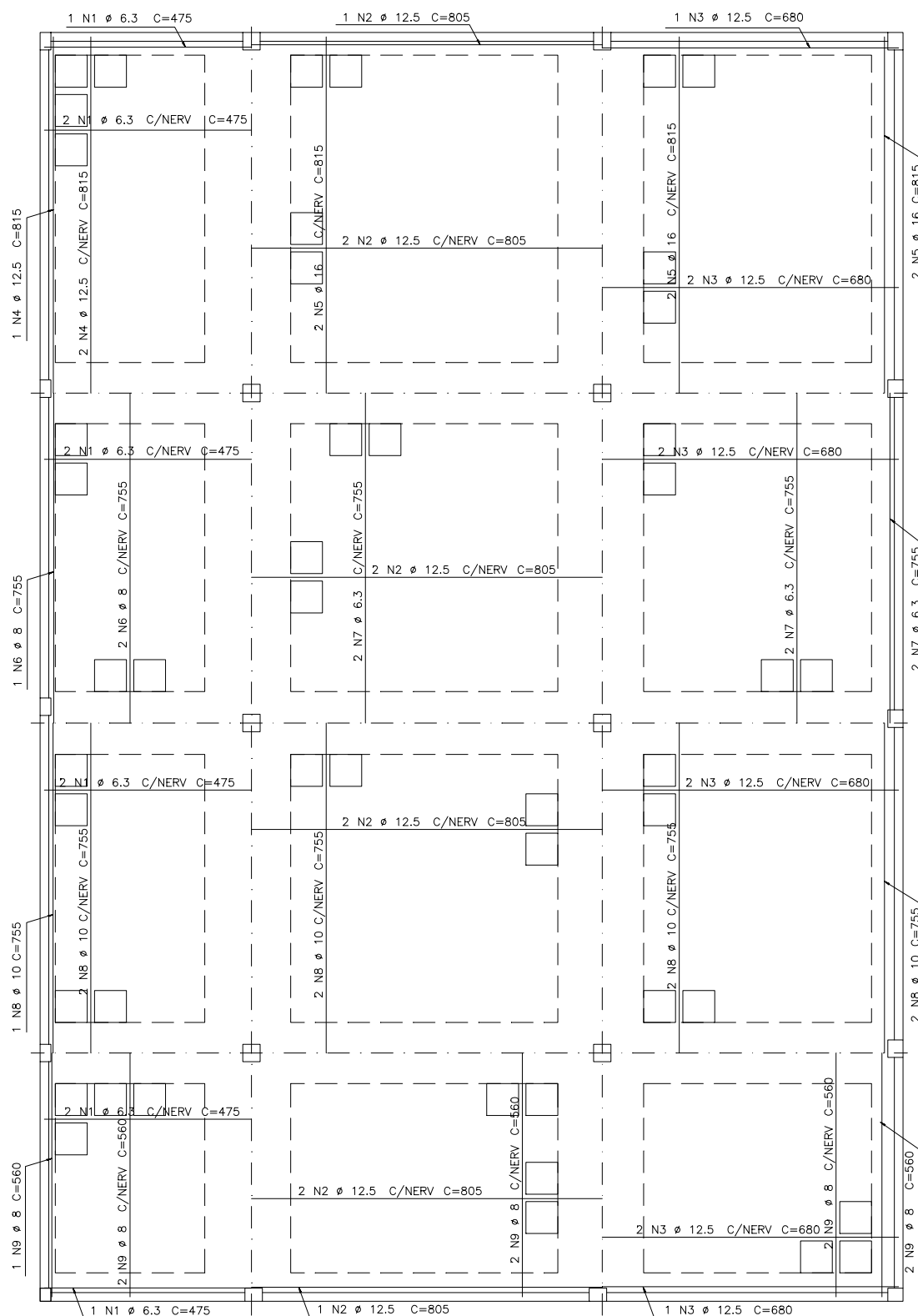


FIGURA 4.28 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

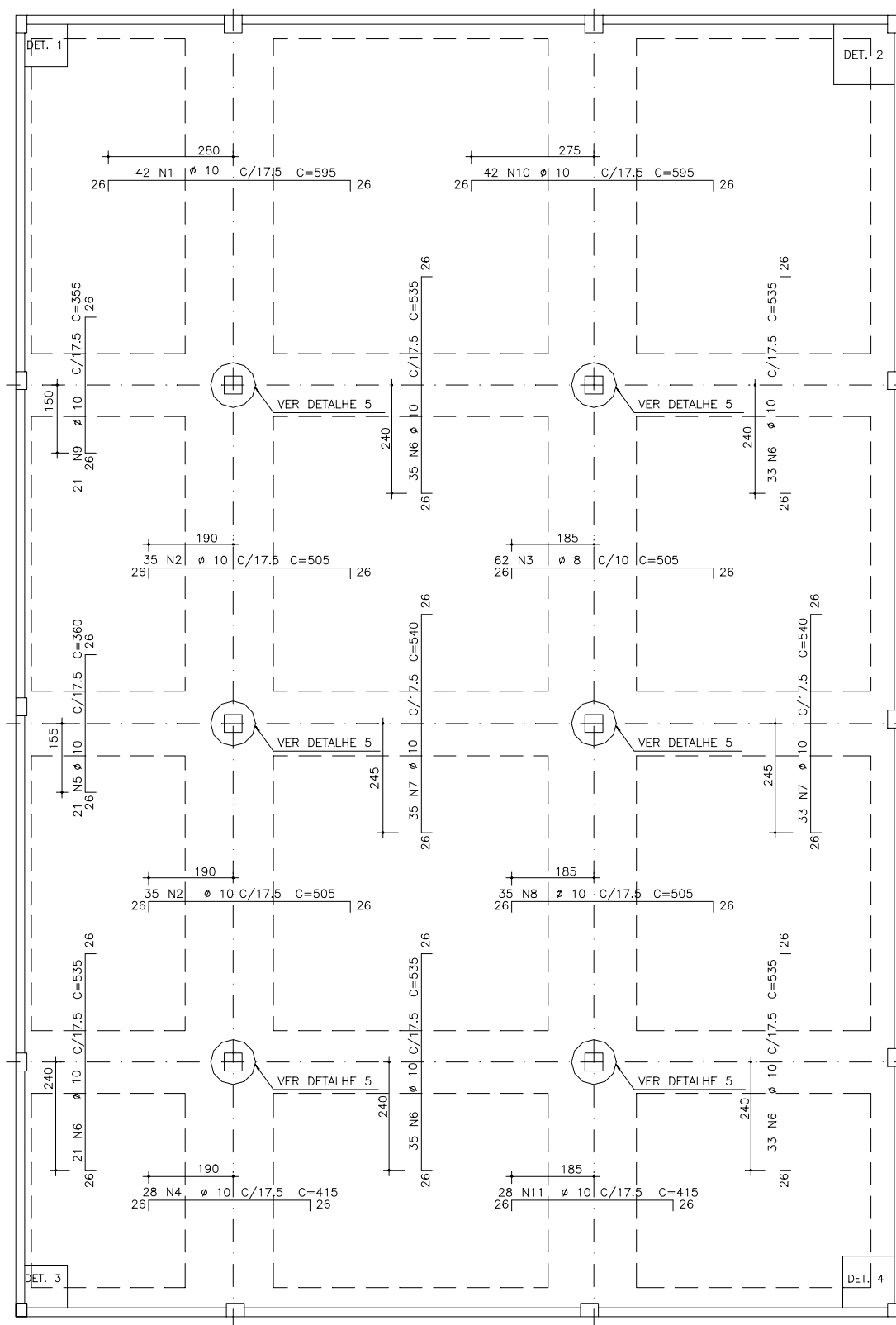


FIGURA 4.29 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

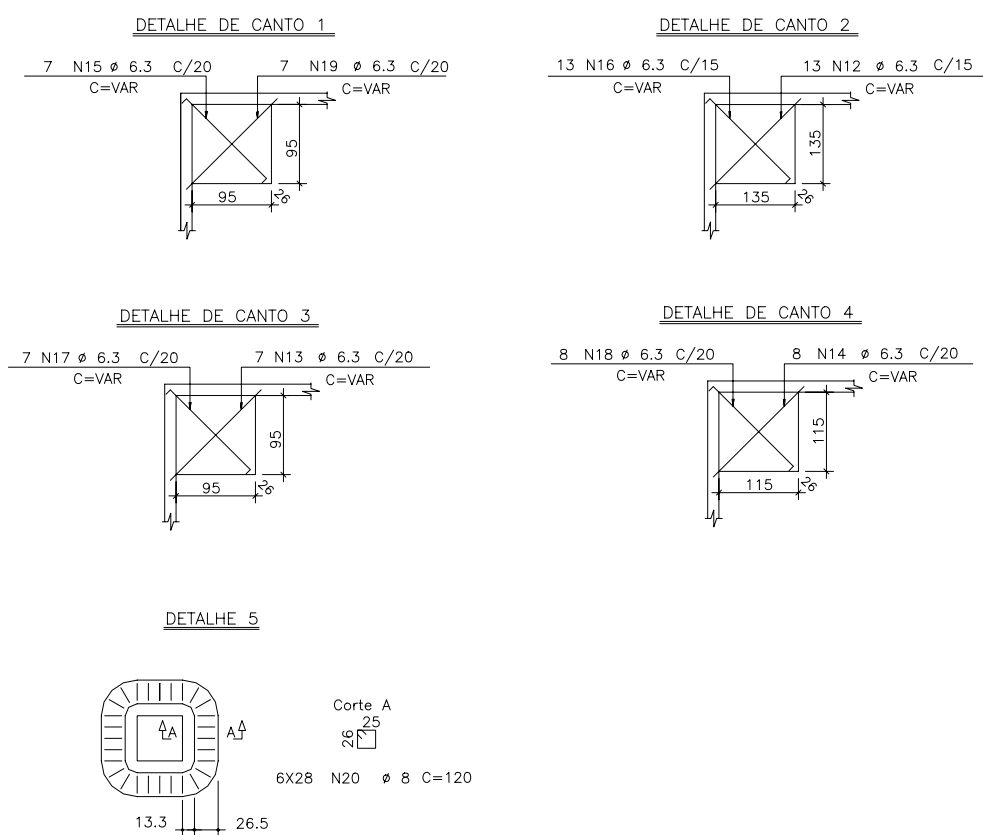


FIGURA 4.30 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

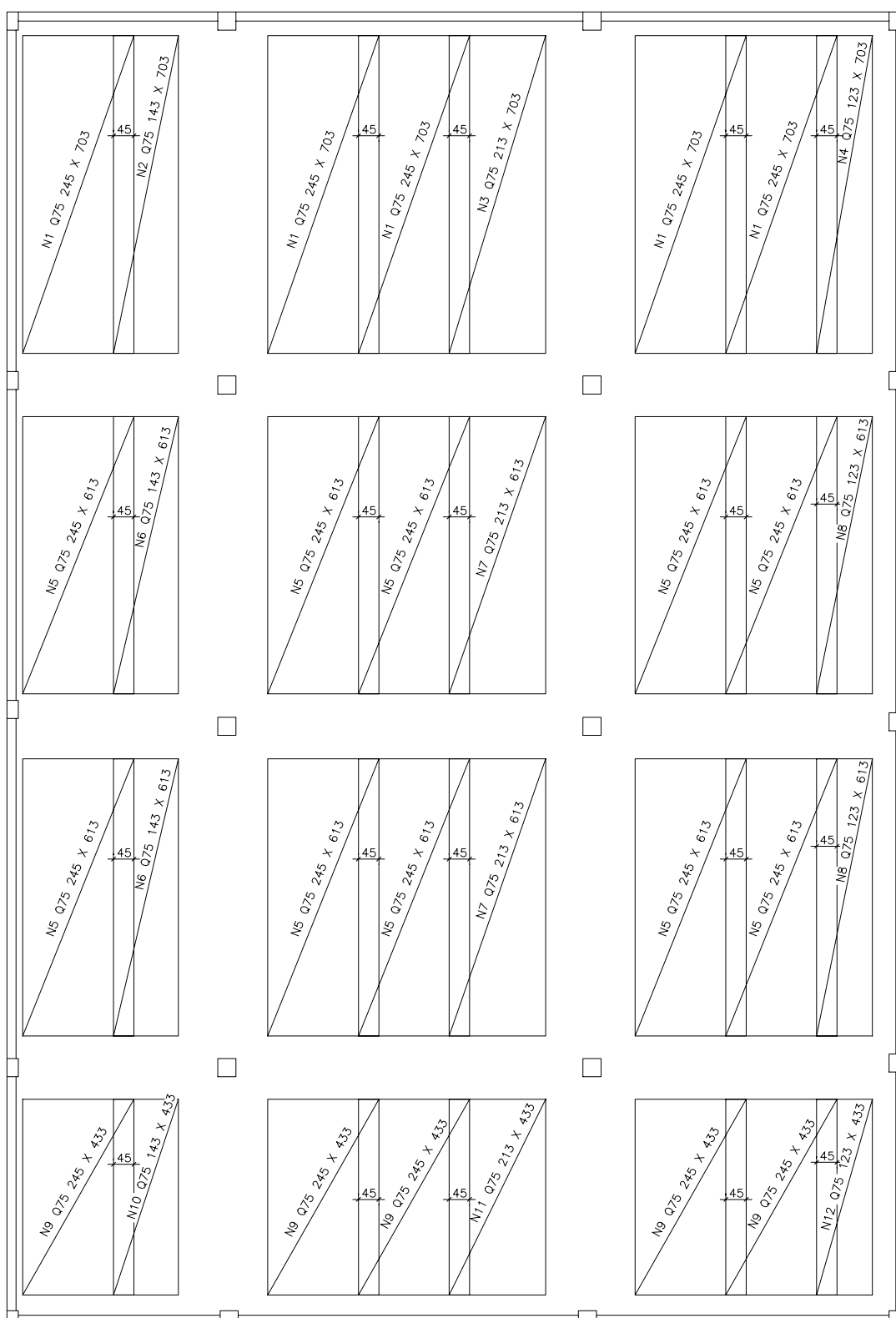


FIGURA 4.31 – Armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

RELAÇÃO DAS TELAS						
POS.	DESIGNAÇÃO	QUANT.	DIM.	UNIT.(CM)		TOTAL (M)
1	Q75	5	245	X	703	35,15
2	Q75	1	143	X	703	7,03
3	Q75	1	213	X	703	7,03
4	Q75	1	123	X	703	7,03
5	Q75	10	245	X	613	61,30
6	Q75	2	143	X	613	12,26
7	Q75	2	213	X	613	12,26
8	Q75	2	123	X	613	12,26
9	Q75	5	245	X	433	21,65
10	Q75	1	143	X	433	4,33
11	Q75	1	213	X	433	4,33
12	Q75	1	123	X	433	4,33

RESUMO DAS TELAS					
AÇO	DESIGNAÇÃO	QUANTIDADES E DIMENSÕES			PESO
		ROLOS (M)			(kgf)
60	Q75	1 ROLO	DE 2,45	X 120	356
60	Q75	1 ROLO	DE 2,45	X 45	134
Total					490 kgf

FIGURA 4.32 – Resumo da armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

4.2.4 Custos

Os preços unitários foram gentilmente cedidos por uma renomada empresa de orçamentos situada em Belo Horizonte, cujo nome é PLANOR - Planejamento e Orçamentos de Obras. Para a composição dos preços unitários, levou-se em consideração materiais, mão-de-obra com encargos sociais, tempo de execução, além da construção de um número mínimo de 10 pavimentos, para levar em consideração a reutilização das fôrmas.

A etapa referente à concretagem (lançamento, adensamento e cura) não varia em função dos elementos estruturais e nem de um sistema para o outro. O mesmo ocorre na etapa de armação (dobramento das barras e colocação nas fôrmas) que, usualmente, é empreitada de acordo com o peso de aço. Porém, a etapa das fôrmas (preparo e montagem) reflete as peculiaridades de cada sistema estrutural e o preço unitário varia de acordo com a facilidade de execução. Nas lajes nervuradas preenchidas com materiais inertes, o preço destes foi considerado na composição dos custos, e para as lajes nervuradas constituídas de fôrmas de polipropileno considerou-se o reaproveitamento das mesmas no cálculo dos custos.

De posse dos preços unitários e quantitativos dos materiais, tornou-se possível a construção das tabelas TAB. 4.1 a TAB. 4.7, que contêm os custos de cada sistema estrutural referentes a um pavimento. Na composição dos custos, estão incluídos o consumo de materiais e mão-de-obra das lajes, das vigas e dos pilares. Com o objetivo de facilitar a análise dos resultados, foram elaborados diversos gráficos comparativos, entre os quais um gráfico que contém os custos (não apresentados em forma de tabela) dos diversos sistemas estruturais, considerando o revestimento inferior das lajes.

Devido à instabilidade da moeda nacional, considera-se oportuno mencionar que a cotação do dólar oficial, na época em que foram elaborados os orçamentos, abril de 2002, era de R\$ 2,37.

TABELA 4.1 – Custo do sistema estrutural convencional calculado através do modelo simplificado

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	835,73	21,89	18.294,13
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	97,07	239,50	23.248,27
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	7.442,20	1,84	13.693,65
TOTAL			55.236,05

TABELA 4.2 – Custo do sistema estrutural convencional calculado através do modelo de grelha

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	835,73	21,89	18.294,13
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	97,07	239,50	23.248,27
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	8.323,20	1,84	15.314,69
TOTAL			56.857,09

TABELA 4.3 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 20 cm)

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	756,09	18,57	14.040,59
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	130,34	239,50	31.216,43
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	13.973,60	1,84	25.711,42
TOTAL			70.968,44

TABELA 4.4 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (espessura de 22 cm)

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	754,27	18,57	14.006,79
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	141,45	239,50	33.877,28
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	13.354,60	1,84	24.572,46
TOTAL			72.456,53

TABELA 4.5 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	751,54	20,66	15.526,82
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	102,82	239,50	24.625,39
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	9.970,60	1,84	18.345,90
Bloco de poliestireno (m ³)	55,49	84,00	4.661,16
TOTAL			63.159,27

TABELA 4.6 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	751,54	20,66	15.526,82
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	102,82	239,50	24.625,39
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	10.519,60	1,84	19.356,06
Bloco de concreto celular (m ³)	55,49	90,00	4.994,10
TOTAL			64.502,37

TABELA 4.7 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	193,84	24,77	4.801,42
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	116,97	239,50	28.014,32
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	8.408,60	1,84	15.471,82
Armação em tela (kgf)	490,00	2,26	1.107,40
Painéis de polipropileno (unid.)	459,00	5,40	2.478,60
TOTAL			51.873,56

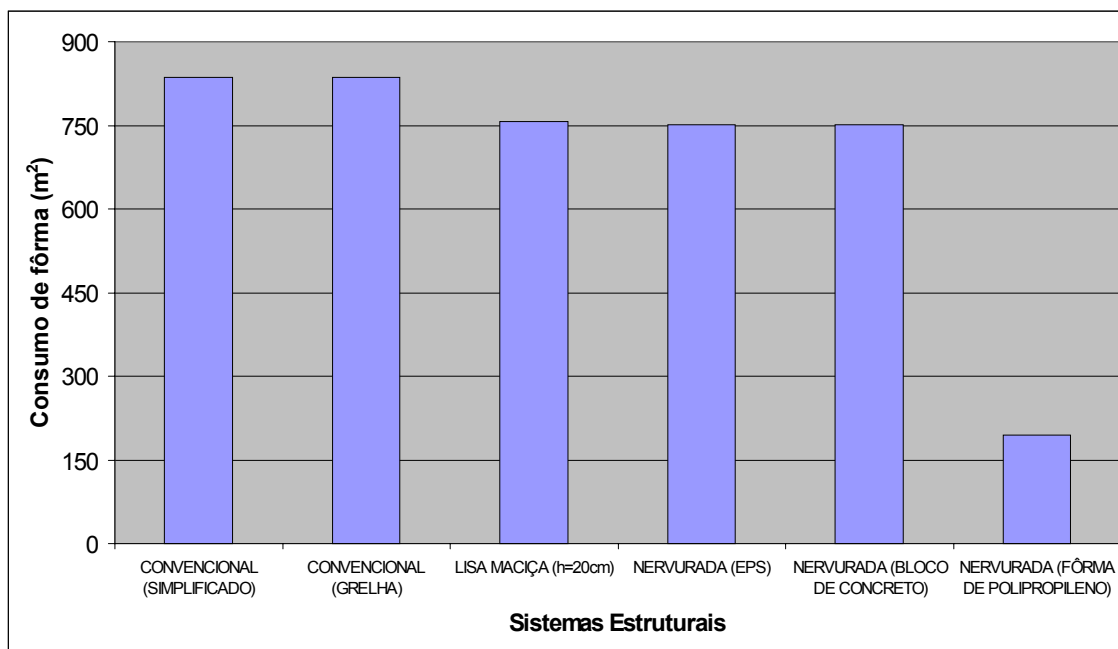


FIGURA 4.33 – Consumo de fôrma dos diversos sistemas estruturais

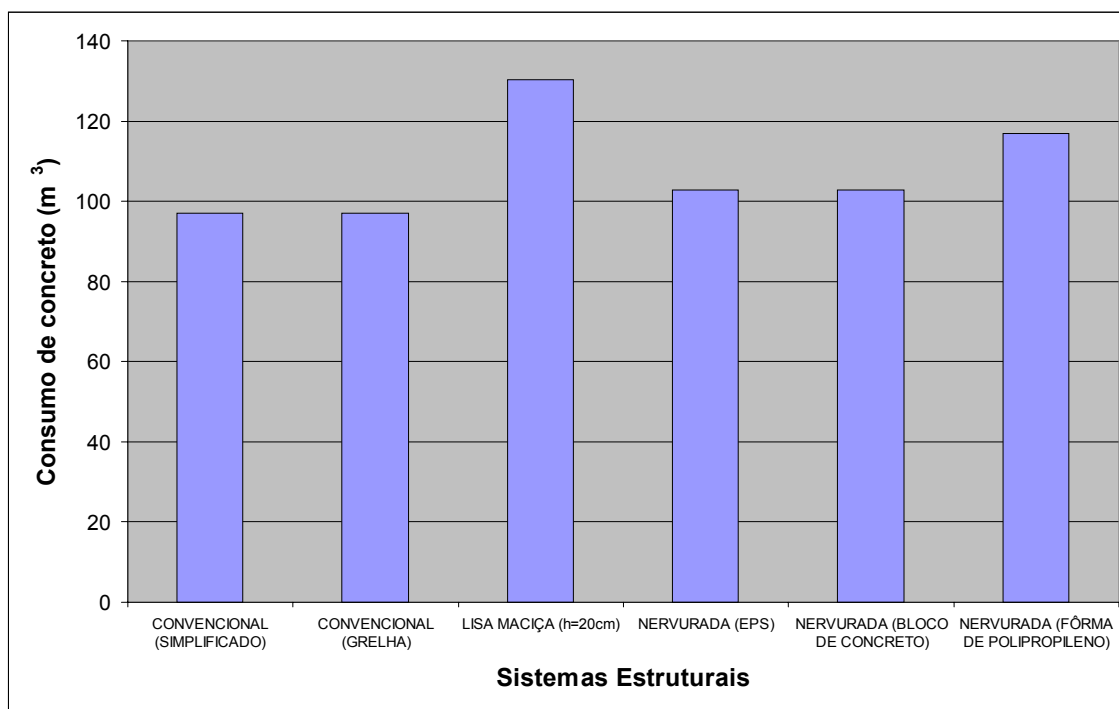


FIGURA 4.34 – Consumo de concreto dos diversos sistemas estruturais

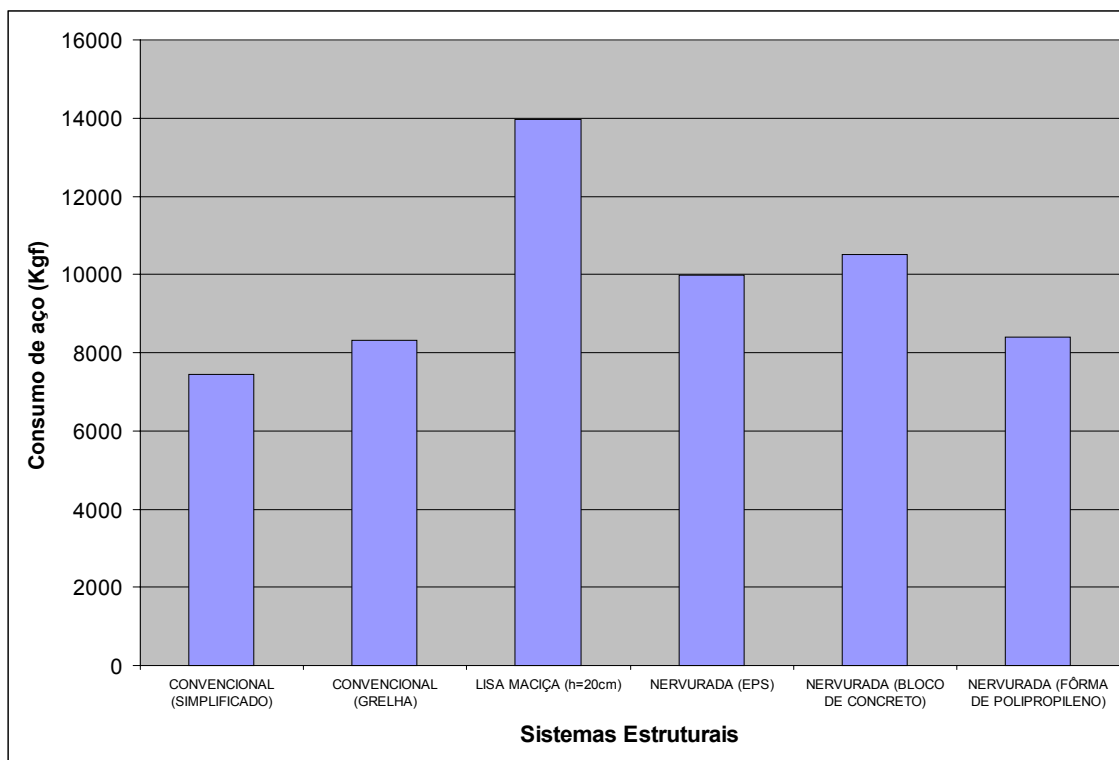


FIGURA 4.35 – Consumo de aço dos diversos sistemas estruturais

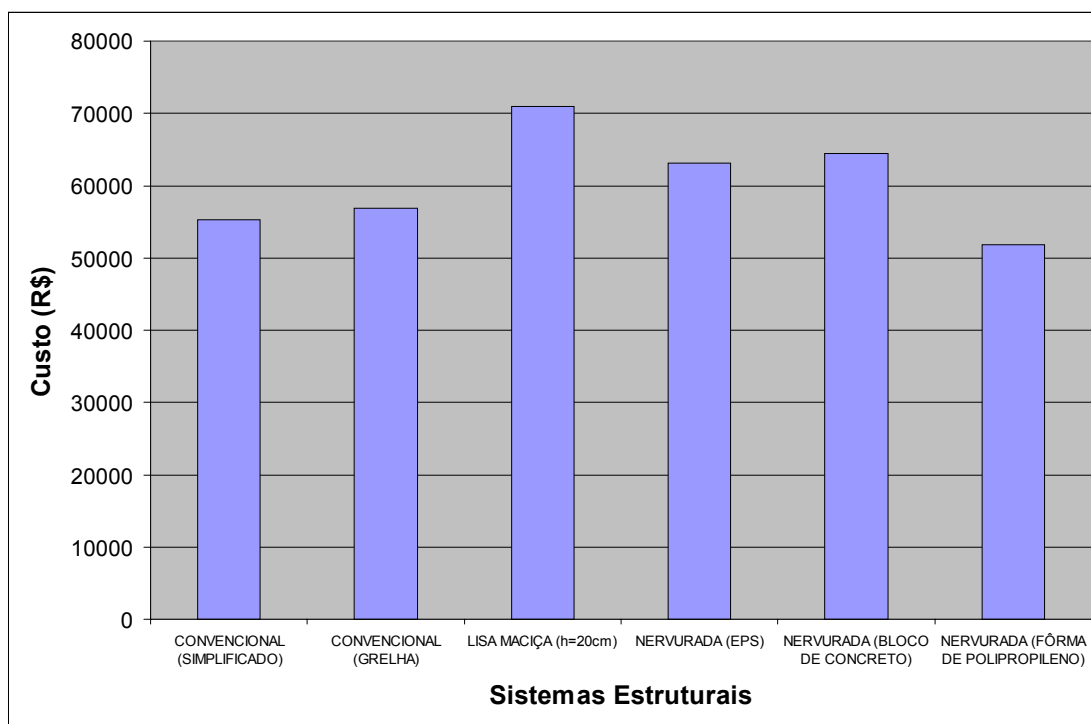
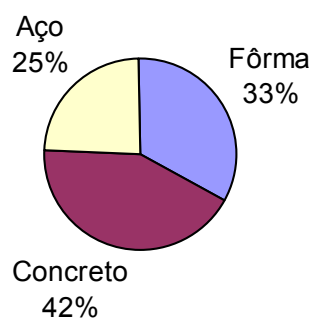
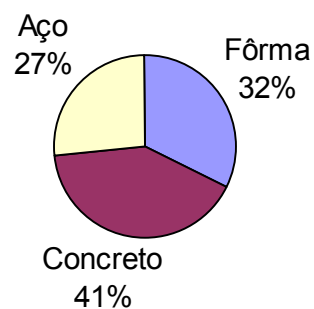


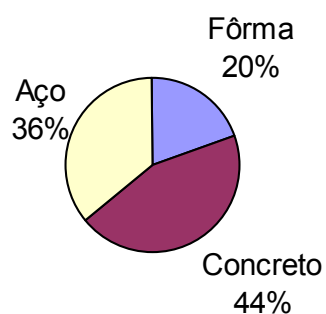
FIGURA 4.36 – Custo total dos diversos sistemas estruturais



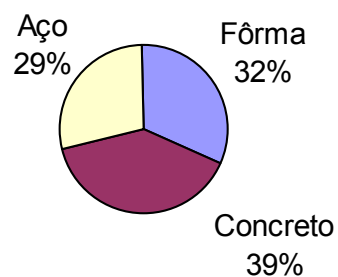
a) Sistema estrutural convencional calculado através do modelo simplificado



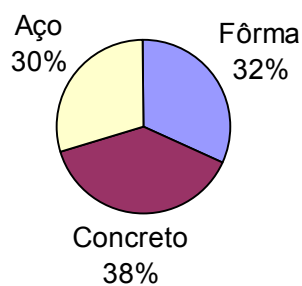
b) Sistema estrutural convencional calculado através do modelo de grelha



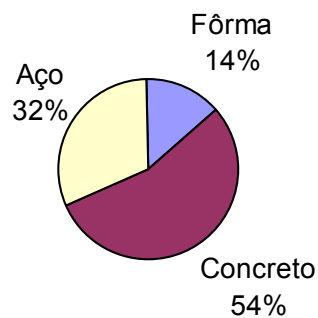
c) Sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (h= 20 cm)



d) Sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada, cujo material inerte são blocos de EPS



e) Sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada, cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado



f) Sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrma de polipropileno

FIGURA 4.37 – Custo percentual por etapa dos diversos sistemas estruturais

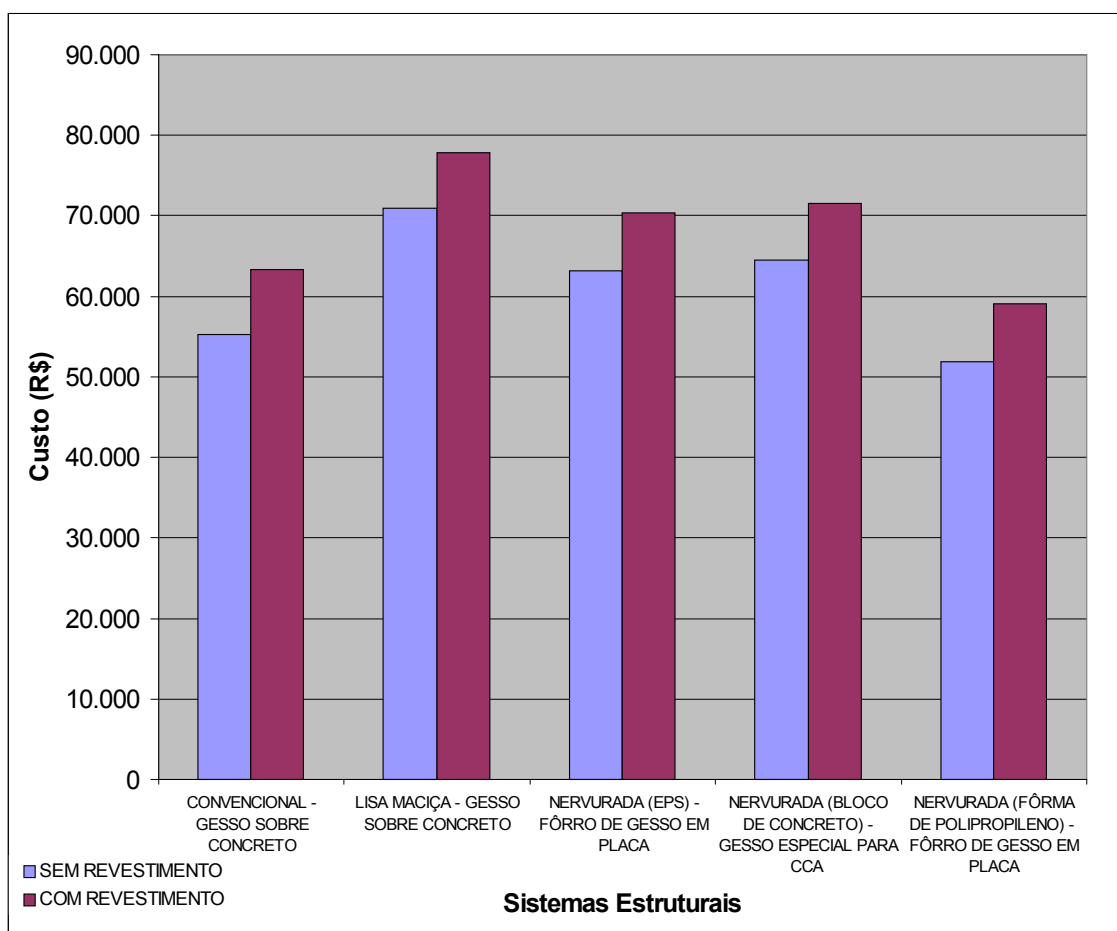


FIGURA 4.38 - Custo total incluindo revestimento dos diversos sistemas estruturais

4.2.5 Comentários

a) Consumo de fôrma

Analisando-se o gráfico, percebe-se que o sistema estrutural que apresenta maior consumo de fôrma é o convencional calculado através do modelo simplificado. Este fato era esperado devido à própria característica do sistema, que, por apresentar maior quantidade de vigas, faz com que as fôrmas sejam mais recortadas, aumentando, assim, o consumo. O sistema estrutural constituído por laje lisa maciça ($h = 20$ cm) apresenta uma economia de aproximadamente 10% em relação ao sistema estrutural

convencional, por ter as fôrmas recortadas apenas no contorno dos pilares e nas vigas de borda. Os sistemas estruturais constituídos por laje lisa nervurada preenchida com material inerte apresentam um consumo ligeiramente inferior (menor que 1%) ao sistema estrutural constituído por laje lisa maciça. Isto é explicado devido à diferença de altura das lajes: no sistema estrutural constituído por laje lisa maciça a altura da laje é 20 cm e nos sistemas com lajes nervuradas preenchidas com material inerte é de 25 cm, consumindo-se, então, nesse último caso, menor quantidade de área de fôrma para as vigas de borda. Os sistemas com lajes nervuradas preenchidas com material inerte apresentam mesmo consumo, pelo fato de suas fôrmas serem idênticas. Para o sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno, percebe-se o menor consumo em relação aos demais sistemas, em função das características inerentes a este sistema, que dispensa o uso de fôrmas de madeira para as lajes. O consumo de madeira restringe-se à montagem dos moldes, que, por si só, já constituem a fôrma, e às vigas de borda. Neste sistema, a laje apresenta uma altura maior e, conseqüentemente, a área de fôrma lateral interna das vigas de borda é menor, contribuindo para a redução do consumo de fôrmas.

b) Volume de concreto

Percebe-se que o sistema estrutural convencional calculado através do modelo simplificado apresenta o menor consumo de concreto, sendo a espessura média do pavimento 16,9 cm (levando-se em consideração para a obtenção deste valor as vigas, as lajes e os pilares), que é a menor altura de laje em comparação com os outros sistemas, justificando este baixo consumo. O sistema constituído por laje lisa maciça apresenta maior consumo de concreto, tanto em relação ao sistema estrutural convencional por ter uma altura de 20 cm, quanto aos demais sistemas por ser maciça. Os sistemas estruturais constituídos por laje lisa nervurada preenchida com material inerte apresentam, entre si, o mesmo consumo por terem fôrmas idênticas. O sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno apresenta o segundo maior consumo de concreto devido à grande altura da laje e também por possuir maior área maciça (vigas-faixa) em relação aos sistemas que possuem materiais inertes.

c) Consumo de aço

O sistema estrutural convencional calculado através do modelo simplificado apresenta o menor consumo, devido à presença de uma quantidade maior de vigas.

Até este ponto, não se comentou sobre o sistema estrutural convencional calculado pelo modelo de grelha, uma vez que a única diferença entre este e o sistema estrutural convencional calculado pelo modelo simplificado é o modelo de cálculo. Portanto, sendo a fôrma idêntica, obviamente as áreas de fôrma e volume de concreto também o são. Percebe-se que o sistema estrutural convencional calculado pelo modelo de grelha possui um consumo de aço 12% maior em comparação ao do modelo simplificado. Esta diferença se deve, principalmente, ao maior consumo de aço das lajes calculadas pelo modelo de grelha, podendo ser observado na FIGURA 4.39. Como neste último modelo despreza-se a rigidez à torção das barras que representam a laje, obtém-se momentos fletores maiores quando comparados ao modelo simplificado, justificando-se, portanto, o maior consumo de aço no modelo de grelha.

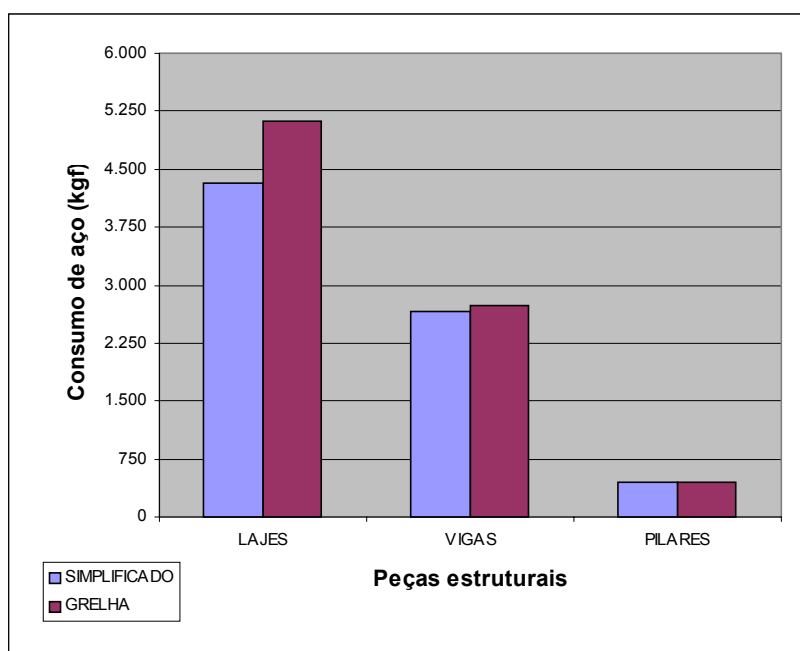


FIGURA 4.39 – Consumo de aço, por peça, para os modelos simplificado e de grelha

Os sistemas constituídos por lajes lisas apresentam um consumo de aço maior em relação ao sistema convencional. Dentre as lajes lisas, o sistema estrutural constituído por laje lisa maciça apresenta o maior consumo de aço devendo-se ao fato de esta laje possuir maior peso próprio e menor altura em relação às demais. Entre as lajes nervuradas, os sistemas com materiais inertes apresentam o maior consumo de aço, sendo que o preenchido com blocos de EPS possui menor consumo em virtude do seu reduzido peso próprio, o que decorre do baixo peso específico destes blocos em relação aos blocos de concreto celular autoclavado. O sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrma de polipropileno possui menor consumo entre as lajes nervuradas.

d) Custo percentual

Analisando-se os gráficos referentes aos custos percentuais, percebe-se que os sistemas estruturais convencionais (calculados através dos dois modelos) e os constituídos por laje lisa nervurada preenchida com materiais inertes, apresentam em média as mesmas proporções entre as etapas: 32% para fôrma, 28% para aço e 40% para concreto. O sistema constituído por laje lisa maciça apresenta um consumo de aço bem maior (36%) e de fôrma menor (20%), sendo que o consumo de concreto (44%) é ligeiramente superior aos anteriores. Já no sistema constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno, há uma redução significativa no consumo de fôrma (14%) e um aumento também significativo no consumo de concreto (54%). O consumo de aço não apresenta muita diferença em relação aos demais.

e) Custo global

TABELA 4.8 – Comparativo de custos dos sistemas estruturais, em relação ao sistema executado com fôrmas de polipropileno

CONVENCIONAL (SIMPLIFICADO)	CONVENCIONAL (GRELHA)	LISA MACIÇA	NERVURADA (EPS)	NERVURADA (BLOCO DE CONCRETO)	NERVURADA (FÔRMA DE POLIPROPILENO)
1,06	1,10	1,37	1,22	1,24	1,00

O sistema estrutural que apresenta o menor custo é aquele constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno em função, especialmente, da grande economia de fôrma proporcionada por este sistema. Em segundo lugar, tem-se o sistema estrutural convencional, calculado através do modelo simplificado, com um custo apenas 6% maior que o primeiro, pois apesar de este sistema ter um consumo muito alto de fôrma, há uma grande economia de concreto e principalmente de aço. Em terceiro lugar, está o sistema estrutural convencional, calculado através do modelo de grelha, que apresenta um custo de apenas 3% a mais que o simplificado. Fato este devido ao aumento do consumo de aço para este modelo de cálculo já observado no item c. Em quarto e quinto lugares, têm-se os sistemas estruturais constituídos por laje lisa nervurada preenchida com materiais inertes, sendo que o preenchido com blocos de EPS apresenta menor custo se comparado com o preenchido com blocos de concreto celular autoclavado. E, por último, tem-se o sistema estrutural constituído por laje lisa maciça, que apresenta o mais alto custo, decorrente do alto consumo de concreto e principalmente de aço.

f) Laje lisa maciça $h=20$ cm x Laje lisa maciça $h=22$ cm

Fez-se, ainda, uma análise da laje lisa maciça com duas espessuras diferentes. Os detalhamentos assim como os custos foram apresentados, porém a laje lisa maciça com espessura de 22 cm não consta nos gráficos comparativos apresentados para não sobrecarregá-los. Na comparação dos custos, o que se observa é que para a laje de 22 cm, mesmo economizando-se fôrma (redução da área de fôrma lateral interna das vigas de borda) e aço (devido ao aumento de inércia), o aumento do consumo de concreto redundou em uma solução menos econômica (2%) em relação à laje de 20 cm.

g) Custo incluindo acabamento

Após realizar-se a comparação dos custos entre os sistemas estruturais, surgiu o seguinte questionamento: a tendência entre os custos manter-se-ia ao levar-se em consideração o custo do revestimento das faces inferiores das lajes? Com o objetivo de responder a este questionamento, realizou-se este cálculo, que está apresentado em

forma de gráfico na FIGURA 4.38. Alguns sistemas possuem mais de uma forma de revestimento, e sendo o objetivo desta dissertação a determinação do sistema mais econômico, para a obtenção deste orçamento escolheu-se a opção mais em conta para cada sistema. O orçamento inclui, além do custo dos materiais, a mão-de-obra necessária para a aplicação do revestimento. Na FIGURA 4.38, “gesso sobre concreto” significa aplicação do gesso corrido sobre o concreto e a pintura. Analisando-se o gráfico que apresenta os custos incluindo o revestimento da face inferior das lajes, observa-se a mesma tendência dos custos sem revestimento.

4.3 Segundo Exemplo – Descrições Gerais

O segundo exemplo é o pavimento-tipo de um edifício comercial construído em Belo Horizonte. Apresenta lajes de grandes dimensões e o pavimento possui uma configuração recortada. O sistema estrutural original deste pavimento também é o convencional com lajes maciças. Hipoteticamente, pela mesma razão, considerou-se o edifício constituído por 10 pavimentos-tipo, cujo pé direito é de 3,06 m. A área de cada pavimento é de aproximadamente 600 m² e o concreto utilizado tem o f_{ck} de 25 MPa.

4.3.1 Cargas Atuantes

Nas lajes, considerou-se uma sobrecarga de 0,20 tf/m², que é a sobrecarga para edifícios comerciais, segundo a NBR-6120 (1980). Considerou-se, ainda, 0,05 tf/m² de revestimento. Conforme informações do engenheiro responsável por este projeto, no interior do pavimento haveria apenas divisórias e, em alguns casos, alvenaria sobre vigas. Como não se dispunha da arquitetura para uma correta locação de tais cargas, foi utilizada, para a consideração das mesmas, carga de alvenaria de 0,6 tf/m nas vigas de 10 cm de largura, e de 0,7 tf/m, nas de 12 cm.

4.3.2 Fôrmas

A seguir está apresentada a fôrma deste exemplo, concebida como sistema estrutural convencional composto de lajes maciças.

4.3.3 Detalhamento

Este pavimento foi analisado para os mesmos sistemas estruturais do primeiro exemplo. No Anexo B encontram-se as fôrmas e armações deste exemplo.

4.3.4 Custos

A seguir são apresentados os custos, referentes a um pavimento, para cada sistema estrutural deste exemplo. Na composição dos mesmos, estão incluídos o consumo de materiais e mão-de-obra das lajes, das vigas e dos pilares.

TABELA 4.9 – Custo do sistema estrutural convencional calculado através do modelo simplificado

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	916,61	21,89	20.064,59
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	117,11	239,50	28.047,85
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	8.984,80	1,84	16.532,03
TOTAL			64.644,47

TABELA 4.10 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	874,60	21,89	19.144,99
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	151,28	239,50	36.231,56
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	11.674,00	1,84	21.480,16
TOTAL			76.856,71

TABELA 4.11 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	872,08	20,66	18.017,17
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	111,33	239,50	26.663,54
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	10.051,00	1,84	18.493,84
Bloco de poliestireno (m ³)	54,06	84,00	4.541,04
TOTAL			67.715,59

TABELA 4.12 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	870,28	20,66	17.979,98
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	115,26	239,50	27.604,77
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	10.466,00	1,84	19.257,44
Bloco de concreto celular (m ³)	57,76	90,00	5.198,40
TOTAL			70.040,59

TABELA 4.13 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	309,97	24,77	7.677,96
Concreto estrut. fck >=25 MPa usinado, bombeado (m ³)	125,52	239,50	30.062,04
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	9.880,00	1,84	18.179,20
Armação em tela (kgf)	685,00	2,26	1.548,10
Painéis de polipropileno (unid.)	488,00	5,40	2.635,20
TOTAL			60.102,50

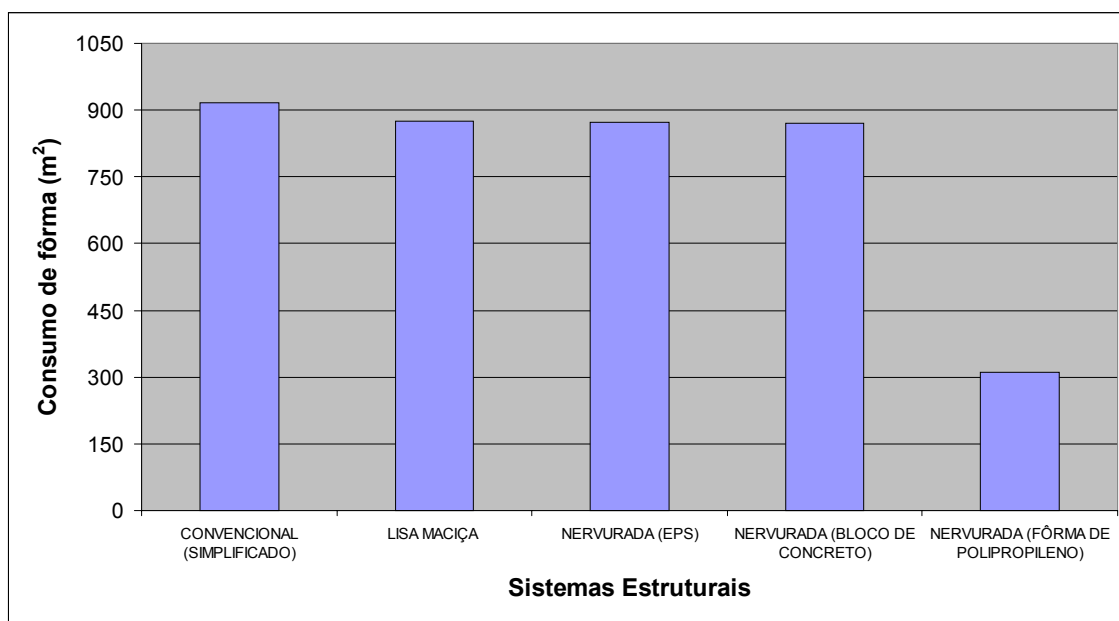


FIGURA 4.41 – Consumo de fôrma dos diversos sistemas estruturais

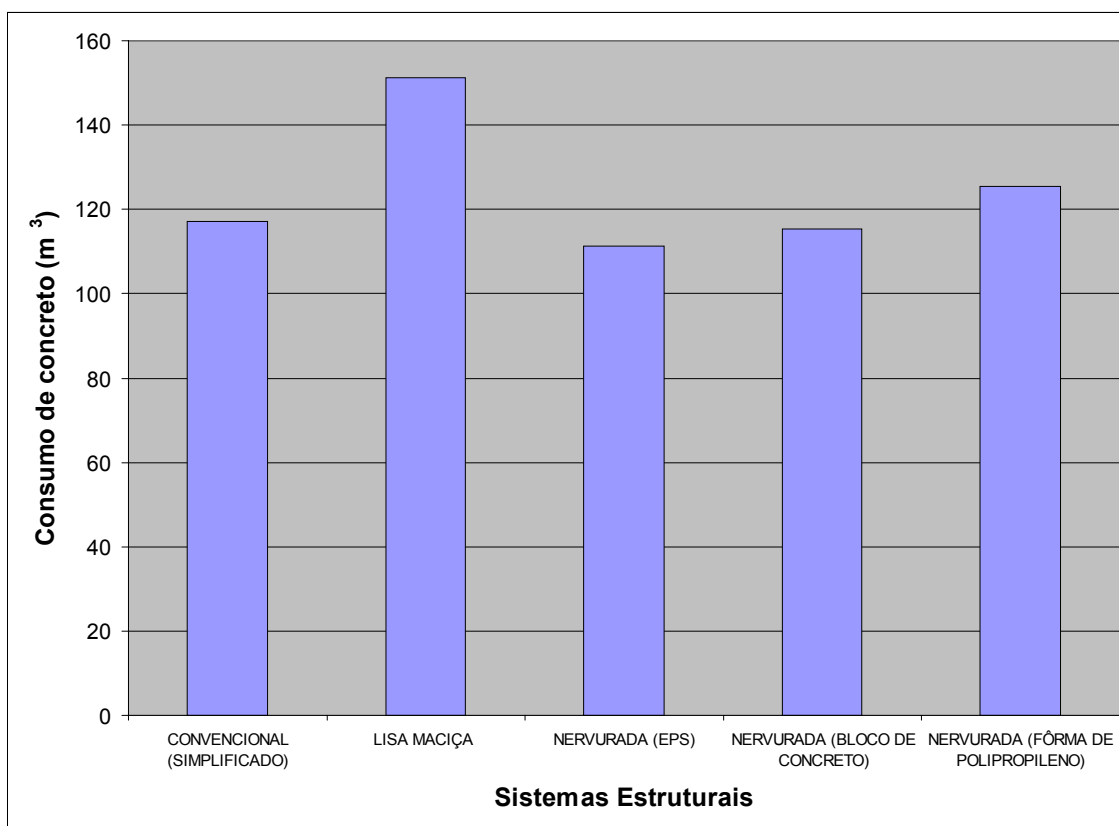


FIGURA 4.42 – Consumo de concreto dos diversos sistemas estruturais

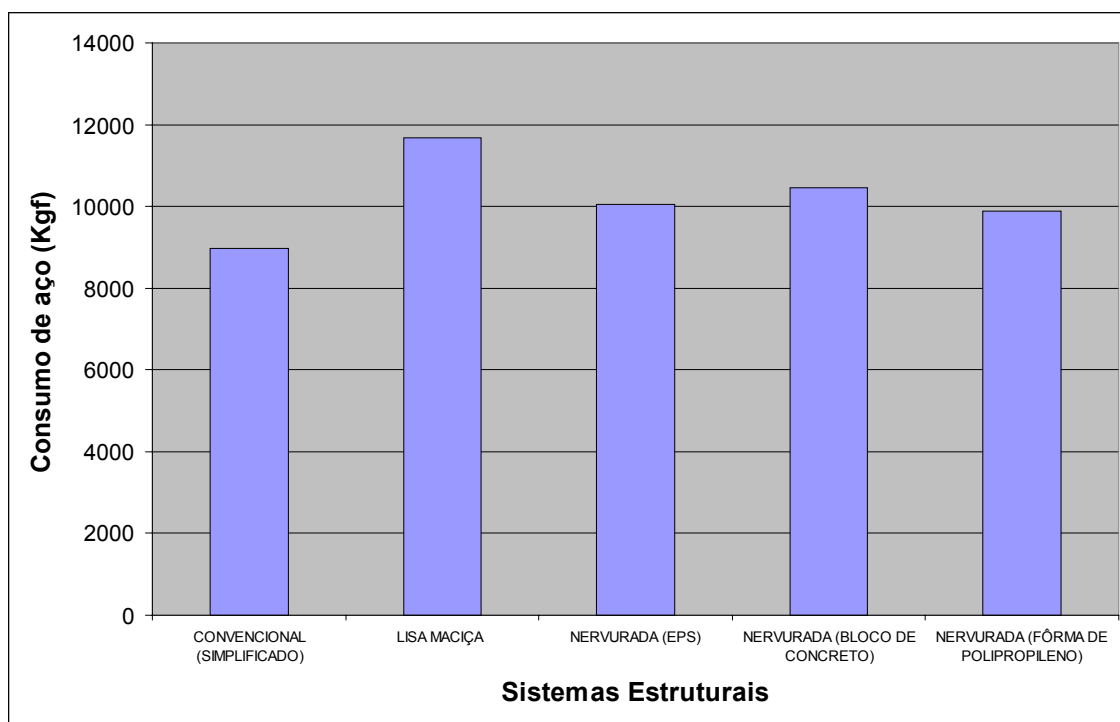


FIGURA 4.43 – Consumo de aço dos diversos sistemas estruturais

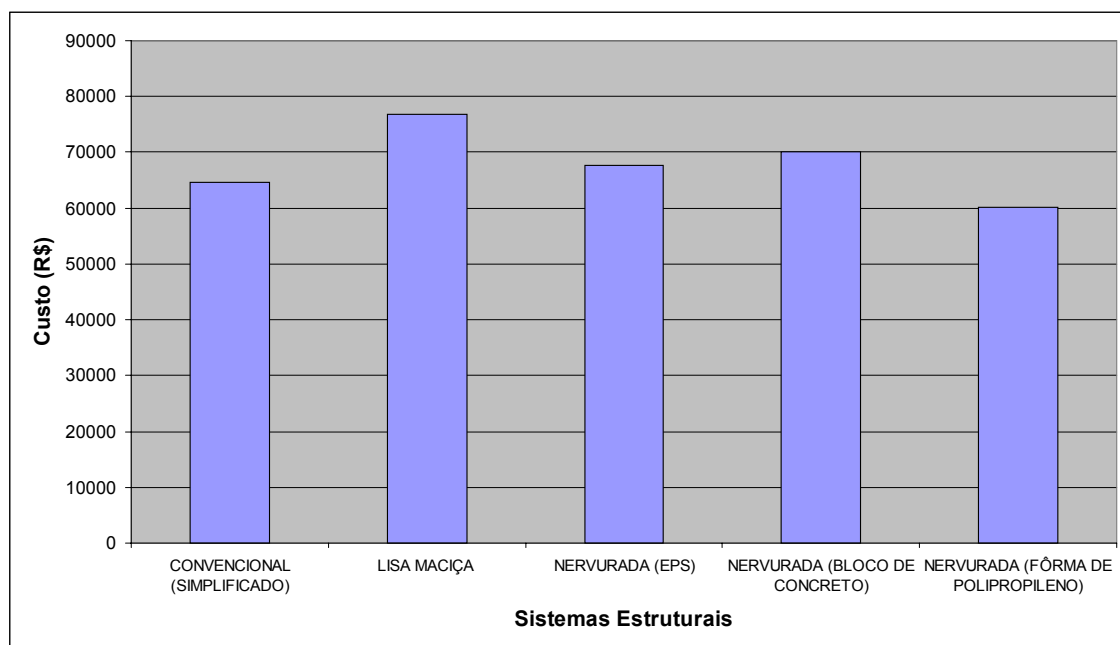


FIGURA 4.44 – Custo total dos diversos sistemas estruturais

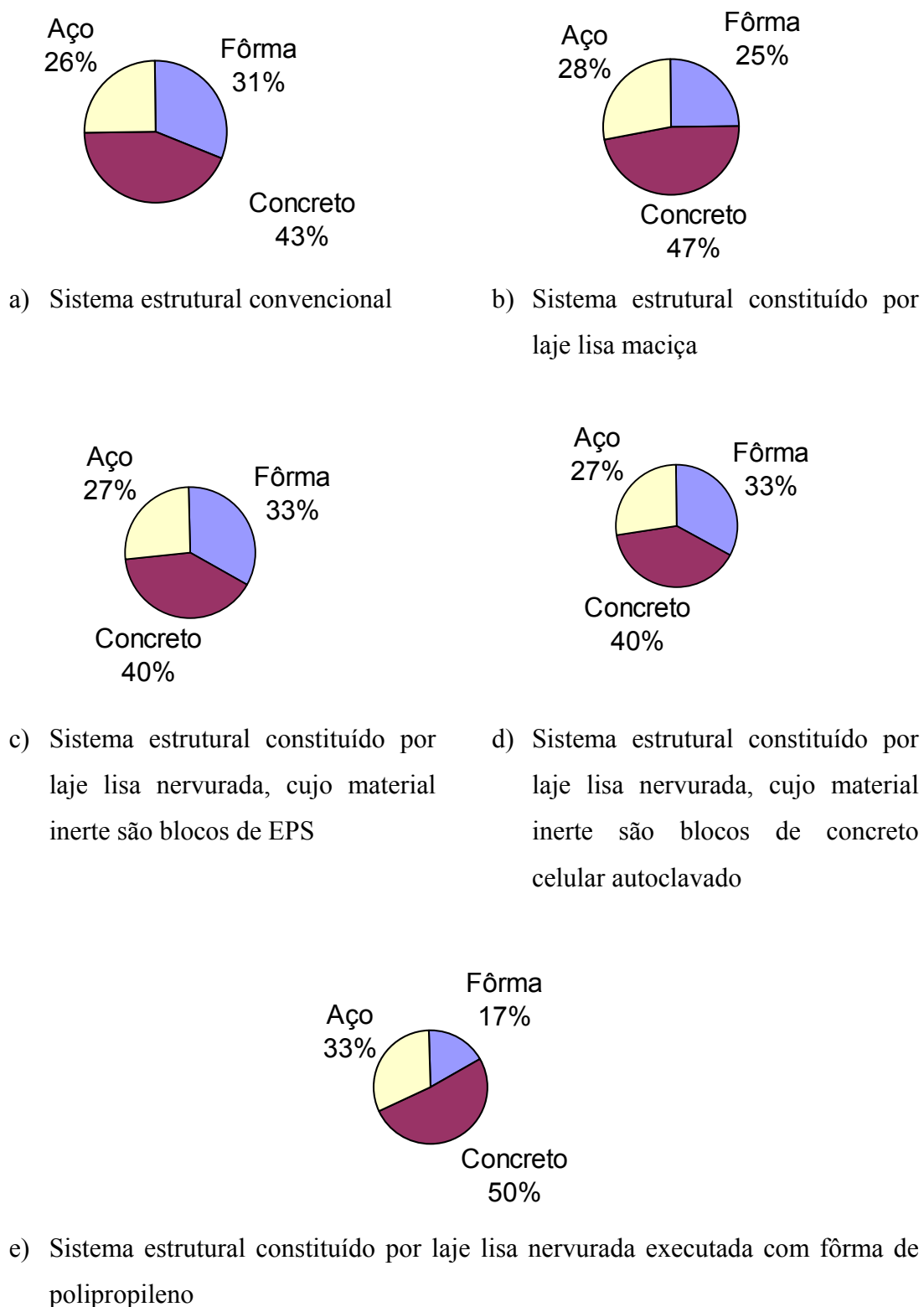


FIGURA 4.45 – Custo percentual por etapa dos diversos sistemas estruturais

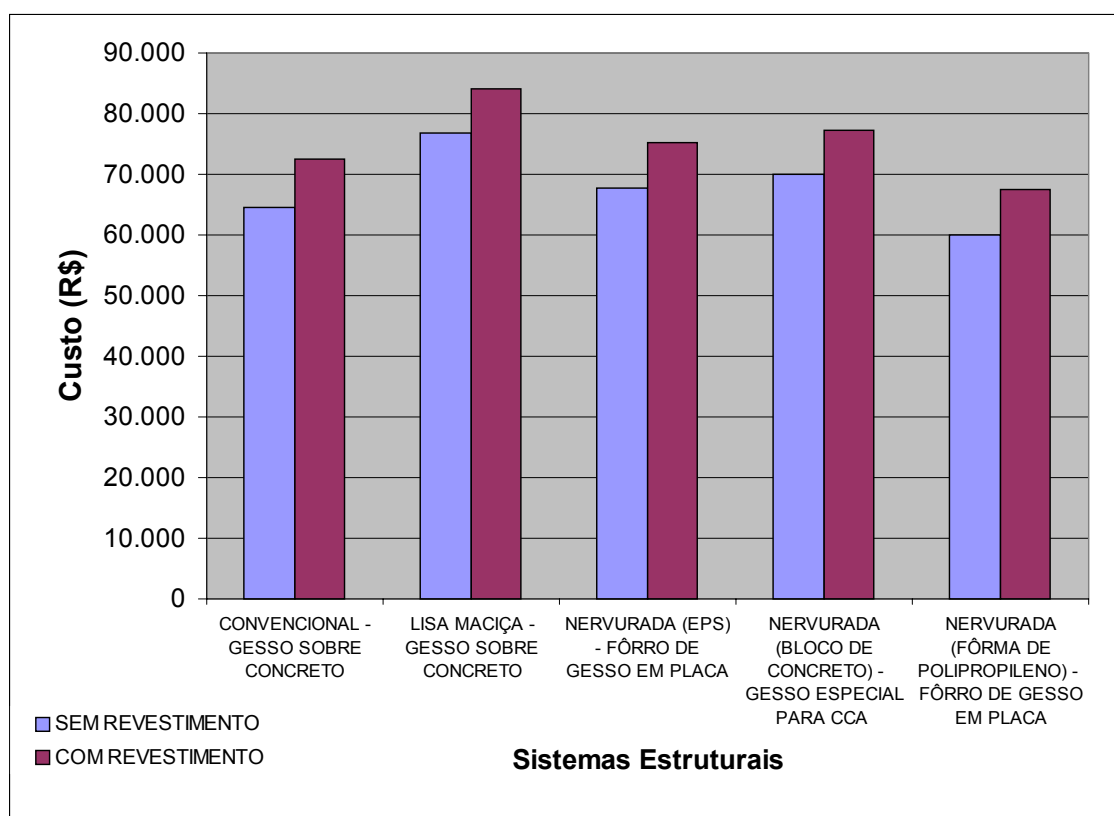


FIGURA 4.46 – Custo total incluindo revestimento dos diversos sistemas estruturais

4.3.5 Comentários

a) Consumo de fôrma

Analisando-se a FIGURA 4.41, percebe-se que o sistema estrutural que apresenta maior consumo de fôrma é o convencional. Este fato era esperado devido à própria característica do sistema, que, por apresentar maior quantidade de vigas, faz com que as fôrmas sejam mais recortadas, aumentando assim o consumo. O sistema estrutural constituído por laje lisa maciça apresenta uma economia de aproximadamente 5% em relação ao sistema estrutural convencional, por possuir menor quantidade de vigas, diminuindo os recortes das fôrmas. Os sistemas estruturais constituídos por lajes lisas nervuradas preenchidas com materiais inertes apresentam um consumo ligeiramente inferior (menor 0,5%, em média) ao sistema estrutural constituído por laje lisa maciça.

Isto é explicado devido à diferença de altura das lajes: no sistema estrutural constituído por laje lisa maciça as alturas das lajes são menores do que as dos sistemas com lajes nervuradas preenchidas com materiais inertes, consumindo-se, então, maior quantidade de área de fôrma lateral para as vigas perimetrais. Como a altura de uma das lajes do sistema estrutural preenchido com blocos de concreto celular autoclavado é maior do que a da laje preenchida com blocos de EPS, o consumo de fôrma, no primeiro caso, é ligeiramente inferior ao do segundo. Para o sistema estrutural constituído por lajes lisas nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno, percebe-se o menor consumo em relação aos demais sistemas, em função das características inerentes a este sistema, que dispensa o uso de fôrmas de madeira para as lajes. O consumo de madeira para a laje restringe-se à montagem dos moldes, que, por si só, já constituem a fôrma. Neste sistema, as lajes apresentam alturas maiores e, conseqüentemente, a área de fôrma lateral das vigas perimetrais é menor, contribuindo também para a redução do consumo de fôrmas.

b) Volume de concreto

Percebe-se que o sistema estrutural convencional apresenta o terceiro maior consumo de concreto, sendo a espessura média do pavimento 21,9 cm (levando-se em consideração para a obtenção deste valor as vigas, as lajes e os pilares). O sistema constituído por laje lisa maciça apresenta maior consumo de concreto, tanto em relação ao sistema estrutural convencional, por possuir laje com altura de até 25 cm, quanto aos demais sistemas, por ser maciça. Os sistemas estruturais constituídos por lajes lisas nervuradas preenchidas com materiais inertes apresentam o menor consumo, sendo que as lajes preenchidas com blocos de EPS possuem um consumo 4% menor do que as preenchidas com blocos de concreto celular autoclavado. O sistema estrutural constituído por lajes lisas nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno apresenta o segundo maior consumo de concreto devido à grande altura da laje e também por possuir maior área maciça (vigas-faixa) em relação aos sistemas que possuem materiais inertes.

c) Consumo de aço

Os sistemas constituídos por lajes lisas apresentam um consumo de aço maior em relação ao sistema convencional. Dentre as lajes lisas, o sistema estrutural constituído por laje lisa maciça apresenta o maior consumo de aço devendo-se ao fato de esta laje possuir maior peso próprio e menor altura em relação às demais. Entre as lajes nervuradas, os sistemas com materiais inertes apresentam o maior consumo de aço, sendo que o preenchido com blocos de EPS possui menor consumo em virtude do seu reduzido peso próprio, o que decorre do baixo peso específico destes blocos em relação aos blocos de concreto celular autoclavado. O sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrma de polipropileno possui menor consumo entre as lajes nervuradas.

d) Custo percentual

Analisando-se a FIGURA 4.45, percebe-se que o sistema estrutural convencional e os constituídos por lajes lisas nervuradas preenchidas com materiais inertes apresentam, em média, as mesmas proporções entre as etapas: 32% para fôrma, 27% para aço e 41% para concreto. O sistema constituído por laje lisa maciça apresenta um maior consumo de concreto (47%) e um menor consumo de fôrma (25%), sendo que o consumo de aço (28%) praticamente não difere dos anteriores. Já no sistema constituído por lajes lisas nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno, há uma redução significativa do consumo de fôrma (17%) e um aumento do consumo de concreto (50%). O consumo de aço não apresenta diferença significativa em relação aos demais.

e) Custo global

TABELA 4.14 – Comparativo de custos dos sistemas estruturais, em relação ao sistema executado com fôrmas de polipropileno

CONVENCIONAL (SIMPLIFICADO)	LISA MACIÇA	NERVURADA (EPS)	NERVURADA (BLOCO DE CONCRETO)	NERVURADA (FÔRMA DE POLIPROPILENO)
1,08	1,28	1,13	1,17	1,00

O sistema estrutural que apresenta o menor custo é aquele constituído por lajes lisas nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno, em função, especialmente, da grande economia de fôrma proporcionada por este sistema. Em segundo lugar, tem-se o sistema estrutural convencional, com um custo apenas 8% maior que o primeiro, pois, apesar de este sistema ter um alto consumo de fôrma, há uma certa economia de concreto e, principalmente, de aço. Em terceiro e quarto lugares, estão, respectivamente, o sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada preenchida com blocos de EPS e de concreto celular autoclavado. E, por último, tem-se o sistema estrutural constituído por laje lisa maciça, que apresenta o mais alto custo, decorrente do alto consumo de concreto e de aço.

f) Custo incluindo acabamento

Analisando-se o gráfico que apresenta os custos, incluindo o revestimento da face inferior das lajes, observa-se a mesma tendência dos custos sem revestimento.

4.4 Terceiro Exemplo – Descrições Gerais

O terceiro exemplo analisado corresponde a uma das partes de um pavimento destinado a um ginásio poliesportivo, construído em um colégio de Belo Horizonte. A estrutura total deste ginásio é constituída de mais três partes, separadas entre si por juntas de dilatação. O nível que está sendo analisado é intermediário, entre a garagem e o nível da quadra principal com arquibancadas, e é destinado a quadras de aquecimento, com um pé-direito de 7,20 m.

O sistema estrutural original deste pavimento é o convencional constituído por lajes nervuradas, vigas e pilares, compondo pórticos em que apenas a linha de pilares maiores é prolongada para receber a estrutura metálica de cobertura do ginásio. Por apresentar lajes com grandes dimensões, a estrutura original é constituída de lajes nervuradas cuja fôrma é de polipropileno. A área desta parte do pavimento é de aproximadamente 800 m² e o concreto utilizado tem o f_{ck} de 30 MPa.

4.4.1 Cargas Atuantes

Nas lajes, considerou-se uma sobrecarga de $0,5 \text{ tf/m}^2$, que é a sobrecarga para ginásios, segundo a NBR-6120 (1980). Considerou-se, ainda, $0,1 \text{ tf/m}^2$ de revestimento. Toda a extensão do pavimento é destinada a quadras de aquecimento, portanto, não há cargas de alvenaria sobre as lajes. Apenas nas vigas V1 e V6 (FIGURA 4.47) foram lançadas cargas de alvenaria de $2,02 \text{ tf/m}$, devido ao fato de que nas outras bordas há continuidade das quadras, sendo separadas por juntas de dilatação de 3 cm.

4.4.2 Fôrmas

A seguir está apresentada a fôrma deste exemplo, concebida como sistema estrutural convencional composto de lajes maciças.

4.4.3 Detalhamento

Este pavimento foi analisado para os seguintes sistemas estruturais:

- lajes convencionais maciças;
- lajes convencionais nervuradas, cujo material inerte são blocos de EPS;
- lajes convencionais nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno.

No Anexo C encontram-se as fôrmas e armações deste exemplo.

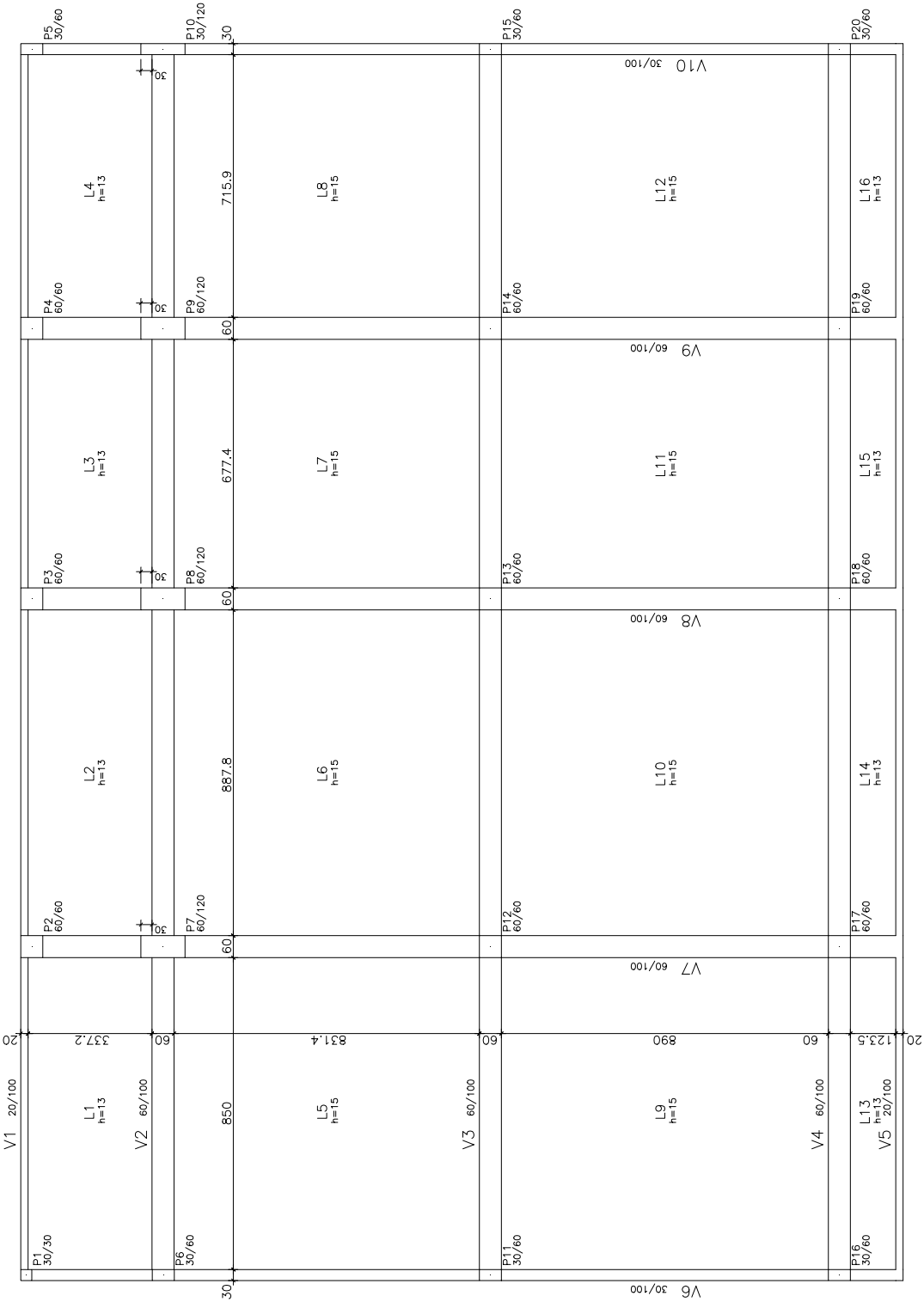


FIGURA 4.47 – Fôrma do sistema estrutural convencional

4.4.4 Custos

A seguir são apresentados os custos, referentes a um pavimento, para cada sistema estrutural deste exemplo. Na composição dos mesmos, estão incluídos o consumo de materiais e mão-de-obra das lajes, das vigas e dos pilares. Estimou-se, para composição dos preços unitários, o reaproveitamento de fôrmas por 2,5 pavimentos.

TABELA 4.15 – Custo do sistema estrutural convencional calculado através do modelo simplificado

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	1.607,20	21,89	35.181,61
Concreto estrut. fck >=30 MPa usinado, bombeado (m ³)	268,62	248,95	66.872,95
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	22.375,00	1,84	41.170,00
TOTAL			143.224,56

TABELA 4.16 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada, cujo material inerte são blocos de EPS

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	1.599,37	20,66	33.042,98
Concreto estrut. fck >=30 MPa usinado, bombeado (m ³)	241,65	248,95	60.158,77
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	23.795,00	1,84	43.782,80
Bloco de poliestireno (m ³)	43,14	84,00	3.623,76
TOTAL			140.608,31

TABELA 4.17 – Custo do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Fôrma em chapa de madeira compensada (m ²)	903,10	24,77	22.369,79
Concreto estrut. fck >=30 MPa usinado, bombeado (m ³)	245,85	248,95	61.204,36
Armação em aço CA-50 e CA-60 (kgf)	23.057,00	1,84	42.424,88
Armação em tela (kgf)	733,00	2,26	1.656,58
Painéis de polipropileno (unid.)	1.479,00	5,40	7.986,60
TOTAL			135.642,21

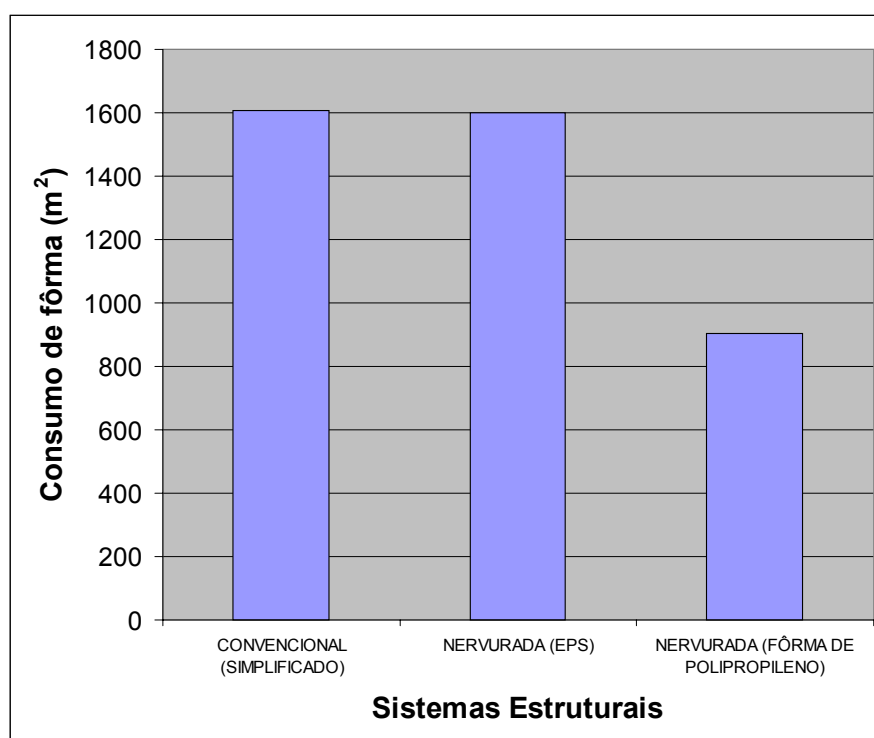


FIGURA 4.48 – Consumo de fôrma dos diversos sistemas estruturais

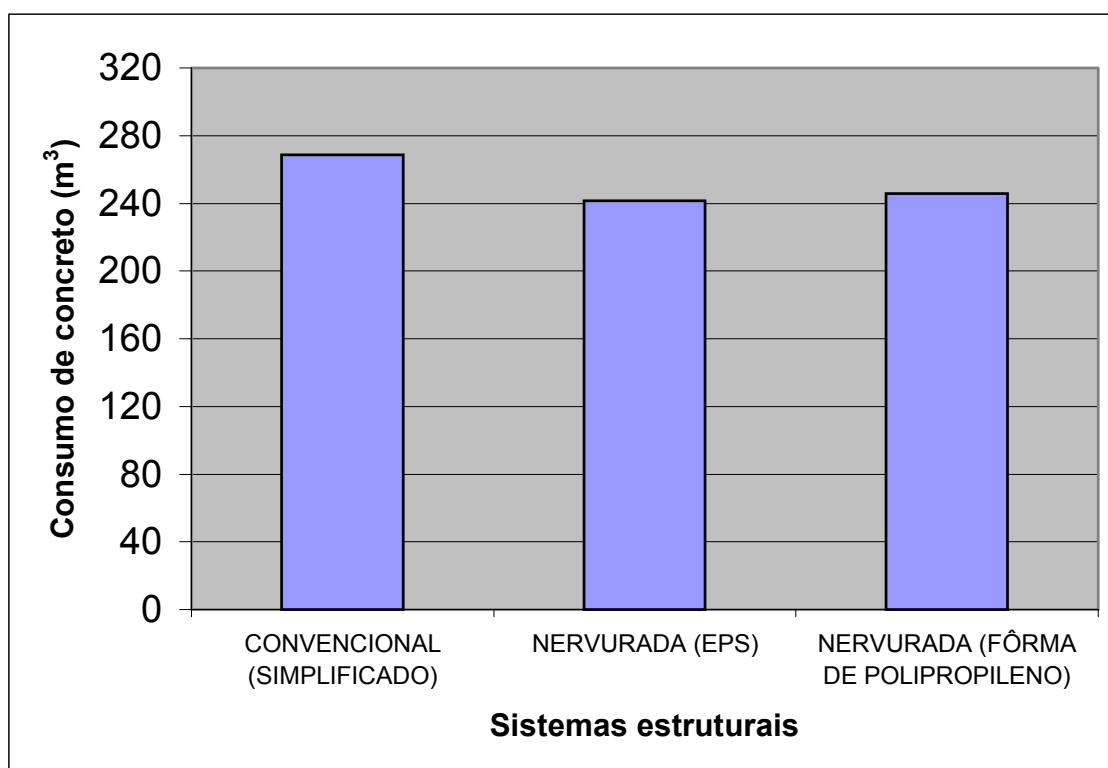


FIGURA 4.49 – Consumo de concreto dos diversos sistemas estruturais

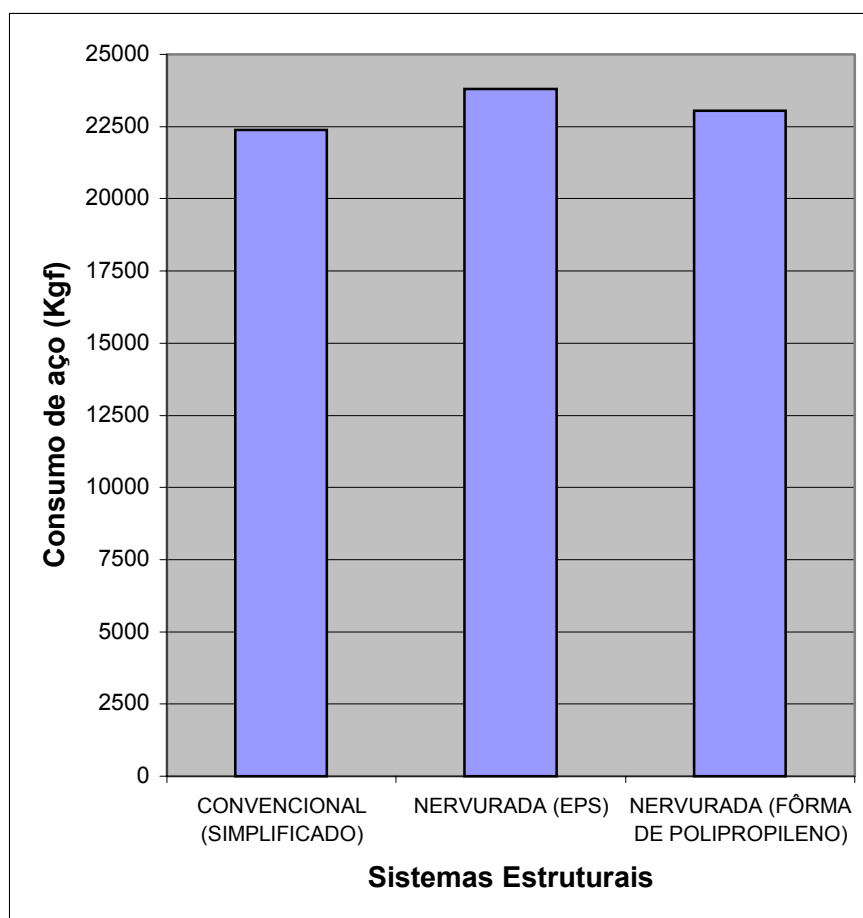


FIGURA 4.50 – Consumo de aço dos diversos sistemas estruturais

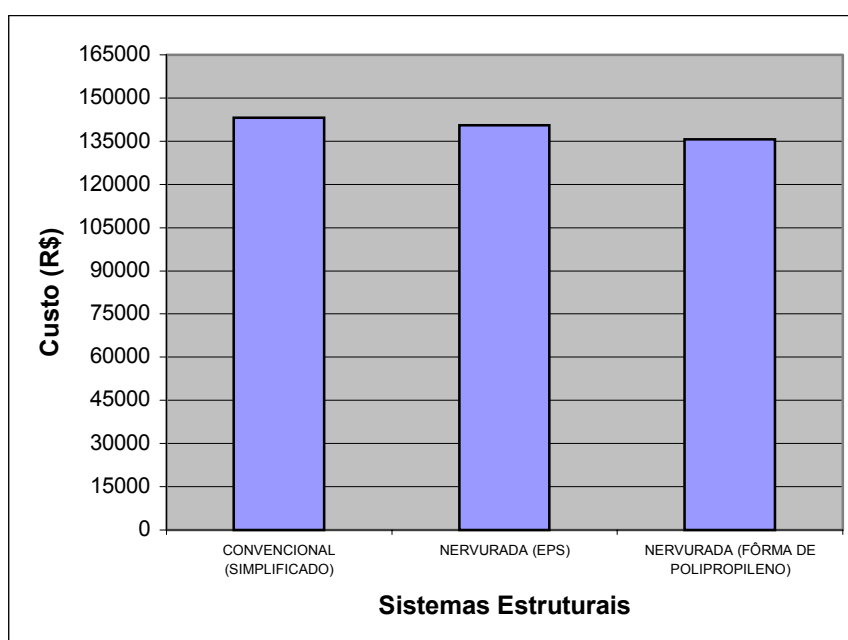


FIGURA 4.51 – Custo total para os diversos sistemas estruturais

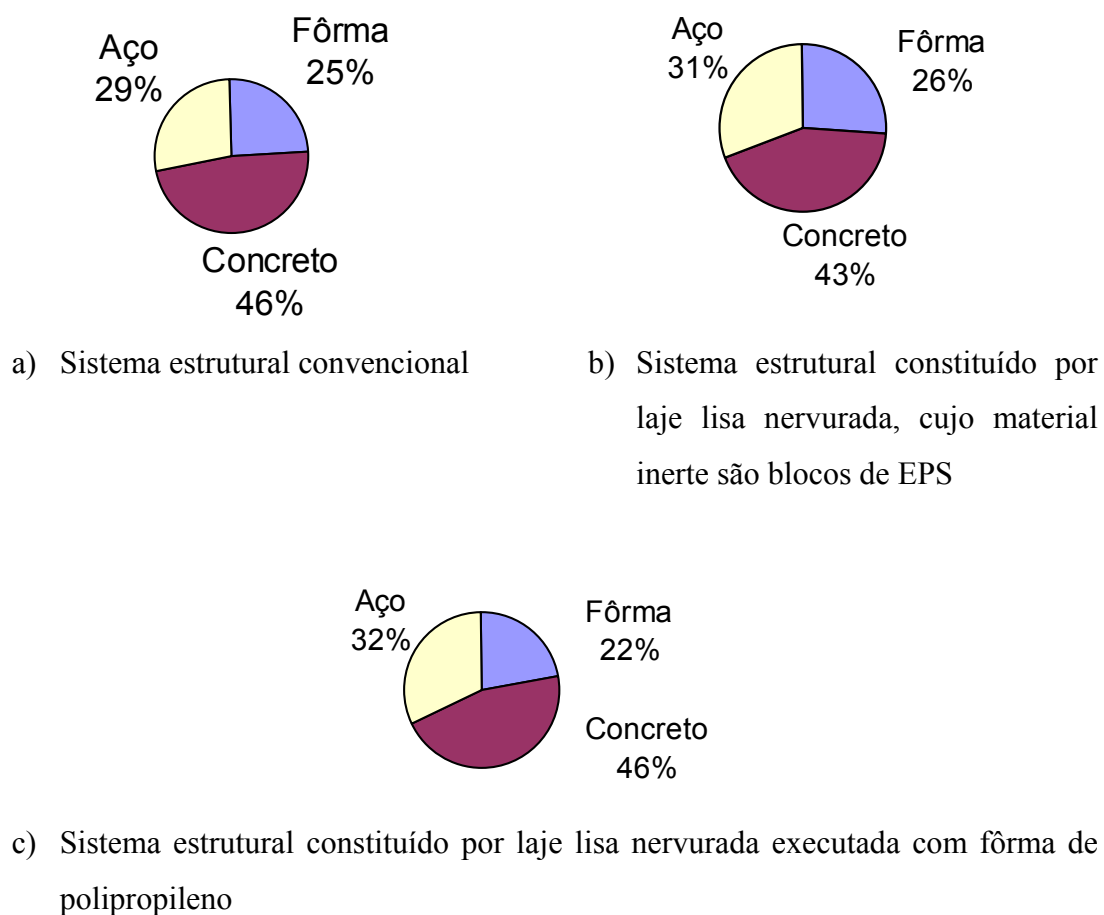


FIGURA 4.52 – Custo percentual por etapa dos diversos sistemas estruturais

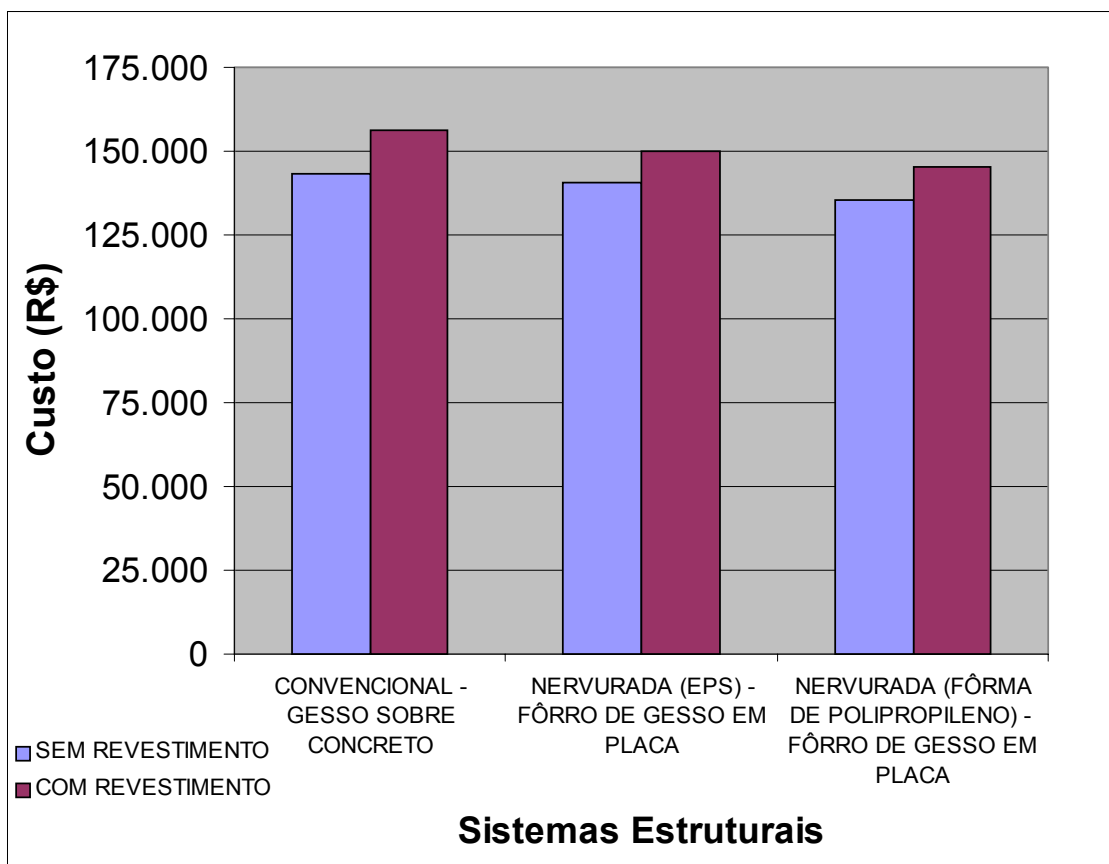


FIGURA 4.53 – Custo total incluindo revestimento dos diversos sistemas estruturais

4.4.5 Comentários

a) Consumo de fôrma

Analisando-se a FIGURA 4.48, percebe-se que o sistema estrutural que apresenta maior consumo de fôrma é o convencional com lajes maciças. O sistema estrutural convencional com lajes nervuradas preenchidas com blocos de EPS apresenta um consumo bem próximo ao anterior. A pequena diferença encontrada é devida à maior altura das lajes nervuradas que acarretam redução da área lateral de fôrmas das vigas, reduzindo, conseqüentemente, o consumo. No sistema estrutural constituído por lajes nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno, percebe-se menor consumo em

relação aos demais sistemas, em função das suas características, que dispensam o uso de fôrmas de madeira para as lajes. O consumo de madeira para a região de lajes nervuradas restringe-se à montagem dos moldes, que, por si só, já constituem a fôrma. Neste sistema, as lajes apresentam alturas maiores e, conseqüentemente, a área de fôrma lateral das vigas é menor, contribuindo, assim, para a redução do consumo de fôrmas.

b) Volume de concreto

Percebe-se que o sistema estrutural convencional com lajes maciças apresenta o maior consumo de concreto, sendo a espessura média do pavimento 33,5 cm (levando-se em consideração, para a obtenção deste valor as vigas, as lajes e os pilares). Os sistemas com lajes nervuradas apresentam menor consumo em relação ao sistema com lajes maciças devido à existência de nervuras. O sistema estrutural constituído por lajes nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno apresenta maior consumo de concreto em relação ao sistema com lajes preenchidas com blocos de EPS por apresentar maior altura.

c) Consumo de aço

O sistema estrutural convencional com lajes maciças apresenta o menor consumo. Em segundo lugar, tem-se as lajes nervuradas executadas com fôrma de polipropileno e, por último, o sistema cujas lajes nervuradas são preenchidas com blocos de EPS.

d) Custo percentual

Analisando-se a FIGURA 4.52, percebe-se basicamente as mesmas proporções para todos os sistemas.

e) Custo global

O sistema estrutural que apresenta o menor custo é aquele constituído por lajes nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno, em função, especialmente, da

grande economia de fôrma proporcionada por este sistema. Em segundo lugar, tem-se o sistema estrutural convencional com lajes nervuradas preenchidas com blocos de EPS, com um custo apenas 4% superior ao primeiro. Em terceiro lugar, tem-se o sistema estrutural convencional com lajes maciças, que apresenta o mais alto custo, decorrente do alto consumo de concreto.

TABELA 4.18 – Comparativo de custos dos sistemas estruturais, em relação ao sistema executado com fôrmas de polipropileno

CONVENCIONAL (SIMPLIFICADO)	NERVURADA (EPS)	NERVURADA (FÔRMA DE POLIPROPILENO)
1,06	1,04	1,00

f) Custo incluindo acabamento

Analisando-se a FIGURA 4.53 que apresenta os custos, incluindo o revestimento da face inferior das lajes, observa-se a mesma tendência dos custos sem revestimento.

4.5 Fundações

Apesar de este trabalho não levar em consideração o custo referente às fundações, em um estudo realizado por ALBUQUERQUE (1999), análogo à presente dissertação, são citadas as seguintes conclusões:

“Observa-se que com a inclusão das fundações os custos das opções aumentaram aproximadamente entre 7% e 8%. Observa-se ainda que as diferenças entre os custos das opções, em termos percentuais, praticamente não se alteraram com a inclusão das fundações”.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao conceber-se uma estrutura, é necessário o conhecimento dos vários sistemas estruturais existentes. Além disto, também é de fundamental importância o domínio do software a ser empregado no cálculo, conhecendo-se os critérios e os modelos apresentados no mesmo. Deve-se saber adequar cada modelo estrutural (físico) ao modelo matemático.

À partir daí, a próxima etapa é encontrar o sistema estrutural que seja economicamente mais viável, balizado por diversos fatores, salientando-se que, na composição dos custos, devem ser incluídos fatores tais como mão-de-obra, tempo de execução, equipamentos, materiais necessários e a reutilização das fôrmas.

5.1 Conclusões

Os resultados observados nos dois primeiros exemplos são bastante semelhantes.

O sistema estrutural mais econômico é aquele constituído por lajes lisas nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno, em função, especialmente, da grande economia de fôrma proporcionada por este sistema.

Em segundo lugar, tem-se o sistema estrutural convencional, que, apesar de apresentar alto consumo de fôrma, proporciona uma economia razoável de aço nos dois casos.

Apesar de este sistema ser o segundo mais econômico, a presença de uma maior quantidade de vigas limita, em parte, as possibilidades arquitetônicas.

Em terceiro e quarto lugares estão, respectivamente, os sistemas estruturais constituídos por lajes lisas nervuradas preenchidas com blocos de EPS e com blocos de concreto celular autoclavado. O sistema com laje lisa nervurada preenchida com blocos de EPS é mais econômico, principalmente pelo menor consumo de aço decorrente do menor peso próprio da laje.

E, finalmente, o sistema estrutural constituído por laje lisa maciça é o sistema economicamente menos viável, especialmente devido ao seu elevado consumo de concreto e de aço.

Quando são acrescentados os custos relativos à aplicação do revestimento das lajes não se percebem mudanças nas tendências observadas para os custos.

No terceiro exemplo, os resultados não seguiram a mesma tendência dos demais. Neste caso, todos os sistemas estruturais são convencionais, sendo um composto por laje maciça e os outros dois, por lajes nervuradas.

O sistema estrutural mais econômico, neste caso, também foi o constituído por lajes nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno. Em segundo lugar, tem-se o sistema estrutural convencional com lajes nervuradas preenchidas com blocos de EPS, que apresentou menor consumo de concreto. O sistema estrutural convencional com lajes maciças foi o economicamente menos viável devido ao alto consumo de concreto. Porém, percentualmente, os custos não diferem significativamente entre os sistemas.

Quando são acrescentados os custos necessários à aplicação do revestimento das lajes, observam-se as mesmas tendências dos custos sem revestimento.

Apesar de os dois primeiros exemplos terem apresentado uma mesma tendência, não há como adotá-los como regra. A prova disto é que, no terceiro exemplo, os resultados já apresentaram um comportamento diferente.

O sistema constituído por lajes nervuradas executadas com fôrmas de polipropileno, em todos os exemplos, apresenta-se como a solução mais econômica.

Espera-se que este estudo forneça subsídios que sirvam de referência a engenheiros de estruturas na escolha de sistemas estruturais, além de contribuir para a literatura técnica, que é extremamente deficiente em se tratando de comparação de custos entre sistemas.

5.2 Sugestões

Como este assunto é muito amplo e não sendo possível esgotá-lo em uma dissertação, sugere-se a seguir, alguns itens que poderiam ser estudados, a fim de enriquecer este tema:

- consideração de outros sistemas estruturais como, por exemplo, lajes protendidas, pré-fabricadas e steel deck;
- análise de pavimentos com outras geometrias;
- consideração da não-linearidade física e geométrica e fissuração do concreto;
- consideração de esforços horizontais devidos ao vento e análise da estabilidade global de estrutura para os diversos sistemas estruturais;
- cálculo e dimensionamento dos pilares;
- inclusão de custos relativos às fundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. T. (1999). “Análise de Alternativas Estruturais para Edifícios em Concreto Armado”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL (1998), A revolução nos custos. ABECE informa, n.15. São Paulo *apud* ALBUQUERQUE, A. T. (1999).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13438 (1995) – Blocos de Concreto Celular Autoclavado, Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118 (1980) – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado, Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118 (2000) – Projeto de Revisão da NBR 6118, São Paulo, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6120 (1980) – Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações, Rio de Janeiro, ABNT.

ASTRA S.A. INDÚSTRIA E COMÉRCIO (2001). Encarte Técnico. Jundiaí, SP.

BARBOZA, A. S. R. (1992). “Contribuição à Análise Estrutural de Sistemas Lajes-Vigas de Concreto Armado mediante Analogia de Grelha”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BRANCO, A. F. V. C. (1989). “Contribuição para o Projeto de Lajes-cogumelo”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo *apud* ALBUQUERQUE, A. T. (1999).

CAD/TQS[®] (2000). Manuais. São Paulo, SP.

CARBONARI, G. et alli (1990). “Estudo da Distribuição de Reações de Apoio de Lajes Retangulares”, Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo. Anais ... São Paulo: EPUSP, 1990. v.2, p. 499-515 *apud* BARBOZA, A. S. R.

COSTA, O. V. (1997). “Estudo de Alternativas de Projetos Estruturais em Concreto Armado para uma Mesma Edificação”, Dissertação de Mestrado, Fortaleza, UFC *apud* ALBUQUERQUE, A. T. (1999).

IKEDA, N. A. (2000). “Métodos de Dimensionamento de Lajes de Concreto Armado”, Reibrac – 42 – IBRACON.

INGERSLEV, A. (1921). Ingeniøren 1921 – Institution of Structural Engineer's Journal.

JOHANSEN, K. W. (1932). “Bruchmomente der Kreuzweise Bewehrten Platten”, Association Internationale des Ponts et Charpentes, Mémoires.

MAZZILLI, A. R. P. (1988). “Influência da Flexibilidade das Vigas de Apoio no Cálculo de Estruturas de Edifícios”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo *apud* PEREZ, G. B. (1999).

MAZZILLI, A. R. P. (1995). “Influência da Flexibilidade das Vigas e das Lajes nos Esforços das Estruturas em Concreto Armado”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo *apud* PEREZ, G. B. (1999).

MELGES, J. L. P. (1995). “Punção em Lajes: Exemplos de Cálculo e Análise Teórico-Experimental”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo *apud* ALBUQUERQUE, A. T. (1999).

COVAS, N. e SILVA, L. A. F. (2002). “Estruturas de Concreto e a Nova NB-1”, lista de discussões da comunidade TQS.

PEREZ, G. B. (1999). “Análise Comparativa de Modelos do Sistema Estrutural de um Edifício de Andares Múltiplos em Concreto Armado”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BOCCHILE, C. (2000). Nervuras Preenchidas. Construção, n.2750, outubro.

BOCCHILE, C. (2001). Leveza Essencial. Técnica, n.50, janeiro/fevereiro.

SOUSA, M. (1992). A Magia da Expansão. Técnica, n.1, dezembro.

SUSSEKIND, J.C. (1984). Curso de Concreto Editora Globo.

ANEXOS

Os anexos têm por objetivo apresentar as fôrmas e detalhamentos das lajes dos diversos sistemas estruturais analisados nos três exemplos.

ANEXO A

Neste anexo encontram-se os detalhes das vigas-faixa das lajes nervuradas do primeiro exemplo.

VIGA FAIXA 1

76/25

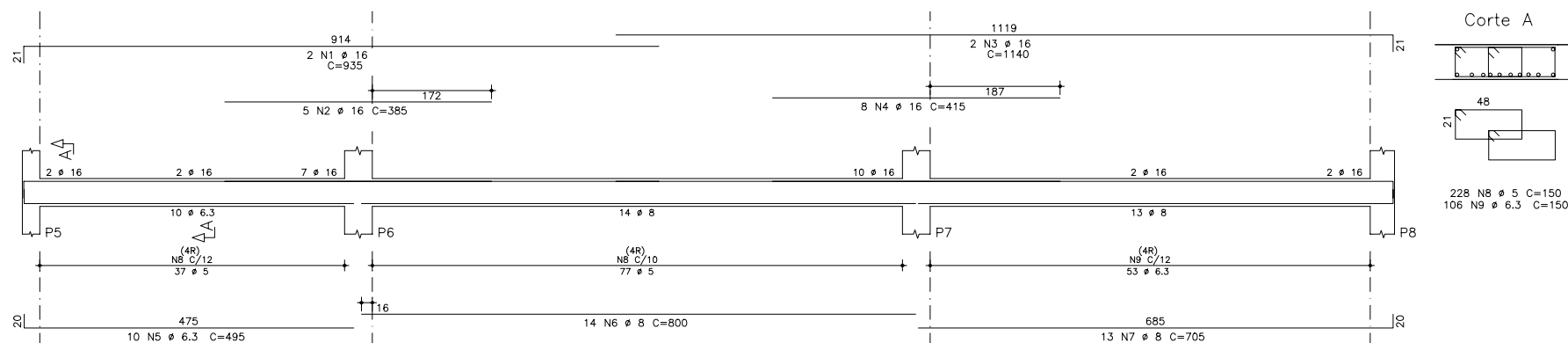


FIGURA A.1 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

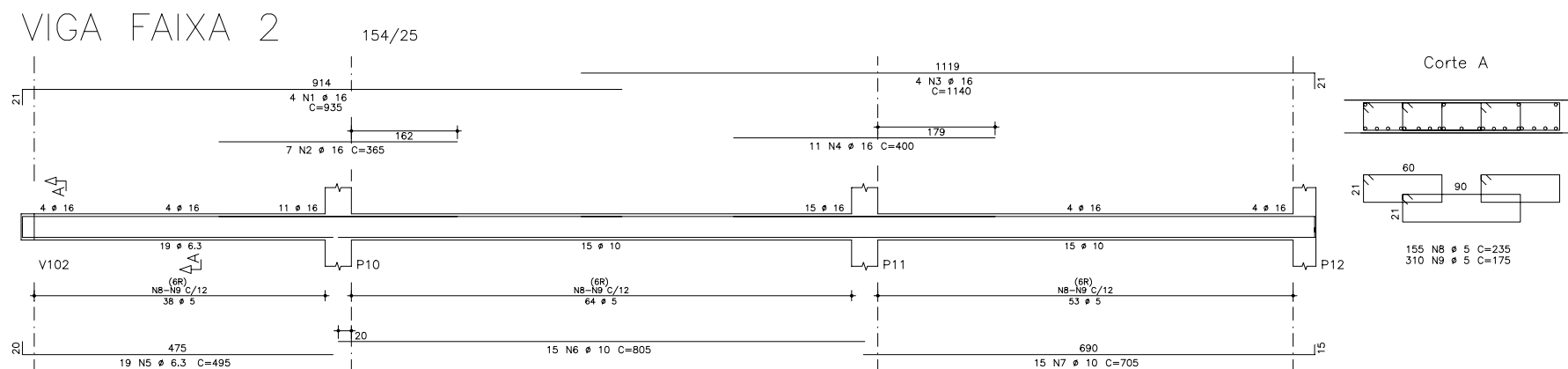


FIGURA A.2 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

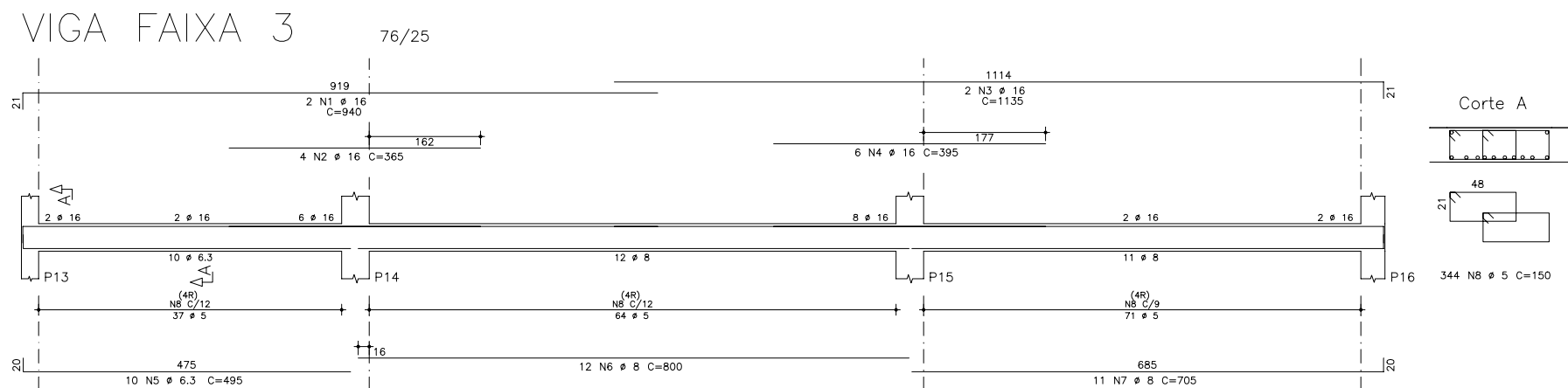


FIGURA A.3 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

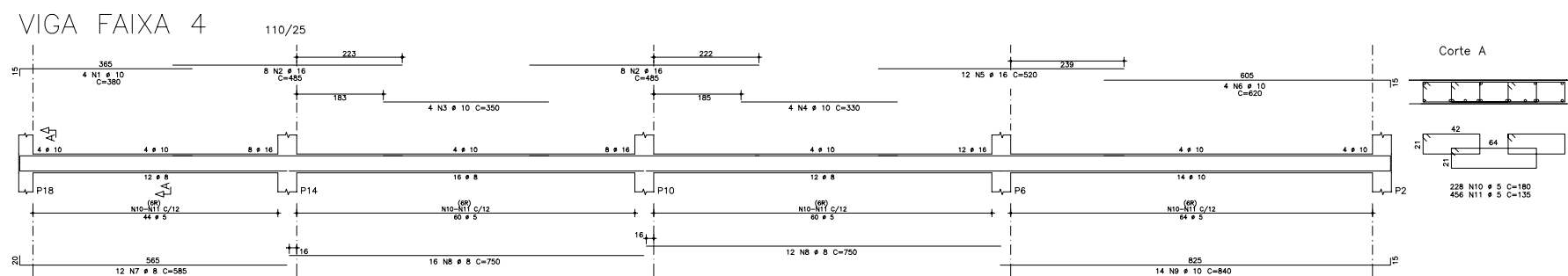


FIGURA A.4 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

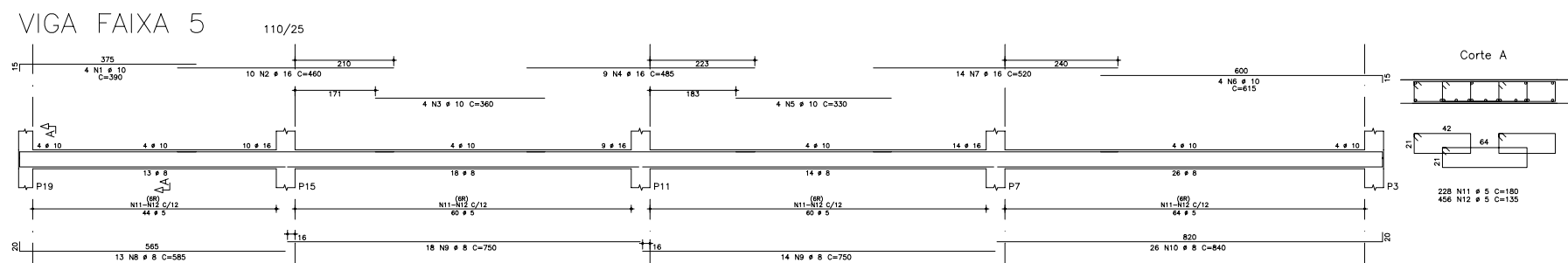


FIGURA A.5 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

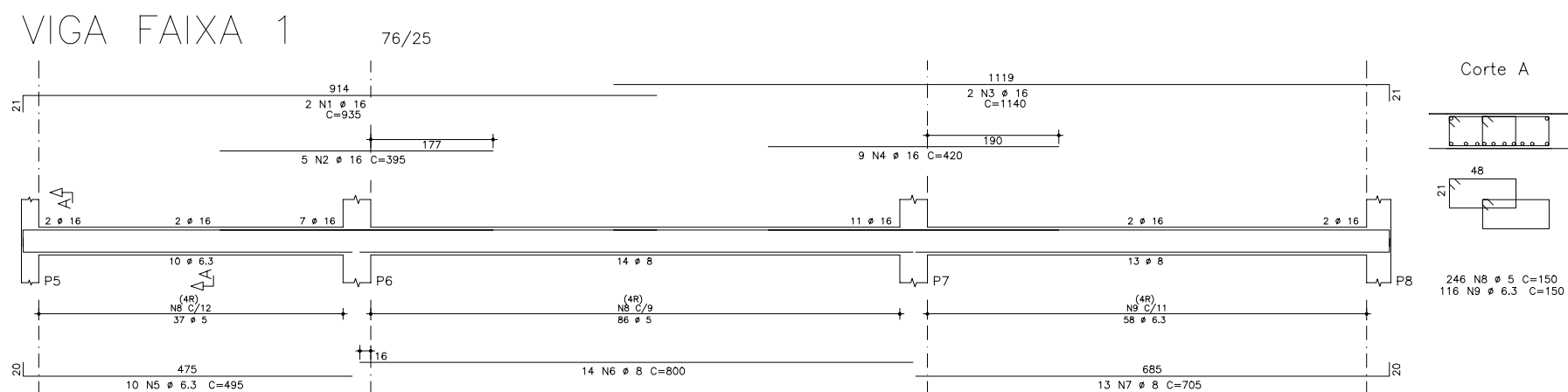


FIGURA A.6 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

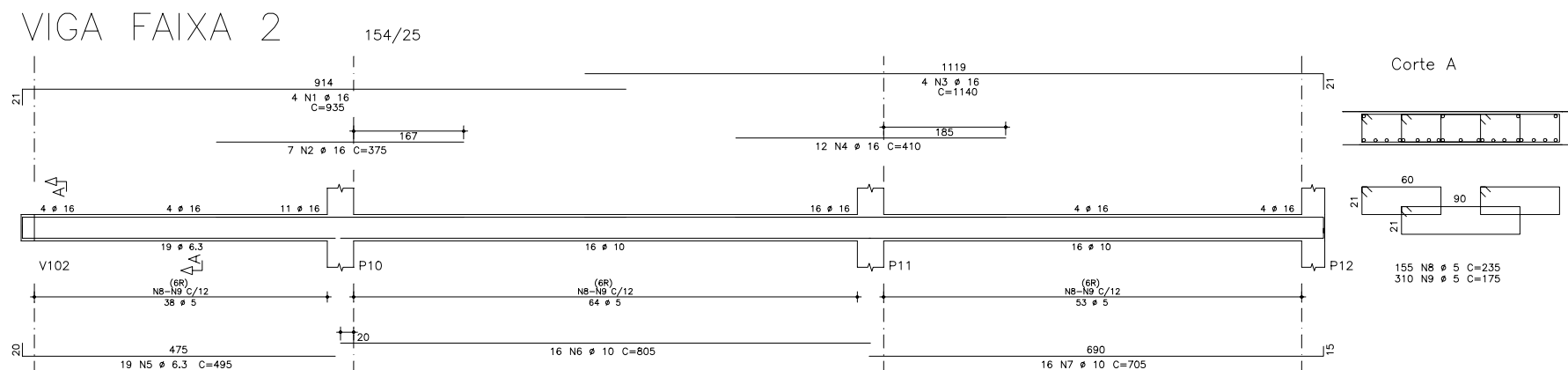


FIGURA A.7 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

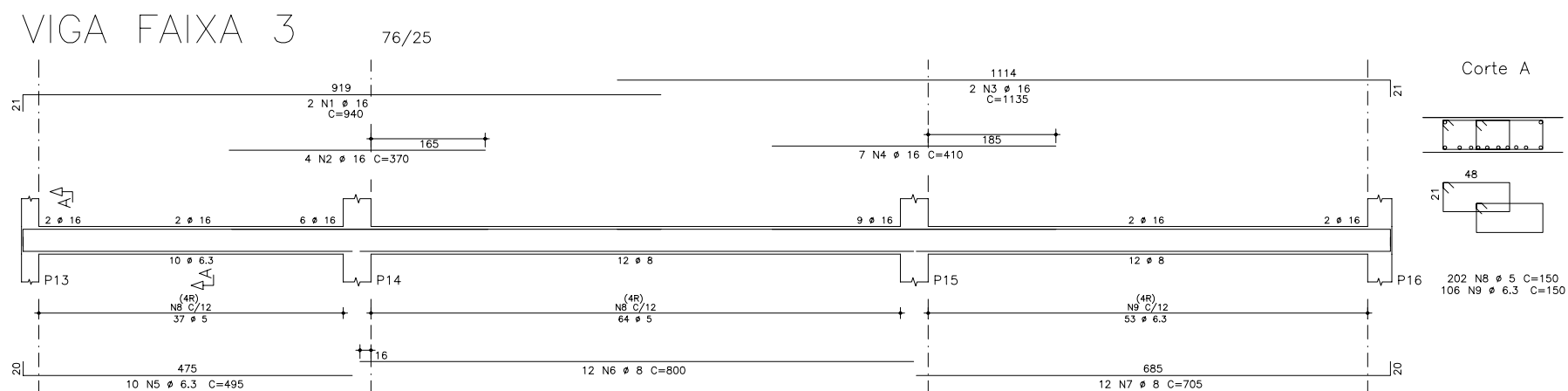


FIGURA A.8 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

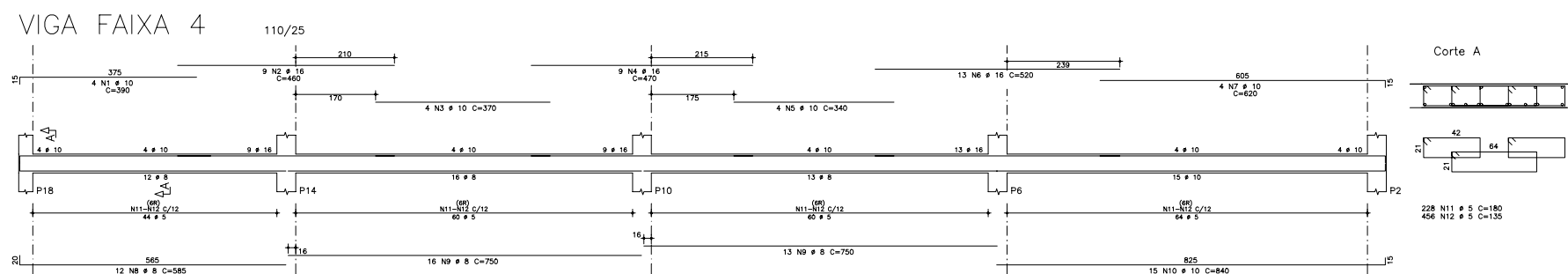


FIGURA A.9 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

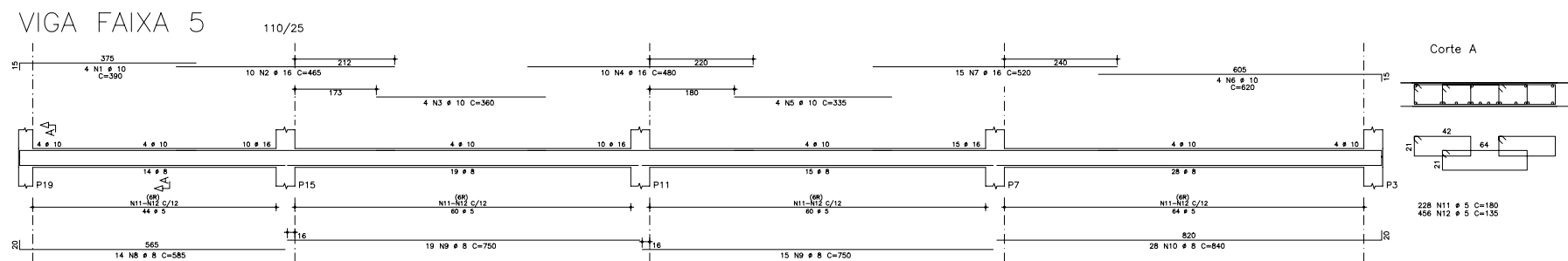


FIGURA A.10 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

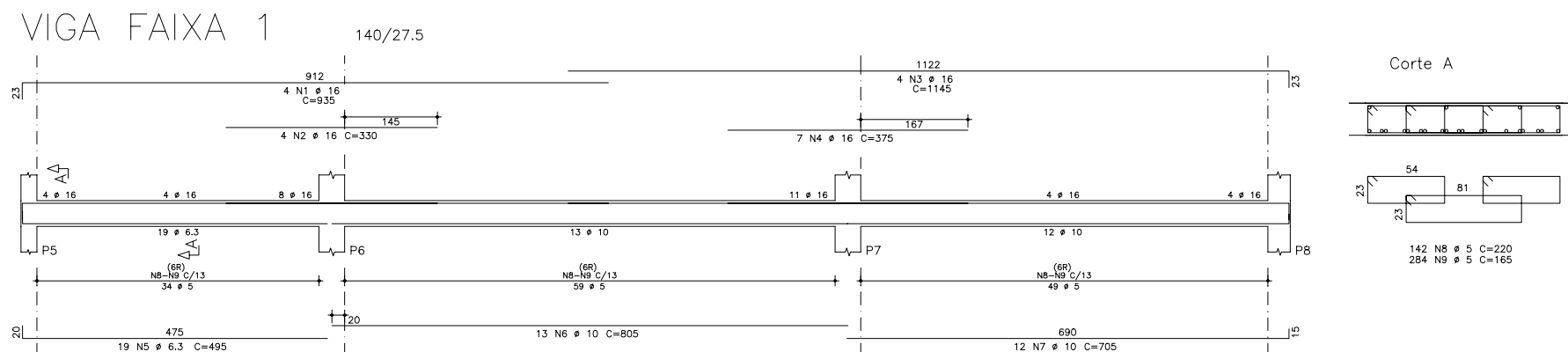


FIGURA A.11 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

VIGA FAIXA 2

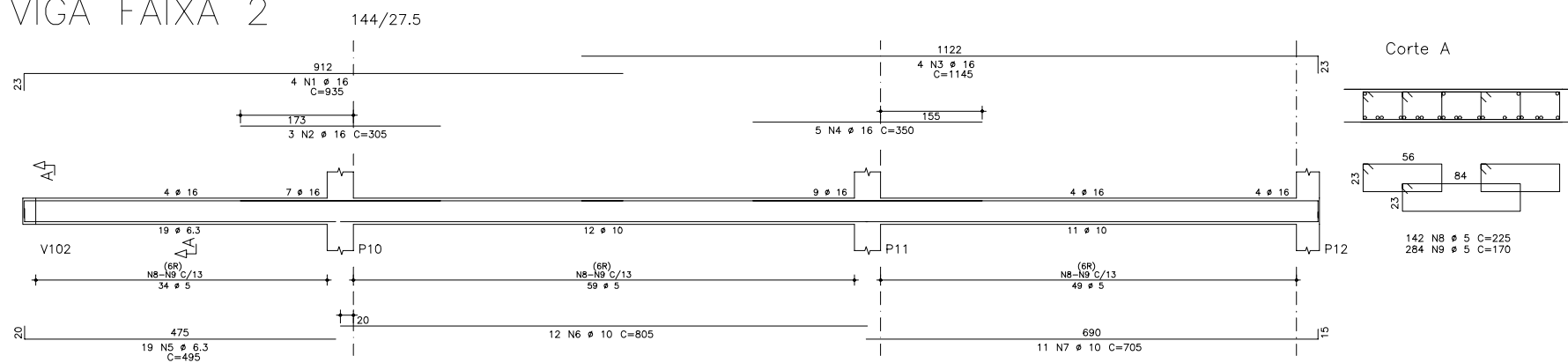


FIGURA A.12 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

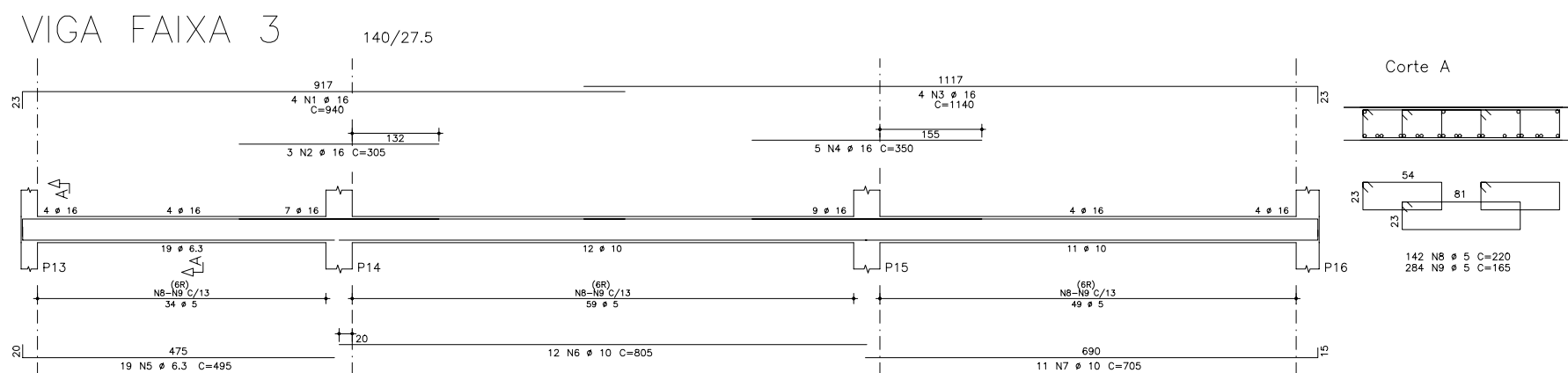


FIGURA A.13 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

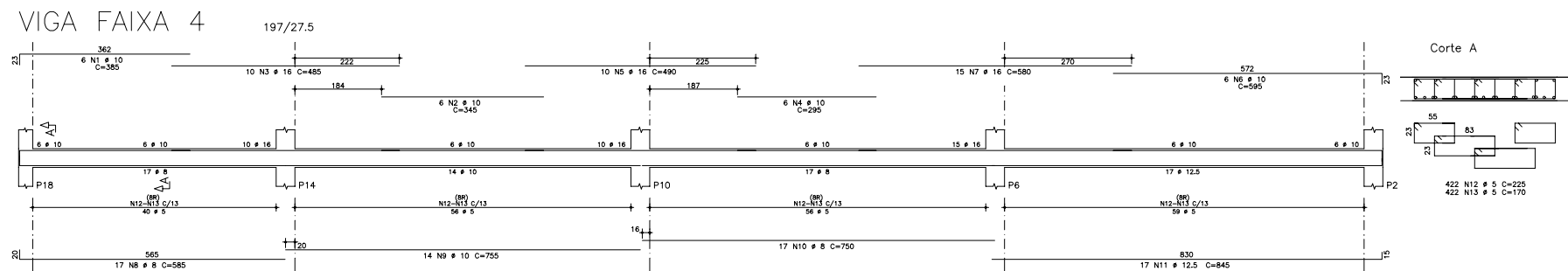


FIGURA A.14 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

VIGA FAIXA 5

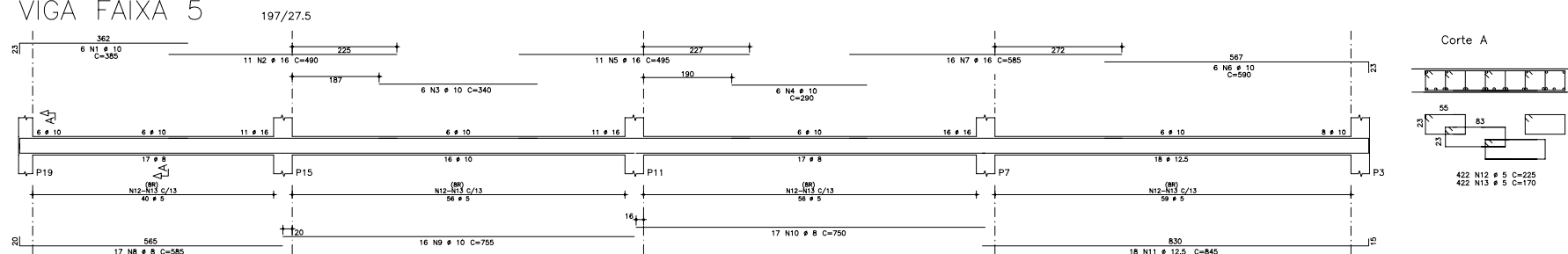


FIGURA A.15 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

ANEXO B

Neste anexo, encontram-se as fôrmas e detalhamentos das lajes dos diversos sistemas estruturais analisados no segundo exemplo.

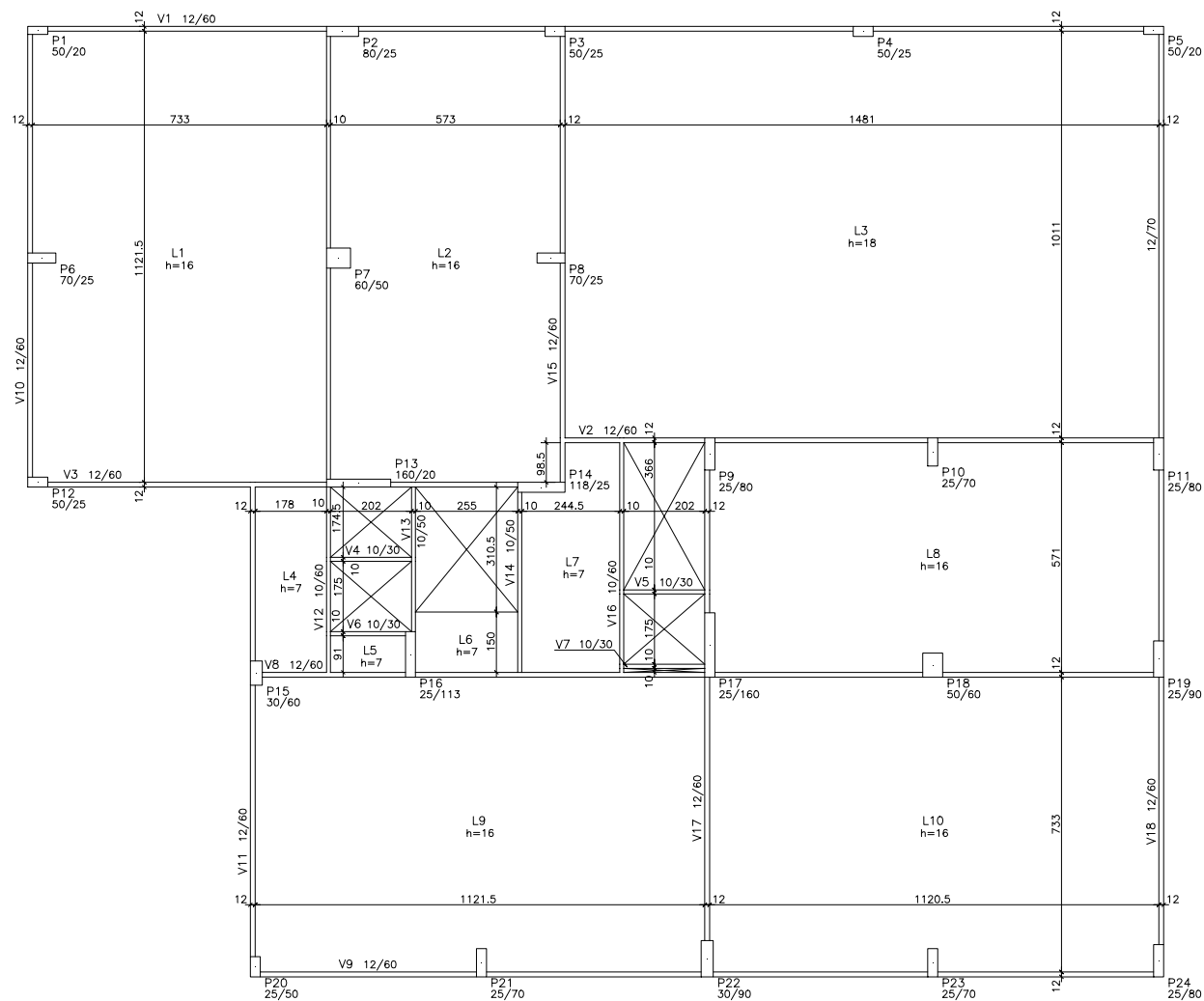


FIGURA B.1 – Fôrma do sistema estrutural convencional

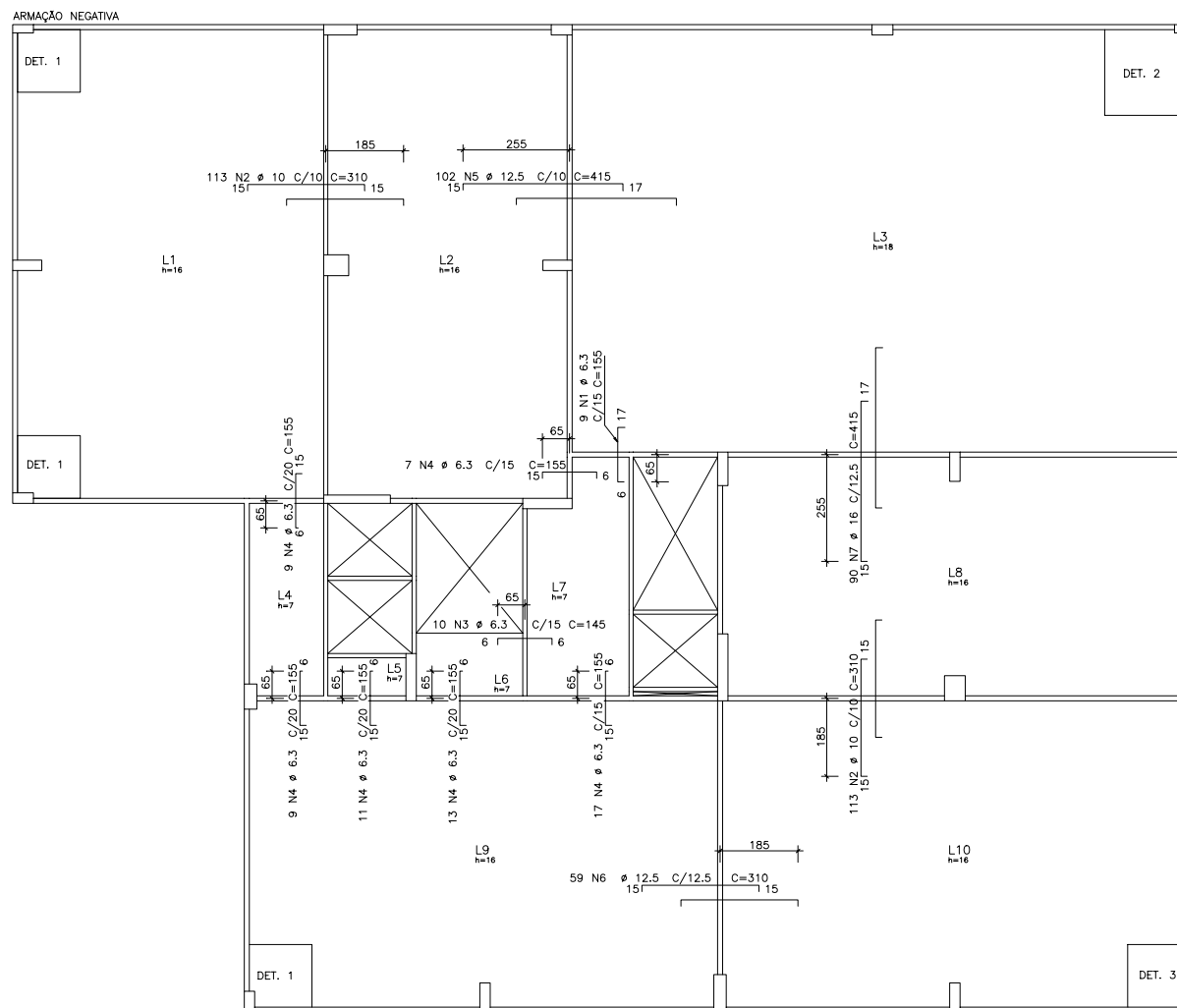


FIGURA B.3 – Armação negativa da laje do sistema estrutural convencional

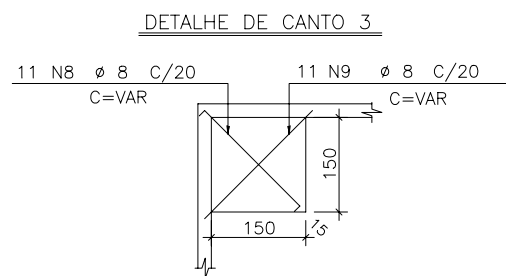
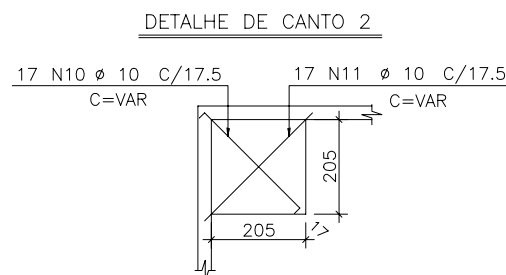
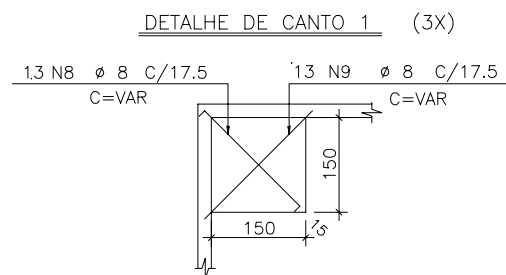


FIGURA B.4 – Armação complementar da laje do sistema estrutural convencional

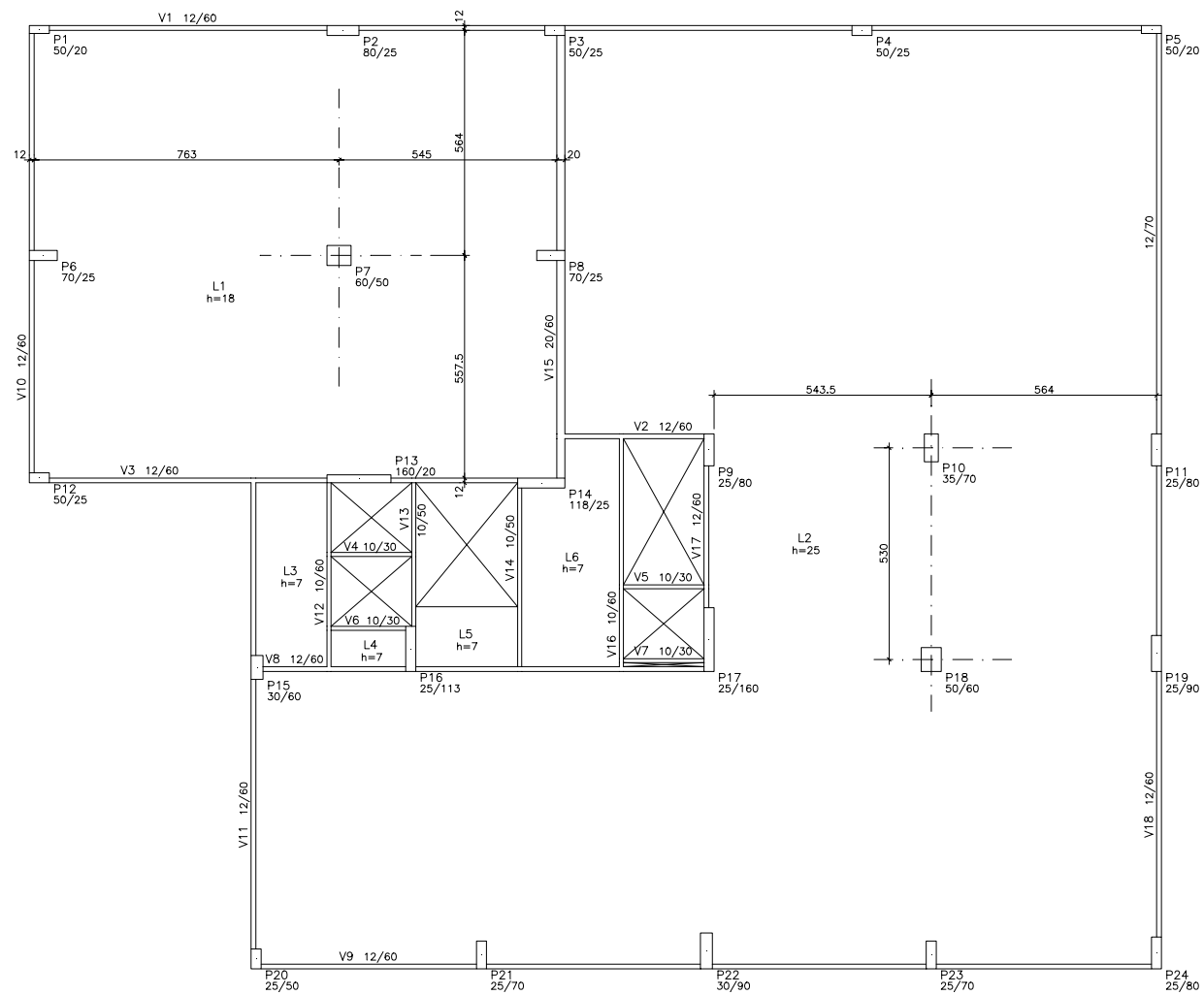


FIGURA B.5 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça

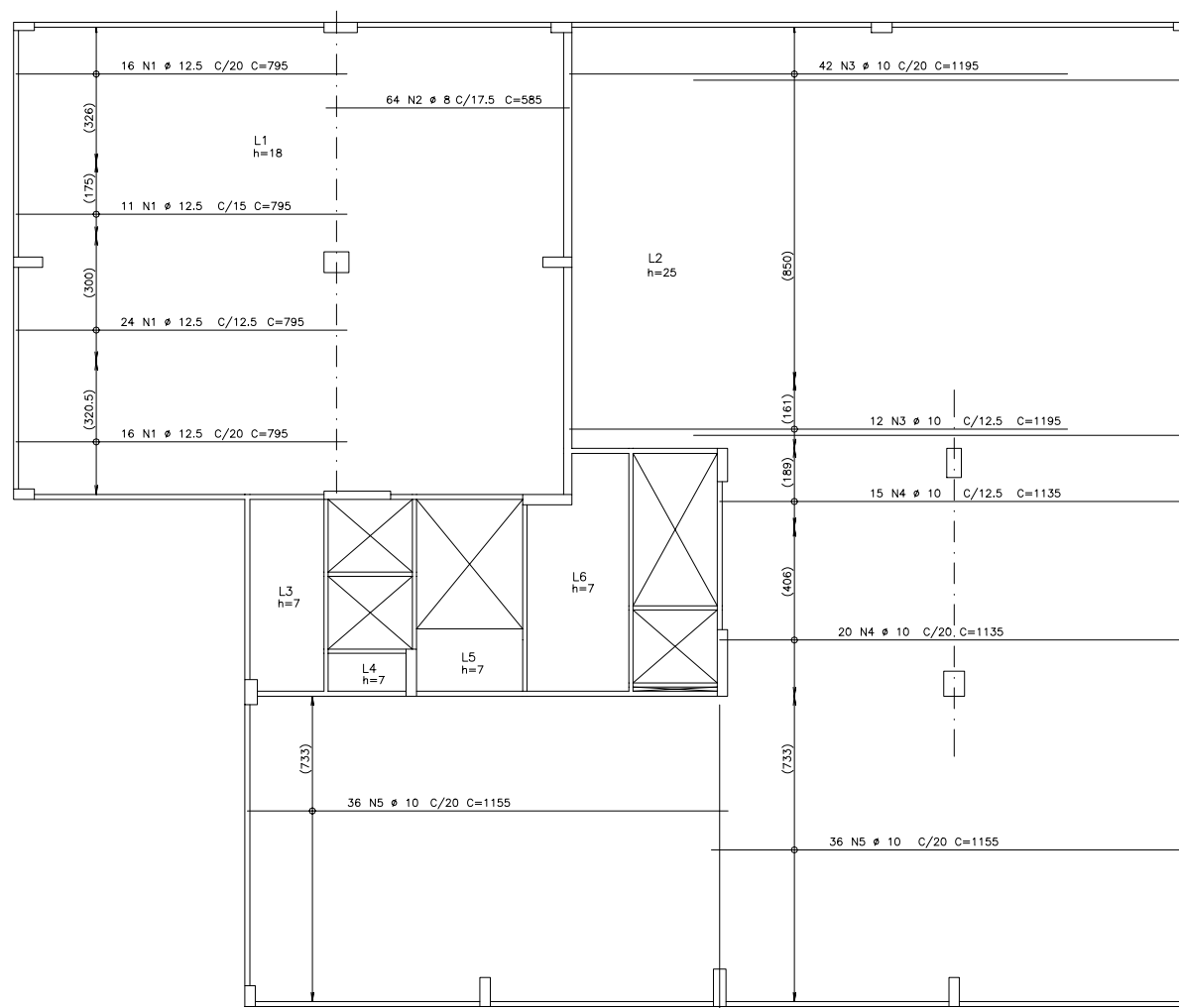


FIGURA B.6 – Armação positiva horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça

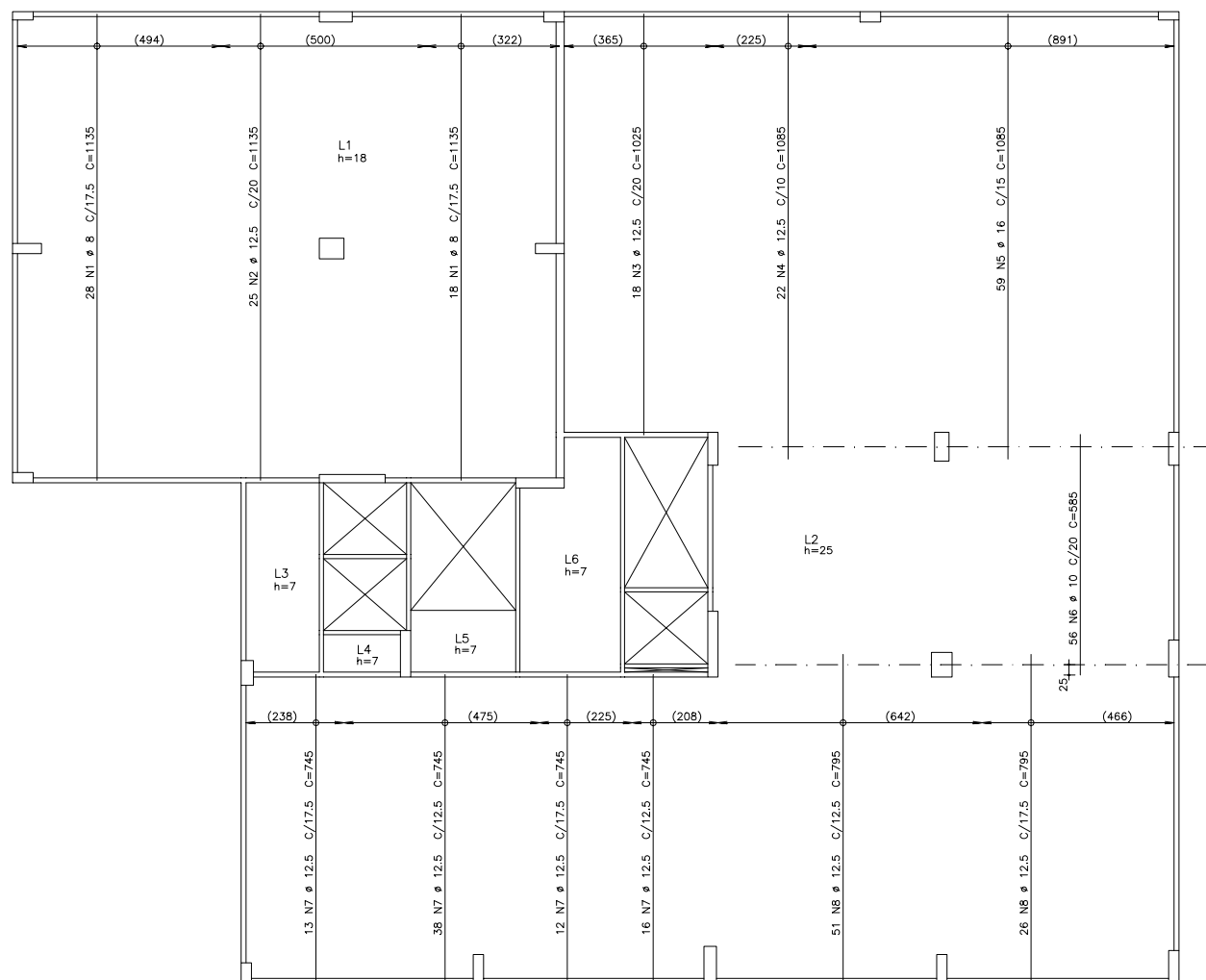


FIGURA B.7 – Armação positiva vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça

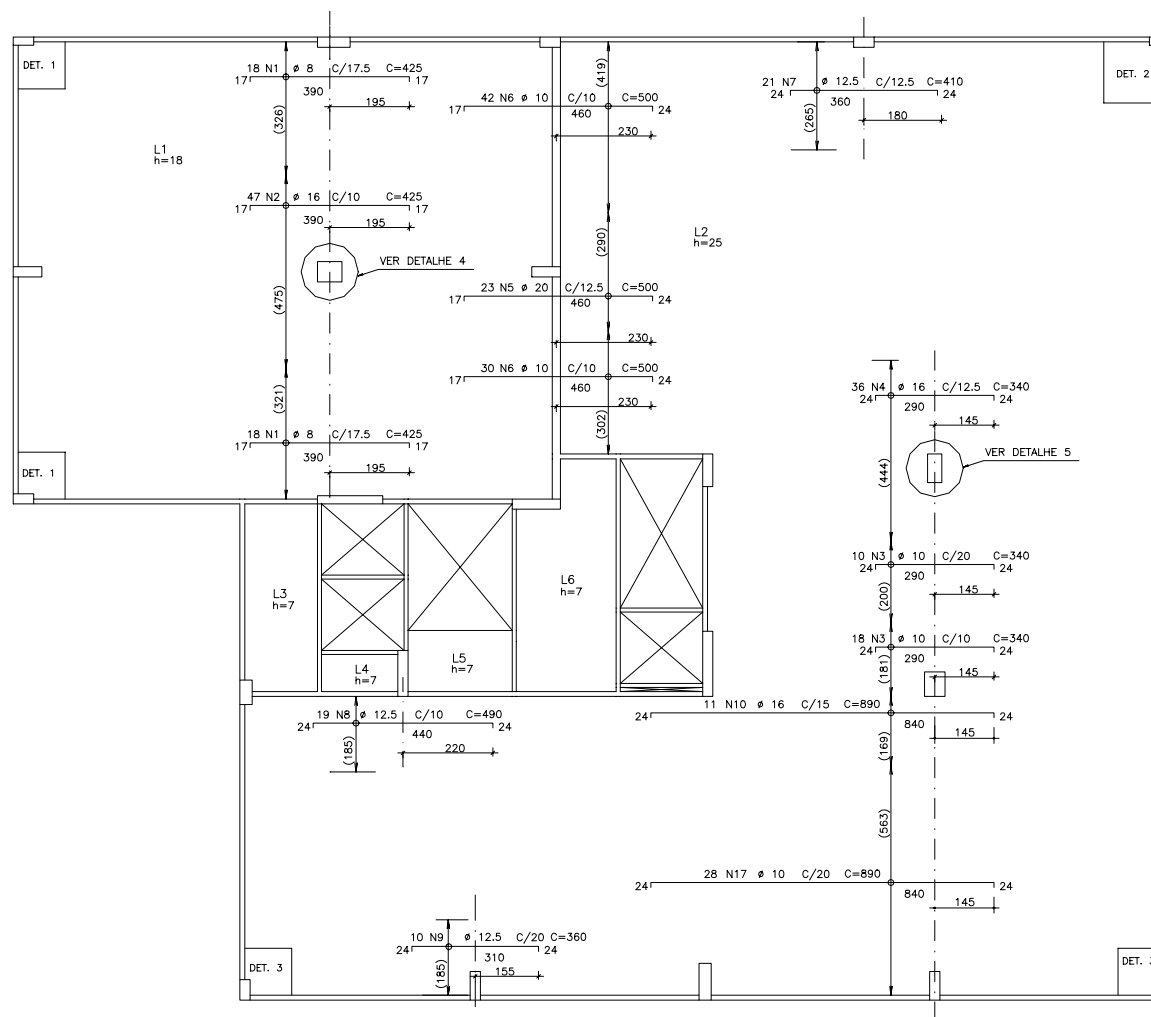


FIGURA B.8 – Armação negativa horizontal da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça

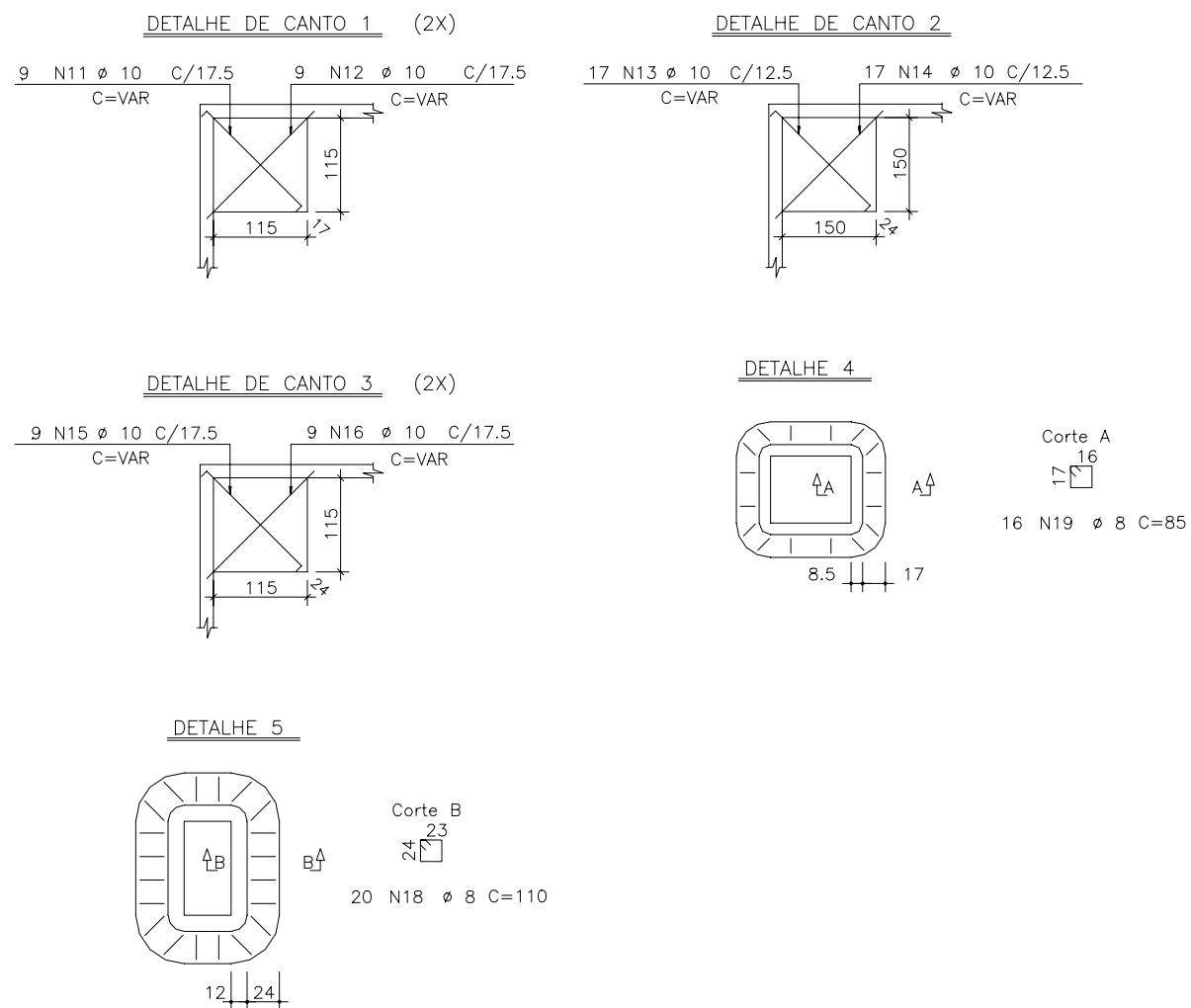


FIGURA B.9 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça

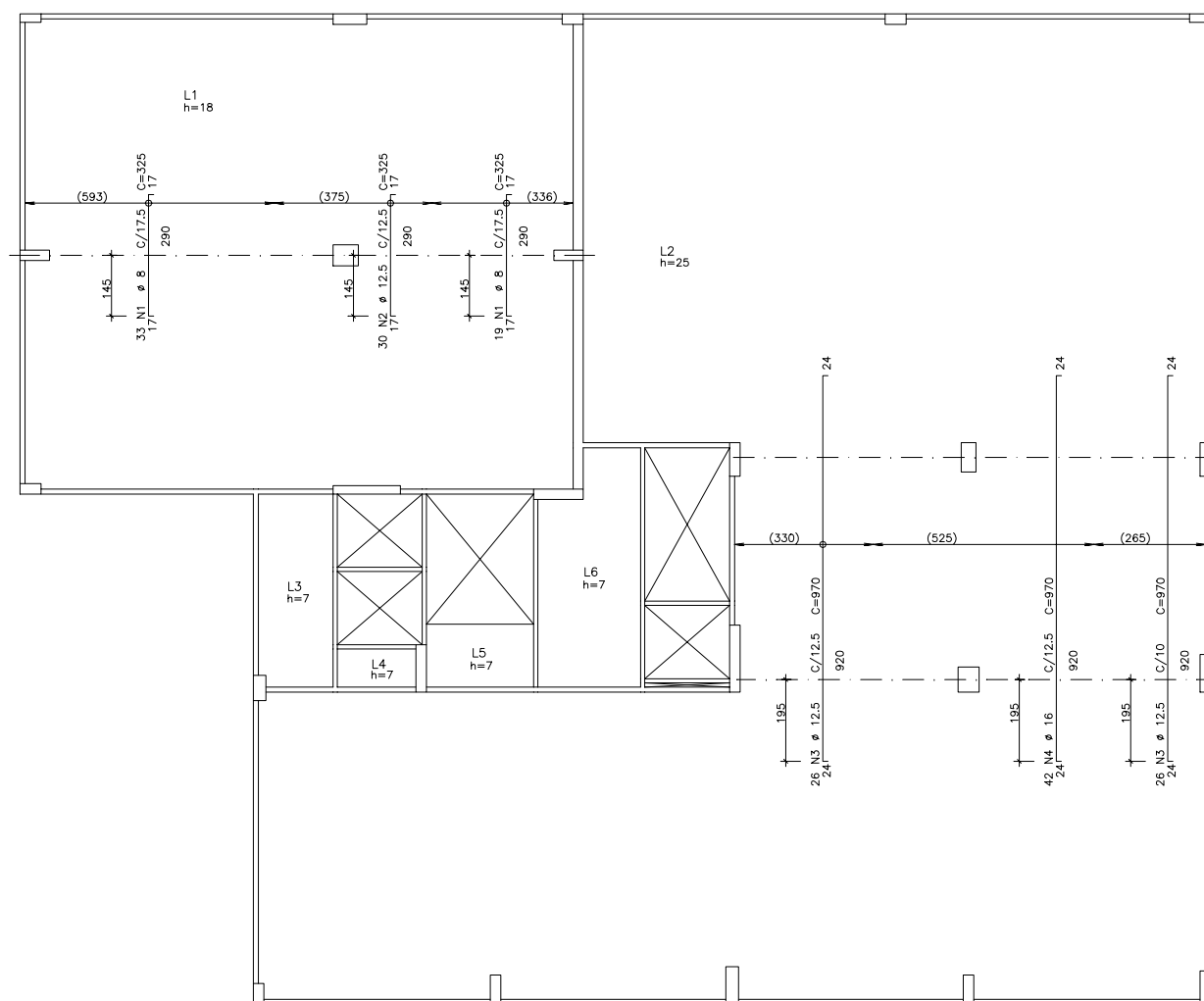


FIGURA B.10 – Armação negativa vertical da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça

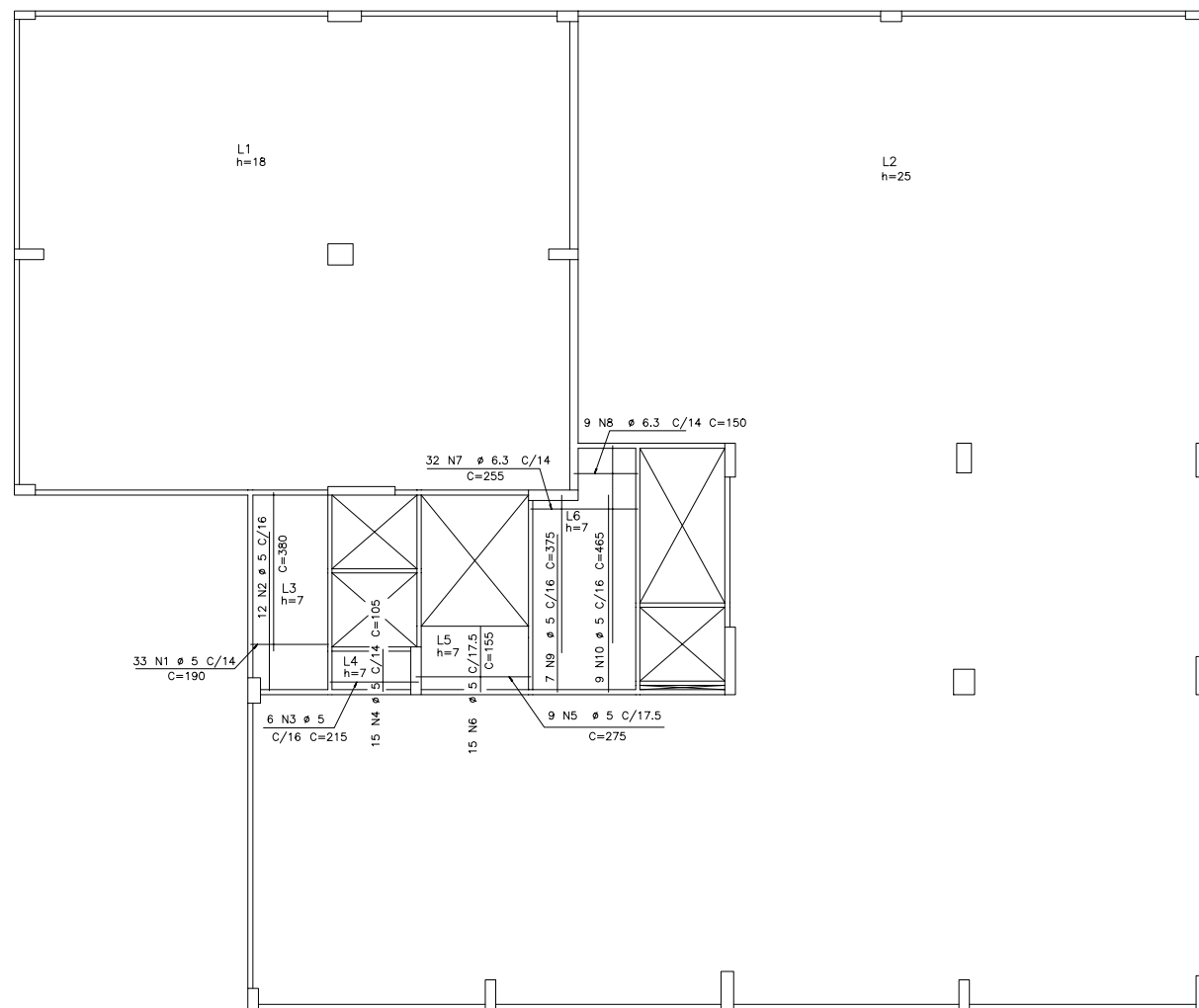


FIGURA B.11 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (lajes comuns a todos os sistemas)

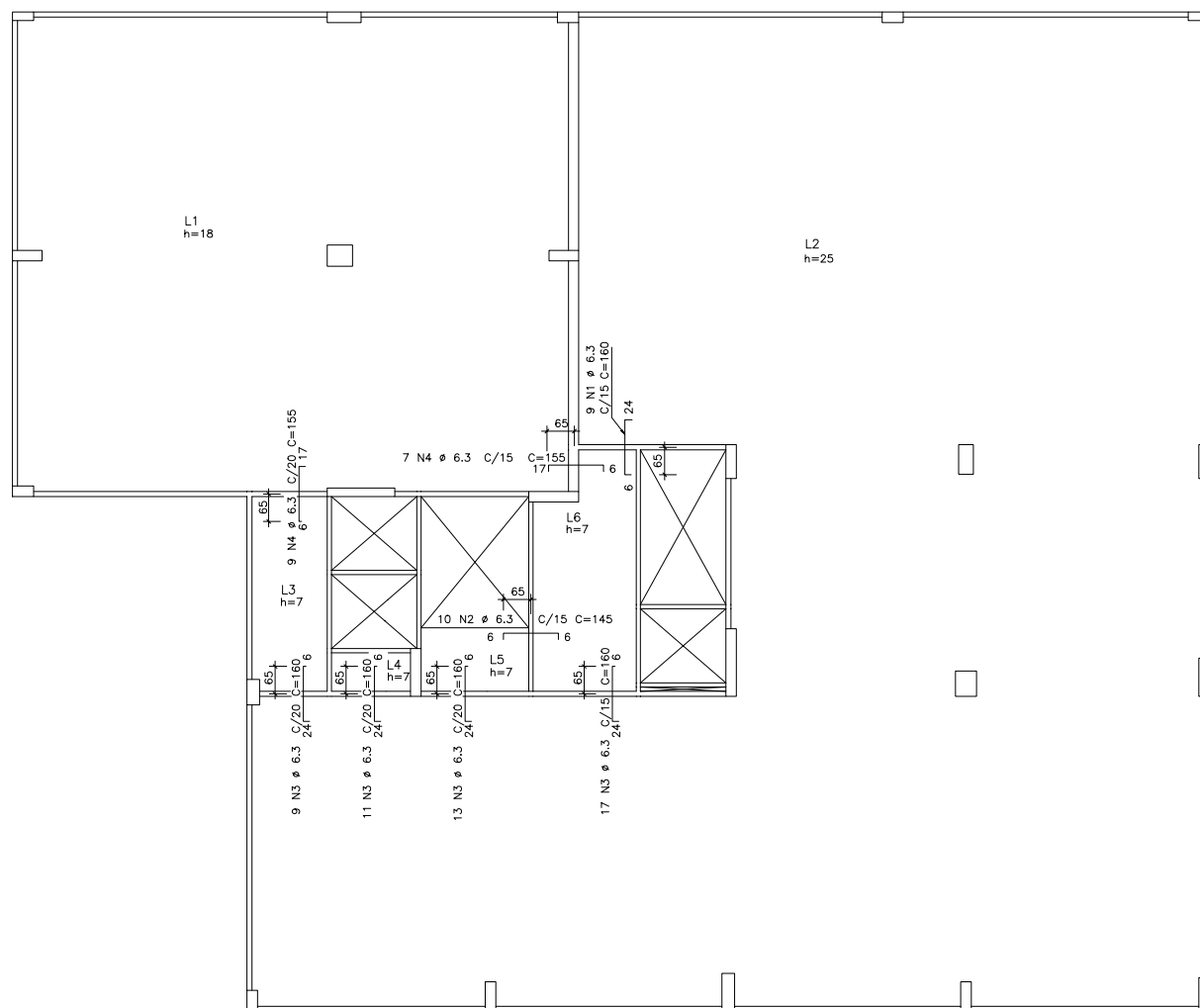


FIGURA B.12 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa maciça (lajes comuns a todos os sistemas)

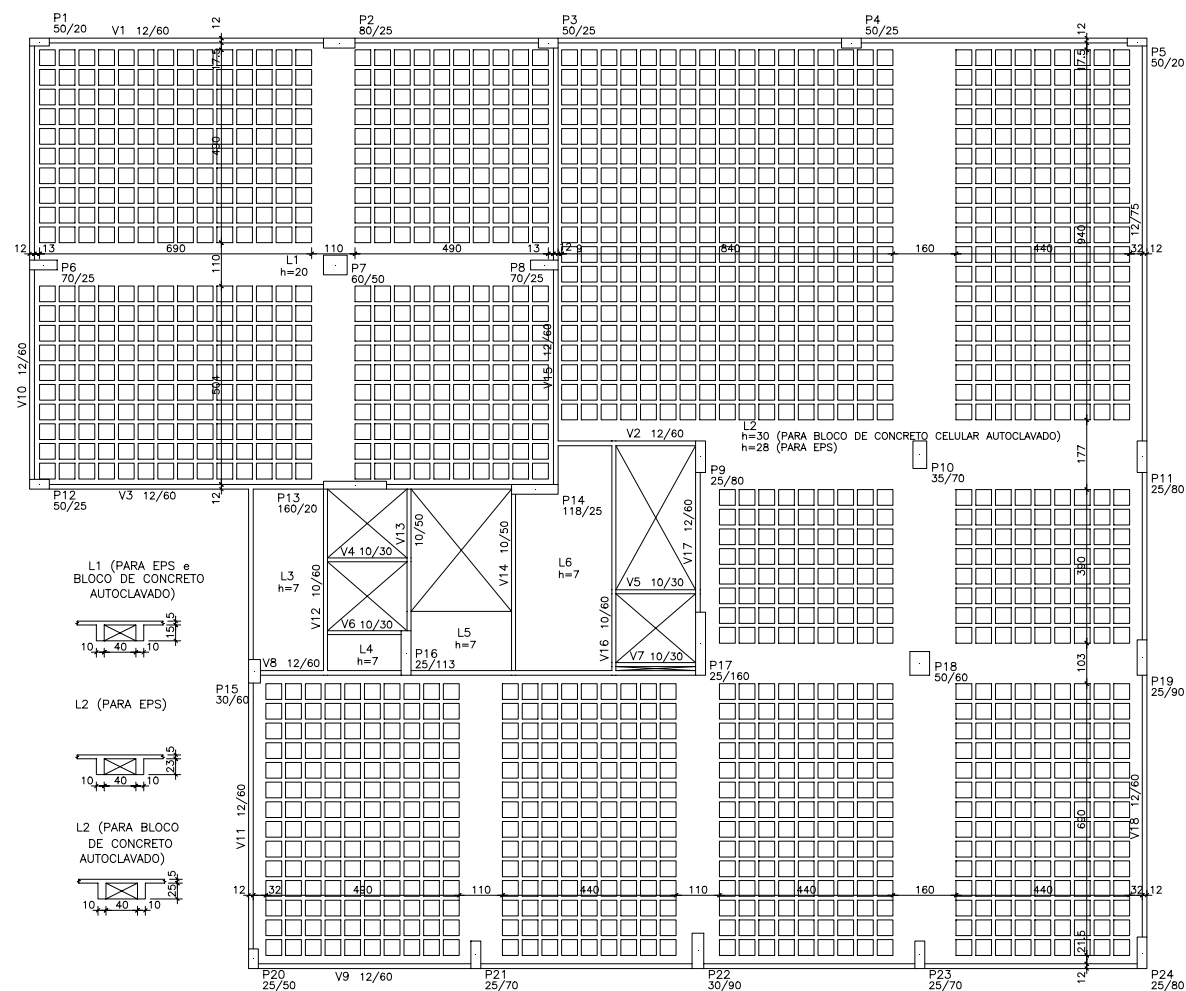


FIGURA B.13 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS ou blocos de concreto celular autoclavado

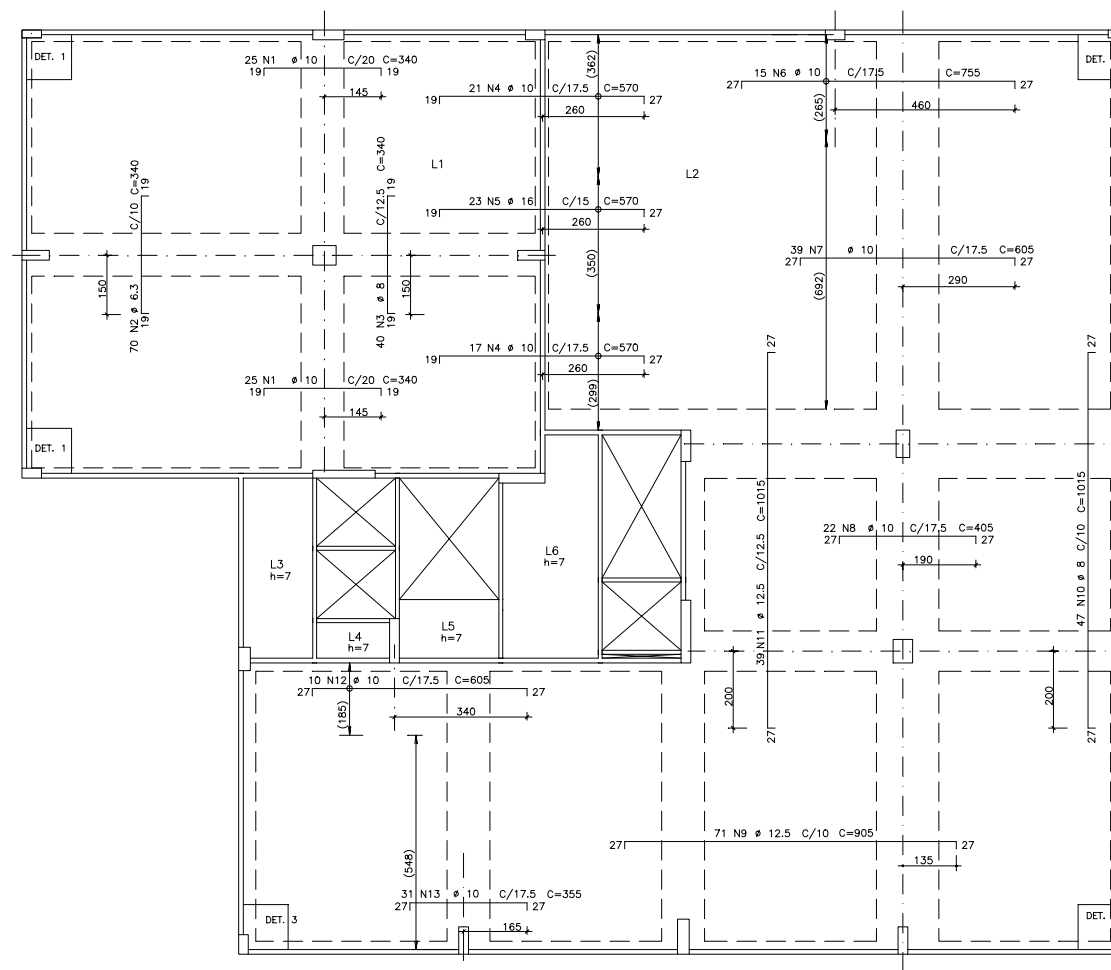


FIGURA B.15 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

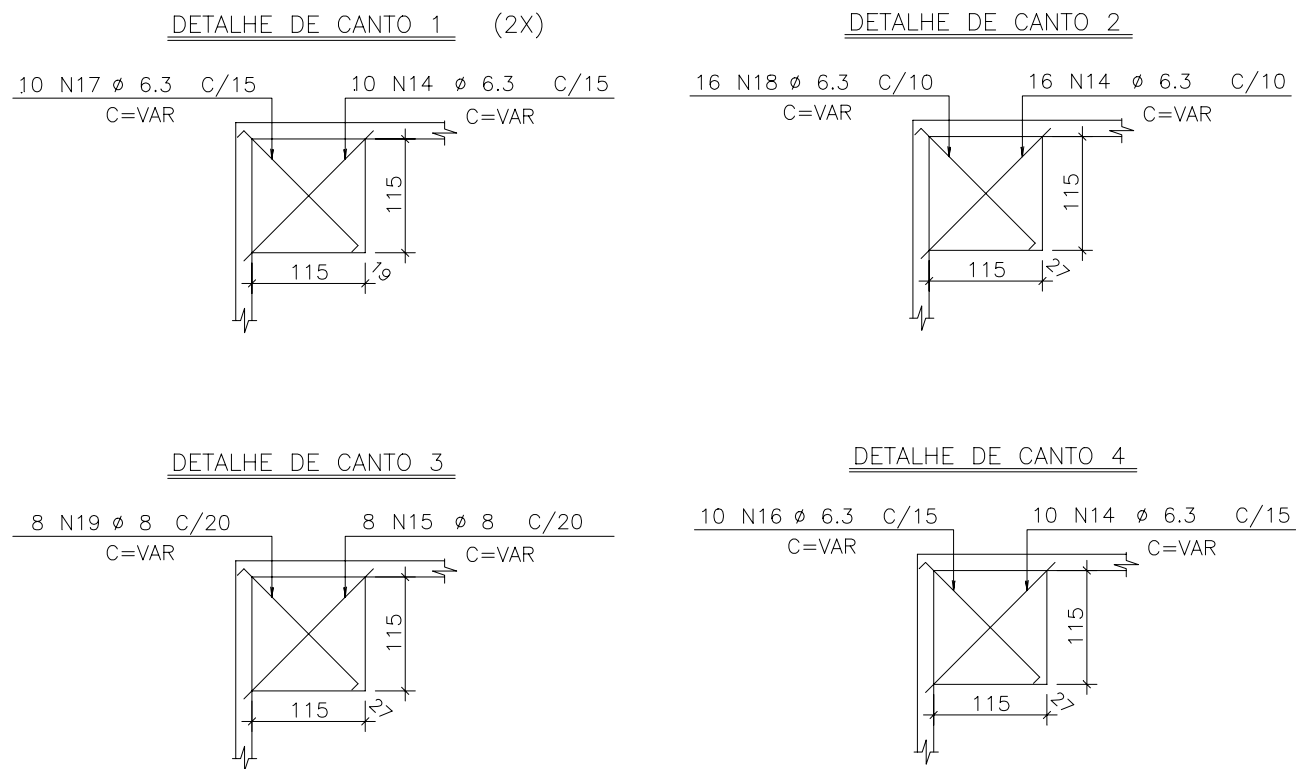


FIGURA B.16 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

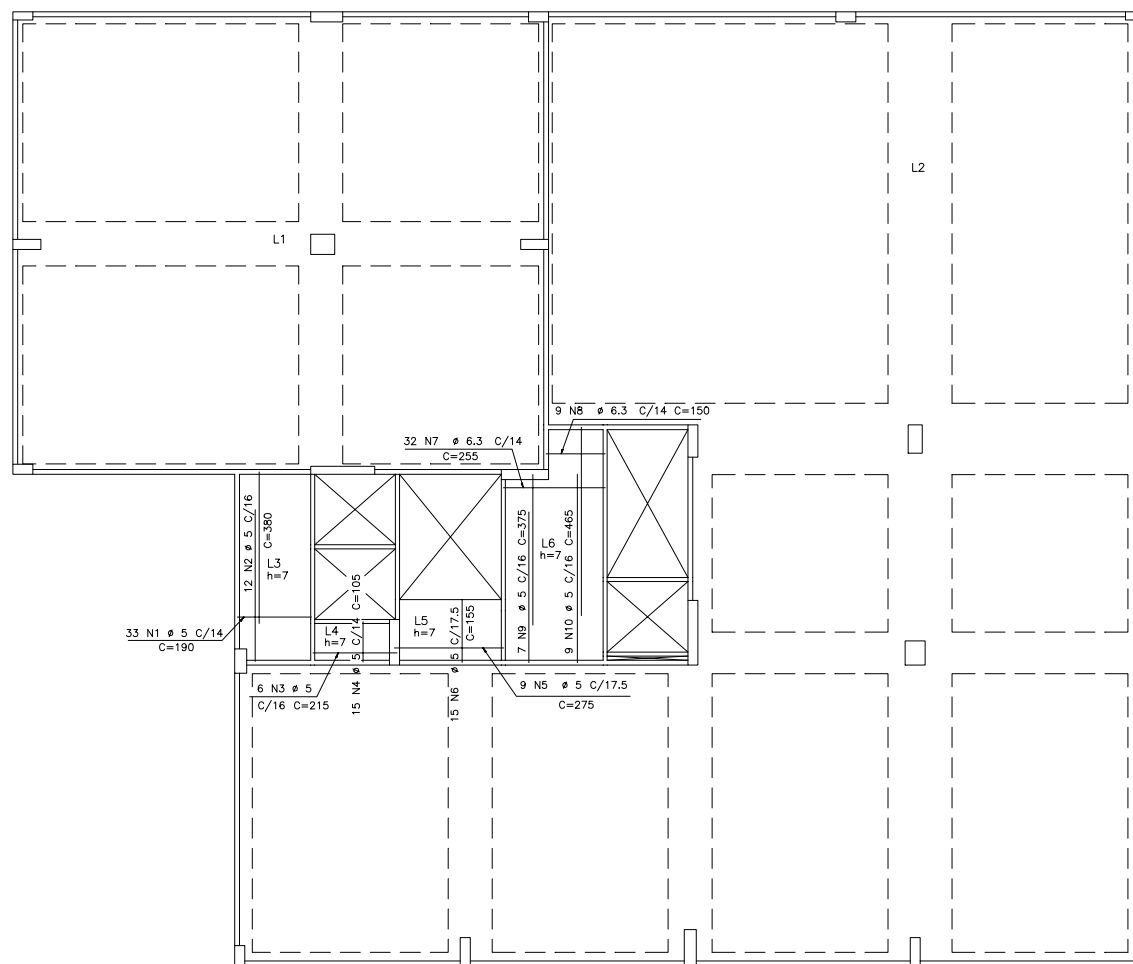
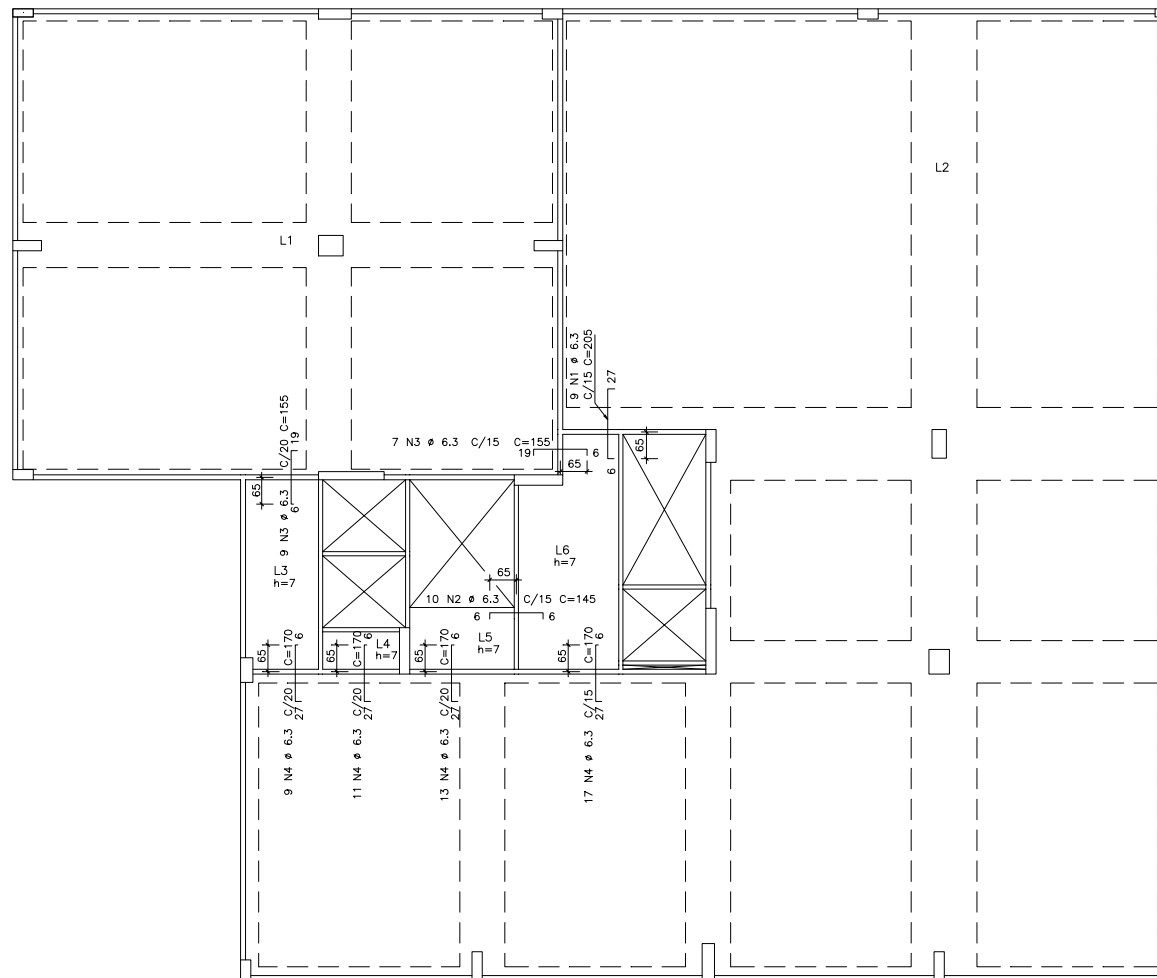


FIGURA B.17 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS (lajes comuns a todos os sistemas)



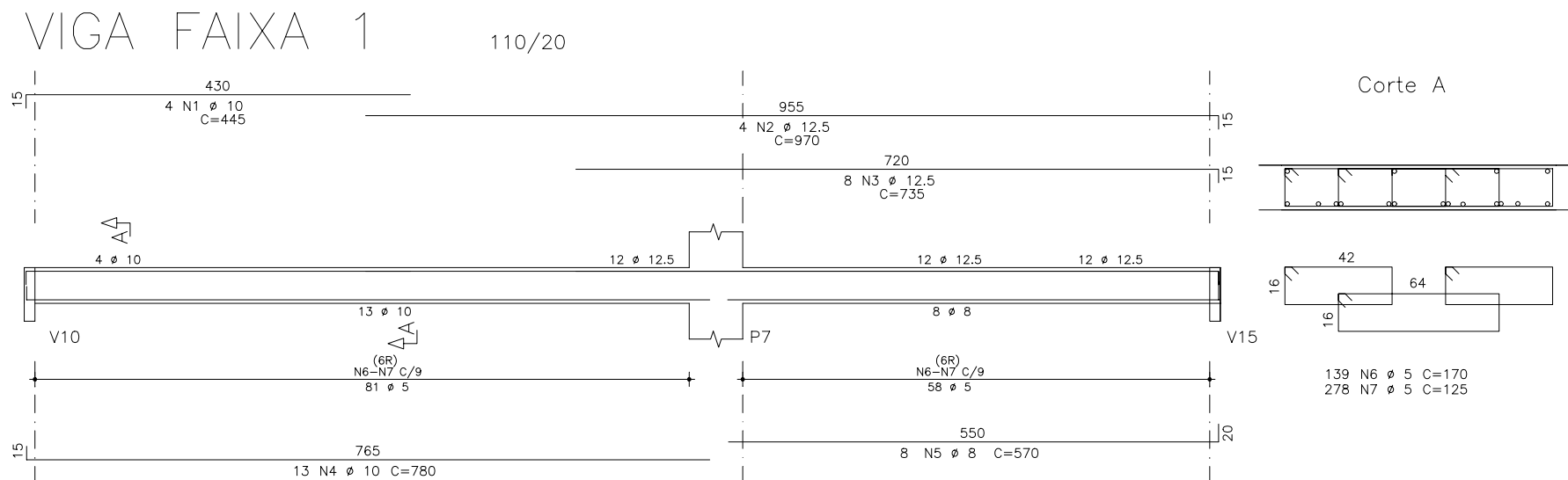


FIGURA B.19 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

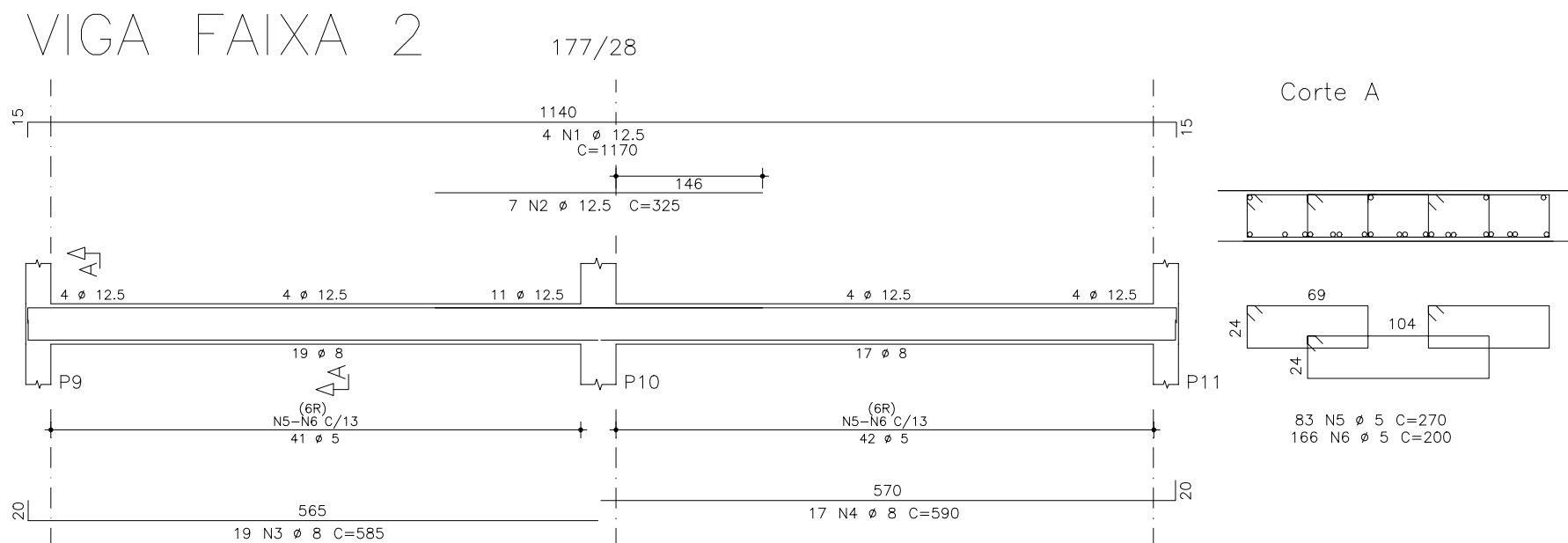


FIGURA B.20 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

VIGA FAIXA 3

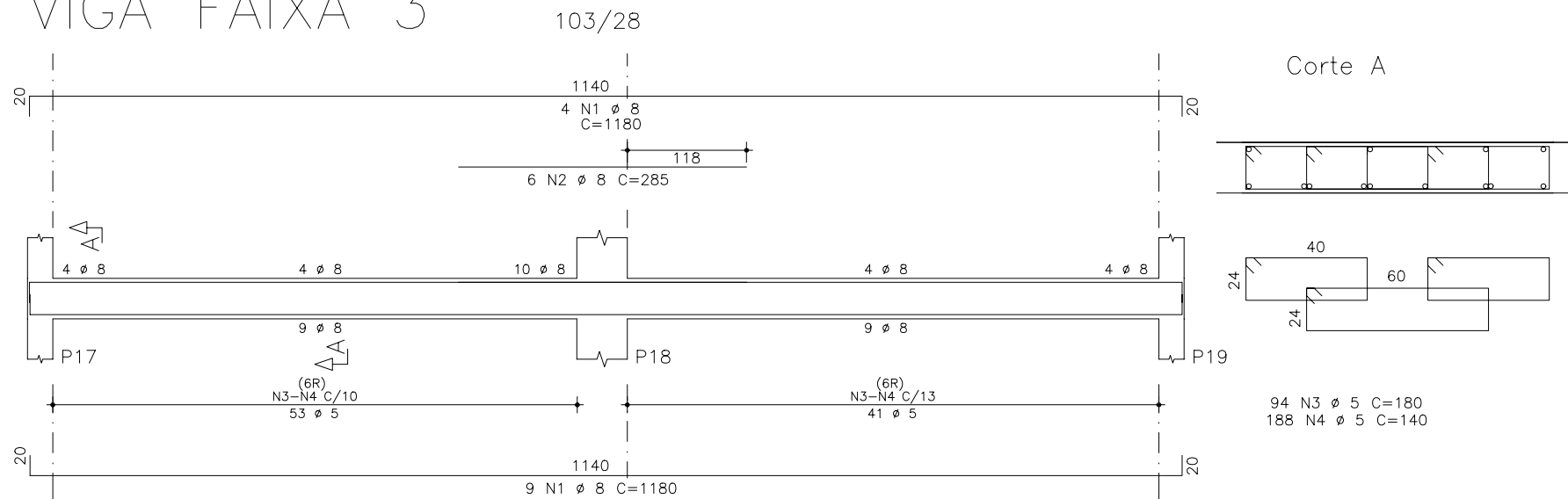


FIGURA B.21 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

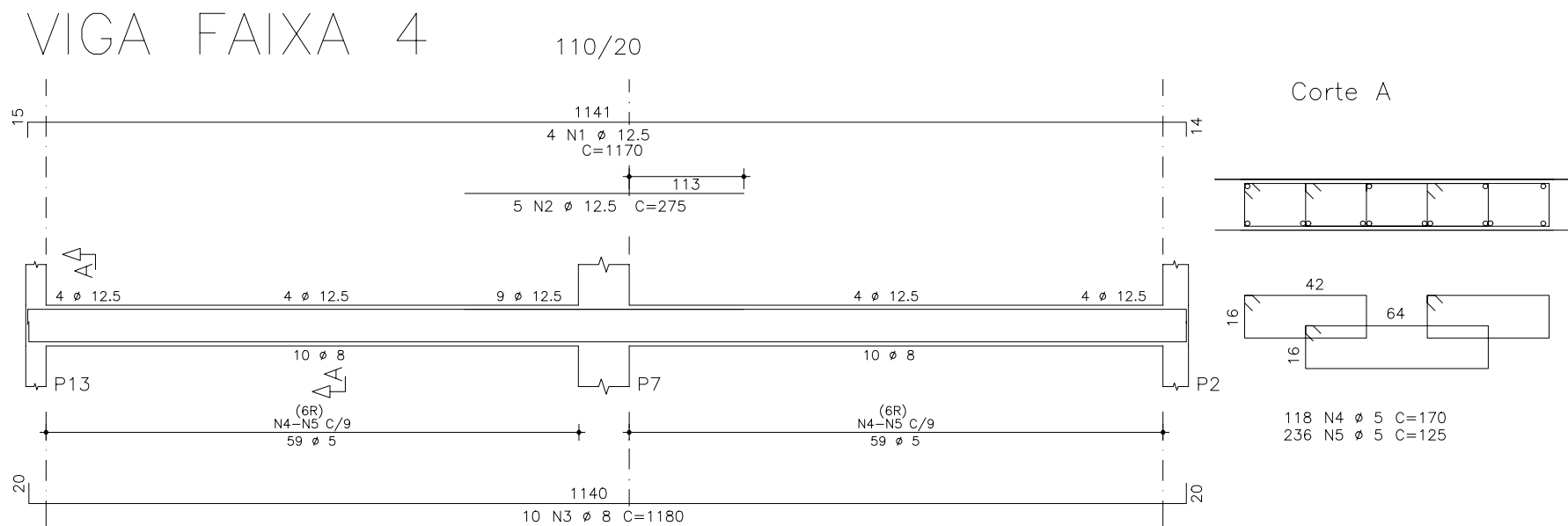


FIGURA B.22 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

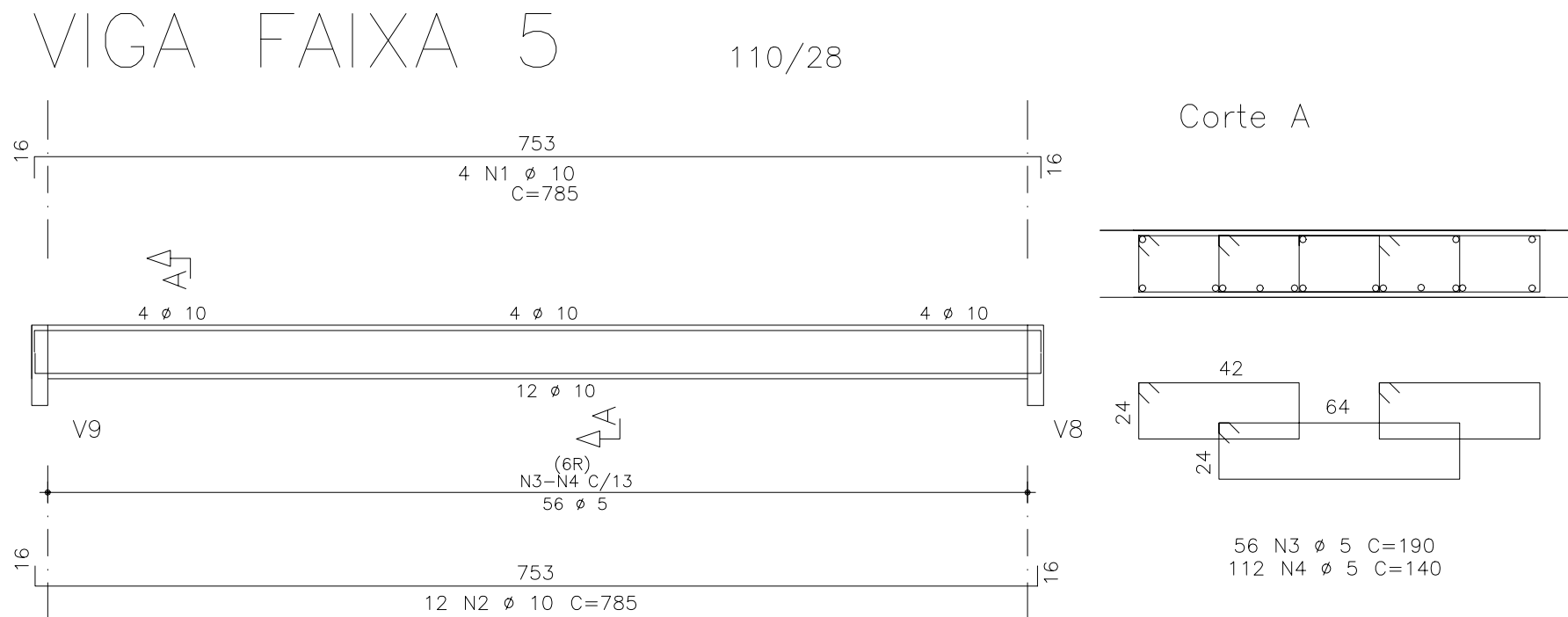
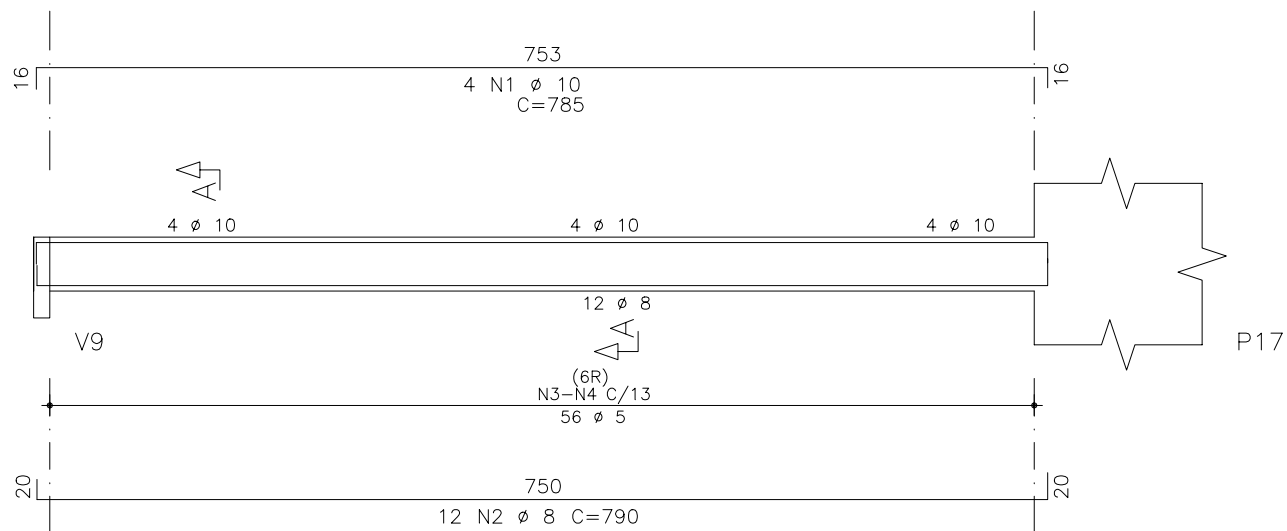


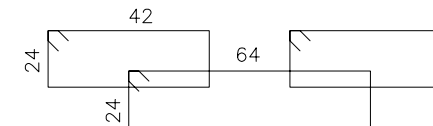
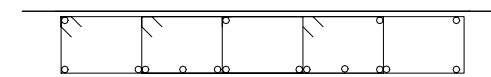
FIGURA B.23 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

VIGA FAIXA 6

110/28



Corte A



56 N3 ϕ 5 C=190
112 N4 ϕ 5 C=140

FIGURA B.24 – Armação da viga faixa 6 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

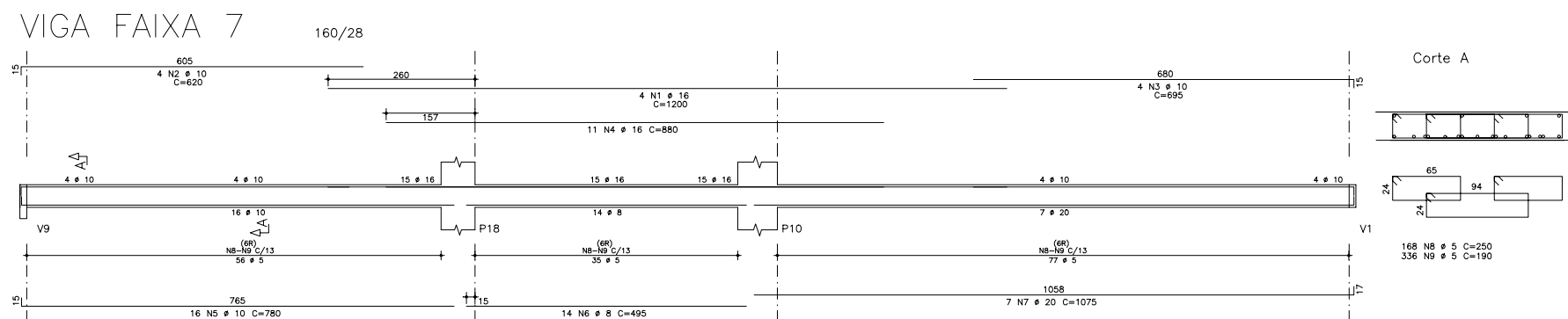


FIGURA B.25 – Armação da viga faixa 7 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

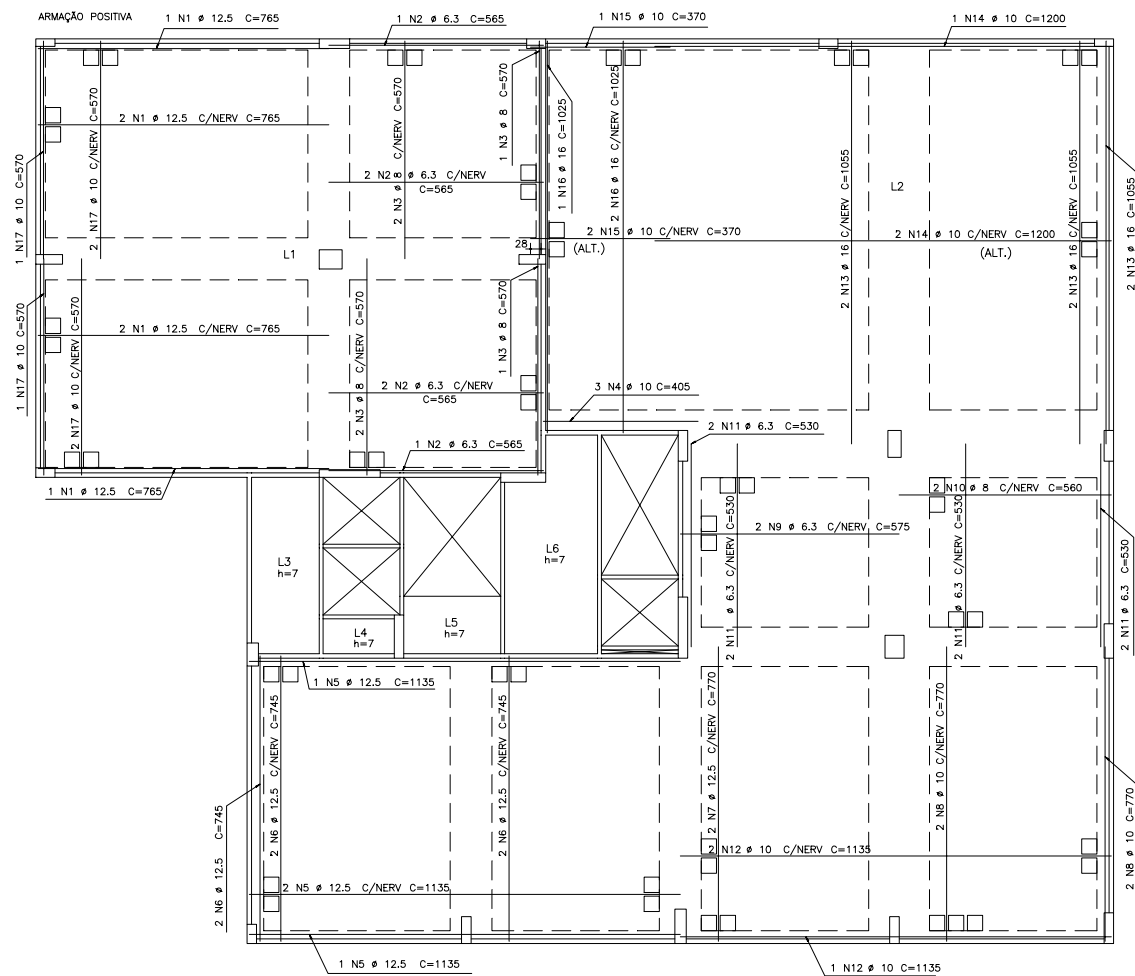


FIGURA B.26 – Armadura positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

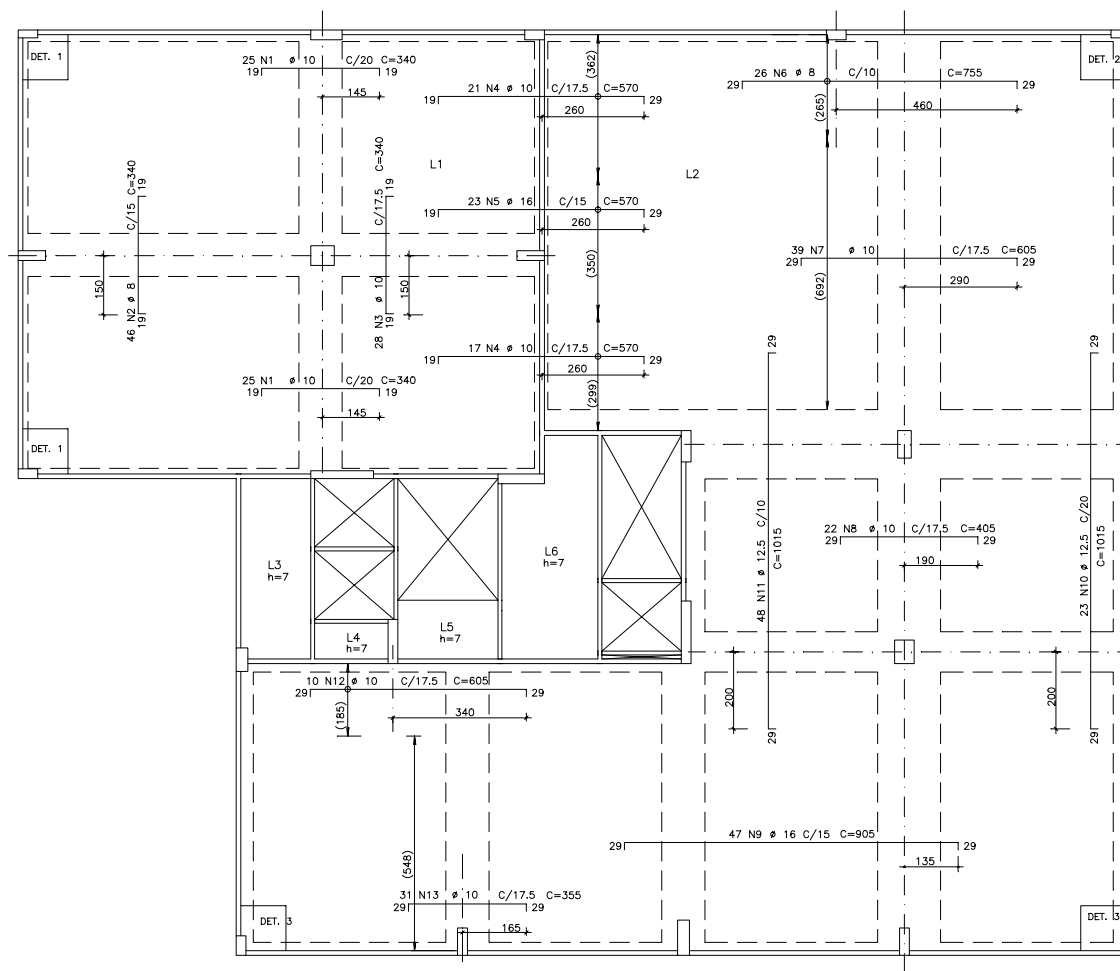


FIGURA B.27 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

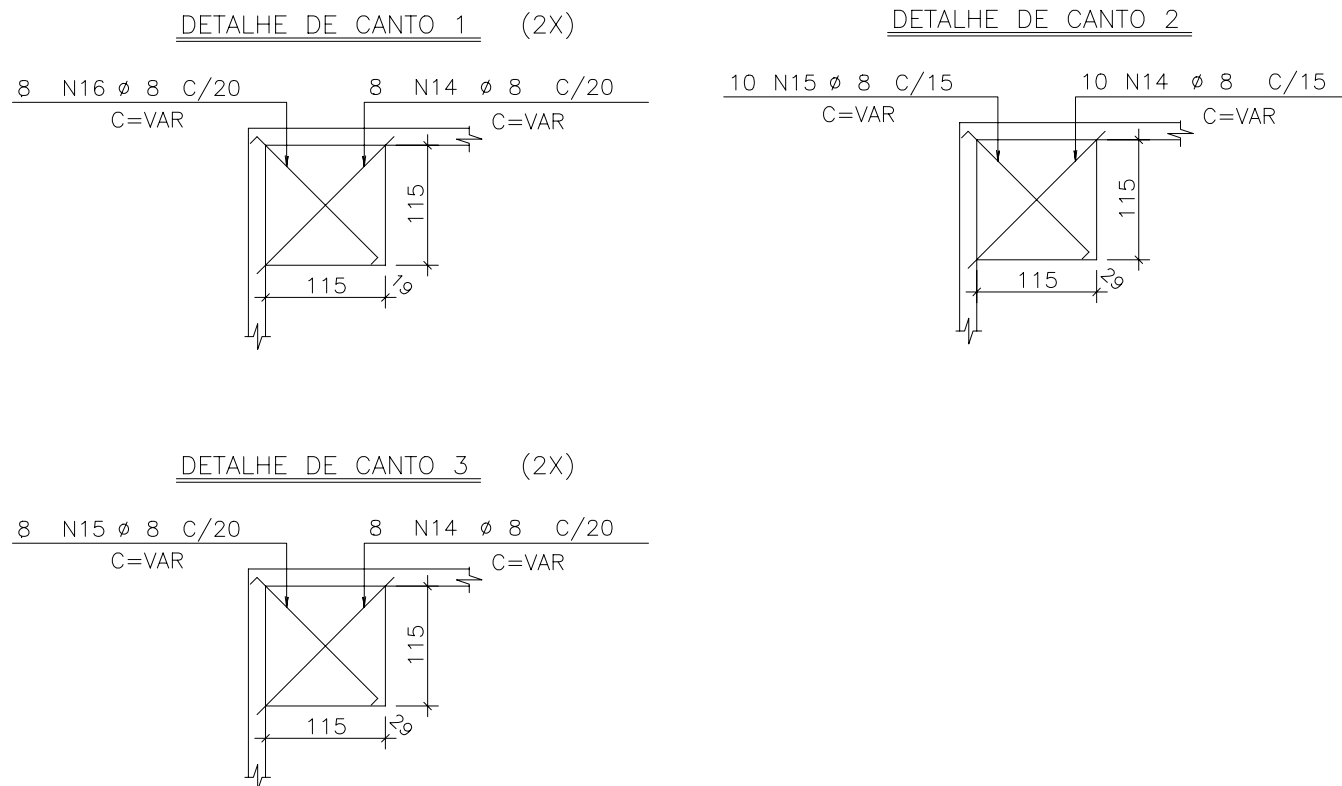
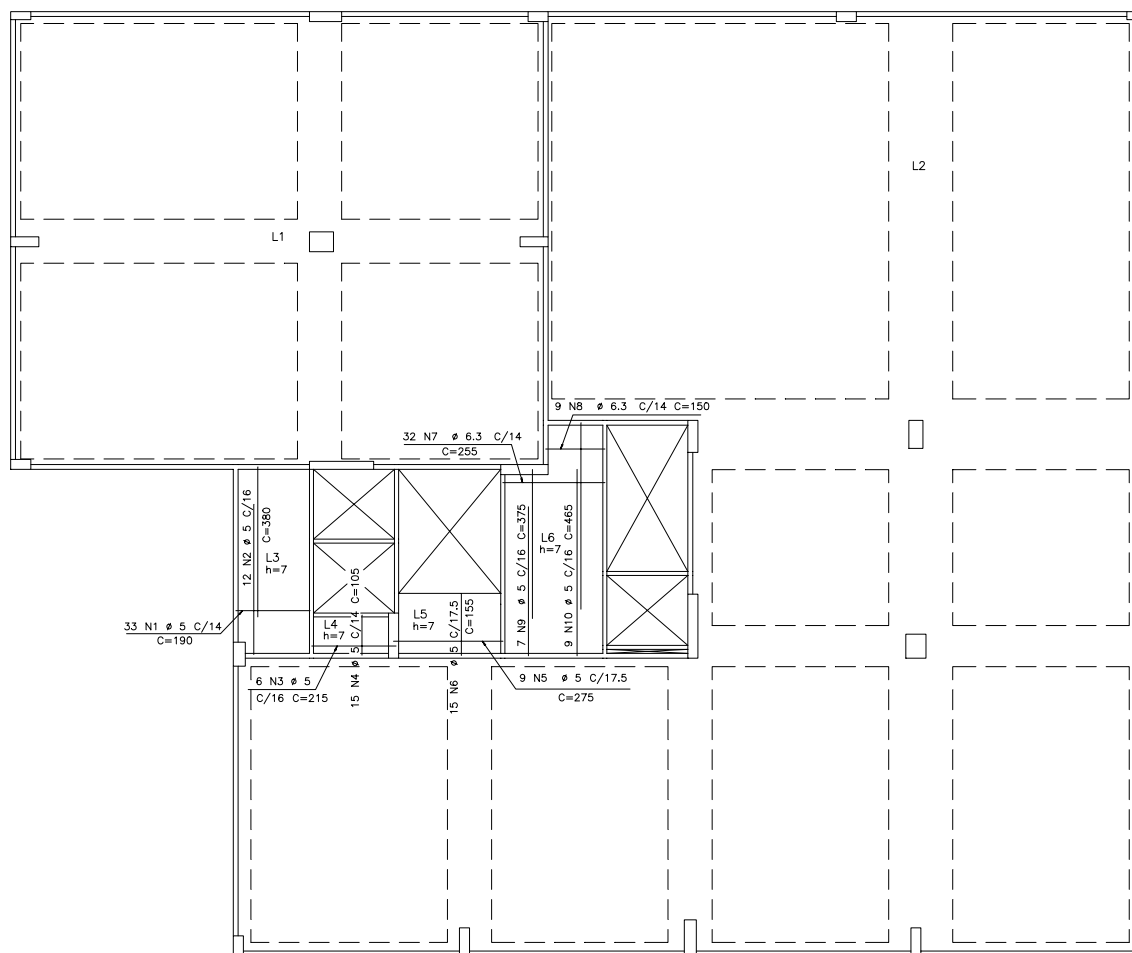


FIGURA B.28 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado



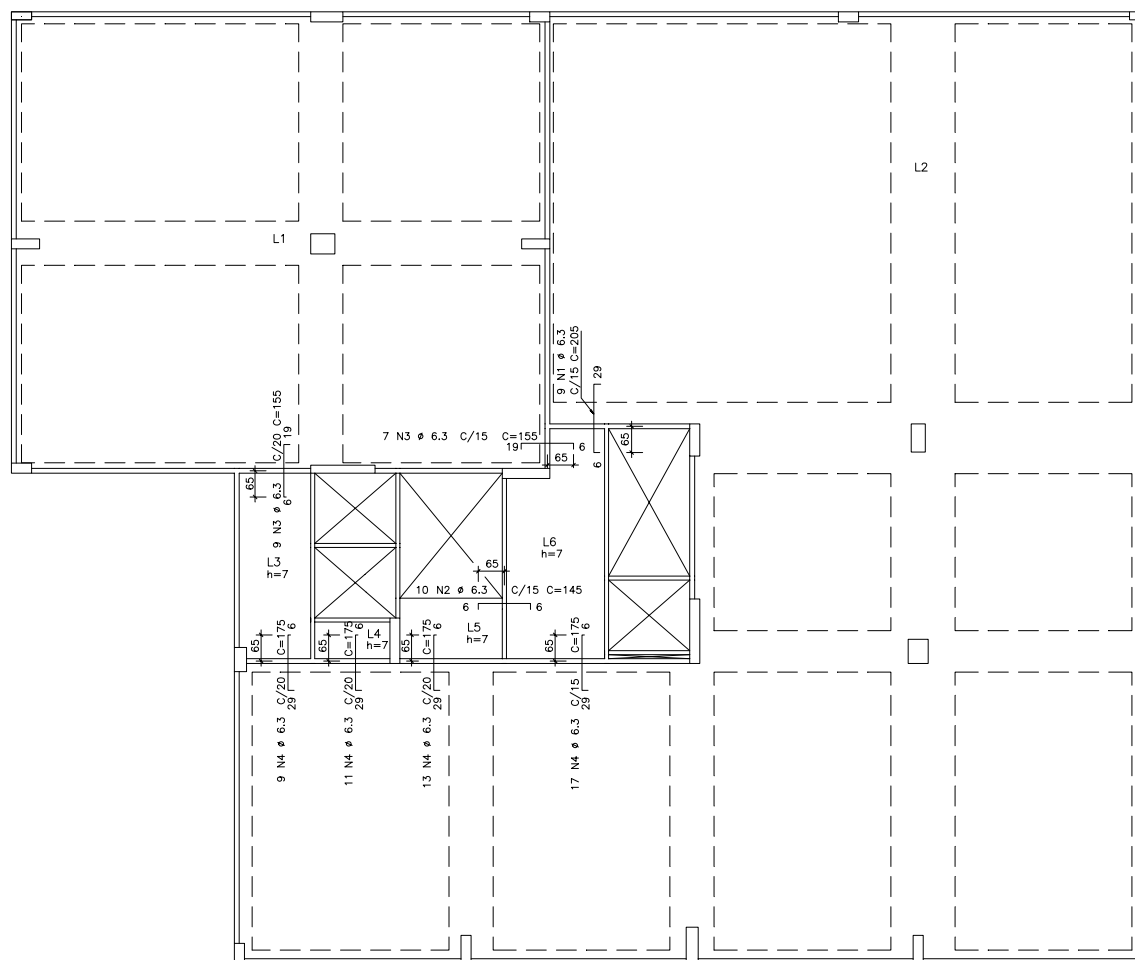


FIGURA B.30 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado (lajes comuns a todos os sistemas)

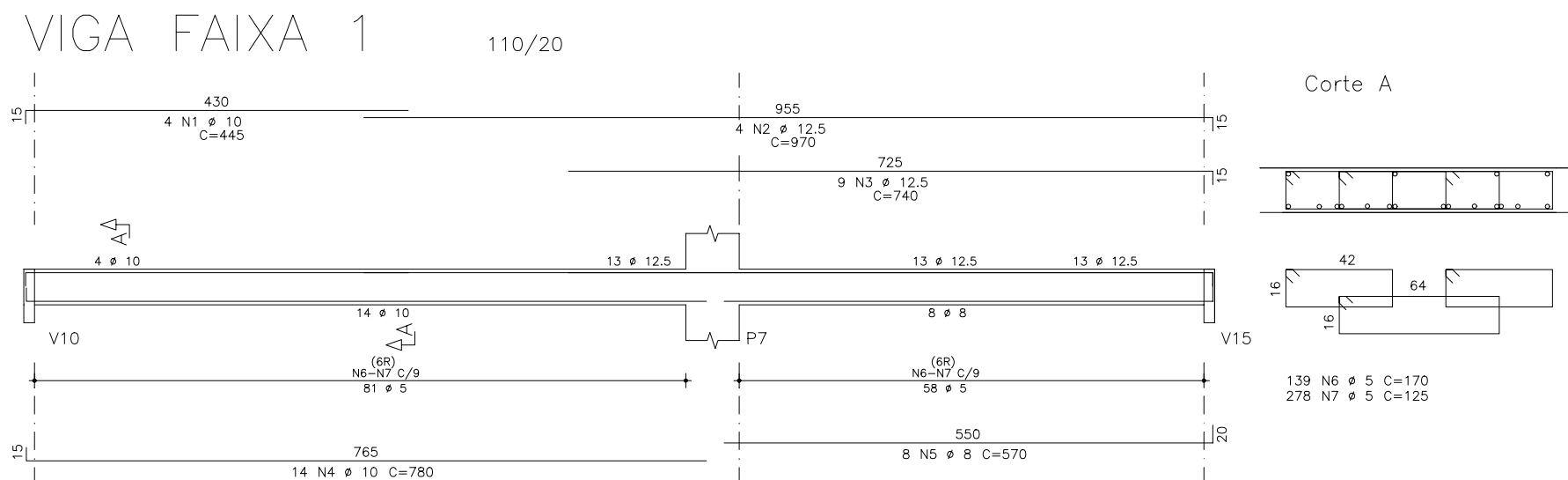


FIGURA B.31 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

VIGA FAIXA 2

177/30

Corte A

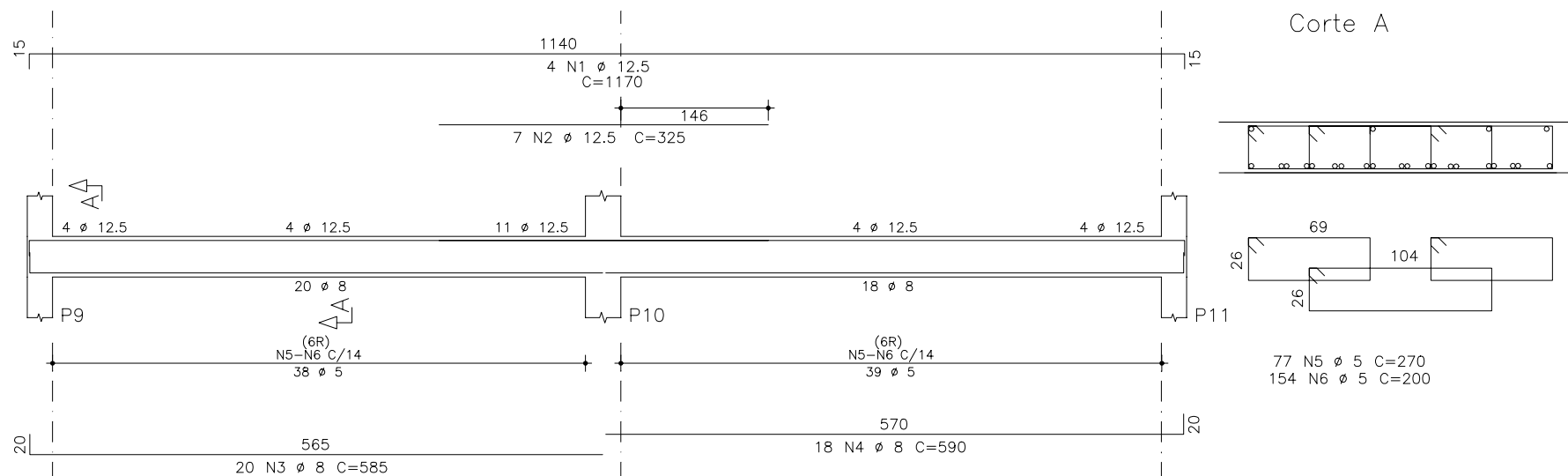


FIGURA B.32 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

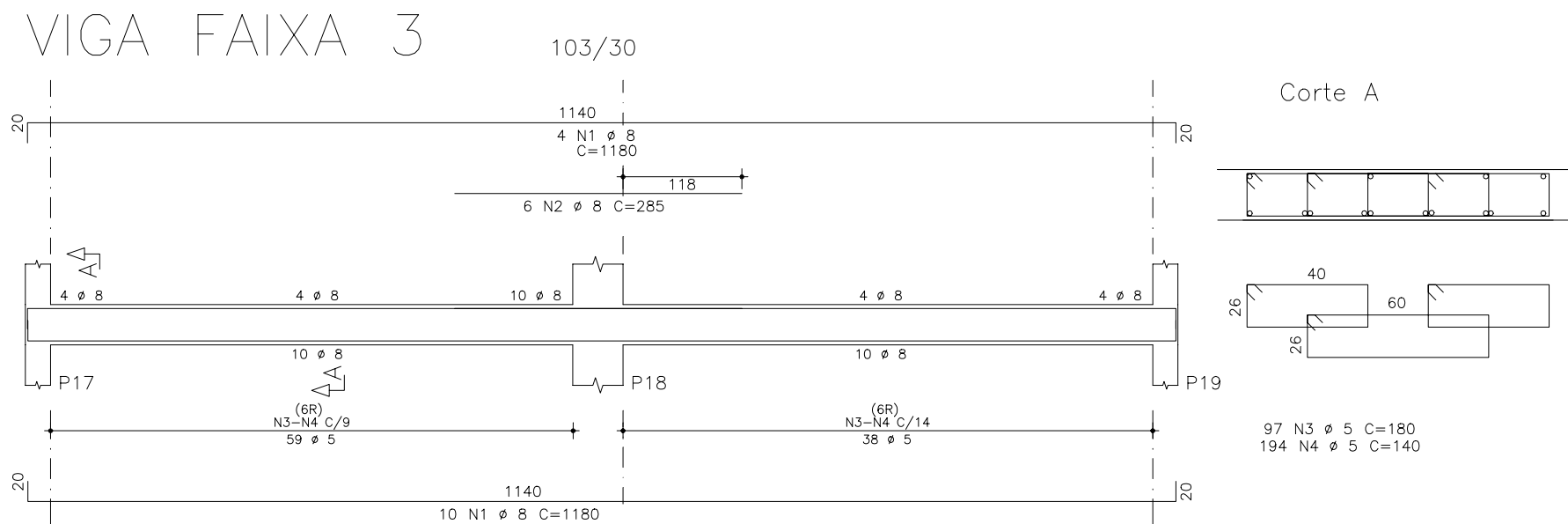


FIGURA B.33 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

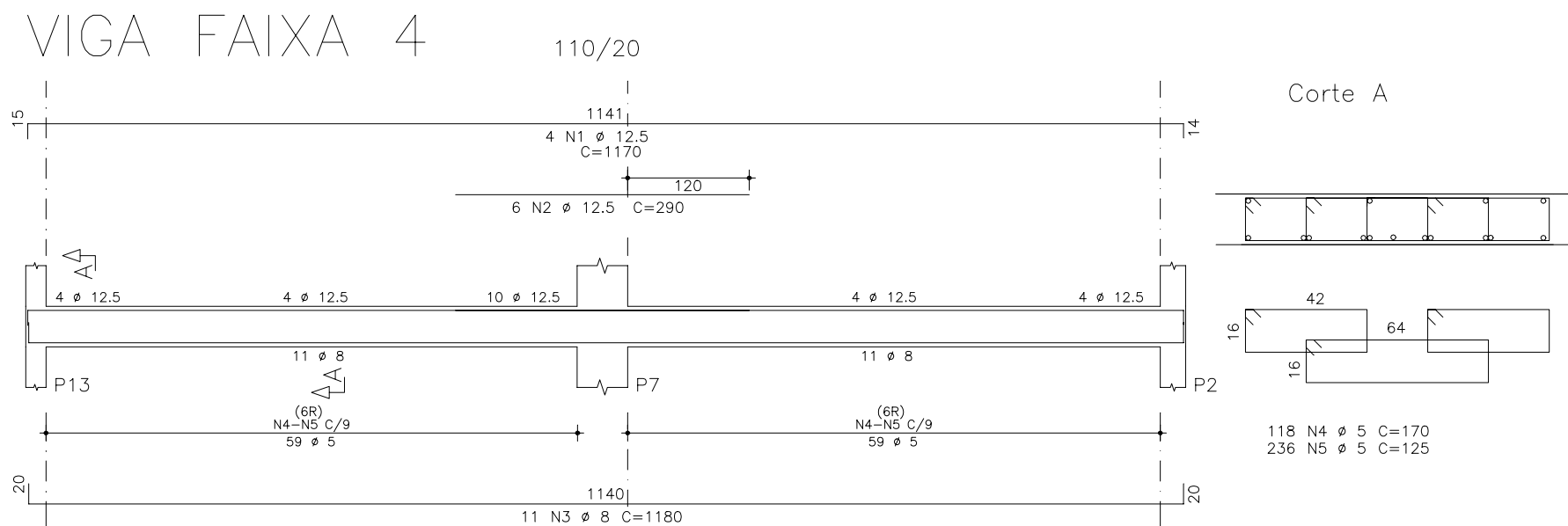


FIGURA B.34 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

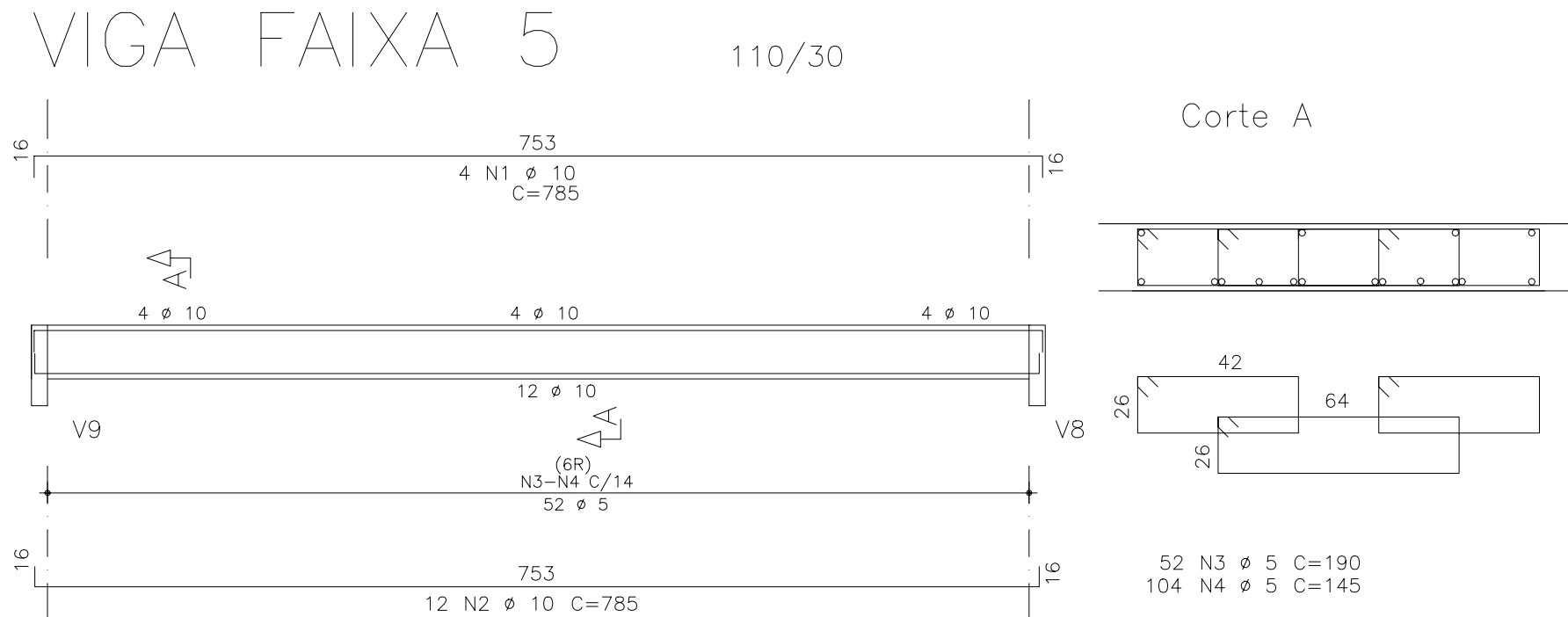


FIGURA B.35 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

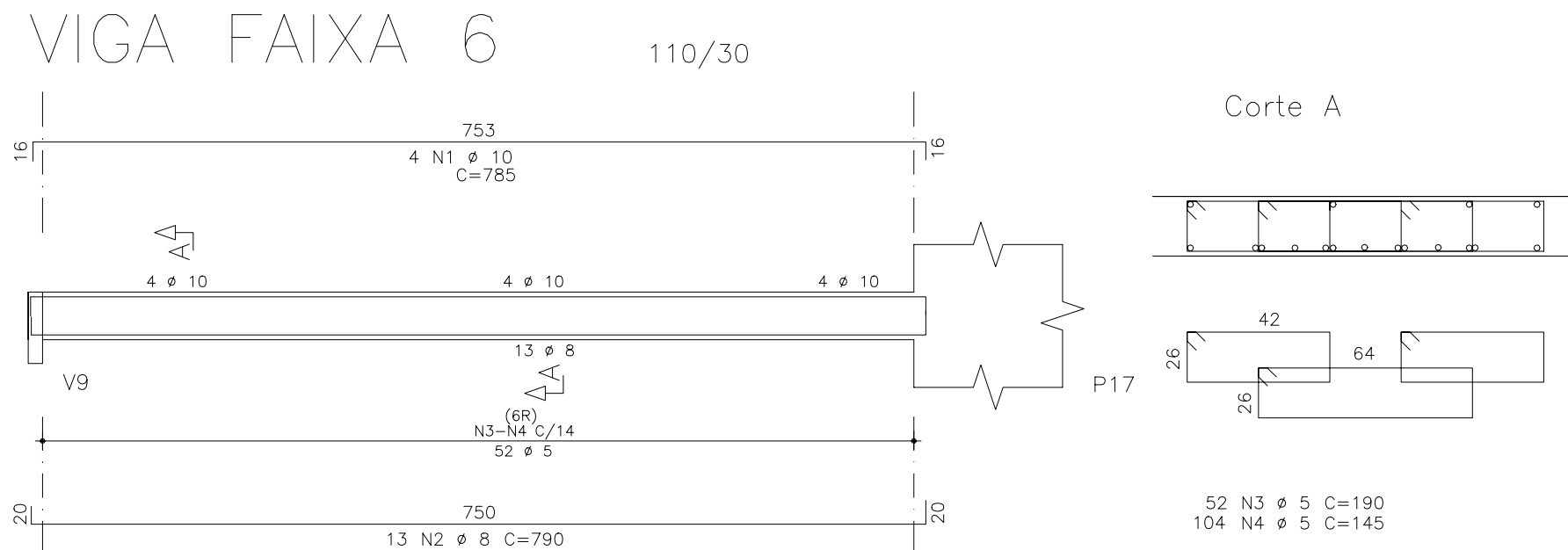


FIGURA B.36 – Armação da viga faixa 6 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

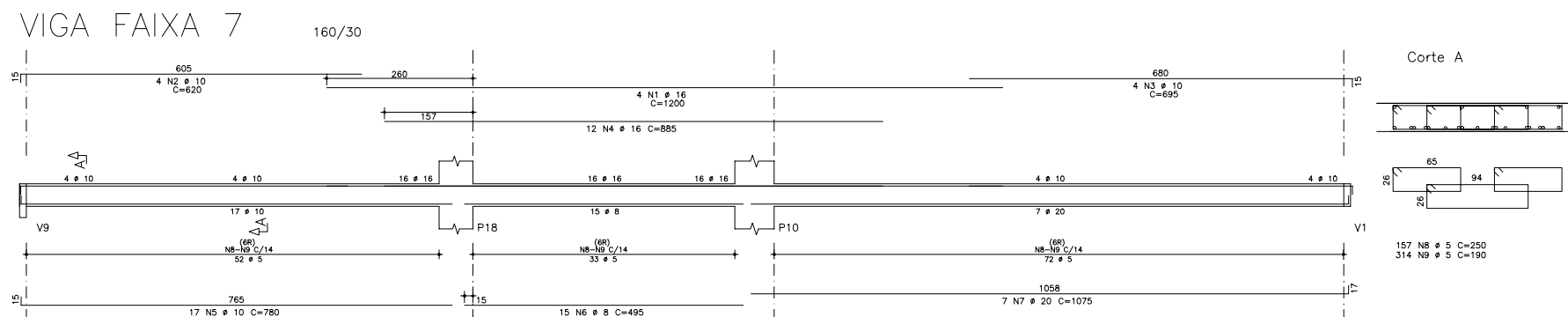


FIGURA B.37 – Armação da viga faixa 7 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de concreto celular autoclavado

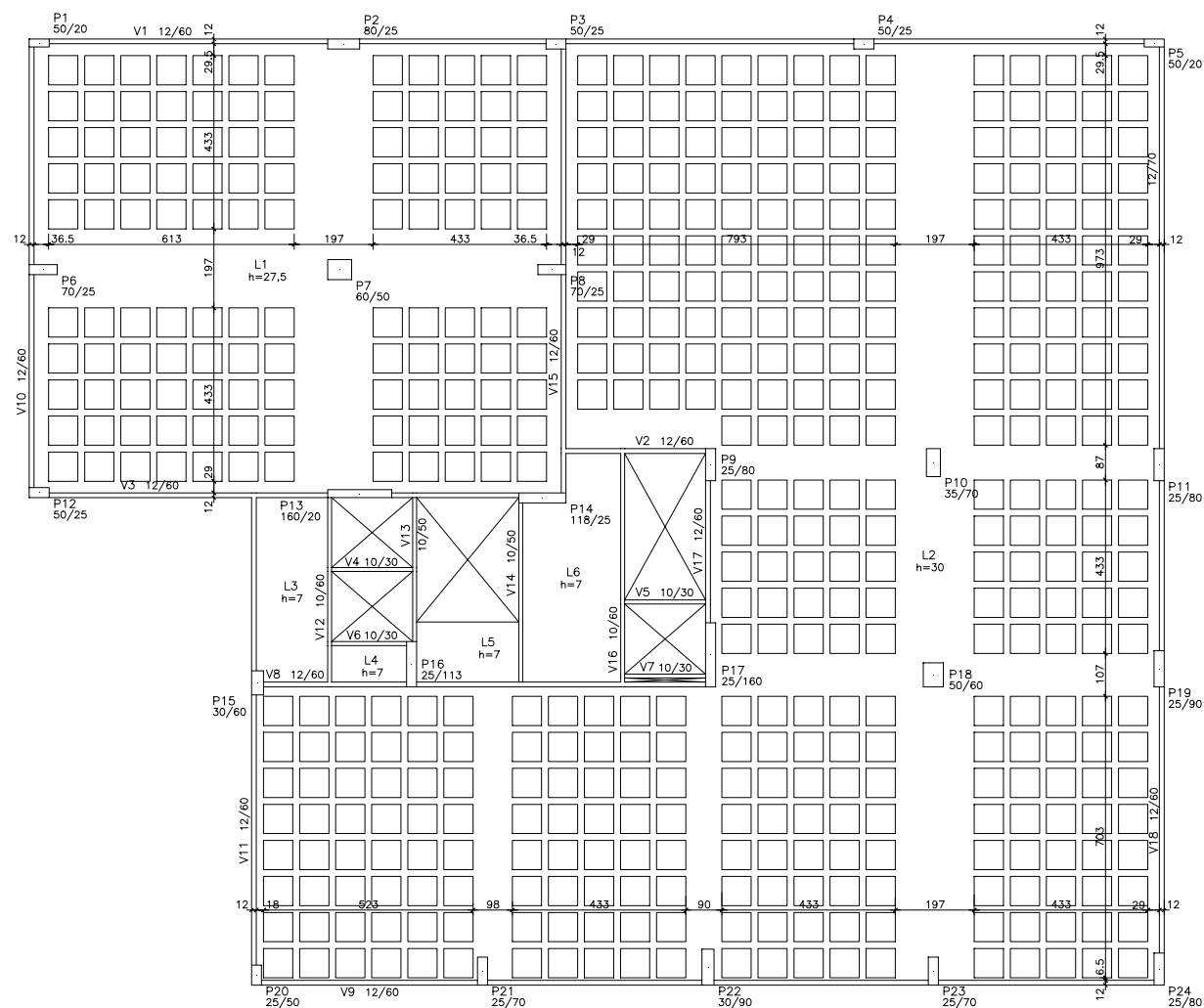


FIGURA B.38 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno



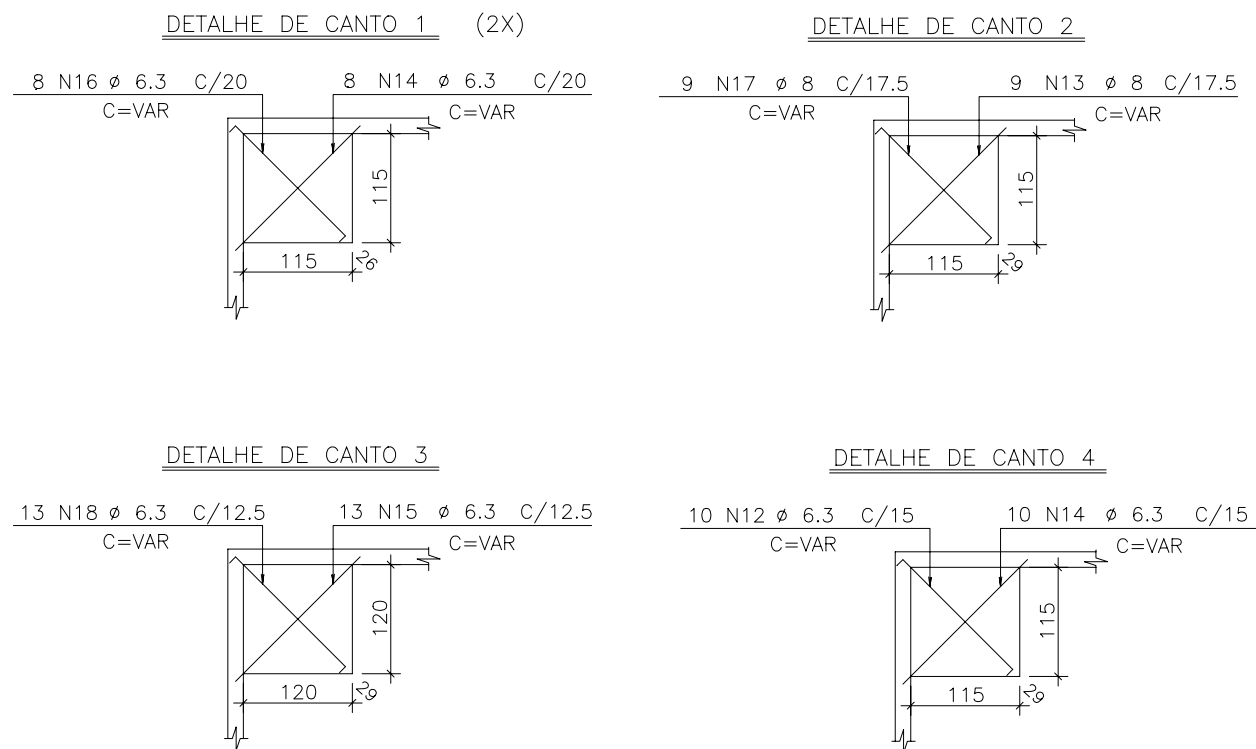


FIGURA B.41 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

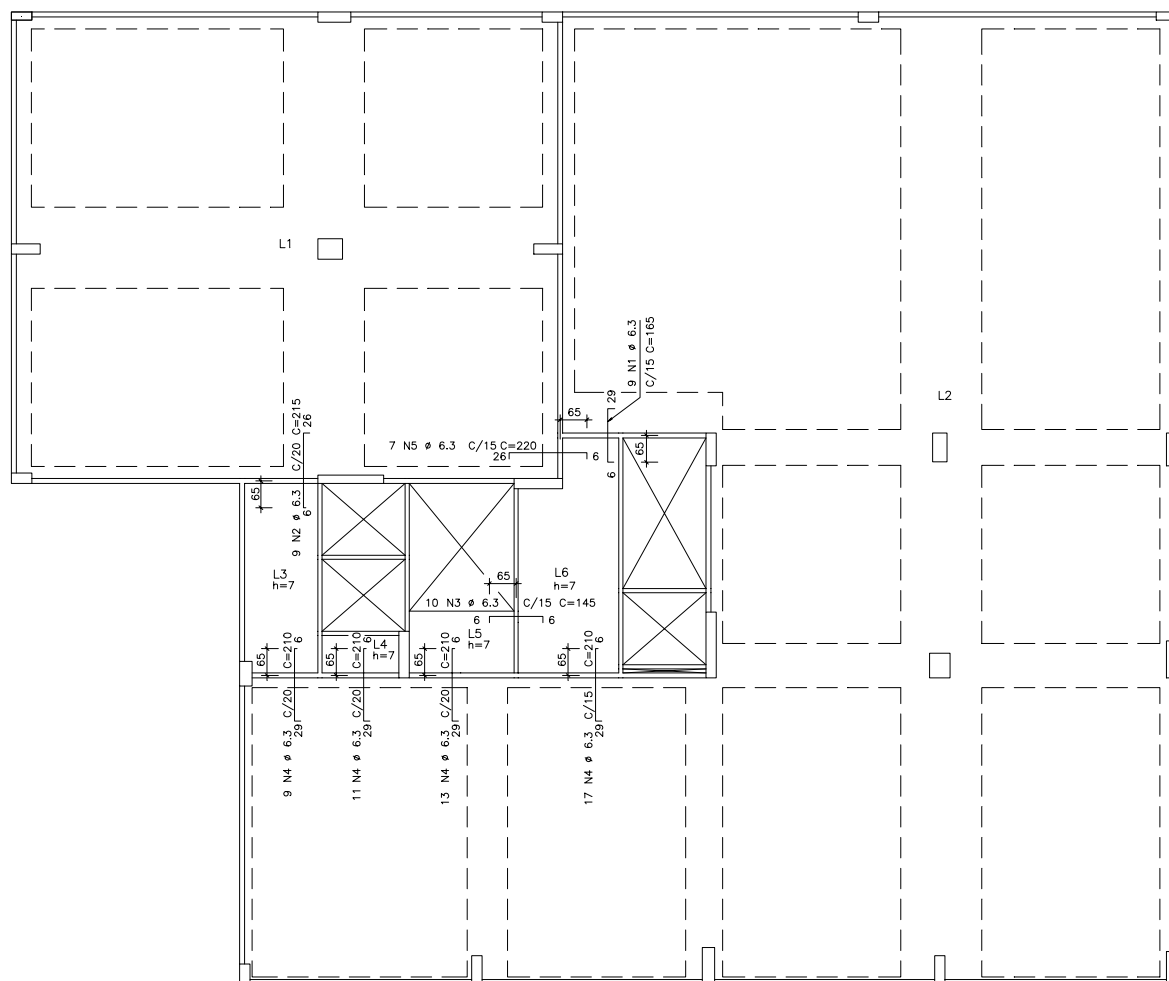


FIGURA B.43 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno (lajes comuns a todos os sistemas)

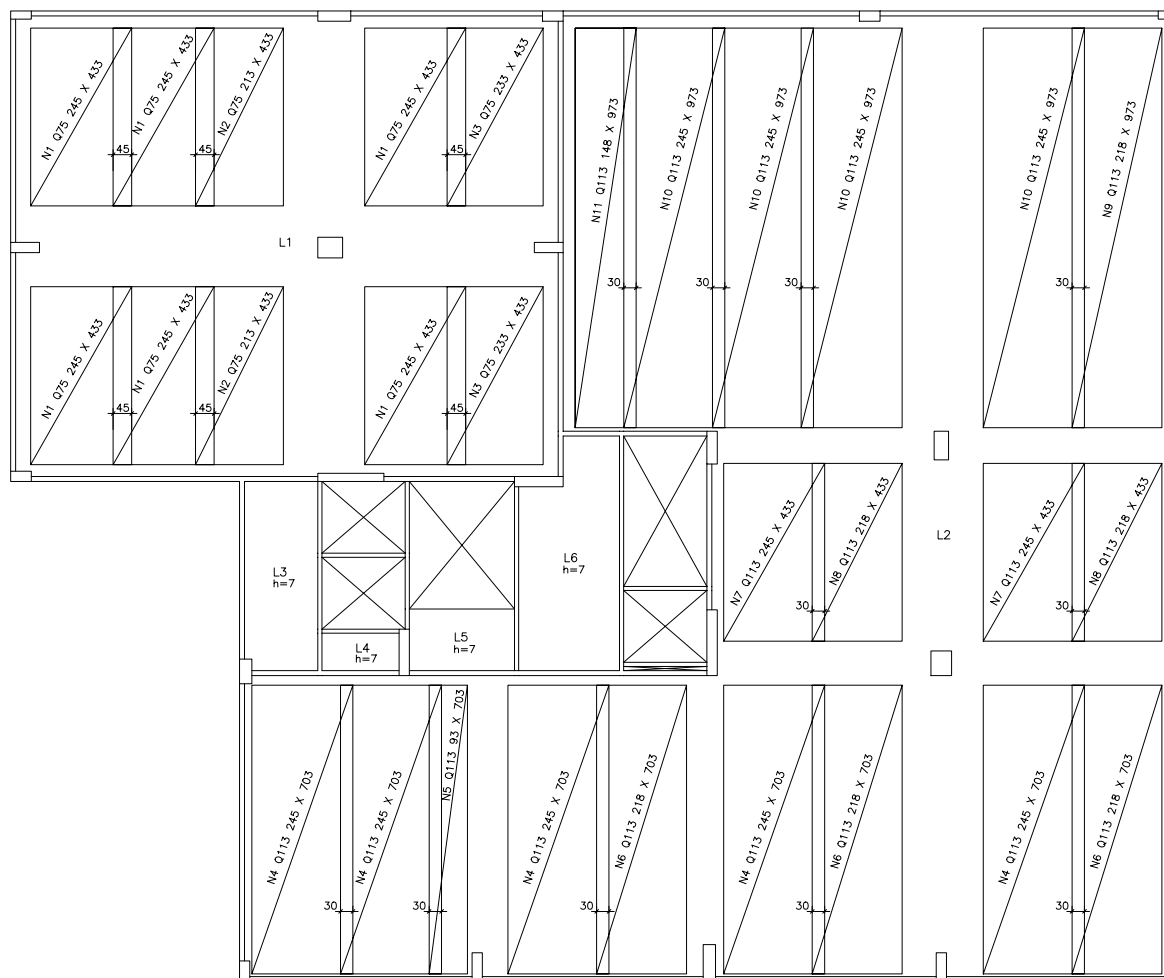


FIGURA B.44 – Armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

RELAÇÃO DAS TELAS					
POS.	DESIGNAÇÃO	QUANT.	DIM.	UNIT.(CM)	TOTAL (M)
1	Q75	6	245	X 433	25,98
2	Q75	2	213	X 433	8,66
3	Q75	2	233	X 433	8,66
4	Q113	5	245	X 703	35,15
5	Q113	1	93	X 703	7,03
6	Q113	3	218	X 703	21,09
7	Q113	2	245	X 433	8,66
8	Q113	2	218	X 433	8,66
9	Q113	1	218	X 973	9,73
10	Q113	4	245	X 973	38,92
11	Q113	1	148	X 973	9,73

RESUMO DAS TELAS					
AÇO	DESIGNAÇÃO	QUANTIDADES E DIMENSÕES			PESO
		ROLOS (M)			(kgf)
60	Q75	1 ROLO	DE 2,45	X 42	125
60	Q113	2 ROLOS	DE 2,45	X 60	529
60	Q113	1 ROLO	DE 2,45	X 7	31
Total					685 kgf

FIGURA B.45 – Resumo da armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno.

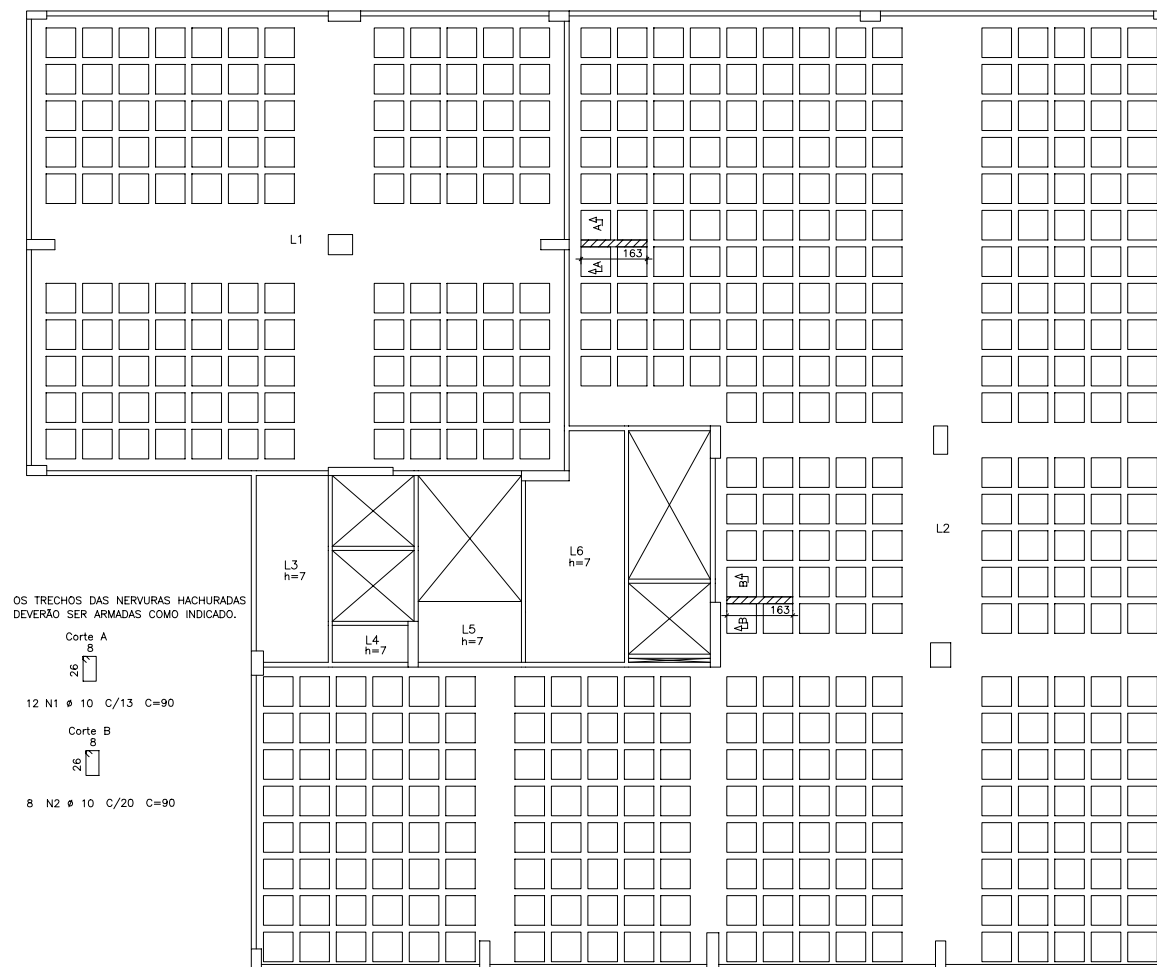


FIGURA B.46 – Armação de cisalhamento da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

VIGA FAIXA 1

197/27.5

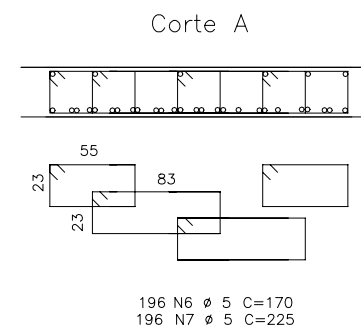
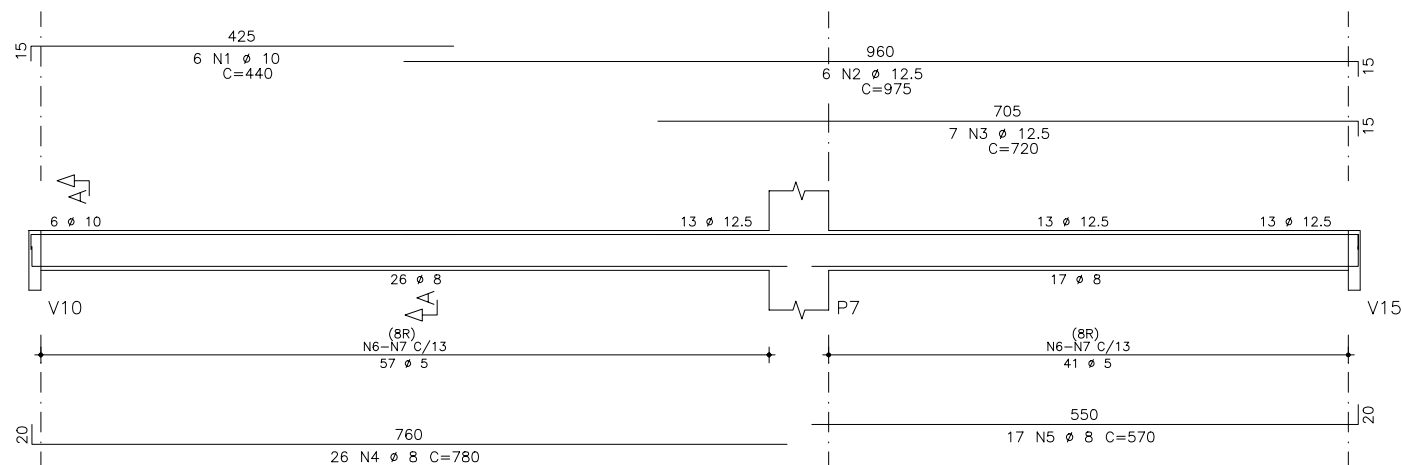
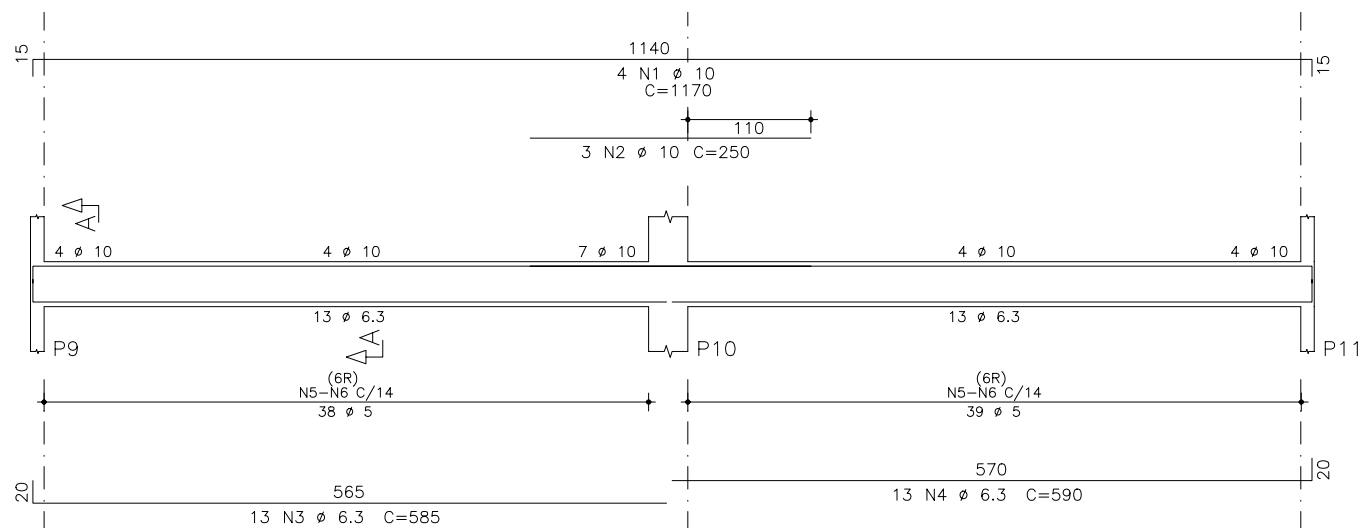


FIGURA B.47 – Armação da viga faixa 1 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

VIGA FAIXA 2

87/30



Corte A

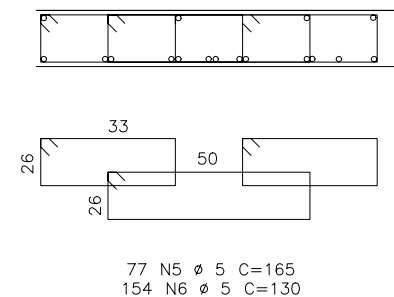


FIGURA B.48 – Armação da viga faixa 2 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

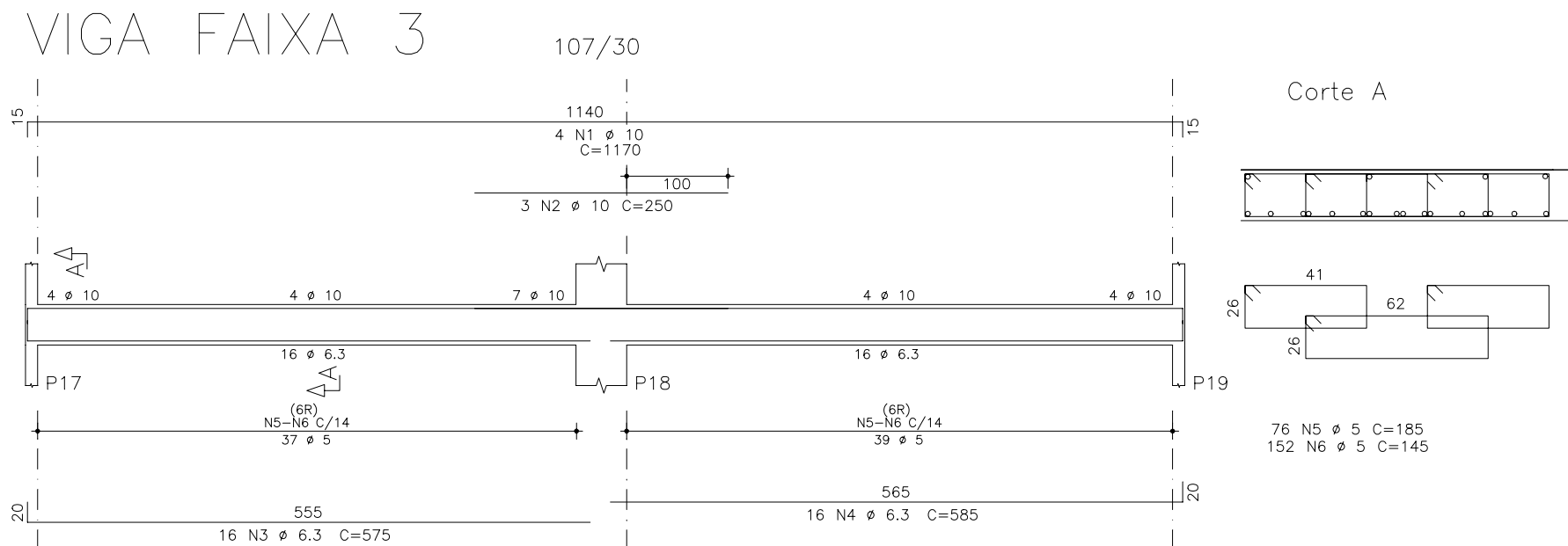


FIGURA B.49 – Armação da viga faixa 3 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

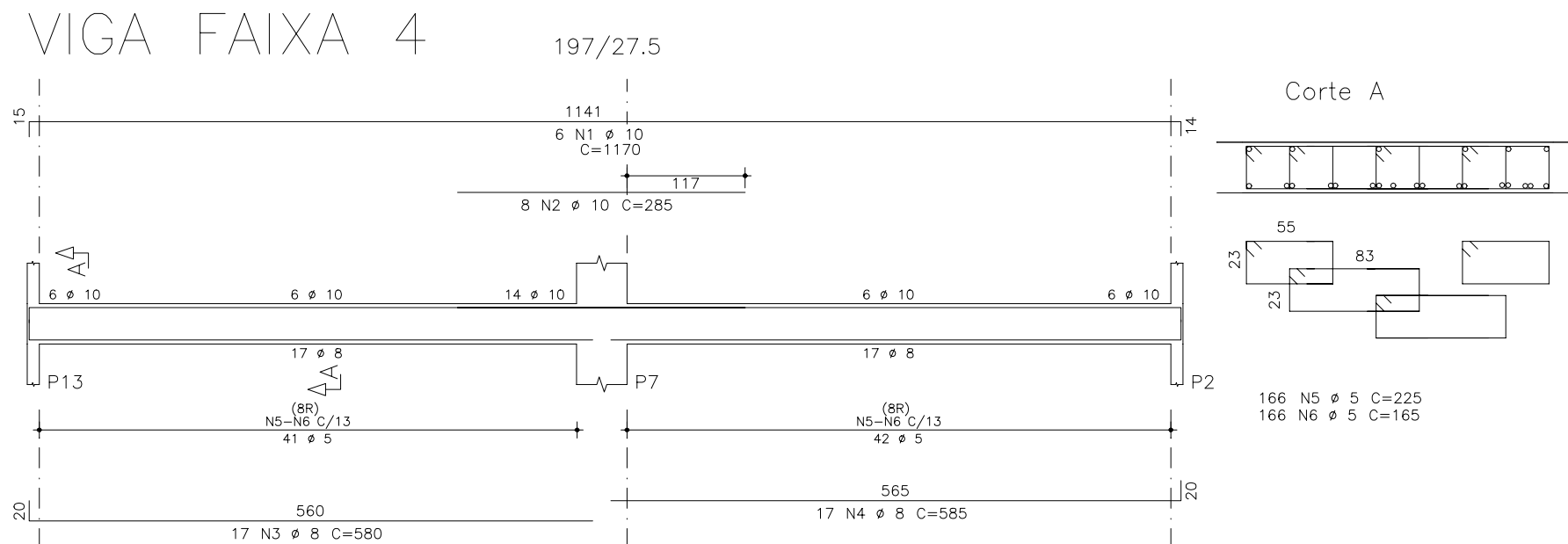
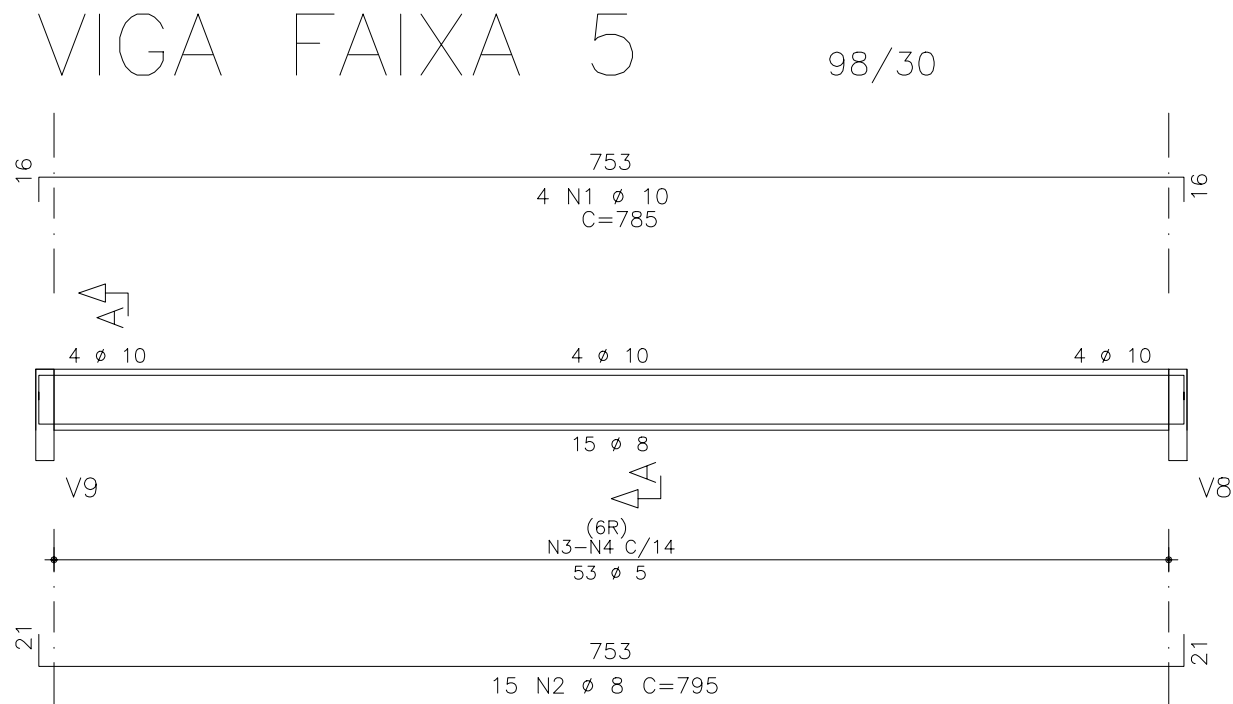
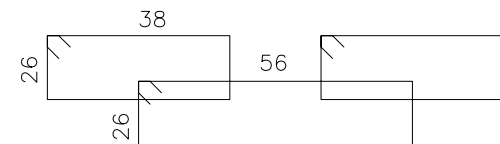
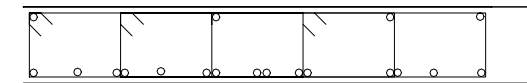


FIGURA B.50 – Armação da viga faixa 4 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno



Corte A



53 N3 Ø 5 C=175
106 N4 Ø 5 C=140

FIGURA B.51 – Armação da viga faixa 5 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

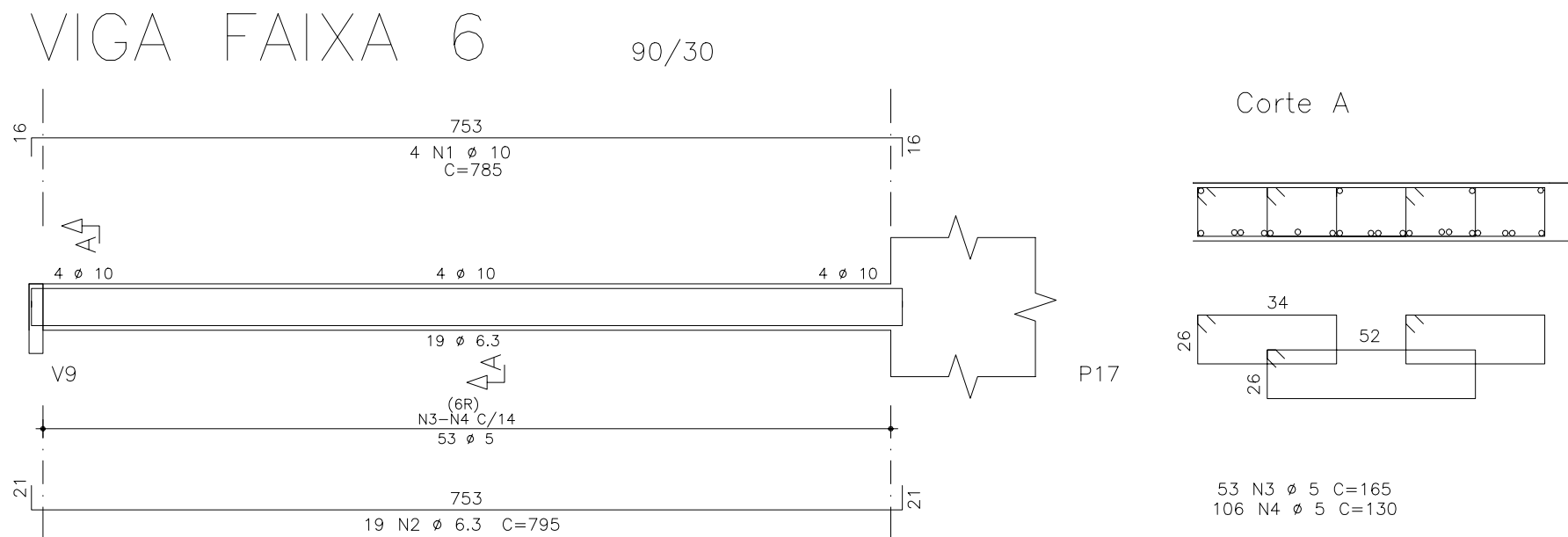


FIGURA B.52 – Armação da viga faixa 6 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

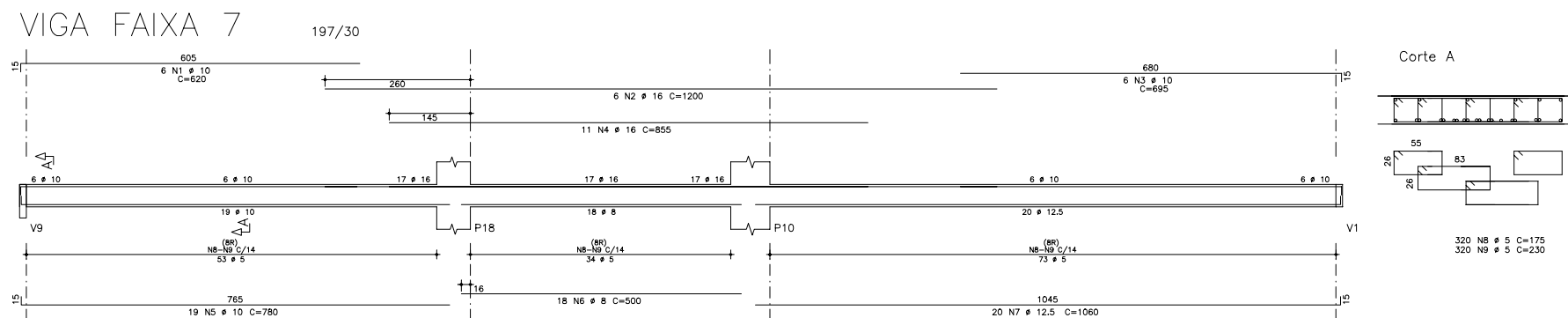


FIGURA B.53 – Armação da viga faixa 7 do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

ANEXO C

Neste anexo encontram-se as fôrmas e detalhamentos das lajes dos diversos sistemas estruturais analisados no terceiro exemplo.

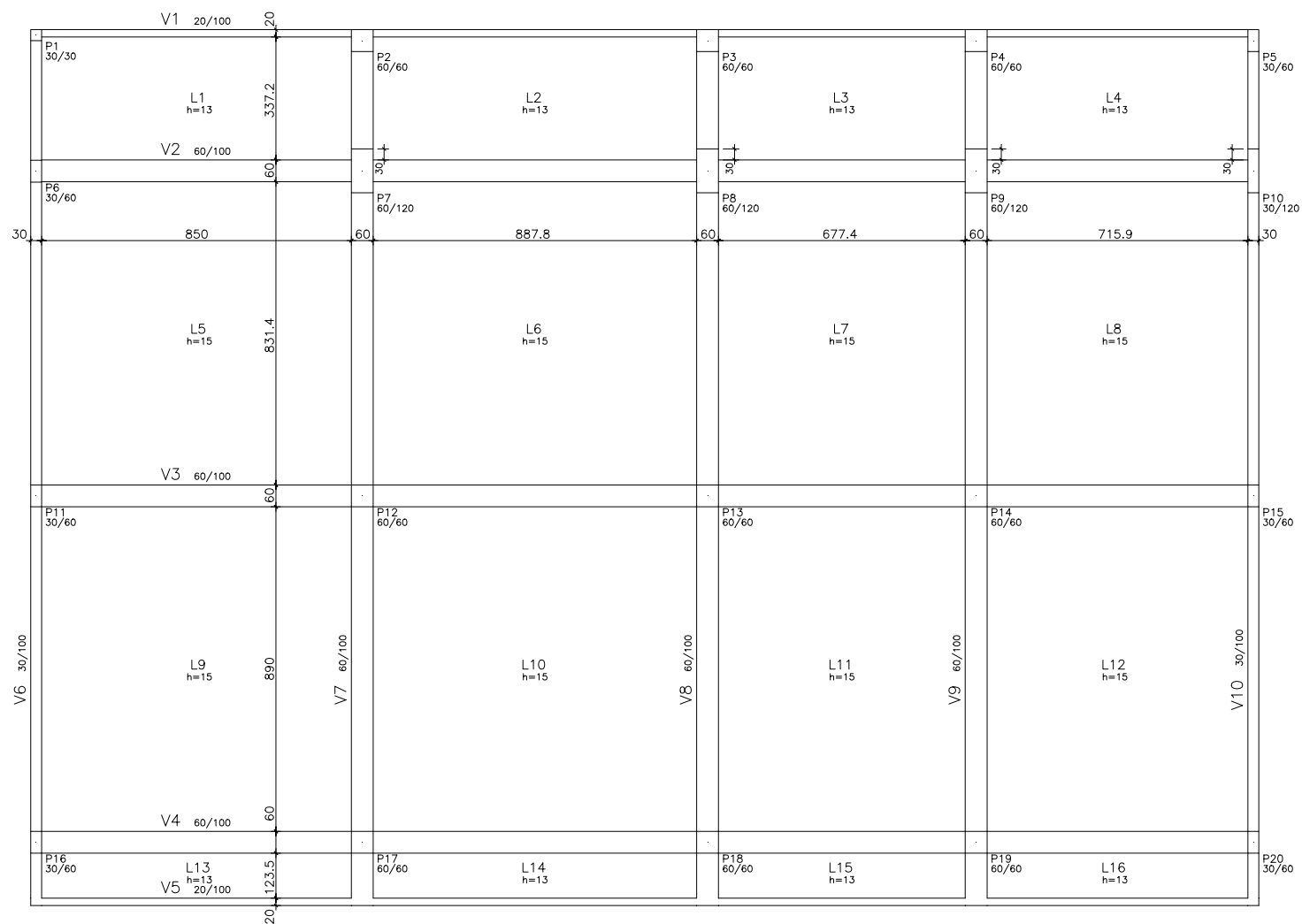


FIGURA C.1 – Fôrma do sistema estrutural convencional



FIGURA C.2 – Armadura positiva da laje do sistema estrutural convencional

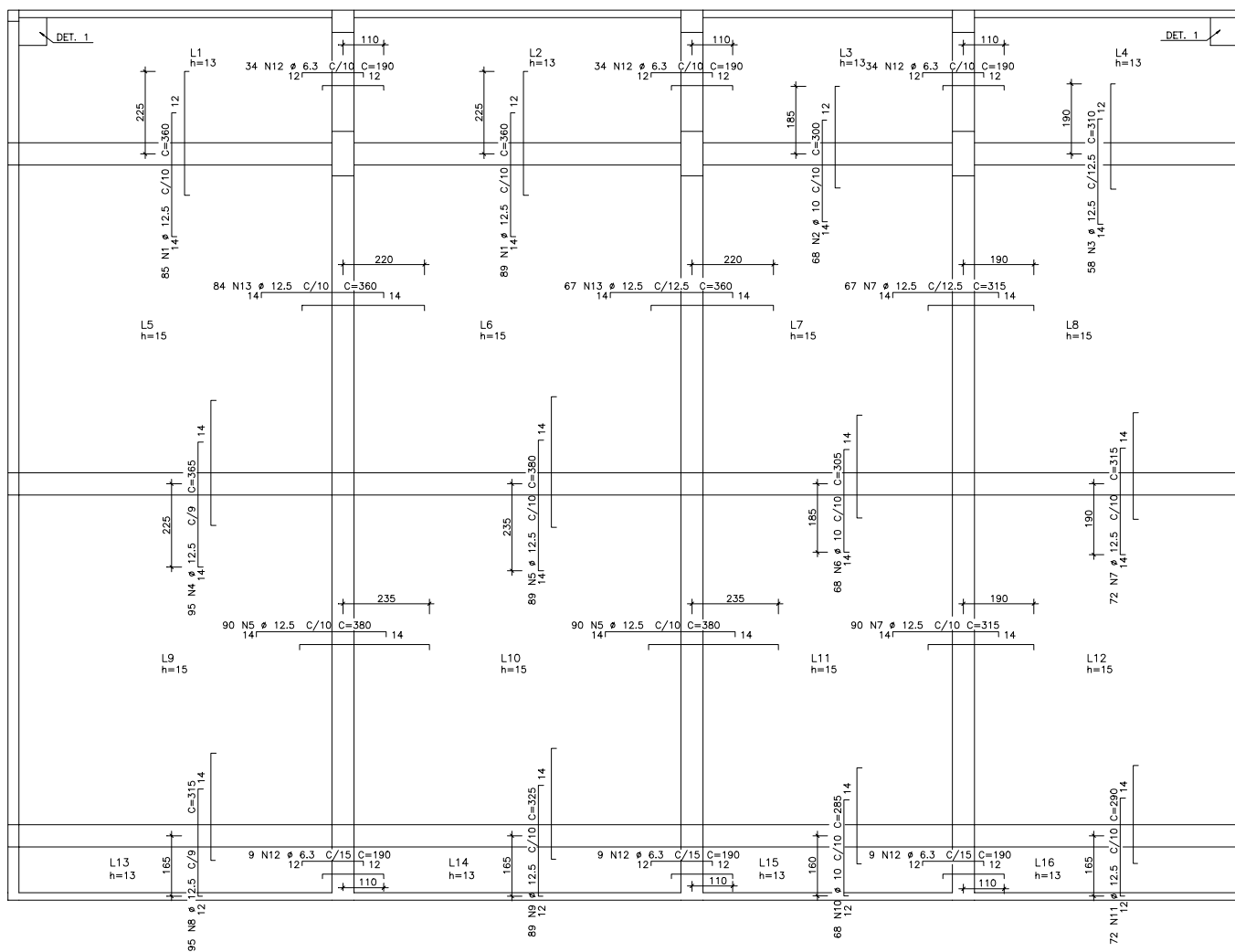


FIGURA C.3 – Armação negativa da laje do sistema estrutural convencional

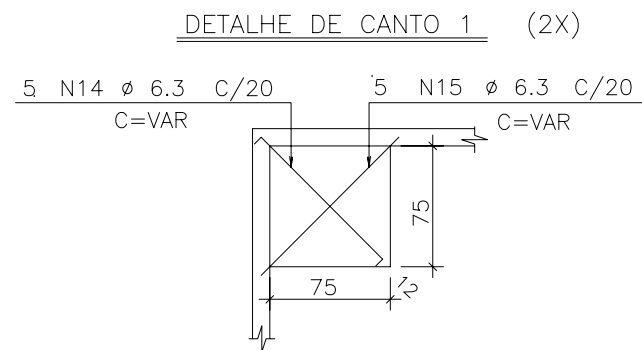


FIGURA C.4 – Armação complementar da laje do sistema estrutural convencional

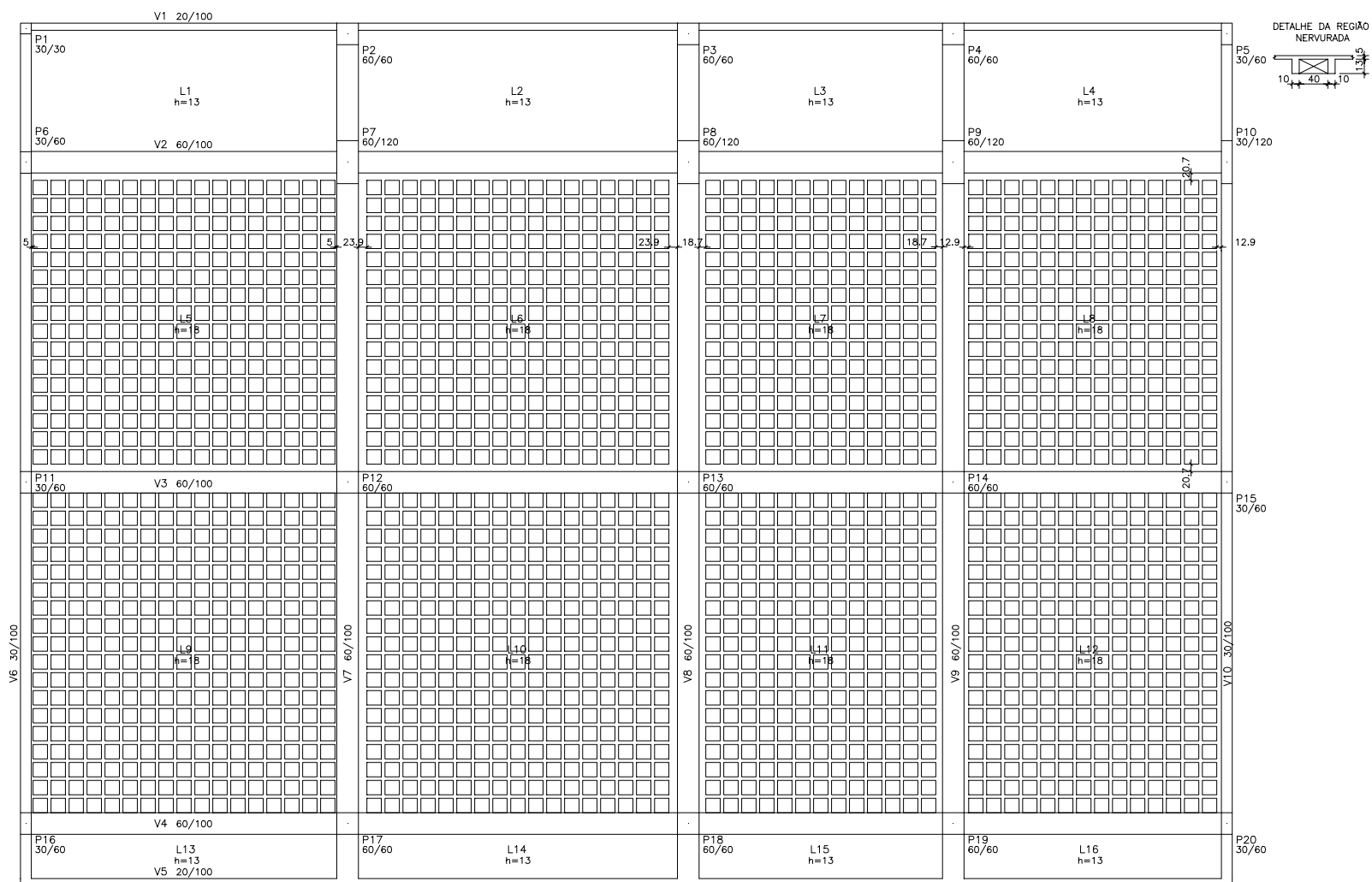


FIGURA C.5 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

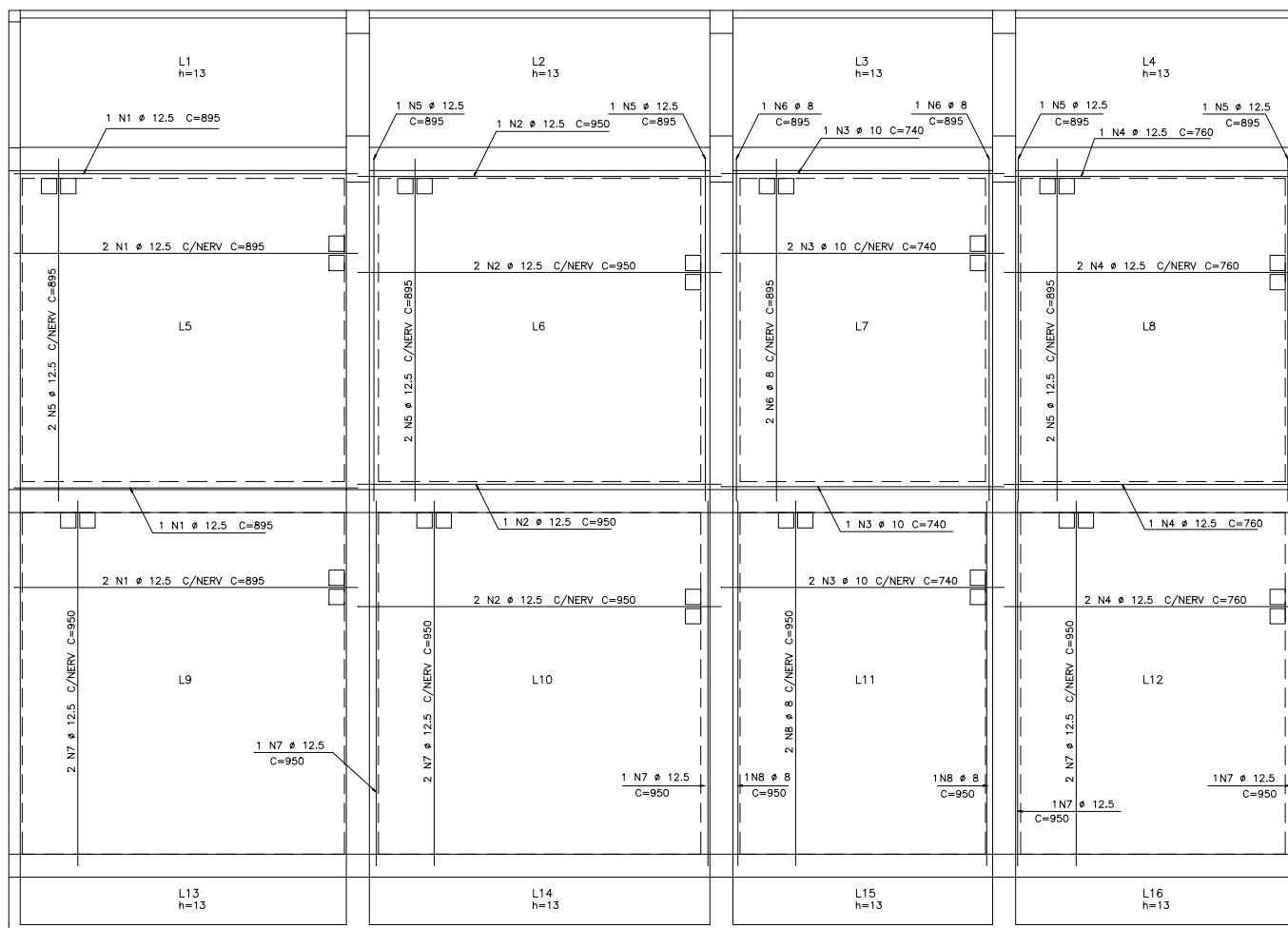


FIGURA C.6 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

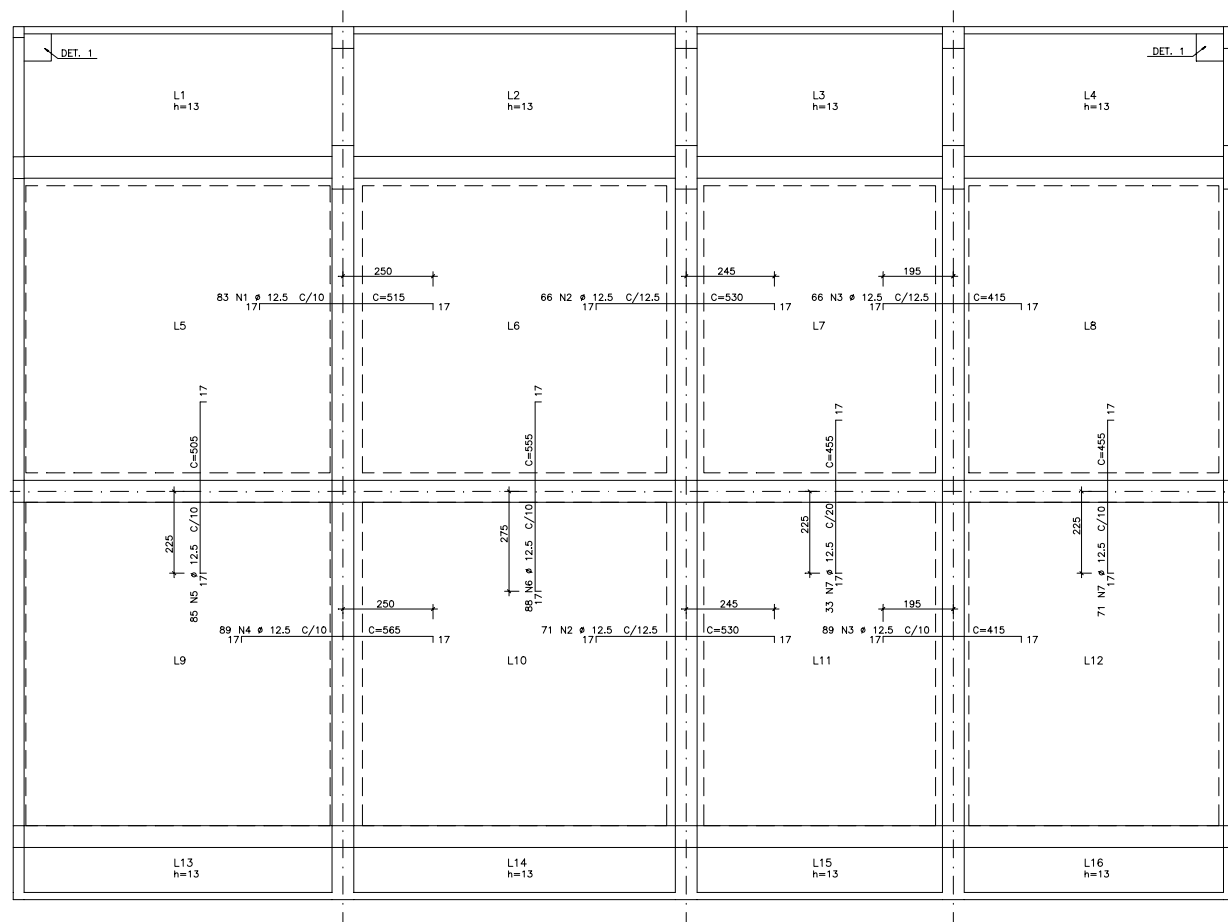


FIGURA C.7 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

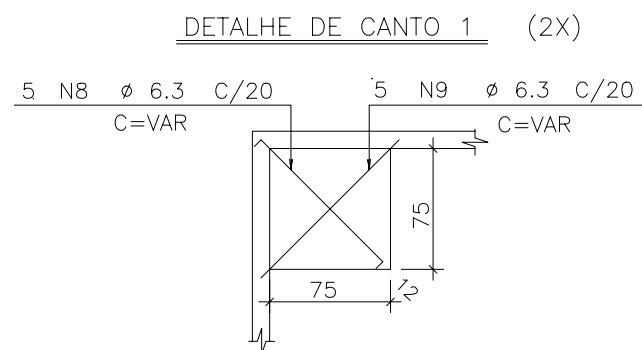


FIGURA C.8 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS

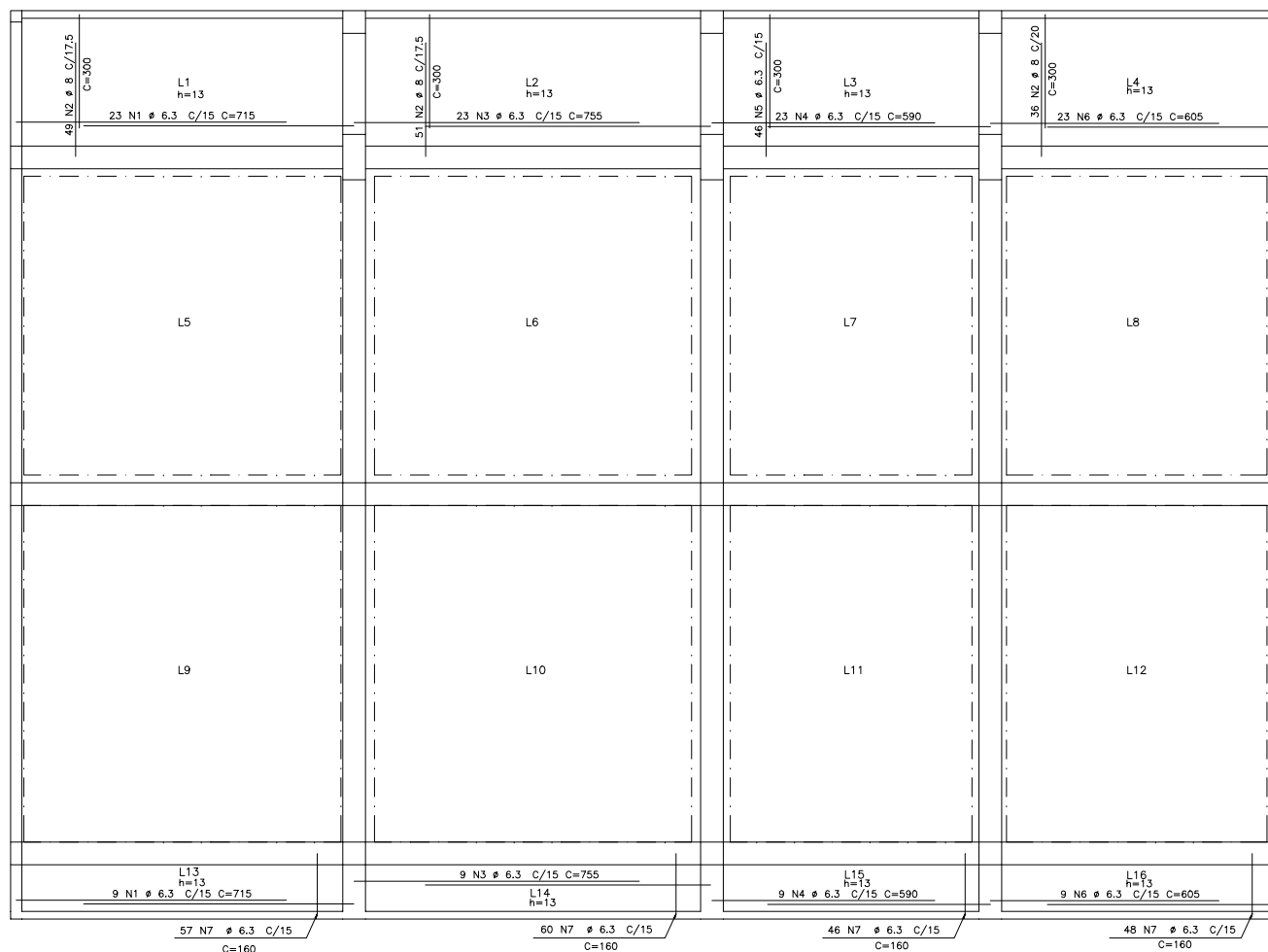


FIGURA C.9 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS (lajes comuns a todos os sistemas)

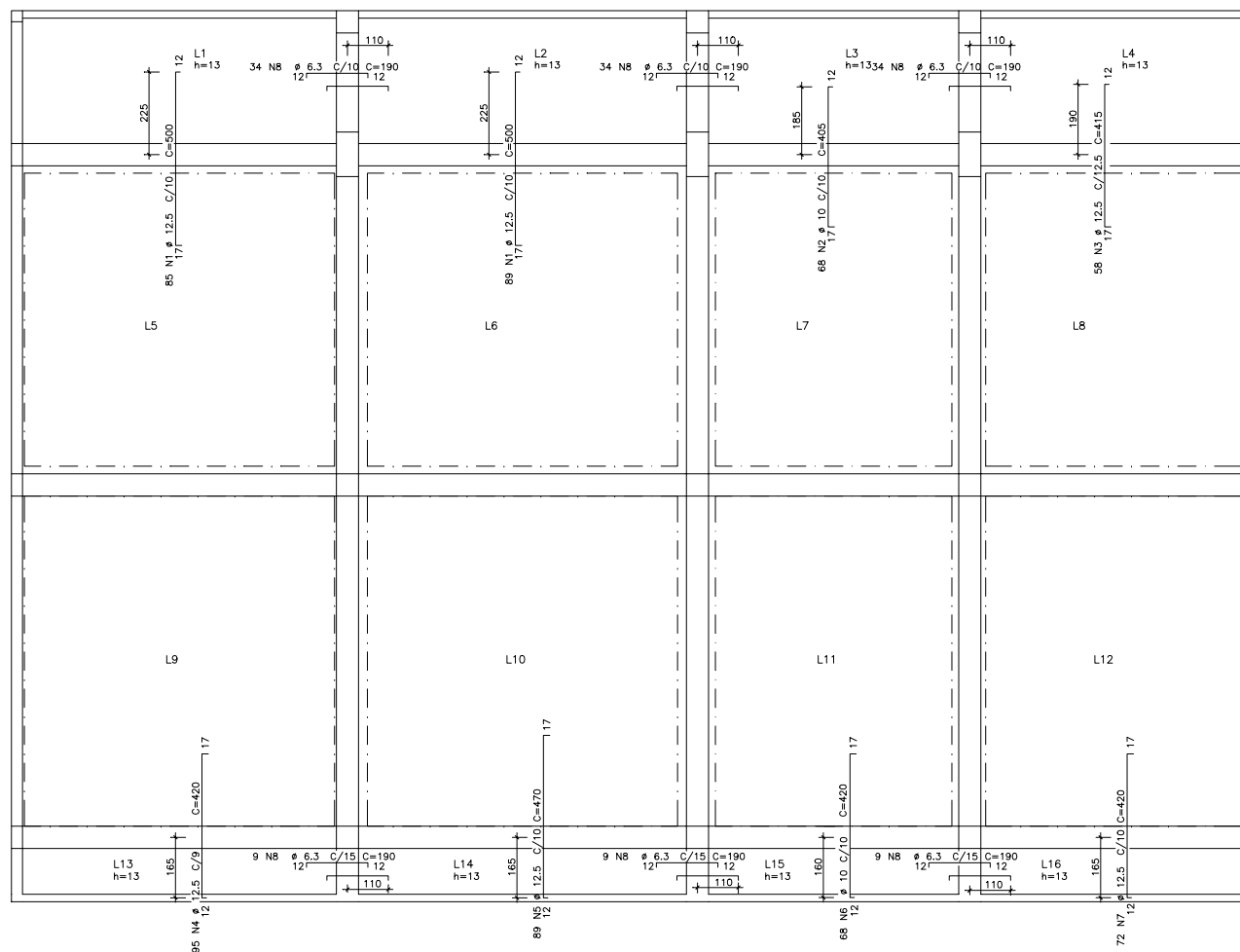


FIGURA C.10 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada cujo material inerte são blocos de EPS (lajes comuns a todos os sistemas)

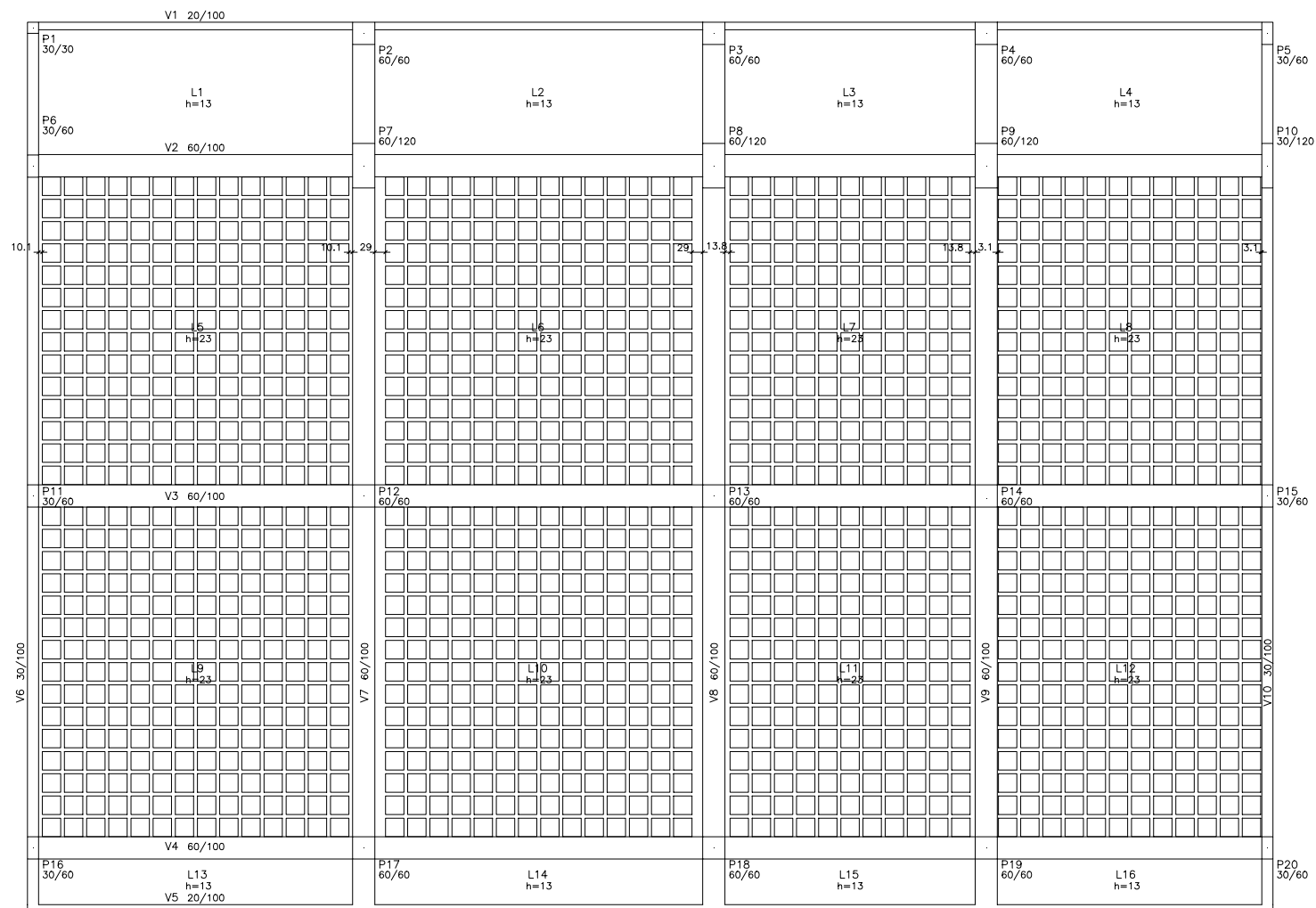


FIGURA C.11 – Fôrma do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

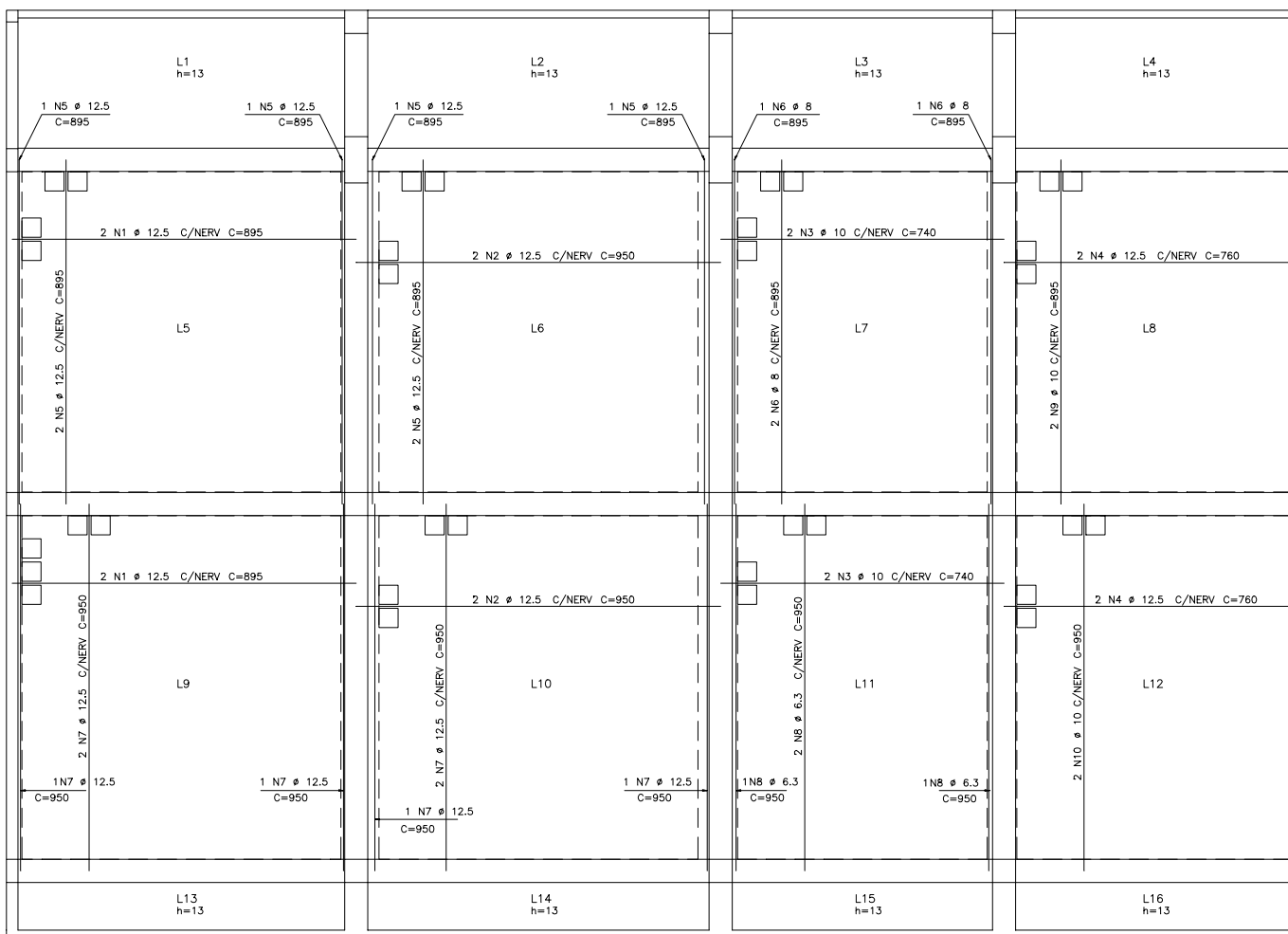


FIGURA C.12 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

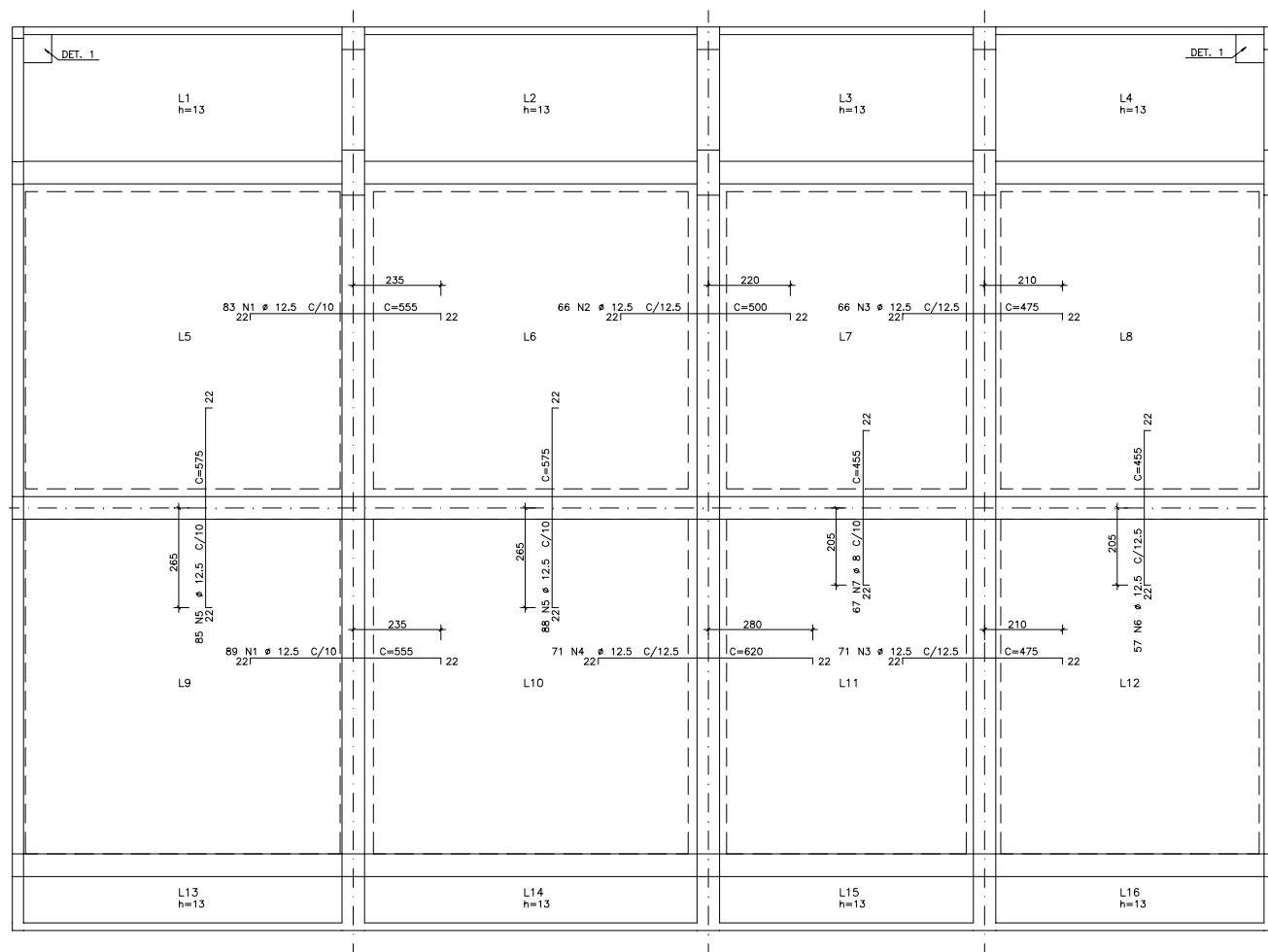


FIGURA C.13 – Armação negativa da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

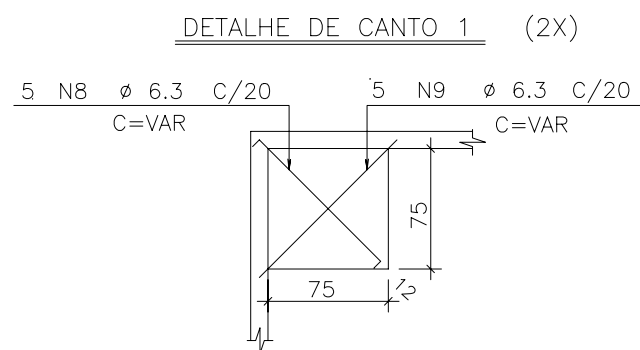


FIGURA C.14 – Armação complementar da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

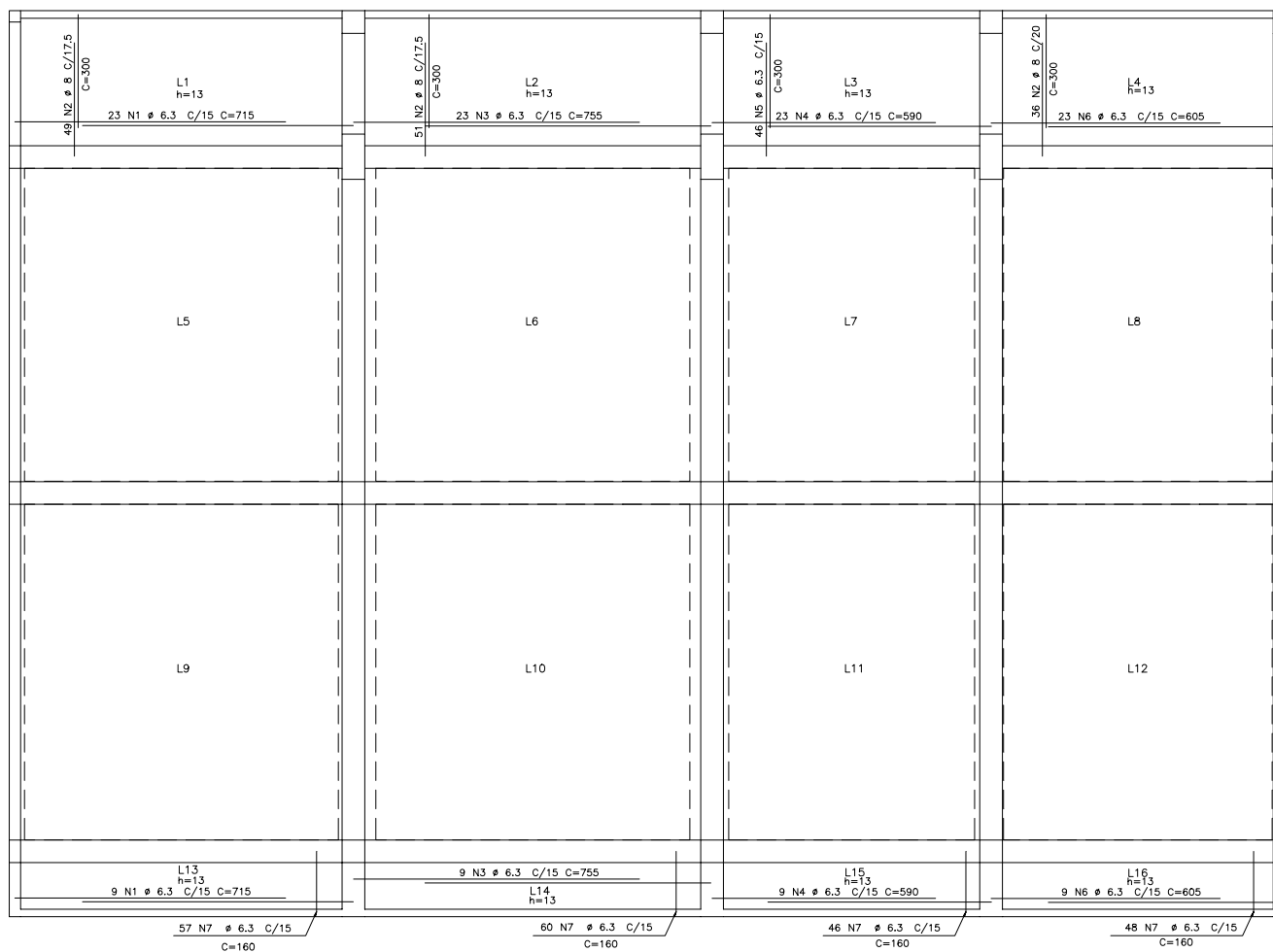
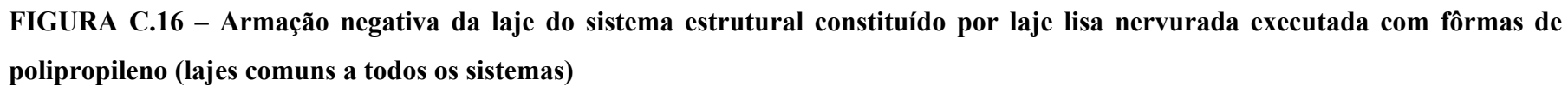


FIGURA C.15 – Armação positiva da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno (lajes comuns a todos os sistemas)



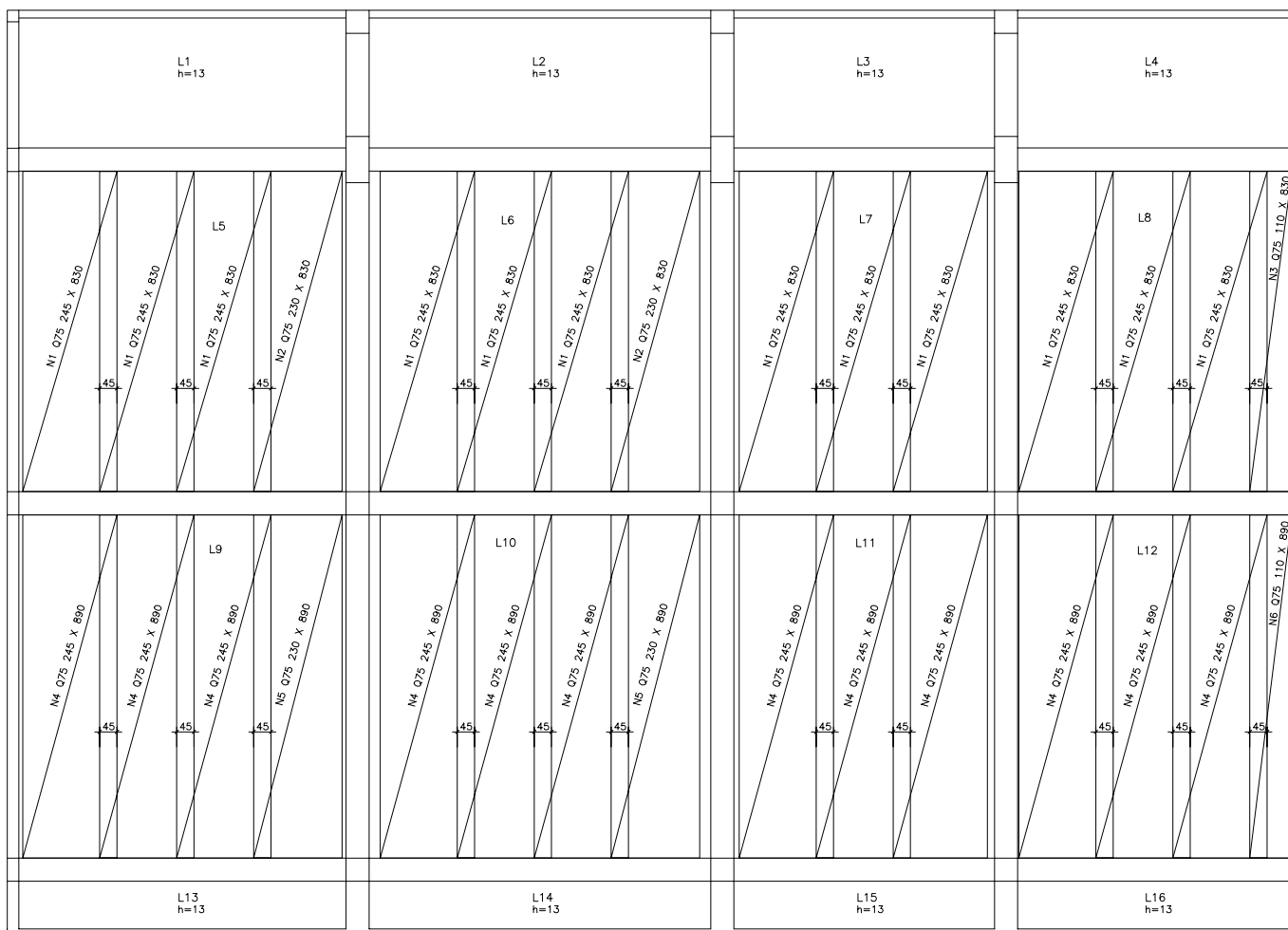


FIGURA C.17 – Armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

RELAÇÃO DAS TELAS					
POS.	DESIGNAÇÃO	QUANT.	DIM.	UNIT.(CM)	TOTAL (M)
1	Q75	12	245	X 830	99,60
2	Q75	2	230	X 830	16,60
3	Q75	1	110	X 830	8,30
4	Q75	12	245	X 890	106,80
5	Q75	2	230	X 890	17,80
6	Q75	1	110	X 890	8,90

RESUMO DAS TELAS			
AÇO	DESIGNAÇÃO	QUANTIDADES E DIMENSÕES ROLOS (M)	PESO (kgf)
60	Q75	2 ROLOS DE 2,45 X 120	712
60	Q75	1 ROLO DE 2,45 X 7	21
Total			733 kgf

FIGURA C.18 – Resumo da armação em tela da laje do sistema estrutural constituído por laje lisa nervurada executada com fôrmas de polipropileno

