



**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Escola Politécnica**  
**Programa de Projeto de Estruturas**

Douglas Emanuel Nascimento de Oliveira

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA**  
**LAJES LISAS COM GRANDES VÃOS**



UFRJ

Douglas Emanuel Nascimento de Oliveira

## **ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA LAJES LISAS COM GRANDES VÃOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientadoras:

Flávia Moll de Souza Judice, D. Sc. e  
Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro, D. Sc.

Rio de Janeiro

2020

Oliveira, Douglas Emanuel Nascimento de

Análise Comparativa de Soluções Estruturais para Lajes Lisas com Grandes Vãos / Douglas Emanuel Nascimento de Oliveira – 2020.  
f.: 177; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estrutura) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2020.

Orientadoras: Flávia Moll de Souza Judice e Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro.

1. Laje Nervurada. 2. Laje *BubbleDeck*. 3. Laje Protendida. I. Judice, Flávia Moll de Souza e Perlingeiro, Mayra Soares Pereira Lima. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Análise Comparativa de Soluções Estruturais para Lajes Lisas com Grandes Vãos.



## ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA LAJES LISAS COM GRANDES VÃOS

Douglas Emanuel Nascimento de Oliveira

Dissertação apresentada ao Corpo Docente do Programa de Projeto de Estruturas da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela banca:

---

Flávia Moll de Souza Judice, D. Sc., Escola Politécnica/UFRJ

---

Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro, D. Sc., Escola de Engenharia/UFRJ

---

Julio Jerônimo Holtz Silva Filho, D. Sc., Escola Politécnica/UFRJ

---

Izabella Pessoa de Castro, D. Sc., Escola de Engenharia/UFRJ

---

Robson Luiz Gaiofatto, Ph. D., Universidade Católica de Petrópolis

Rio de Janeiro

2020

*O espírito da fé é essencial para que você viva  
uma nova vida e progrida. Não o deixe nem o  
troque por outro, mas seja aquilo que Deus  
idealizou e te capacitou para ser: mais que  
vencedor em Cristo Jesus!*

Mauricio Fragale

Dedicado a Gabriela, minha querida filha.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela capacitação, resiliência e fé para tornar esse sonho uma realidade.

À minha esposa Camila, por estar ao meu lado nessa jornada e me apoiado nos momentos mais difíceis dos últimos anos.

À minha família, por ter sido a base de tudo que já alcancei e a razão para seguir em frente.

Às professoras Flávia Moll e Mayra Perlingeiro, pela orientação, disponibilidade e grande ajuda para tornar possível a realização deste trabalho.

Aos demais professores do Programa de Projeto de Estruturas da Escola Politécnica da UFRJ, em especial aos professores Sergio Hampshire e Gilberto Ellwanger, pelo incentivo e aprendizado no início do curso.

Ao escritório MD Engenheiros Associados, por ter disponibilizado dados de projetos executivos em lajes *BubbleDeck* e nervuradas protendidas.

A todos amigos que fiz no PPE, especialmente ao colega Rodrigo Affonso por ter contribuído com parte fundamental da bibliografia para realização desta Dissertação.

## RESUMO

OLIVEIRA, Douglas Emanuel Nascimento de. **Análise Comparativa de Soluções Estruturais para Lajes Lisas com Grandes Vãos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2020.

A busca por soluções econômicas e que otimizem espaços tem sido um dos paradigmas da construção de edificações. Nesse contexto, a supressão das vigas e o aumento dos vãos livres são alternativas para promover resultados competitivos. No entanto, o emprego de tecnologias que promovam a redução do peso próprio estrutural das lajes é fundamental para que se obtenham respostas satisfatórias. Isso se torna possível a partir da retirada do concreto das regiões de menor sollicitação, mantendo-se a rigidez necessária do pavimento, tal como nas lajes nervuradas e nas lajes *BubbleDeck*. As lajes nervuradas, obtidas a partir da utilização de caixas plásticas ou material inerte, apresentam comportamento similar ao de vigas na flexão, porém mantendo o comportamento de placa. Já a tecnologia *BubbleDeck* emprega esferas vazias que possibilitam a redução de aproximadamente 35% do peso próprio da laje. A protensão de lajes é outra técnica que vem ganhando espaço no Brasil com grandes benefícios, como a redução das flechas, limitação da fissuração e menor consumo de aço. Diante deste cenário, foi realizado estudo comparativo do desempenho em serviço e dos custos associados às soluções em laje nervurada em concreto armado e em concreto protendido, além da laje *BubbleDeck* em concreto armado, para um pavimento de edifício garagem com espaçamento máximo entre eixos de pilares de 8,00 m, 10,50 m e 13,50 m. Os resultados obtidos indicaram que a laje nervurada protendida é a solução mais econômica para os vãos estudados, além de apresentar o melhor comportamento em serviço.

Palavras-chave: Laje nervurada; Laje *BubbleDeck*; Laje protendida.



## ABSTRACT

OLIVEIRA, Douglas Emanuel Nascimento de. **Comparative Analysis of Structural Solutions for Flat Slabs with Large Spans**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2020.

The search for economic solutions to optimize spaces has been one of the paradigms of buildings construction. In this context, the suppression of beams and the increase in free spans are alternatives to promote competitive results. However, the use of technologies that promote the reduction of structural self-weight is essential for obtaining satisfactory responses. This is possible by removing the concrete from the least requested regions, maintaining the required floor stiffness, as in the waffle slabs and BubbleDeck slabs. The waffle slabs, obtained from the use of plastic boxes or inert material, present a behavior similar to beams in bending, but maintaining the behavior of slab. BubbleDeck technology, on the other hand, uses empty spheres for enable the reduction of approximately 35% of the slabs self-weight. The prestressed slabs is another technique that has been gaining space in Brazil with great benefits, such as the reduction of deformations, limitation of cracking and lower consumption of steel. Given this scenario, a comparative study was carried out between reinforced and prestressed concrete waffle slabs, in addition to the BubbleDeck slab, comparing the behavior in service and the costs of the solution, for a garage building floor with maximum span between pillars of 8,00 m, 10,50 m and 13,50 m. The results obtained indicated that the prestressed waffle slab is the most economical solution for the studied spans, in addition to presenting the best behavior in service.

Keywords: Waffle slab; BubbleDeck slab; Prestressed slab.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	MOTIVAÇÃO	2
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	4
2.2	LAJES MACIÇAS SOBRE VIGAS	5
2.3	LAJES LISAS E COGUMELO DE CONCRETO ARMADO	6
2.3.1	VANTAGENS E DESVANTAGENS	7
2.3.2	MÉTODOS DE CÁLCULO	8
2.4	LAJES LISAS NERVURADAS	12
2.4.1	VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS LAJES NERVURADAS	13
2.4.2	PRÉ-DIMENSIONAMENTO	14
2.5	LAJES BUBBLEDECK	14
2.5.1	VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS LAJES BUBBLEDECK	19
2.5.2	CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO	20
2.6	LAJES PROTENDIDAS	20
2.6.1	VANTAGENS E DESVANTAGENS	21
2.6.2	TIPOS DE PROTENSÃO EM LAJES	22
2.6.3	PRINCIPAIS SISTEMAS ESTRUTURAIS	24
2.6.4	PRÉ-DIMENSIONAMENTO	26
2.6.5	PERDAS DE PROTENSÃO	26
2.7	PUNÇÃO NAS LAJES LISAS	27
<b>3</b>	<b>PRESCRIÇÕES NORMATIVAS</b>	<b>29</b>
3.1	PRESCRIÇÕES GERAIS	29
3.1.1	ARMADURA MÍNIMA E MÁXIMA DE FLEXÃO	29
3.1.2	ESPAÇAMENTO E DIÂMETROS MÁXIMOS DAS BARRAS	31
3.1.3	CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL	31

3.1.4	COBRIMENTO DAS ARMADURAS .....	32
<b>3.2</b>	<b>LAJES NERVURADAS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>LAJES BUBBLEDECK.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>LAJES LISAS PROTENDIDAS.....</b>	<b>36</b>
3.4.1	DIMENSÕES LIMITES .....	36
3.4.2	DISTRIBUIÇÃO DOS CABOS EM PLANTA .....	36
3.4.3	TRAÇADO VERTICAL DOS CABOS .....	38
3.4.4	VALORES LIMITES DA FORÇA NA ARMADURA DE PROTENSÃO .....	39
<b>3.5</b>	<b>ESTADO-LIMITE ÚLTIMO (ELU) .....</b>	<b>39</b>
3.5.1	LAJES DE CONCRETO ARMADO.....	41
3.5.2	LAJES DE CONCRETO PROTENDIDO .....	43
<b>3.6</b>	<b>ESTADOS-LIMITES DE SERVIÇO (ELS).....</b>	<b>45</b>
3.6.1	ESTADO-LIMITE DE FORMAÇÃO DE FISSURAS (ELS-F) .....	46
3.6.2	ESTADO-LIMITE DE ABERTURA DE FISSURAS (ELS-W) .....	47
3.6.3	ESTADO-LIMITE DE DEFORMAÇÃO EXCESSIVA (ELS-DEF) .....	48
3.6.4	ESTADO-LIMITE DE DESCOMPRESSÃO (ELS-D) .....	51
3.6.5	ESTADO-LIMITE DE DESCOMPRESSÃO PARCIAL (ELS-DP).....	51
3.6.6	ESTADO-LIMITE DE COMPRESSÃO EXCESSIVA (ELS-CE).....	52
3.6.7	ESTADO-LIMITE DE VIBRAÇÕES EXCESSIVAS (ELS-VE) .....	53
<b>3.7</b>	<b>COMBINAÇÕES DE AÇÕES .....</b>	<b>53</b>
3.7.1	COMBINAÇÕES ÚLTIMAS .....	54
3.7.2	COMBINAÇÕES DE SERVIÇO .....	58
<b>3.8</b>	<b>CONTROLE DA FISSURAÇÃO E PROTEÇÃO DAS ARMADURAS .....</b>	<b>59</b>
<b>3.9</b>	<b>PUNÇÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>3.10</b>	<b>COLAPSO PROGRESSIVO .....</b>	<b>62</b>
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DO PROJETO .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>PROJETO A – VÃO DE 8,00 M.....</b>	<b>66</b>
4.2.1	PROJETO A1 – LAJE NERVURADA EM CONCRETO ARMADO.....	66
4.2.2	PROJETO A2 – LAJE NERVURADA PROTENDIDA .....	71
4.2.3	PROJETO A3 – LAJE <i>BUBBLEDECK</i> .....	81
<b>4.3</b>	<b>PROJETO B – VÃO DE 10,50 M .....</b>	<b>85</b>
4.3.1	PROJETO B1 – LAJE NERVURADA EM CONCRETO ARMADO.....	86

4.3.2	PROJETO B2 – LAJE NERVURADA PROTENDIDA.....	90
4.3.3	PROJETO B3 – LAJE <i>BUBBLEDECK</i> .....	99
<b>4.4</b>	<b>PROJETO C – VÃO DE 13,50 M .....</b>	<b>103</b>
4.4.1	PROJETO C1 – LAJE NERVURADA EM CONCRETO ARMADO .....	104
4.4.2	PROJETO C2 – LAJE NERVURADA PROTENDIDA.....	109
4.4.3	PROJETO C3 – LAJE <i>BUBBLEDECK</i> .....	117
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>122</b>
<b>5.1</b>	<b>ANÁLISE DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS .....</b>	<b>122</b>
5.1.1	FLECHAS .....	122
5.1.2	CONSUMO DE CONCRETO E ESPESSURA MÉDIA .....	123
5.1.3	CONSUMO DE AÇO .....	125
5.1.4	ESTIMATIVA DE CUSTOS .....	127
5.1.5	COMPARAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS.....	129
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>136</b>
<b>6.1</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>138</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>140</b>
	<b>SÍTIOS DE INTERNET.....</b>	<b>144</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>145</b>
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>155</b>
	<b>ANEXO C .....</b>	<b>175</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistema estrutural convencional de uma edificação (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2007).	4
Figura 2.2: Perspectiva de um painel de laje sem vigas (CARVALHO e PINHEIRO, 2009).	5
Figura 2.3: Exemplo de laje cogumelo e principais tipos de capitéis (FIGUEIREDO FILHO, 1989).	6
Figura 2.4: Esquema de ruptura por punção (DONIN, 2007).	6
Figura 2.5: Momentos fletores e divisão dos painéis para uso do método direto (CARVALHO e PINHEIRO, 2009).	9
Figura 2.6: Faixas de laje para distribuição dos esforços nos pórticos múltiplos (ABNT NBR 6118, 2014).	11
Figura 2.7: Pilar equivalente (ACI-318, 2014).	11
Figura 2.8: Laje nervurada: vistas superior e inferior (disponível em <a href="http://www.atex.com.br">www.atex.com.br</a> ).	13
Figura 2.9: Composição da laje <i>BubbleDeck</i> (Adaptado de CHURAKOV, 2014).	15
Figura 2.10: Seção transversal esquemática e solicitações na laje <i>BubbleDeck</i> (Adaptado de CHURAKOV, 2014).	15
Figura 2.11: Módulo de painel de armadura para laje <i>BubbleDeck</i> (BLUBBLEDECK DO BRASIL, 2019).	16
Figura 2.12: Posicionamento de pré-laje <i>BubbleDeck</i> (BUBBLEDECK DO BRASIL, 2019).	16
Figura 2.13: Painel acabado de laje <i>BubbleDeck</i> (BUBBLEDECK DO BRASIL, 2019).	16
Figura 2.14: a) Projeção da área sem esferas sobre pilar; b) Armadura de reforço ao cisalhamento (CALIN E ASAVOAIE, 2009).	17
Figura 2.15: Cordoalha engraxada e plastificada com sete fios (EMERICK, 2005).	22
Figura 2.16: Laje lisa (EMERICK, 2005).	24
Figura 2.17: Laje cogumelo (EMERICK, 2005).	
Figura 2.18: Laje com viga faixa (EMERICK, 2005).	24
Figura 2.19: Laje nervurada com faixas protendidas (EMERICK, 2005).	25
Figura 2.20: Laje nervurada com trechos maciços sobre os pilares (EMERICK, 2005).	25
Figura 2.21: Definição das faixas de projeto a partir das linhas de cortante nulo. (LOUREIRO, 2006).	26

Figura 2.22: Perspectivas esquemáticas de superfícies de ruína devidas à punção em ligações laje-pilar em lajes lisas (CARVALHO e PINHEIRO, 2009). .....	28
Figura 3.1: Seção típica de uma laje nervurada. ....	34
Figura 3.2: Largura para a distribuição de cabos nas faixas dos pilares segundo a ABNT NBR 6118, 2014 (EMERICK, 2005). ....	37
Figura 3.3: Distribuição dos cabos em planta (Adaptado de ACI 423.3R-96). ....	37
Figura 3.4: Traçado vertical dos cabos de protensão (EMERICK, 2005). ....	38
Figura 3.5: Esforços resistentes em uma seção de concreto armado fletida (CLÍMACO, 2005). ....	41
Figura 3.6: Esforços resistentes em uma seção de concreto protendido fletida (EMERICK, 2005). ....	43
Figura 3.7: ELS-DP(ABNT NBR 6118, 2014). ....	51
Figura 3.8: Perímetro crítico em pilares internos (ABNT NBR 6118, 2014). ....	61
Figura 3.9: Efeito favorável dos cabos inclinados (ABNT NBR 6118, 2014). ....	62
Figura 3.10: Armadura contra colapso progressivo (ABNT NBR 6118, 2014). ....	62
Figura 4.1: Planta baixa do pavimento térreo (medidas em cm). ....	64
Figura 4.2: Corte vertical do edifício (medidas em cm). ....	64
Figura 4.3: Projeto A1 - Planta de forma (dimensões em cm). ....	66
Figura 4.4: Projeto A1 - Seção da laje nervurada. ....	67
Figura 4.5: Projeto A1 - Momento de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra). ....	68
Figura 4.6: Projeto A1 - Flechas totais (cm) em tempo infinito. ....	69
Figura 4.7: Projeto A1 – Barras em vermelho com indicação de microfissuras. ....	70
Figura 4.8: Projeto A1 – Participação dos serviços no custo direto total. ....	70
Figura 4.9: Projeto A2 - Planta de forma (dimensões em cm). ....	72
Figura 4.10: Projeto A2 - Seção da laje nervurada (dimensões em cm). ....	72
Figura 4.11: Projeto A2 – Distribuição das cordoalhas de protensão em planta. ....	73
Figura 4.12: Projeto A2 – Vista espacial das cordoalhas de protensão. ....	74
Figura 4.13: Projeto A2 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra). .	75
Figura 4.14: Projeto A2 – Momentos de flexão devidos às forças de protensão (x10 kN·m/barra). ....	75
Figura 4.15: Projeto A2 - Diagrama de tensões (combinação frequente). ....	76
Figura 4.16: Projeto A2 - Diagrama de tensões (ato da protensão). ....	76
Figura 4.17: Projeto A2 - Armadura passiva calculada (cm <sup>2</sup> /m). ....	77
Figura 4.18: Projeto A2 - Força de protensão ao longo do cabo. ....	77
Figura 4.19: Projeto A2 – Flechas imediatas (cm). ....	78
Figura 4.20: Projeto A2 – Flechas totais (cm) em tempo infinito. ....	79
Figura 4.21: Projeto A2 – Participação dos serviços no custo direto total. ....	79

Figura 4.22: Projeto A3 - Planta de forma (dimensões em cm). .....	81
Figura 4.23: Projeto A3 - Seção transversal da laje <i>BubbleDeck</i> (dimensões em cm). 81	
Figura 4.24: Projeto A3 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra). . 82	
Figura 4.25: Projeto A3 – Flechas totais (cm) em tempo infinito. .... 83	
Figura 4.26: Projeto A3 – Barras em vermelho com indicação de microfissuras. .... 84	
Figura 4.27: Projeto A3 – Participação dos serviços no custo direto total. .... 84	
Figura 4.28: Projeto B1 - Planta de forma (dimensões em cm). .... 86	
Figura 4.29: Projeto B1 - Seção da laje nervurada (dimensões em cm). .... 87	
Figura 4.30: Projeto B1 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra) .. 87	
Figura 4.31: Projeto B1 – Flechas totais (cm) em tempo infinito. .... 88	
Figura 4.32: Projeto B1 – Barras em vermelho com indicação de microfissuras. .... 89	
Figura 4.33: Projeto B1 – Participação dos serviços no custo direto total ..... 89	
Figura 4.34: Projeto B2 – Planta de forma (dimensões em cm). .... 91	
Figura 4.35: Projeto B2 - Seção de laje nervurada (dimensões em cm). .... 91	
Figura 4.36: Projeto B2 – Distribuição das cordoalhas de protensão em planta. .... 92	
Figura 4.37: Projeto B2 – Vista espacial das cordoalhas de protensão. .... 93	
Figura 4.38: Projeto B2 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra). . 93	
Figura 4.39: Projeto B2 - Momentos de flexão devidos às forças de protensão (x10 kN·m/barra). .... 94	
Figura 4.40: Projeto B2 - Diagrama de tensões (combinação frequente). .... 94	
Figura 4.41: Projeto B2 - Diagrama de tensões (ato da protensão). .... 95	
Figura 4.42: Projeto B2 - Armadura passiva calculada (cm <sup>2</sup> /m). .... 95	
Figura 4.43: Projeto B2 - Força de protensão ao longo da RPU. .... 96	
Figura 4.44: Projeto B2 – Flechas imediatas (cm). .... 97	
Figura 4.45: Projeto B2 – Flechas totais (cm) em tempo infinito. .... 97	
Figura 4.46: Projeto B2 – Participação dos serviços no custo direto total. .... 99	
Figura 4.47: Projeto B3 - Planta de forma (dimensões em cm). .... 99	
Figura 4.48: Projeto B3 – Seção transversal da laje <i>BubbleDeck</i> (dimensões em cm). ..... 100	
Figura 4.49: Projeto B3 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra). 100	
Figura 4.50: Projeto B3 – Flechas totais (cm) em tempo infinito. .... 101	
Figura 4.51: Projeto B3 - Barras em vermelho com indicação de microfissuras. .... 102	
Figura 4.52: Projeto B3 – Participação dos serviços no custo direto total. .... 102	
Figura 4.53: Projeto C1 - Planta de forma (dimensões em cm). .... 104	
Figura 4.54: Projeto C1 - Seção da laje nervurada (dimensões em cm). .... 105	
Figura 4.55: Projeto C1 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra). 105	
Figura 4.56: Projeto C1 – Flechas totais (cm) em tempo infinito. .... 106	

Figura 4.57: Projeto C1 – Barras em vermelho com indicação de microfissuras.....	107
Figura 4.58: Projeto C1 - Participação dos serviços no custo direto total.....	108
Figura 4.59: Projeto C2 - Planta de forma (dimensões em cm).....	109
Figura 4.60: Projeto C2 – Distribuição das cordoalhas de protensão em planta.....	110
Figura 4.61: Projeto C2 - Vista espacial das cordoalhas de protensão. ....	110
Figura 4.62: Projeto C2 - Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN.m/barra). ....	111
Figura 4.63: Projeto C2 - Momentos de flexão devidos às forças de protensão (x10 kN.m/barra). ....	111
Figura 4.64: Projeto C2 - Diagrama de tensões (combinação frequente).....	112
Figura 4.65: Projeto C2 - Diagrama de tensões (ato da protensão). ....	112
Figura 4.66: Projeto C2 - Armadura passiva calculada (cm <sup>2</sup> /m). ....	113
Figura 4.67: Projeto C2 - Força de protensão ao longo da RPU. ....	113
Figura 4.68: Projeto C2 - Flechas imediatas (cm). ....	114
Figura 4.69: Projeto C2 - Flechas totais (cm) em tempo infinito. ....	115
Figura 4.70: Projeto C2 - Participação dos serviços no custo direto total.....	115
Figura 4.71: Projeto C3 - Planta de forma (dimensões em cm).....	117
Figura 4.72: Projeto C3 - Seção transversal da laje <i>BubbleDeck</i> (dimensões em cm). .....	117
Figura 4.73: Projeto C3 - Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN.m/barra). ....	118
Figura 4.74: Projeto C3 - Flechas totais (cm) em tempo infinito. ....	119
Figura 4.75: Projeto C3 - Barras em vermelho com indicação de microfissuras.....	120
Figura 4.76: Projeto C3 - Participação dos serviços no custo direto total.....	120
Figura 5.1: Comparativo das flechas máximas ao longo do tempo. ....	123
Figura 5.2: Consumos de concreto. ....	124
Figura 5.3: Espessuras médias.....	125
Figura 5.4: Consumos de aço. ....	125
Figura 5.5: Comparativo das estimativas de custos unitários.....	128
Figura 5.6: Comparativo dos custos percentuais dos materiais e serviços.....	129
Figura 5.7: Comparativo de espessuras médias (cm) de lajes nervuradas em concreto armado. ....	130
Figura 5.8: Comparativo dos consumos de aço (kg/m <sup>2</sup> ) de lajes nervuradas em concreto armado. ....	130
Figura 5.9: Comparativo de espessuras médias (cm) das lajes nervuradas em concreto protendido.....	131
Figura 5.10: Comparativo dos consumos de aço passivo (kg/m <sup>2</sup> ) de lajes nervuradas protendidas.....	132



Figura 5.11: Comparativo dos consumos de aço de protensão (kg/m <sup>2</sup> ) de lajes nervuradas protendidas. ....	132
Figura 5.12: Comparativo de espessuras médias (cm) de lajes <i>BubbleDeck</i> . ....	133
Figura 5.13: Comparativo dos consumos de aço (kg/m <sup>2</sup> ) de lajes <i>BubbleDeck</i> . ....	134
Figura 5.14: Linhas de tendência de espessuras médias. ....	134
Figura 5.15: Linhas de tendência de consumos de aço. ....	135
Figura 5.16: Tendência de custos unitário de cada solução. ....	135

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1: Projeto A1 - Propriedades da seção transversal.....	67
Tabela 4.2: Projeto A1 - Quantitativos de aço, forma e concreto. ....	68
Tabela 4.3: Projeto A1 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo. ....	71
Tabela 4.4: Projeto A2 - Propriedades da seção transversal.....	73
Tabela 4.5: Projeto A2 – Quantitativos de aço, forma e concreto.....	78
Tabela 4.6: Projeto A2 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo. ....	80
Tabela 4.7: Projeto A3 – Quantitativos de aço, forma e concreto.....	83
Tabela 4.8: Projeto A3 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo. ....	85
Tabela 4.9: Projeto B1 - Propriedades da seção transversal.....	87
Tabela 4.10: Projeto B1 – Quantitativos de aço, forma e concreto.....	88
Tabela 4.11: Projeto B1 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo. ....	90
Tabela 4.12: Projeto B2 - Propriedades da seção transversal.....	92
Tabela 4.13: Projeto B2 – Quantitativos de aço, forma e concreto.....	96
Tabela 4.14: Projeto B2 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo. ....	98
Tabela 4.15: Projeto B3 – Quantitativos de aço, forma e concreto.....	101
Tabela 4.16: Projeto B3 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo. ....	103
Tabela 4.17: Projeto C1 - Propriedades da seção transversal. ....	105
Tabela 4.18: Projeto C1 – Quantitativos de aço, forma e concreto.....	106
Tabela 4.19: Projeto C1 – Estimativa de custos para laje do pavimento térreo.....	108
Tabela 4.20: Projeto C2 - Quantitativos de aço, forma e concreto. ....	114
Tabela 4.21: Projeto C2 - Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.....	116
Tabela 4.22: Projeto C3 - Quantitativos de aço, forma e concreto. ....	118
Tabela 4.23: Projeto C3 - Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.....	121
Tabela 5.1: Comparativo das flechas máximas ao longo do tempo.....	122
Tabela 5.2: Comparativo do consumo de concreto. ....	124
Tabela 5.3: Consumos de aço. ....	125
Tabela 5.4: Consumos de aço totais.....	126
Tabela 5.5: Comparativo dos consumos totais de aço. ....	126
Tabela 5.6: Estimativa de custo total da estrutura da laje. ....	127
Tabela 5.7: Comparativo da estimativa de custo unitário. ....	127
Tabela 5.8: Dados de projetos de lajes nervuradas protendidas (MD Engenheiros Associados).....	131

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Comparação entre laje maciças e lajes <i>BubbleDeck</i> (TEJA <i>et al</i> , 2012)..	18
Quadro 2.2: Especificações técnicas para dimensionamento de lajes <i>BubbleDeck</i> (BUBBLEDECK INTERNACIONAL, 2017).....	20
Quadro 3.1: Valores mínimos para armaduras passivas aderentes. (ABNT NBR 6118:2014) .....	30
Quadro 3.2: Taxas mínimas de armadura de flexão em função do $f_{ck}$ (ABNT NBR 6118:2014) .....	30
Quadro 3.3: Classes de agressividade ambiental (ABNT NBR 6118, 2014). .....	32
Quadro 3.4: Cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$ (ABNT NBR 6118, 2014). .....	33
Quadro 3.5: Vãos usuais para lajes <i>BubbleDeck</i> e sua carga permanente equivalente (Freire, 2009).....	36
Quadro 3.6: Limites de abertura de fissuras para estruturas de concreto armado (ABNT NBR 6118, 2014). .....	47
Quadro 3.7: Limites para deslocamentos considerando o efeito de aceitabilidade sensorial (ABNT NBR 6118, 2014). .....	49
Quadro 3.8: Frequência crítica ( $f_{crit}$ ) para vibrações verticais para alguns casos (ABNT NBR 6118, 2014). .....	53
Quadro 3.9: Coeficientes de ponderação para ações permanentes consideradas separadamente (ABNT NBR 8681, 2003).....	55
Quadro 3.10: Coeficientes de ponderação para ações permanentes agrupadas (ABNT NBR 8681, 2003). .....	56
Quadro 3.11: Coeficientes de ponderação para efeitos de recalque de apoio e de retração de materiais (ABNT NBR 8681, 2003). .....	56
Quadro 3.12: Coeficientes de ponderação para ações variáveis consideradas separadamente (ABNT NBR 8681, 2003). .....	57
Quadro 3.13: Coeficientes de ponderação para ações variáveis consideradas conjuntamente (ABNT NBR 8681, 2003). .....	57
Quadro 3.14: Coeficientes de ponderação das ações nas combinações últimas (ABNT NBR 6118, 2014). .....	57
Quadro 3.15: Valores dos fatores de combinação ( $\Psi_0$ ) e de redução ( $\Psi_1$ e $\Psi_2$ ) (ABNT NBR 8681, 2003) .....	59
Quadro 3.16: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental (ABNT NBR 6118, 2014). .....	60

Quadro 4.1: Resumo dos casos analisados..... 65

# 1 INTRODUÇÃO

---

Os últimos anos não foram fáceis para a construção civil no Brasil. De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), desde o segundo trimestre de 2013 a queda no Produto Interno Bruto (PIB) do setor tem se intensificado, atingindo redução de cerca de 15% ao final de 2018.

Apesar da instabilidade política que ainda se arrasta atualmente, especialistas indicam que a retomada da economia já teve início, porém de forma lenta e gradual, e as empresas que conseguirem investir em qualidade, produtividade e inovação sairão na frente.

Diante desse cenário, fica evidente a necessidade de implementação de novas técnicas construtivas que promovam a eficiência, a racionalidade e a economia ao processo produtivo da construção civil. O que se vê no mercado brasileiro de edificações, no entanto, é o prevalecimento de processos construtivos artesanais que pouco evoluíram ao longo dos anos, como as estruturas formadas por vigas e lajes de concreto armado.

A busca por soluções que eliminassem vigas e vencessem vãos maiores ganhou o mundo na segunda metade do século XX. O desenvolvimento da tecnologia da protensão, que se estabeleceu ao final da 2ª Guerra Mundial, abriu o mercado americano da construção civil para o uso de lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas e plastificadas nos anos de 1960. Na Europa, no início dos anos de 1990, o engenheiro dinamarquês Jorgen Breuning apresentou um novo sistema que conquistou diversos prêmios de sustentabilidade e inovação: a tecnologia *BubbleDeck*. Esse sistema, de menor peso e elevada rigidez, conta com elementos esféricos vazios dentro da laje, ocupando o espaço do concreto sem função estrutural, resultando em economia de formas e materiais.

No Brasil, o sistema *BubbleDeck* foi introduzido de maneira experimental em uma obra comercial em Salvador, na Bahia, no ano de 2009. Outras grandes obras como o Centro Administrativo do Distrito Federal (CADF) e o edifício garagem do Aeroporto Internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro, também fizeram uso desse sistema estrutural, no entanto, ainda pouco difundido no país.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

No mercado brasileiro de edificações, ainda prevalecem estruturas formadas por vigas e lajes que, na maioria dos casos, funcionam bem devido à larga aplicabilidade em vãos pequenos (até cerca de 6 m) sob ação de cargas não muito elevadas (da ordem de até 3 kN/m<sup>2</sup>). Por outro lado, para grandes vãos, as lajes maciças apoiadas sobre vigas podem ser antieconômicas, pois a espessura média do pavimento aumenta significativamente para atender aos critérios de deslocamentos em serviço.

Na ocorrência de vãos maiores, faz-se necessário o emprego de outras soluções estruturais, tais como as lajes nervuradas e as lajes *BubbleDeck*. A utilização da protensão em lajes lisas de concreto, por sua vez, possibilita o aumento da sua capacidade resistente e, conseqüentemente, dos vãos a vencer.

Diante disso, surge a necessidade de se investigar qual a solução estrutural de lajes mais adequada para determinado pavimento tendo em vista parâmetros como racionalidade do processo construtivo, arquitetura, cargas de utilização, tamanho dos vãos, desempenho em serviço, disponibilidade de equipamentos, materiais e mão de obra e custos diretos.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

O avanço tecnológico na construção civil é fundamental para que se vençam os obstáculos que dificultam o crescimento da engenharia de edificações no Brasil. O emprego de lajes lisas protendidas com cordoalhas engraxadas ainda é regional, com grande aplicação nos estados do Ceará e do Espírito Santo, e com inexpressiva utilização no sul do país. O sistema *BubbleDeck*, por sua vez, teve seu uso em pouquíssimas obras no território nacional, enquanto em alguns países europeus tem sido empregado em diferentes tipos de construções de múltiplos pavimentos.

A prática profissional de projeto, muitas vezes, não possibilita uma análise mais detalhada das diversas possibilidades de soluções estruturais para lajes sem vigas e com grandes vãos.

O presente trabalho busca, a partir da análise comparativa em programa computacional, avaliar técnica e economicamente as soluções de edifícios com lajes lisas do tipo nervurada em concreto armado e em concreto protendido e do tipo *BubbleDeck*, aplicadas a um estudo de caso, fornecendo, assim, parâmetros para projetistas e construtores durante o estudo da melhor solução para um caso real.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em seis capítulos.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica dos conceitos fundamentais acerca dos sistemas estruturais, métodos de cálculo e as vantagens e desvantagens de cada tipo de solução empregada.

O capítulo 3 aborda aspectos normativos relacionados ao desempenho em serviço, dimensionamento no Estado Limite Último (ELU) e critérios a serem atendidos pelas soluções estruturais propostas para as lajes.

O capítulo 4, por sua vez, apresenta os modelos computacionais gerados para estudar os diversos sistemas estruturais e os resultados obtidos.

No capítulo 5 são avaliados os resultados obtidos na análise estrutural e no dimensionamento, tais como desempenho em serviço, consumo de materiais e estimativas de custos. Faz-se, também, comparações com os resultados de outros trabalhos.

O capítulo 6 resume as conclusões a partir dos resultados e sugere novas pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Apresentam-se, a seguir, as principais características dos sistemas estruturais de lajes lisas em concreto armado e concreto protendido, bem como os resultados de estudos realizados por outros autores.

### 2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

As placas são estruturas laminares com superfície média plana, solicitadas predominantemente por forças perpendiculares ao seu plano médio. Nas estruturas de concreto, as placas usualmente ganham o nome de lajes (FUSCO, 2013).

Nas estruturas de edifícios, as lajes são os elementos estruturais responsáveis por receber diretamente as ações provenientes do uso e ocupação dos pavimentos, além de resistir às ações do seu peso próprio, de revestimentos e de paredes que se apoiem diretamente nelas.

Nos edifícios de concreto moldado no local, os pavimentos podem ser compostos por um conjunto de lajes apoiando em vigas, ou por uma única laje, sem vigas, apoiando diretamente nos pilares, com ou sem a presença de capitéis. Alternativamente à solução de laje maciça, podem ser utilizadas lajes nervuradas ou lajes *BubbleDeck*, sendo essa última moldada no local ou pré-moldada. Além desses tipos de lajes, há também soluções pré-moldadas/mistas, como as lajes treliçadas, alveolares e *steel-deck*.

Usualmente, os sistemas estruturais empregados são de lajes que se apoiam em vigas e que transmitem as solicitações aos pilares e estes às fundações, conforme apresentado na Figura 2.1.

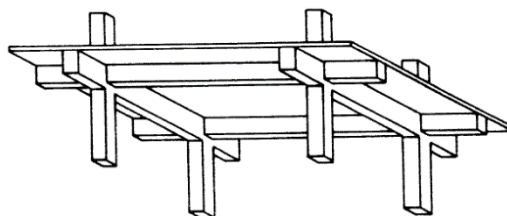


Figura 2.1: Sistema estrutural convencional de uma edificação (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2007).

Contudo, tem sido cada vez mais recorrente a eliminação das vigas, buscando soluções racionalizadas e econômicas, em que as lajes transmitem as solicitações diretamente aos pilares, com rigidez adequada (Figura 2.2).



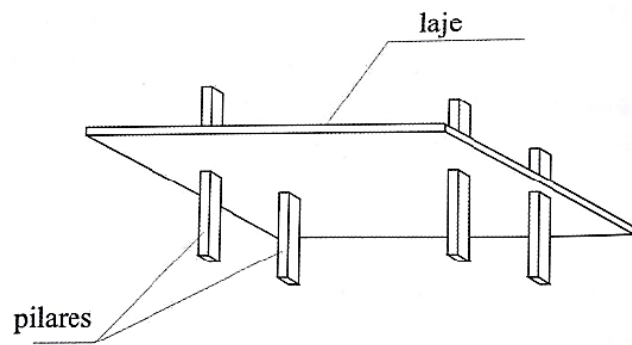


Figura 2.2: Perspectiva de um painel de laje sem vigas (CARVALHO e PINHEIRO, 2009).

Para CARVALHO e PINHEIRO (2009), este sistema de lajes sem vigas apresenta uma série de vantagens em relação ao convencional, que basicamente resulta em diminuição do tempo de execução, melhora na qualidade e redução do custo da estrutura, dentre estas vantagens:

- simplificação das formas, armaduras e do cimbramento;
- simplificação da concretagem;
- redução da altura total do edifício;
- simplificação das instalações prediais.

No Brasil, a utilização de lajes lisas tem aumentado em função das vantagens citadas, como também em decorrência do desenvolvimento tecnológico dos materiais e do surgimento de novas técnicas construtivas.

## 2.2 LAJES MACIÇAS SOBRE VIGAS

As lajes maciças são placas em que a sua espessura é totalmente preenchida com concreto. Podem apresentar bordos livres, simplesmente apoiados ou engastados, a depender da presença ou não de vigas e da presença de lajes adjacentes.

Esse sistema confere à estrutura razoável rigidez à flexão e pequenas deformações devido à presença de grande quantidade de vigas. Especialmente a formação de pórticos proporciona elevada estabilidade à edificação.

Para grandes vãos (acima de 7 m), esse sistema estrutural pode ser desvantajoso, já que as lajes passam a necessitar de espessuras cada vez maiores

para vencer os vãos. Isso resulta no aumento do consumo de concreto, inviabilizando economicamente o sistema.

Além disso, a presença das vigas requer formas recortadas, elevando o consumo de madeira e diminuindo a produtividade em campo.

## 2.3 LAJES LISAS E COGUMELO DE CONCRETO ARMADO

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), quando as lajes se apoiam diretamente nos pilares, estas denominam-se lajes lisas, se inexistem capitéis, ou lajes-cogumelos, quando empregados capitéis.

Os capitéis consistem no acréscimo da espessura das lajes na região de ligação com os pilares, que tem por objetivo absorver as elevadas tensões de cisalhamento que ocorrem nessas regiões, e que podem levar à ruína, caracterizando o fenômeno da punção. Na Figura 2.3 pode ser observado um tipo de laje-cogumelo.

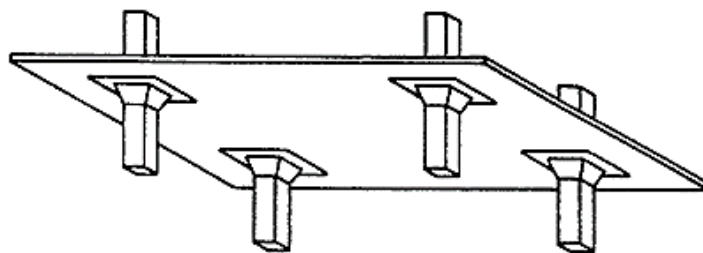


Figura 2.3: Exemplo de laje cogumelo e principais tipos de capitéis (FIGUEIREDO FILHO, 1989).

A ruptura por punção é frágil e abrupta. O fenômeno se agrava quando há transferência de momentos fletores da laje para o pilar, ou em pilares posicionados nas bordas e nos cantos da laje.

A Figura 2.4 ilustra o modo de ruptura por punção na região de ligação laje-pilar.

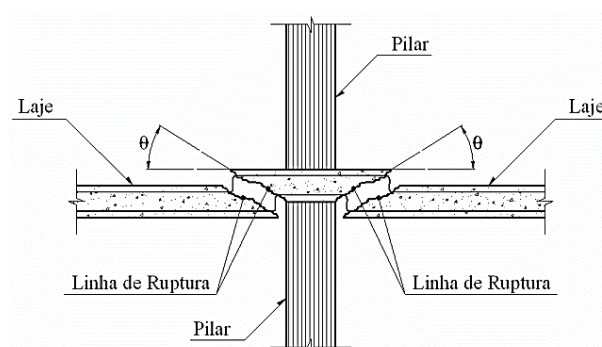


Figura 2.4: Esquema de ruptura por punção (DONIN, 2007).

Segundo FIGUEIREDO FILHO (1989), geralmente procura-se evitar o uso de capitéis de modo a se obter tetos lisos e, como consequência, simplificação das formas.

### 2.3.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Branco (1989) apresenta uma série de vantagens das lajes sem vigas em relação às lajes maciças:

a) Aspectos construtivos:

- maior simplicidade na execução das formas;
- armaduras mais simples, possibilitando o emprego de telas pré-fabricadas;
- maior facilidade no lançamento, adensamento e desforma do concreto.

b) Aspectos econômicos:

- redução nos custos das formas devido ao menor consumo de material, à simplicidade na execução e ao maior reaproveitamento;
- maior rapidez na obra;
- consumo de aço e concreto próximos dos obtidos com adoção de estrutura convencional.

FIGUEIREDO FILHO (1989) cita como desvantagens da utilização de lajes sem vigas:

- risco de punção das lajes, que pode ser atenuado pela adoção de maior espessura de laje ou capitel e dimensionamento de armadura adequada;
- maiores flechas que a solução de lajes com vigas;
- necessidade de atenção especial à estabilidade global do edifício devido à redução da rigidez causada pela ausência de vigas e, conseqüentemente, de pórticos.

## 2.3.2 MÉTODOS DE CÁLCULO

O método elástico baseado na Teoria das Placas Delgadas geralmente é utilizado para o cálculo deste tipo de laje. Para resolver a equação fundamental são empregados processos numéricos como, por exemplo: diferenças finitas, elementos finitos ou séries trigonométricas para a representação do valor da carga atuante.

Outros processos numéricos são aplicados na análise estrutural das lajes lisas, sendo aqui apresentados o método direto, o de grelhas equivalentes e o de pórticos equivalentes ou múltiplos. Esses são também processos elásticos, uma vez que consideram as relações de linearidade entre ações e solicitações.

O método direto foi introduzido nas prescrições normativas do American Concrete Institute (ACI), especificamente a ACI 318 na primeira metade do século XX, com o nome de método empírico, sendo ainda recomendado como método de análise estrutural pela atual revisão da ACI 318 (item 8.10 da ACI 318:2014).

A partir de 1971, a ACI 318, para superar as restrições do método empírico, propôs a análise elástica pelo método dos Pórticos Equivalentes, que unificou o cálculo para todos os sistemas de lajes em duas direções, com ou sem vigas entre os apoios (item 8.11 da ACI 318:2014).

A ABNT NBR 6118 (2014), no seu item 14.7.8, prevê que a análise estrutural de lajes sem vigas deve ser realizada mediante emprego de procedimento numérico adequado. Nos casos das lajes lisas de concreto armado, a norma brasileira também permite o cálculo das solicitações por processo elástico aproximado a partir de pórticos múltiplos em cada direção. Essa mesma norma, porém, não recomenda o Método Direto para análise estrutural de lajes sem vigas.

### 2.3.2.1 MÉTODO DIRETO

O método direto, conforme previsto no item 8.10 do código ACI 318 (2014), consiste na determinação dos esforços de flexão em um painel de forma simples, sem considerar as dimensões e as cargas dos painéis adjacentes.

A utilização deste método para o cálculo dos momentos na laje envolve três passos básicos:

- Determinação de um momento total de referência  $M_0$ , calculado para cada painel, nas duas direções.

- Transformação do momento  $M_0$  em dois momentos de referência negativos nas seções A e C, nas faces dos apoios, e um positivo na seção B no meio do vão (Figura 2.5).

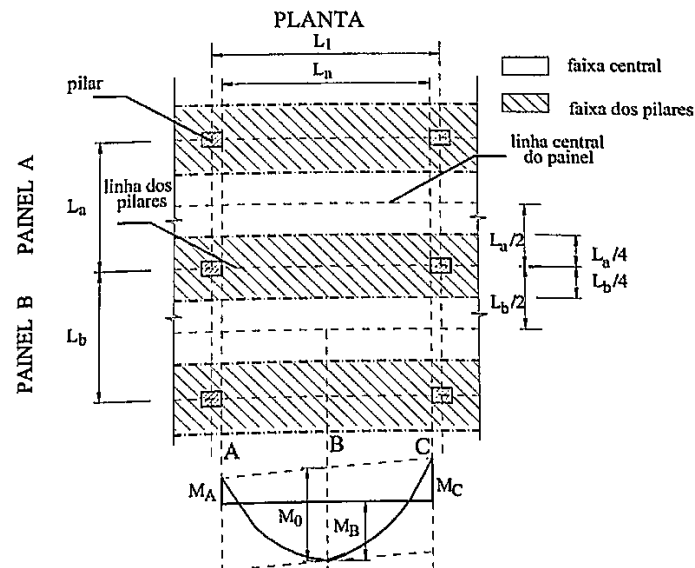


Figura 2.5: Momentos fletores e divisão dos painéis para uso do método direto (CARVALHO e PINHEIRO, 2009).

- Distribuição dos momentos de referência negativos e positivo para as faixas de laje que contêm os pilares e para as faixas centrais de cada painel.

Segundo o ACI 318 (2014), o método deve ser empregado com algumas limitações:

- o pavimento analisado deve ser formado por, pelo menos, três painéis, segundo cada direção;
- os painéis devem ser retangulares e a razão entre o maior e o menor vão teórico de cada painel não deve ser superior a 2;
- vãos teóricos sucessivos, segundo as duas direções ortogonais do plano do pavimento, não podem diferir em mais de um terço do comprimento do maior vão;
- o desalinhamento máximo permitido para um pilar, em relação aos demais, é de 10% do vão teórico, medido em relação ao alinhamento dos demais pilares e segundo a direção em que ocorrer o desalinhamento;

- e) todas as ações devem ser de origem gravitacional, e uniformemente distribuídas em toda a extensão de cada painel. O valor máximo permitido para a carga acidental é limitado ao triplo do valor da carga permanente.

Conforme BRANCO (1989), a utilização deste método em projetos definitivos fica restrita às limitações apresentadas anteriormente. No entanto, no pré-dimensionamento, o método direto pode ser utilizado mesmo que nem todas as recomendações sejam atendidas.

### 2.3.2.2 MÉTODO DOS PÓRTICOS EQUIVALENTES OU MÚLTIPLOS

Consiste na discretização da laje e pilares da estrutura em uma série de pórticos tomados nas duas direções dos planos ortogonais às bordas da laje.

Conforme FIGUEIREDO FILHO (1989), considera-se que os pórticos correspondentes a cada direção são calculados para a totalidade das ações verticais contidas em sua área de influência, agindo no seu plano. Esses pórticos devem ser centrados nas linhas que unem os eixos dos pilares e devem ter largura delimitada pela meia distância entre os painéis adjacentes.

De acordo com LOUREIRO (2006), para o cálculo das solicitações devidas às cargas verticais, os pórticos podem ser considerados isoladamente para cada piso, com os lances superiores e inferiores dos pilares engastados nas suas extremidades, e com o carregamento total atuando, separadamente, em cada uma das direções, pois o mecanismo de ruptura de uma laje apoiada diretamente sobre pilares é semelhante àquele de uma laje armada numa só direção.

A ABNT NBR 6118 (2014) estabelece critérios para a distribuição dos momentos fletores nas faixas de laje, tal que:

- a) 45% dos momentos positivos para as duas faixas internas;
- b) 27,5% dos momentos positivos para cada uma das faixas externas;
- c) 25% dos momentos negativos para as duas faixas internas;
- d) 37,5% dos momentos negativos para cada uma das faixas externas.

A Figura 2.6 ilustra essa situação.

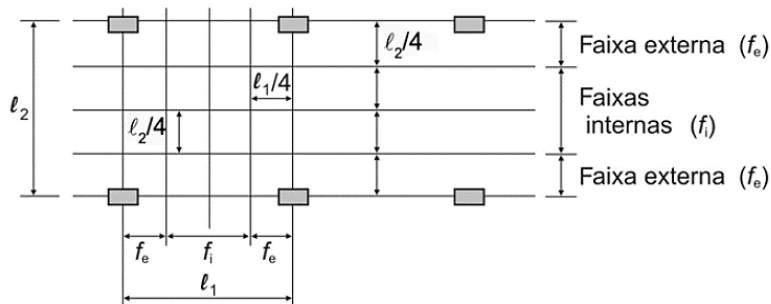


Figura 2.6: Faixas de laje para distribuição dos esforços nos pórticos múltiplos (ABNT NBR 6118, 2014).

O método do pórtico equivalente, segundo a ACI 318 (2014), apresenta algumas diferenças em relação ao método da ABNT NBR 6118 (2014). Os itens 8.10.5, 8.10.5.7 e 8.10.6 da norma americana especificam os percentuais do momento fletor solicitante a serem distribuídos nas faixas externas e internas em função da relação entre os vãos da laje, nas duas direções.

De acordo com o item 8.11.4 da ACI 318:2014, quando as faixas de laje são analisadas separadamente para a ação dos carregamentos gravitacionais, o conceito de um pilar equivalente combinando a rigidez da faixa e de membros transversais, em cada lado do pilar, submetidos à torção, deve ser considerado (Figura 2.7).

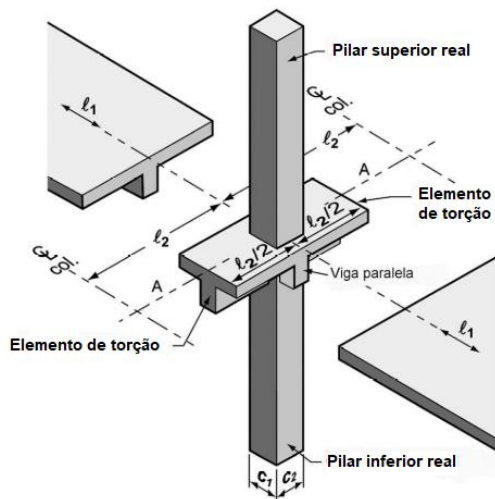


Figura 2.7: Pilar equivalente (ACI-318, 2014).

A rigidez dos membros submetidos à torção, segundo a ACI 318:2014, pode ser calculada pelas expressões:

$$K_t = \sum \frac{9E_{cs}C}{l_2(1 - \frac{c_2}{l_2})^3} \tag{Eq. 2.1}$$

$$c = \sum \left[ \left( 1 - 0,63 \frac{x}{y} \right) \cdot \frac{x^3 y}{3} \right] \quad (\text{Eq. 2.2})$$

onde:

$c_1$  e  $c_2$  são as dimensões da seção do pilar nas direções longitudinal e transversal à faixa, respectivamente;

$E_{CS}$  é o módulo de elasticidade secante do concreto;

$l_2$  é a média dos vãos adjacentes na direção transversal à faixa;

$x$  e  $y$  são a menor e a maior dimensão do retângulo considerado que compõe o membro submetido à torção.

### 2.3.2.3 ANALOGIA DE GRELHA

Esse processo consiste na substituição da laje (placa) por uma malha equivalente de elementos de barras (grelha equivalente). Os pilares são considerados indeformáveis na direção vertical.

As cargas distribuídas dividem-se entre os elementos da grelha equivalente de acordo com a área de influência de cada elemento, podendo ser consideradas uniformemente distribuídas ao longo dos elementos ou, dentro de certa aproximação, concentradas nos nós.

Conforme SILVA (2002), ao substituir a placa por elementos de barras, deve-se garantir que estas se deformem de modo idêntico à primeira e apresentem os mesmos esforços quando submetidas ao mesmo carregamento.

A analogia de grelha é o método de cálculo utilizado pelo sistema computacional CAD/TQS.

## 2.4 LAJES LISAS NERVURADAS

O emprego das lajes maciças sobre vigas é usual para vãos de até 6 m de comprimento. Para vãos maiores, o comportamento em serviço passa a ser preponderante, demandando espessuras de laje antieconômicas e com elevado peso próprio. Diante disto, a adoção de um sistema estrutural que apresente comportamento similar ao de vigas na flexão – elevada rigidez e baixo peso próprio – porém, mantendo o comportamento de placa, torna-se vantajoso e eficiente.



A ABNT NBR 6118 (2014) define as lajes nervuradas como lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras.

Geralmente, as nervuras são obtidas com o uso de caixas plásticas reutilizáveis ou, ainda, com o emprego de material inerte de baixo peso específico, como blocos de EPS. Ambas as alternativas promovem a redução do peso próprio estrutural e permitem vencer grandes vãos com economia.

A Figura 2.8 mostra, na parte 'a', a montagem de uma laje nervurada com o uso de formas plásticas reutilizáveis e, na parte 'b', a vista inferior de uma laje já desformada.



a) Montagem das formas e armaduras.



b) Laje desformada.

Figura 2.8: Laje nervurada: vistas superior e inferior (disponível em [www.atex.com.br](http://www.atex.com.br)).

A laje nervurada é constituída de duas partes principais: a mesa, que consiste em uma pequena camada de concreto comprimida e as nervuras, que são as regiões tracionadas onde se distribuem as armaduras de tração.

Nas regiões em que se têm momentos fletores negativos, como nas superfícies próximas às ligações com os pilares, é comum a utilização de zonas maciças. Este procedimento assegura a capacidade resistente aos momentos fletores negativos e garante maior resistência à punção.

#### 2.4.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS LAJES NERVURADAS

Dentre as vantagens de aplicação das lajes nervuradas, destacam-se:

- permitem vencer grandes vãos, o que é vantajoso em locais como garagens;
- consomem menos concreto e aço que outros sistemas similares;

- pelas suas características (elevada inércia e reduzido peso próprio), podem suportar cargas mais elevadas que as demais (CARVALHO E PINHEIRO, 2009);
- maior facilidade na execução, uma vez que as vigas/nervuras são embutidas na própria laje, evitando-se recortes e agilizando-se os serviços de montagem das formas (SPOHR, 2008);
- os pilares podem ser distribuídos de acordo com as necessidades do projeto arquitetônico, sem a necessidade de alinhamento (SPOHR, 2008);
- quando associadas a um sistema de formas industrializadas, aceleram muito o processo construtivo.

Como desvantagens da utilização do sistema de lajes nervuradas, citam-se:

- necessária mão de obra qualificada para não onerar custos e prejudicar a produtividade (ARAÚJO *apud* FARIA, 2010);
- dificuldade na passagem de tubulações (pelas nervuras), que pode ser atenuada com o uso de formas especiais.

#### 2.4.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Como critério de pré-dimensionamento para estimativa da espessura da laje nervurada de concreto armado, recomenda-se a seguinte equação:

$$\frac{L}{28} \leq h \leq \frac{L}{23} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

onde:

h é a espessura recomendada para a laje; e

L é a distância entre pilares.

#### 2.5 LAJES BubbleDeck

Criado na década de 1980, o sistema de lajes *BubbleDeck* é composto de esferas plásticas ocas dispostas no interior da laje de concreto e fixadas entre si por meio de telas de aço superior, inferior e lateral (Figura 2.9). Em termos de comportamento estrutural, as lajes *BubbleDeck* funcionam como lajes lisas maciças

armadas em duas direções e apoiadas diretamente sobre pilares, cujos vazios são localizados no meio da seção transversal onde o concreto é pouco solicitado (Figura 2.10).

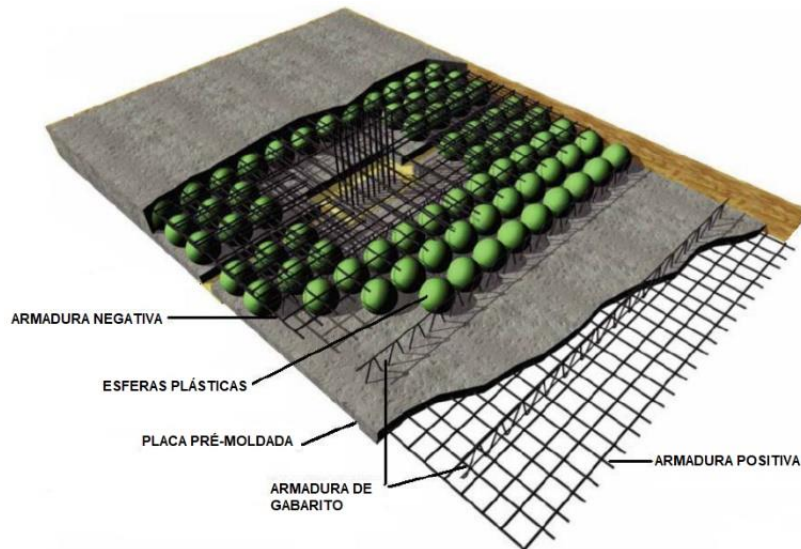


Figura 2.9: Composição da laje *BubbleDeck* (Adaptado de CHURAKOV, 2014).

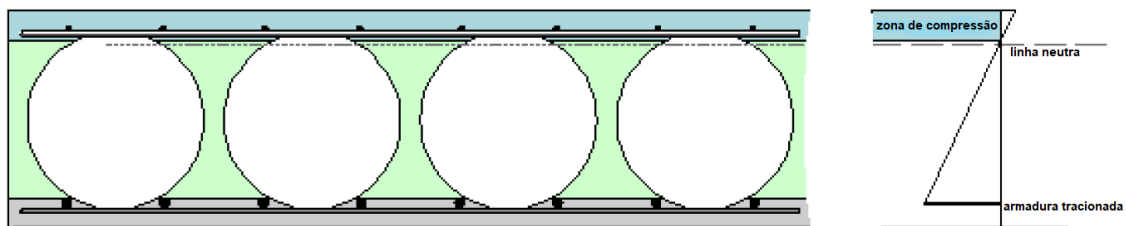


Figura 2.10: Seção transversal esquemática e solicitações na laje *BubbleDeck* (Adaptado de CHURAKOV, 2014).

Quanto ao método construtivo, o sistema com lajes *BubbleDeck* apresenta três diferentes soluções: composição de módulos de painel de armadura; painéis de pré-lajes; e painéis acabados.

No método em módulos de armaduras, são montadas “gaiolas” formadas pelas telas de aço superior e inferior com as esferas plásticas posicionados entre as duas (Figura 2.11). O módulo obtido é leve e de manuseio simples, de forma que pode ser posicionado por operários sobre formas de madeira. Nesse processo, a concretagem deve ser feita em duas etapas: a primeira, de até 6 cm, para que as esferas não flutuem, e a segunda para o restante da laje.



Figura 2.11: Módulo de painel de armadura para laje *BubbleDeck* (BLUBBLEDECK DO BRASIL, 2019).

O método mais utilizado para a execução de laje *BubbleDeck* é o sistema com pré-lajes de concreto (Figura 2.12). Nesse sistema, inicialmente é fabricada uma pré-laje com cerca de 6 cm de espessura, seguida da introdução das esferas e da malha de armadura superior, formando um painel pré-moldado. O painel é transportado até o local da obra e içado por grua ou guindaste, sendo então posicionadas as armaduras complementares necessárias. Esse processo dispensa a utilização de formas para o assoalho, sendo o painel apoiado diretamente sobre o escoramento metálico.



Figura 2.12: Posicionamento de pré-laje *BubbleDeck* (BUBBLEDECK DO BRASIL, 2019).

As lajes *BubbleDeck* podem, ainda, ser fabricadas como painéis acabados, que são as lajes prontas, concretadas e entregues na obra para içamento e posicionamento final. Nesse método é necessário que haja viga de suporte.



Figura 2.13: Painel acabado de laje *BubbleDeck* (BUBBLEDECK DO BRASIL, 2019).

CALIN e ASAVOAIE (2009) recomendam que nas áreas de concentração de tensões, como nas regiões de apoio nos pilares, não existam vazios (Figura 2.14), o que assegura a resistência da ligação laje-pilar à punção.

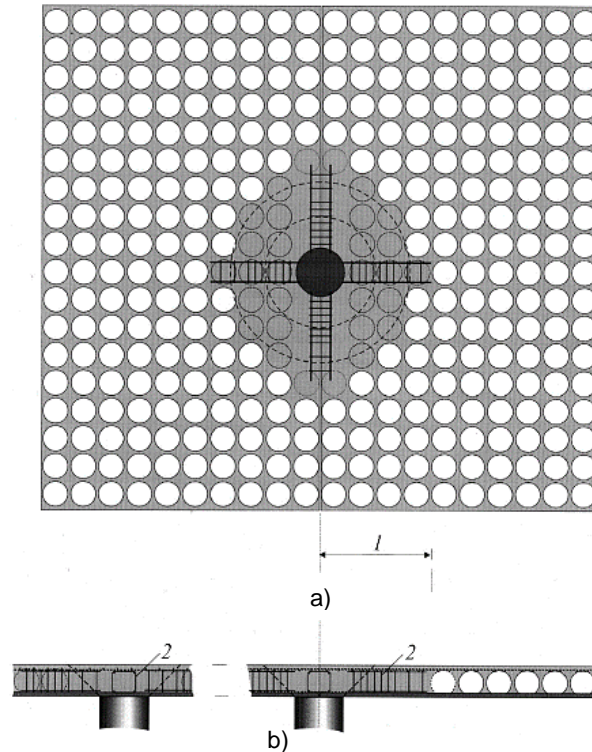


Figura 2.14: a) Projeção da área sem esferas sobre pilar; b) Armadura de reforço ao cisalhamento (CALIN E ASAVOAIE, 2009).

Conforme IBRAHIM *et al* (2013), as lajes *BubbleDeck* possuem resistência última semelhante à das lajes maciças, porém com peso próprio menor e deformações em serviço levemente superiores. REICH *et al* (2017) citam que a laje *BubbleDeck* possui 87% da rigidez de uma laje maciça de mesma espessura, porém com apenas 66% da massa de concreto. Dessa forma, a redução da rigidez da laje é compensada pela diminuição do peso próprio, resultando em maior capacidade de carga. Além disso, com uma mesma quantidade de concreto, a laje *BubbleDeck* apresenta maior rigidez à flexão quando comparada à laje maciça.

TEJA *et al* (2012) apresentam em seu trabalho quadro comparativo entre lajes *Bubbledeck* e maciças (Quadro 2.1), onde uma laje *BubbleDeck* com a mesma rigidez de uma laje maciça possui uma capacidade de carga 5% superior utilizando 69% do volume de concreto. Já uma laje *BubbleDeck* com o mesmo volume de concreto de uma laje maciça apresenta rigidez e carga última, respectivamente, 200% e 50% superiores, se forem utilizadas as mesmas armaduras.

Quadro 2.1: Comparação entre laje maciças e lajes *BubbleDeck* (TEJA *et al*, 2012).

	Valores relativos entre lajes <i>BubbleDeck</i> e lajes maciças		
	Para a mesma carga última	Para a mesma rigidez	Para o mesmo volume de concreto
Carga última		105%	150%*
Rigidez	87%		300%
Volume de concreto	66%	69%	

\*Na condição de utilização da mesma armadura.

A capacidade resistente ao cisalhamento de uma laje *BubbleDeck* é menor do que a de uma laje maciça de mesma espessura. Segundo LAI (2010), o projetista inicialmente pode avaliar se a solicitação por cisalhamento é maior ou menor que a capacidade resistente da laje *BubbleDeck* com esferas plásticas. Se a capacidade da laje com esferas for maior, nenhuma verificação adicional é necessária. Contudo, caso a laje com esferas plásticas tenha capacidade resistente inferior à tensão de cisalhamento solicitante, o projetista deve omitir as esferas na região do apoio e verificar o cisalhamento na seção maciça. Se ainda assim não for suficiente, é possível a utilização de armaduras de reforço.

OUKAILI e HUSAIN (2016) estudaram o comportamento à punção de lajes *BubbleDeck* a partir de um modelo em escala reduzida e constataram que as primeiras fissuras ocorrem nos cantos dos pilares, iniciando com carregamento entre 27% a 36% da carga de ruptura.

MARCHIORI *et al* (2017) realizaram estudo comparativo entre o sistema de laje *BubbleDeck* e laje nervurada, concluindo que, para vão de 7,5 m, as lajes nervuradas apresentam menor custo de execução, enquanto que para o vão de 15 m o custo da solução *BubbleDeck* é menor se o custo unitário da esfera for inferior a R\$ 0,75.

No tocante à vibração das lajes *BubbleDeck*, TEJA *et al* (2012) citam que o peso mais leve pode ser explorado para alterar, de maneira útil, as frequências modais da laje, geralmente aumentando-a em comparação à laje maciça. Se considerado que o amortecimento é semelhante entre as duas soluções, a laje *BubbleDeck* pode fornecer rigidez maior para o mesmo volume de concreto, o que pode ser favorável em estruturas sensíveis à vibração. LAI (2010) comparou a resposta dinâmica de uma laje *BubbleDeck*

com uma laje maciça de mesma espessura, constatando que as frequências modais são praticamente idênticas.

De acordo com OUKAILI e YASEEN (2014), a utilização de protensão em lajes *BubbleDeck* traz ganhos significativos em relação ao comportamento em serviço. A introdução de forças de protensão aumenta entre 185,7% e 228% a carga de fissuração da laje, enquanto o aumento da carga de ruptura é de 79,3%.

Em relação à redução da capacidade resistente ao esforço cortante, OUKAILI e MERIE (2018) analisaram a utilização de concreto reforçado com fibras de carbono na produção de lajes *BubbleDeck*. A partir de testes realizados, os autores concluíram que a utilização das fibras de carbono aumenta significativamente a resistência ao cisalhamento da laje *BubbleDeck*, diminuindo a fissuração e as flechas.

### **2.5.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS LAJES *BUBBLEDECK***

Segundo FREIRE (2009), a incorporação das esferas de plástico reciclado como formadoras de vazios na laje de concreto permite vencer vãos 50% maiores. A combinação dessas esferas com o conceito de lajes lisas garante benefícios, tais como:

- liberdade nos projetos: *layouts* flexíveis que se adaptam a plantas curvas e irregulares;
- diminuição do peso próprio: 35% menor, permitindo redução nas fundações;
- possibilidade de industrialização com uso de pré-lajes;
- eliminação de vigas: execução mais barata e rápida de alvenaria e instalações;
- redução do volume de concreto;
- ambientalmente adequado: redução de energia e emissão de carbono, em função da utilização de plástico reciclável com diminuição do consumo de matérias primas.

Como desvantagens, a necessidade de mão de obra especializada e a baixa divulgação da metodologia no Brasil fazem com que a solução estrutural ainda seja pouco utilizada. Além disso, as esferas não são reutilizáveis, como as cubetas das lajes nervuradas, e o sistema exige detalhamento mais complexo.

## 2.5.2 CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO

A ABNT NBR 6118 (2014) não prescreve normativos acerca da análise estrutural das lajes *BubbleDeck*. No Brasil, o cálculo dessas lajes se baseia em recomendações de outros pesquisadores.

GUEDES e ANDRADE (2015) apresentam sugestões para o cálculo das lajes *BubbleDeck*. Segundo os autores, devido à forma circular dos vazios, que permite que as forças sejam transferidas dentro da laje de forma homogênea, é possível calcular uma laje *BubbleDeck* considerando-a como laje maciça lisa.

Todavia, a simples substituição das lajes com vazios por uma placa maciça não é suficiente, haja vista as modificações na rigidez da estrutura, no seu peso próprio e na resistência ao esforço cortante. Para levar em consideração estes efeitos, o fabricante *BubbleDeck* Internacional (2017) recomenda a utilização dos fatores redutores indicados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2: Especificações técnicas para dimensionamento de lajes *BubbleDeck* (BUBBLEDECK INTERNACIONAL, 2017).

Identificação	BD230	BD280	BD340	BD395	BD450	BD520	BD580
<b>Diâmetro da esfera (cm)</b>	18,00	22,50	27,00	31,50	36,00	40,50	45,00
<b>Mínimo intereixo das esferas (cm)</b>	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
<b>Máximo número de esferas (1/m<sup>2</sup>)</b>	25,00	16,00	11,11	8,16	6,25	4,94	4,00
<b>Espessura mínima da laje (cm)</b>	23,00	28,00	34,00	40,00	45,00	52,00	58,00
<b>Redução de carga por esfera (kN)</b>	0,08	0,15	0,26	0,41	0,61	0,87	1,19
<b>Redução máxima de carga /m<sup>2</sup> (kN/m<sup>2</sup>)</b>	1,91	2,39	2,86	3,34	3,82	4,29	4,77
<b>Fator redutor para rigidez [-]</b>	0,88	0,87	0,87	0,88	0,87	0,88	0,88
<b>Fator redutor para o cortante [-]</b>	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
<b>Fator redutor para o peso [-]</b>	0,67	0,66	0,66	0,67	0,66	0,67	0,67

## 2.6 LAJES PROTENDIDAS

Segundo CARVALHO e PINHEIRO (2009), o uso da protensão em lajes permite atingir vãos de até 15 metros com o controle dos deslocamentos verticais a partir da introdução de forças compressivas excêntricas que impõem tensões contrárias às solicitações de projeto.

Com a utilização da protensão, também há efeito benéfico em relação à punção das lajes, já que a componente vertical da força de protensão pode reduzir o valor da força cortante junto aos pilares, evitando o uso de capitéis.



### 2.6.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS

EMERICK (2009) apresenta as seguintes vantagens da utilização de lajes protendidas em relação ao sistema convencional de concreto armado:

- possibilidade de vencer vãos maiores com lajes mais esbeltas, o que permite maior liberdade arquitetônica e redução do número de pilares, com conseqüente aumento na área útil e no número de vagas em estacionamentos;
- possibilidade de trabalhar com lajes de menor espessura, suprimindo o uso de vigas, o que permite redução na altura total da edificação e, conseqüentemente, diminuição de carga nas fundações e/ou maior número de pavimentos para uma altura fixa;
- maior velocidade na desforma e retirada dos escoramentos, possibilitando ganhos significativos no tempo de execução da estrutura;
- redução de flechas e fissuração nas lajes;
- para lajes lisas ou cogumelo, o posicionamento dos cabos na região dos pilares gera aumento da resistência ao cisalhamento;
- economia, em relação às estruturas em concreto armado, para vãos superiores a 7 metros.

AALAMI (2014) cita outras vantagens, como:

- utilização de menor quantidade de aço;
- possibilidade de utilização de espaçamento irregular entre pilares;
- menor demanda sísmica em função da utilização de estrutura mais leve;
- maior resistência à penetração de água.

De acordo com SCHMID (2009), a falta de mão de obra especializada e desconhecimento da tecnologia por parte de muitos construtores ainda dificulta o uso da técnica de protensão em lajes de edifícios.

## 2.6.2 TIPOS DE PROTENSÃO EM LAJES

Nas lajes de pavimentos de edifícios, o sistema comumente utilizado é o de pós-tensão, que pode ser classificado quanto à aderência entre os cabos e o concreto em sistemas aderente e não-aderente.

### 2.6.2.1 PROTENSÃO ADERENTE

Na protensão aderente, as cordoalhas (até quatro) são dispostas no interior de bainhas metálicas formando os cabos de protensão que, após tensionadas, recebem injeção de nata de cimento para garantir a aderência aço-concreto.

Segundo EMERICK (2005), a solução com cordoalhas aderentes se comporta melhor quanto à distribuição das fissuras e à segurança contra a ruptura para efeitos localizados (explosão, incêndios, demolição parcial etc.). Em geral, costuma-se projetar cabos com uma ancoragem ativa e outra passiva. Entretanto, especialmente para cabos longos, com comprimentos maiores que 40 metros, pode ser conveniente aplicar a protensão pelas duas extremidades do cabo, utilizando-se ancoragem ativa nas duas extremidades, de modo a reduzir as perdas por atrito.

### 2.6.2.2 PROTENSÃO NÃO-ADERENTE

A protensão não-aderente é composta por cabos individuais devidamente engraxados e plastificados para garantia de durabilidade. São também conhecidos como cordoalhas engraxadas, uma vez que são as mesmas cordoalhas tradicionais, porém com a adição de revestimento de PEAD – polietileno de alta densidade – impermeável à água e extrudado diretamente sobre a cordoalha já engraxada, o que permite sua livre movimentação no interior da bainha (revestimento PEAD).

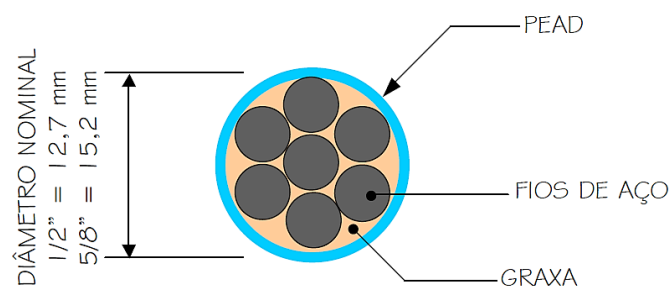


Figura 2.15: Cordoalha engraxada e plastificada com sete fios (EMERICK, 2005).

A utilização desta tecnologia trouxe uma série de vantagens executivas para as lajes de edifícios, destacando-se:

- facilidade de transporte e manuseio das cordoalhas, que simplificam a montagem das armaduras;
- uso de ancoragens pequenas e práticas, que reúnem em uma só peça o bloco e a placa de distribuição de tensões;
- uso de conjunto bomba-macaco hidráulico leve e prático, facilitando o manuseio, transporte horizontal e vertical na obra;
- protensão simples e descomplicada executada em uma só etapa de introdução de pressão;
- dispensa do uso de bainhas metálicas;
- eliminação do serviço de injeção de calda de cimento.

Do ponto de vista estrutural, LOUREIRO (2006) apresenta algumas vantagens da utilização de cordoalhas engraxadas na protensão de lajes. São elas:

- com relação à esbeltez ( $L/h$ ), estas lajes são capazes de vencer grandes vãos utilizando pequenas espessuras e apresentando fissuração e flechas reduzidas, pois, além da pré-compressão, a protensão balanceia grande parte das cargas permanentes e somente uma parte da carga total é que provoca flechas e tensões de tração no concreto. Como, normalmente, essas tensões são inferiores à resistência do concreto à tração, o cálculo das flechas pode ser feito adotando-se o momento de inércia da seção bruta de concreto, que é duas a três vezes maior do que o da seção fissurada;
- a cordoalha engraxada e plastificada tem coeficientes de atrito muito baixos, o que reduz bastante as perdas por atrito ao longo dos cabos, resultando numa maior força efetiva de protensão;
- o fato de as ancoragens serem individuais, uma para cada cordoalha, minimiza as tensões concentradas nas regiões de introdução da força de protensão, diminuindo as armaduras de fretagem;
- as lajes protendidas passam por um grande teste no ato da protensão: a cordoalha fica submetida a tensão máxima de tração, normalmente, 80% da sua tensão de ruptura e a força de compressão no concreto na região

das ancoragens também é máxima, quando a resistência do concreto ainda é da ordem de 65% de sua resistência última.

### 2.6.3 PRINCIPAIS SISTEMAS ESTRUTURAIS

Os principais sistemas estruturais adotados nas lajes protendidas são as lajes lisas, maciças ou nervuradas. As lajes lisas apresentam vantagens em relação às demais, sobretudo do ponto de vista da execução. Entretanto, sua resistência é, em geral, ditada pelo cisalhamento na região de ligação laje-pilar (puncionamento), que pode ser melhorada com o uso de capitéis. Alternativamente, o emprego de faixas de maior espessura garante o controle das flechas e a resistência à punção quando se tem grandes vãos em uma direção apenas.

As Figuras 2.16 a 2.18 ilustram essas situações.

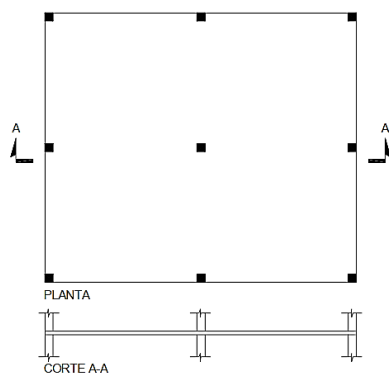


Figura 2.16: Laje lisa (EMERICK, 2005).

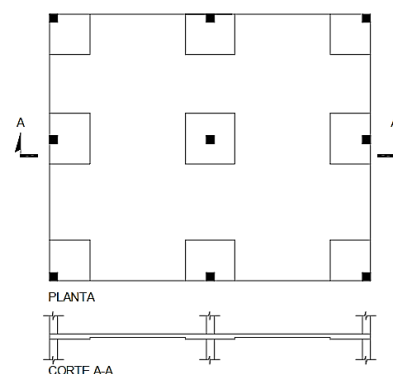


Figura 2.17: Laje cogumelo (EMERICK, 2005).

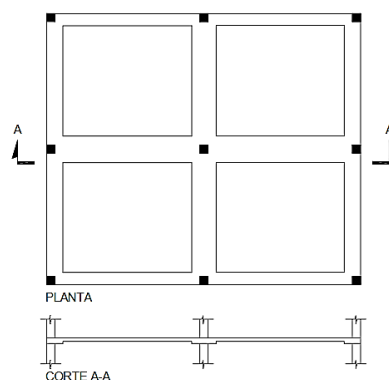


Figura 2.18: Laje com viga faixa (EMERICK, 2005).

Para grandes vãos, a utilização de lajes nervuradas protendidas torna-se economicamente mais interessante. Nesta solução, as nervuras podem ou não ser protendidas.

As Figuras 2.19 e 2.20 ilustram essas situações.

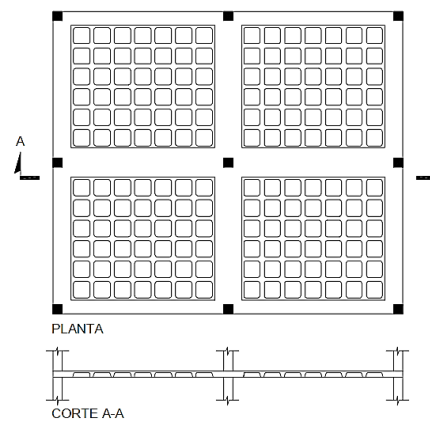


Figura 2.19: Laje nervurada com faixas protendidas (EMERICK, 2005).

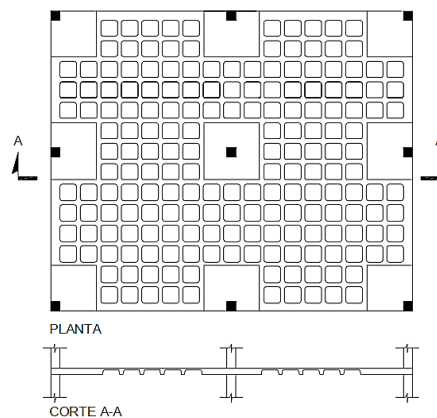


Figura 2.20: Laje nervurada com trechos maciços sobre os pilares (EMERICK, 2005).

### 2.6.3.1 CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO

Segundo RAISS *et al* (1994), é comum a análise estrutural de lajes lisas protendidas por meio da divisão do sistema estrutural em pórticos nas duas direções. Cada pórtico geralmente compreende uma linha de pilares junto com elementos de laje com largura definida.

A Figura 2.21 ilustra as faixas de projeto superpostas às tributárias naturais, que são limitadas pelas linhas de cortante nulo.

A consideração da protensão é feita a partir da aplicação do carregamento equivalente, em função do perfil dos cabos na faixa considerada (LOUREIRO, 2006).

Na análise estrutural das lajes lisas protendidas são comumente empregados o método dos pórticos equivalentes ou múltiplos e a analogia de grelha.

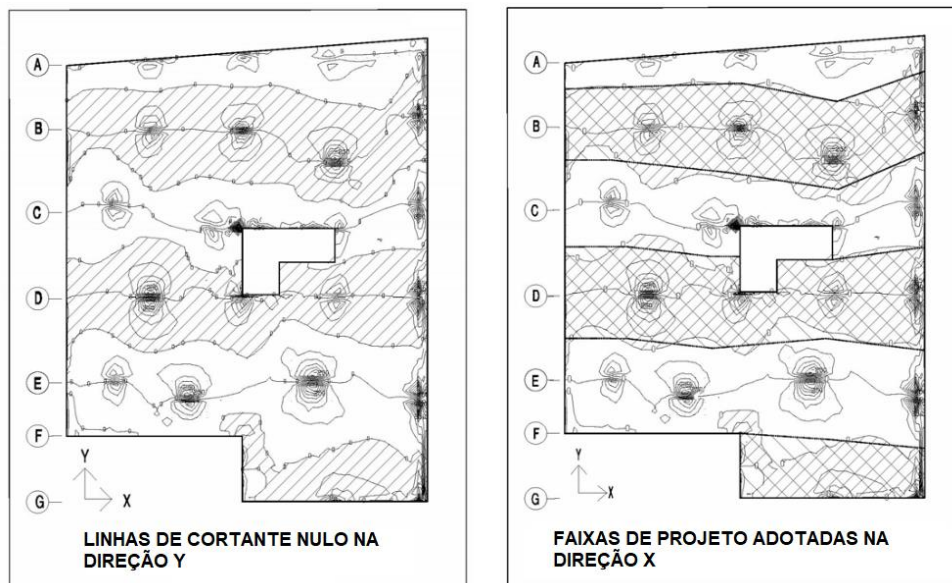


Figura 2.21: Definição das faixas de projeto a partir das linhas de cortante nulo. (LOUREIRO, 2006).

#### 2.6.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Para lajes nervuradas com trechos maciços sobre os pilares (Figura 2.20) e vãos contínuos, o *Post-Tensioning Institute* (PTI, 2006) sugere que:

$$h = \frac{L}{35} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

onde:

h é a espessura recomendada para a laje; e

L é a distância entre pilares.

No caso de lajes nervuradas com faixas protendidas sobre os apoios (Figura 2.19), o PTI sugere que:

$$h = \frac{L}{30} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

#### 2.6.5 PERDAS DE PROTENSÃO

As perdas são classificadas em dois grupos, em função do instante em que ocorrem na estrutura: perdas imediatas e perdas progressivas (ao longo do tempo).

As perdas imediatas ocorrem durante a operação da protensão, sendo divididas em perdas por atrito, por acomodação dos dispositivos de ancoragem e por encurtamento elástico do concreto. As perdas por atrito e por encurtamento elástico do concreto são calculadas conforme o item 9.6.3.3.2.2 e 9.6.3.3.2.1 da ABNT NBR 6118 (2014), respectivamente. Geralmente, o valor da perda por acomodação da ancoragem é fornecido pelos fabricantes, sendo da ordem de 6 mm.

As perdas progressivas ocorrem ao longo do tempo, sendo causadas por retração e fluência do concreto e pela relaxação do aço da armadura de protensão. A ABNT NBR 6118 (2014), no seu item 9.6.3.4.1, estabelece que os valores parciais e totais das perdas progressivas devem ser determinados considerando-se a interação entre essas causas, podendo ser utilizado o processo simplificado (item 9.6.3.4.2), o processo aproximado (item 9.6.3.4.3) ou o método geral de cálculo (item 9.6.3.4.4), a depender das condições de projeto.

## 2.7 PUNÇÃO NAS LAJES LISAS

De acordo com CARVALHO e PINHEIRO (2009), o fenômeno da punção pode ocorrer nas lajes sem vigas e, muitas vezes, inviabilizar o seu uso. Por ser uma ruptura abrupta, sem aviso, suas consequências são particularmente desastrosas e, por essa razão, é importante que os elementos da estrutura apresentem boa ductilidade, ou seja, sofram deformações antes que atinjam sua resistência última. As lajes devem ser dimensionadas de modo que o estado limite último, se atingido, seja por flexão.

A punção de uma laje consiste, basicamente, na sua perfuração ocasionada por altas tensões de cisalhamento, causadas por forças concentradas agindo em pequenas áreas. Em regiões de ligação laje-pilar pode existir, também, a ação de grandes momentos fletores, principalmente em pilares posicionados nas bordas e cantos da laje, o que torna a situação mais crítica devido à redução da área de contato entre a laje e o pilar.

CARVALHO e PINHEIRO (2009) citam que, para os pilares internos, a superfície de ruína é praticamente um tronco de cone (Figura 2.22a). Já para os pilares de borda (Figura 2.22b) e de canto (Figura 2.22c), essas superfícies são mais irregulares e a análise da ruína é consideravelmente mais difícil, principalmente devido à influência dos efeitos de flexão e torção.

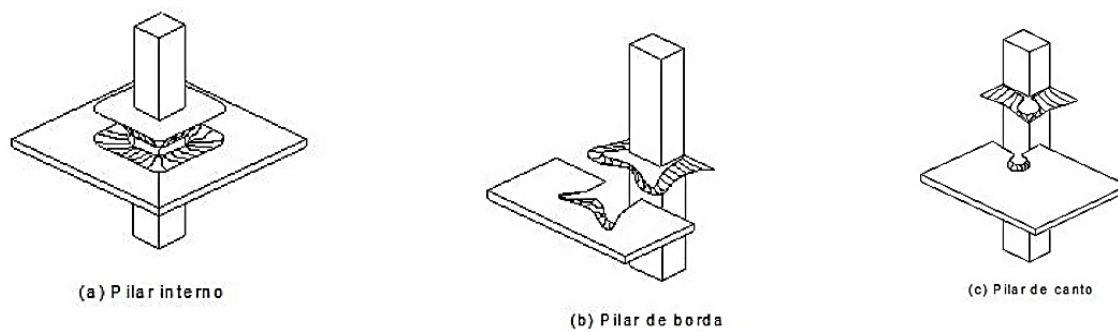


Figura 2.22: Perspectivas esquemáticas de superfícies de ruína devidas à punção em ligações laje-pilar em lajes lisas (CARVALHO e PINHEIRO, 2009).



## 3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

---

Neste capítulo são apresentadas as prescrições normativas segundo a ABNT NBR 6118 (2014), para as lajes nervuradas e lisas protendidas.

A norma brasileira não contempla o uso de lajes *BubbleDeck*. Por isso, fez-se o uso de recomendações do fabricante do sistema e de referências bibliográficas sobre essa técnica.

### 3.1 PRESCRIÇÕES GERAIS

#### 3.1.1 ARMADURA MÍNIMA E MÁXIMA DE FLEXÃO

De forma a evitar uma ruptura brusca nas seções submetidas aos esforços de tração na flexão das lajes, a ABNT NBR 6118 (2014) estabelece a adoção de armaduras mínimas capazes de resistir ao esforço que causa o início da fissuração na peça de concreto armado.

O momento fletor mínimo é dado por:

$$M_{d,\min} = 0,8 \cdot W_0 \cdot f_{ctk,\text{sup}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

$W_0$  é o módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada;

$f_{ctk,\text{sup}}$  é a resistência característica superior do concreto à tração.

A taxa mínima absoluta de armadura é de 0,15%.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), a adoção de armadura mínima em lajes tem como principal objetivo melhorar o desempenho e a ductilidade à flexão, assim como controlar a fissuração. Essa armadura deve ser constituída preferencialmente por barras com alta aderência ou por telas soldadas.

Para lajes de concreto armado ou protendido, os valores mínimos de armadura passiva aderente ( $\rho_s$ ), devem atender ao disposto nos Quadros 3.1 e 3.2 (ABNT NBR 6118, 2014).

Quadro 3.1: Valores mínimos para armaduras passivas aderentes. (ABNT NBR 6118:2014)

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - \rho_p \geq 0,67\rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - 0,5\rho_p \geq 0,67\rho_{\text{mín}}$ (Exceto lajes lisas ou cogumelo)
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\text{mín}}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\text{mín}} - \rho_p \geq 0,5\rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - 0,5\rho_p \geq 0,5\rho_{\text{mín}}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - \rho_p \geq 0,5\rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - 0,5\rho_p \geq 0,5\rho_{\text{mín}}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$\frac{A_s}{s} \geq 20\%$ da armadura principal $\frac{A_s}{s} \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5\rho_{\text{mín}}$		-
onde $\rho_s = A_s/b_w$ e $\rho_p = A_p/b_w h$ Nota: Os valores de $\rho_{\text{mín}}$ são definidos no Quadro 3.2			

Quadro 3.2: Taxas mínimas de armadura de flexão em função do  $f_{ck}$  (ABNT NBR 6118:2014)

Forma da seção	<sup>a</sup> Valores de $\rho_{\text{mín}}$ ( $A_{s,\text{mín}}/A_c$ )														
	%														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

<sup>a</sup> Os valores de  $\rho_{\text{mín}}$  estabelecidos neste Quadro pressupõem o uso de aço CA-50,  $d/h = 0,8$  e  $\gamma_c = 1,4$  e  $\gamma_s = 1,15$ . Caso esses fatores sejam diferentes,  $\rho_{\text{mín}}$  deve ser recalculado.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), em lajes lisas ou lajes-cogumelo com armadura ativa não aderente, as armaduras passivas positivas devem respeitar os

valores mínimos do Quadro 3.1 e a armadura negativa passiva sobre os apoios deve atender à expressão 3.2:

$$A_s \geq 0,00075h \cdot \ell \quad (\text{Eq. 3.2})$$

onde:

$h$  é a altura da laje;

$\ell$  é o vão médio da laje medido na direção da armadura a ser colocada.

Essa armadura deve cobrir a região transversal a ela, compreendida pela dimensão dos apoios, acrescida de  $1,5h$  para cada lado.

Para garantir a ductilidade e respeitar o campo de validade dos ensaios que deram origem às prescrições de funcionamento do conjunto aço-concreto (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2007), a soma das armaduras de tração e compressão ( $A_s + A_s'$ ) não deve ultrapassar 4% da área de concreto da seção ( $A_c$ ), calculada na região fora da zona de emendas.

### 3.1.2 ESPAÇAMENTO E DIÂMETROS MÁXIMOS DAS BARRAS

As barras da armadura principal de flexão devem ser constituídas por barras de alta aderência ou por telas soldadas. O espaçamento máximo entre as barras é igual a duas vezes a espessura da laje ( $h$ ) ou 20 cm, prevalecendo o menor destes dois valores na região dos maiores momentos fletores.

As barras da armadura de flexão das lajes não devem ter diâmetro maior que  $h/8$ .

### 3.1.3 CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), a agressividade do ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre a estrutura de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas.

Em função das condições de exposição aos agentes agressivos, a estrutura deve ser classificada em uma das classes de agressividade ambiental apresentadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3: Classes de agressividade ambiental (ABNT NBR 6118, 2014).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a,b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a,b</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>a,c</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

Seguem as notas quanto à classificação do tipo de ambiente do Quadro 3.3:

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, banheiros, dormitórios, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura);

<sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove;

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

### 3.1.4 COBRIMENTO DAS ARMADURAS

A ABNT NBR 6118 (2014) estabelece o conceito de cobrimento mínimo ( $c_{\min}$ ) e cobrimento nominal ( $c_{\text{nom}}$ ), que é o cobrimento mínimo acrescido de tolerância de execução ( $\Delta c$ ).

Nas obras correntes, o valor de  $\Delta c$  deve ser maior ou igual a 10 mm, podendo ser adotado o valor de  $\Delta c = 5$  mm em obras com alto controle de qualidade de execução, explicitado nos desenhos de projeto. Para os casos de obras correntes ( $\Delta c = 10$  mm), os cobrimentos nominais em função da classe de agressividade ambiental estão especificados no Quadro 3.4.

Os cobrimentos nominais e mínimos estão sempre referidos à superfície da armadura externa, sendo que o cobrimento nominal de determinada barra deve sempre ser (item 7.4.7.5 da ABNT NBR 6118, 2014):

- a)  $c_{nom} \geq \varnothing_{barra}$ ;
- b)  $c_{nom} \geq \varnothing_{feixe} = \varnothing_n = \varnothing\sqrt{n}$ ;
- c)  $c_{nom} \geq 0,5\varnothing_{bainha}$

onde  $\varnothing_n$  é o diâmetro equivalente de um feixe de barras.

Quadro 3.4: Cobrimento nominal para  $\Delta c = 10\text{mm}$  (ABNT NBR 6118, 2014).

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

As notas referentes ao Quadro 3.4 são:

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências deste Quadro podem ser substituídas pelas do item 7.4.7.5 da ABNT NBR 6118 (2014), respeitando um cobrimento nominal  $\geq 15\text{mm}$ .

<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobertura nominal  $\geq 45$  mm.

## 3.2 LAJES NERVURADAS

A ABNT NBR 6118 (2014) recomenda as seguintes especificações relativas às dimensões da mesa e das nervuras:

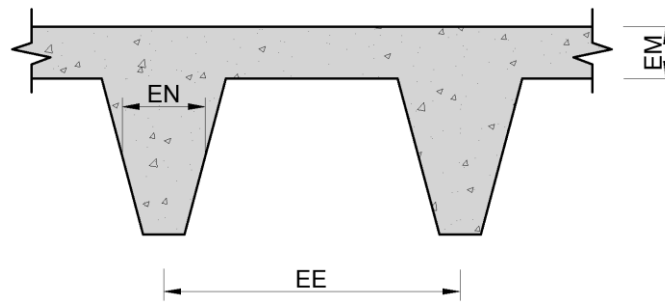


Figura 3.1: Seção típica de uma laje nervurada.

- a) Espessura da mesa (EM)
- Quando não houver tubulações horizontais embutidas, a espessura da mesa deve ser maior ou igual a  $1/15$  da distância entre as faces das nervuras e não menor que 4 cm.
  - Quando existirem tubulações embutidas de diâmetro máximo de 10 mm, o valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser de 5 cm.
  - Quando existirem tubulações embutidas de diâmetro ( $\emptyset$ ) maior que 10 mm, a mesa deve ter espessura mínima de  $4 \text{ cm} + \emptyset$ , ou  $4 \text{ cm} + 2\emptyset$  caso exista cruzamento destas tubulações.
- b) Espessura média das nervuras (EN)
- A espessura das nervuras não pode ser inferior a 5 cm.
  - Não é permitido o uso de armaduras de compressão em nervuras de espessura inferior a 8 cm.
- c) Espaçamento entre eixos de nervuras (EE)
- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa. Para a

verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje.

- Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm.
- Para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

### 3.3 LAJES BUBBLEDECK

O projeto de lajes *BubbleDeck* deve levar em consideração fatores como os diâmetros das esferas, distância entre eixos e fatores redutores da rigidez e resistência, conforme apresentados no Quadro 2.2.

As lajes *BubbleDeck* devem ser calculadas como uma laje maciça de concreto armado equivalente. Logo, a estas se aplicam as recomendações apresentadas no item 3.1.

De acordo com Freire (2009), os vãos máximos nos diferentes tipos de lajes *BubbleDeck* são geralmente determinados pelas limitações de flechas. Esse critério é determinado pela razão entre o menor comprimento do vão ( $L$ ) e a espessura ( $h$ ) da laje. A razão  $L/h$  para os diferentes tipos de vãos está descrita a seguir:

$$L/h \leq 30 \quad \rightarrow \quad \text{Vãos simples} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$L/h \leq 39 \quad \rightarrow \quad \text{Vãos contínuos} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$L/h \leq 10,5 \quad \rightarrow \quad \text{Balanço} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

O Quadro 3.5 apresenta os valores usuais de vãos para cada espessura padronizada das lajes *BubbleDeck* e sua carga permanente equivalente.

Quadro 3.5: Vãos usuais para lajes *BubbleDeck* e sua carga permanente equivalente (Freire, 2009).

Tipo	Espessura da Laje	Diâmetro das Esferas	Vão	Carga (PP)
	[mm]	[mm]	[m]	[kg/m <sup>2</sup> ]
<b>BD230</b>	230	Ø180	7 a 10	370
<b>BD280</b>	280	Ø225	8 a 12	460
<b>BD340</b>	340	Ø270	9 a 14	550
<b>BD395</b>	395	Ø315	10 a 16	640
<b>BD450</b>	450	Ø360	11 a 18	730

## 3.4 LAJES LISAS PROTENDIDAS

### 3.4.1 DIMENSÕES LÍMITES

As dimensões mínimas para as lajes protendidas são:

- 16 cm para as lajes lisas;
- 14 cm para as lajes cogumelo, fora da região do capitel.

### 3.4.2 DISTRIBUIÇÃO DOS CABOS EM PLANTA

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014) para que uma faixa de laje seja tratada como uma região protendida, na direção considerada, o espaçamento entre cordoalhas, cabos ou feixes de cabos deve ser no máximo de seis vezes a espessura da laje ( $h$ ), não excedendo 120 cm. A tensão de compressão média na seção da laje na faixa considerada deve ser igual ou superior a 1 MPa.

Cabos dispostos em faixa externa de apoio devem estar contidos em uma porção de laje, de tal forma que a largura desta ( $A$ ) não ultrapasse a dimensão em planta do pilar de apoio ( $a$ ), tomada transversalmente à direção longitudinal da faixa, acrescida de 3,5 vezes a espessura da laje ( $h$ ) para cada um dos lados do pilar (ABNT NBR 6118, 2014), conforme ilustra a Figura 3.2.



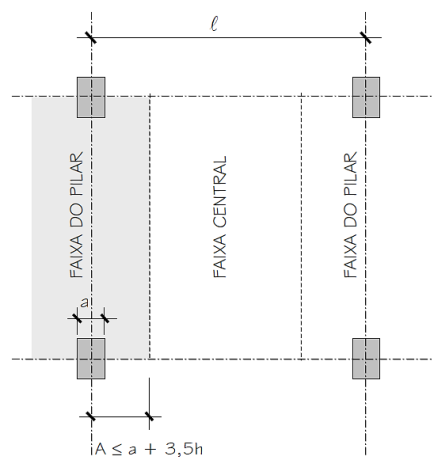


Figura 3.2: Largura para a distribuição de cabos nas faixas dos pilares segundo a ABNT NBR 6118, 2014 (EMERICK, 2005).

De acordo com o ACI 423.3R-96, embora seja importante que alguns cabos passem dentro do perímetro de cisalhamento sobre as colunas, a distribuição em outro lugar é viável. De acordo com a norma americana, para carregamento uniforme, o espaçamento máximo entre cabos simples ou grupos de cabos em uma direção não deve exceder oito vezes a espessura da laje, com espaçamento máximo de 150 cm. A norma cita ainda que devem ser evitadas curvaturas horizontais dos cabos e, caso sejam realmente necessárias, deve-se prever armaduras e acessórios de reforço nos pontos de curvatura. Em relação à distribuição em planta, o ACI 423.3R-96 diz que o número de cabos necessários pode ser colocado nas linhas dos pilares em uma direção e distribuídos na outra (Figura 3.3). Contudo, pelo menos dois cabos devem ser dispostos na área de cisalhamento sobre os pilares, em cada direção.

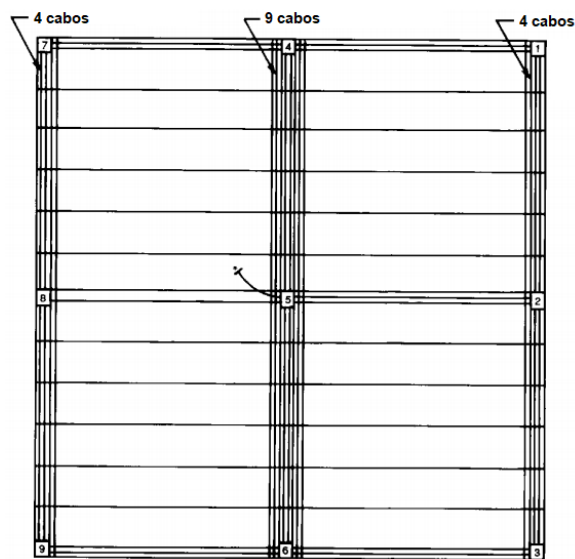


Figura 3.3: Distribuição dos cabos em planta (Adaptado de ACI 423.3R-96).

Em lajes nervuradas protendidas é usual a distribuição de cordoalhas nas nervuras.

Entre cabos ou feixes de cabos, ou entre cabos e armaduras passivas, deve ser mantido um espaçamento mínimo de 5 cm. O cobrimento mínimo de cabos em relação à face de aberturas nas lajes deve ser de 7,5 cm.

Havendo a necessidade de desvio dos cabos em planta, a ABNT NBR 6118 (2014) estabelece que o mesmo deve produzir inclinação máxima de 1/10, na corda imaginária que o une o início ao fim desse trecho, mantendo o seu desenvolvimento de acordo com uma curva parabólica em planta. Ao longo do desvio, o conjunto de cabos ou feixes deve estar disposto de tal forma que a distância mínima entre cabos na região central da curva seja de 5 cm. Para os cabos em que o desvio exceda os limites especificados, deve ser prevista armadura capaz de resistir à força cortante provocada por esse desvio.

Nas lajes protendidas com cordoalhas engraxadas e plastificadas, no máximo quatro cordoalhas podem ser dispostas em feixe.

### 3.4.3 TRAÇADO VERTICAL DOS CABOS

O traçado vertical dos cabos geralmente possui geometria parabólica, principalmente quando o carregamento externo é uniformemente distribuído, resultando em um diagrama de momentos parabólico.

Por condições econômicas e de execução, é comum adotar as maiores excentricidades possíveis, atendendo às condições de cobrimento mínimo. A Figura 3.4 ilustra o traçado vertical de um cabo, indicando uma recomendação para o ponto de mudança de curvatura ( $\alpha l$ ), onde  $\alpha$  geralmente varia de 5% a 15%. Os cabos são ancorados no plano médio da laje, após um trecho de traçado reto de no mínimo 50 cm (ABNT NBR 6118, 2014), com o objetivo de não induzir momentos fletores devido à protensão na extremidade da peça.

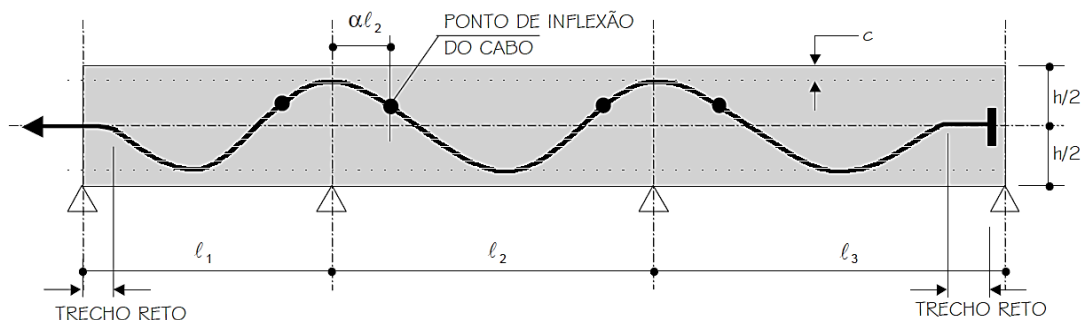


Figura 3.4: Traçado vertical dos cabos de protensão (EMERICK, 2005).

### 3.4.4 VALORES LIMITES DA FORÇA NA ARMADURA DE PROTENSÃO

Para armadura pós-tracionada, a ABNT NBR 6118 (2014) especifica o seguinte limite de tensão ( $\sigma_{pi}$ ) na saída do aparelho de tração, para aços de relaxação baixa:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,74 \cdot f_{ptk} \\ 0,82 \cdot f_{pyk} \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

onde:

$f_{ptk}$  é a tensão característica de ruptura do aço de protensão;

$f_{pyk}$  é a tensão característica de escoamento do aço de protensão.

No caso de utilização de cordoalhas engraxadas, com aços de classe de relaxação baixa, os valores limites da tensão  $\sigma_{pi}$  da armadura de protensão na saída do aparelho de tração podem ser elevados para:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,80 \cdot f_{ptk} \\ 0,88 \cdot f_{pyk} \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Estes limites (Eq. 3.7) devem ser respeitados também ao término da operação de protensão.

## 3.5 ESTADO-LIMITE ÚLTIMO (ELU)

O ELU é aquele relacionado ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação, no todo ou em parte, do uso da estrutura.

No dimensionamento das armaduras de lajes no estado limite último, a ABNT NBR 6118 (2014) estabelece os seguintes princípios:

- a) as seções transversais se mantêm planas após a deformação;
- b) a deformação das barras passivas aderentes ou o acréscimo de deformação das barras ativas aderentes em tração ou compressão deve ser a(o) mesma(o) do concreto em seu entorno;
- c) para armaduras ativas não aderentes, na falta de valores experimentais e de análises não lineares adequadas, os valores do acréscimo das tensões ( $\Delta\sigma_p$ ) para estruturas usuais de edifícios estão apresentados a

seguir, devendo ainda ser divididos pelos devidos coeficientes de ponderação:

- para elementos com relação vão/altura útil igual ou menor que 35:

$$\Delta\sigma_p = 70 + f_{ck}/100\rho_p \quad (\text{Eq. 3.8})$$

com  $\Delta\sigma_p$  em megapascal, não podendo ultrapassar 420 MPa.

- para elementos com relação vão/altura útil maior que 35:

$$\Delta\sigma_p = 70 + f_{ck}/300\rho_p \quad (\text{Eq. 3.9})$$

com  $\Delta\sigma_p$  em megapascal, não podendo ultrapassar 210 MPa.

onde  $\rho_p$  é a taxa geométrica de armadura ativa, dada por:

$$\rho_p = \frac{A_p}{b_c \cdot d_p} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

onde

$A_p$  é a área da seção transversal do cabo resultante;

$b_c$  é a largura da mesa de compressão; e

$d_p$  é a altura útil referida à armadura ativa;

- d) as tensões de tração no concreto, normais à seção transversal, devem ser desprezadas no ELU;
- e) a distribuição de tensões no concreto é feita de acordo com o diagrama parábola-retângulo, com tensão de pico igual a  $0,85f_{cd}$ . Este diagrama pode ser substituído pelo retângulo de profundidade  $y = 0,8x$ , para concretos com  $f_{ck} \leq 50$  MPa;
- f) a tensão nas armaduras deve ser obtida a partir dos diagramas tensão-deformação dos materiais. Para as armaduras protendidas, deve-se considerar, além da deformação devido à curvatura do concreto, o pré-alongamento aplicado devido a protensão e o estado de descompressão do concreto;

g) o estado limite último por flexão é caracterizado pelos seguintes valores de deformações unitárias:

- $\varepsilon_{cu} = 0,35\%$  (encurtamento máximo do concreto);
- $\varepsilon_{su} = 1,00\%$  (deformação plástica da armadura).

### 3.5.1 LAJES DE CONCRETO ARMADO

Na análise do ELU de flexão de peças de concreto armado, o momento solicitante de cálculo deve ser menor ou igual ao momento resistente:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

onde:

$M_{Sd}$  é o momento solicitante de cálculo,

$M_{Rd}$  é o momento resistente de cálculo.

O momento fletor solicitante ( $M_{Sd}$ ) é resistido por um binário formado por uma força correspondente ao concreto comprimido e a força de tração nas armaduras, conforme apresentado na Figura 3.5.

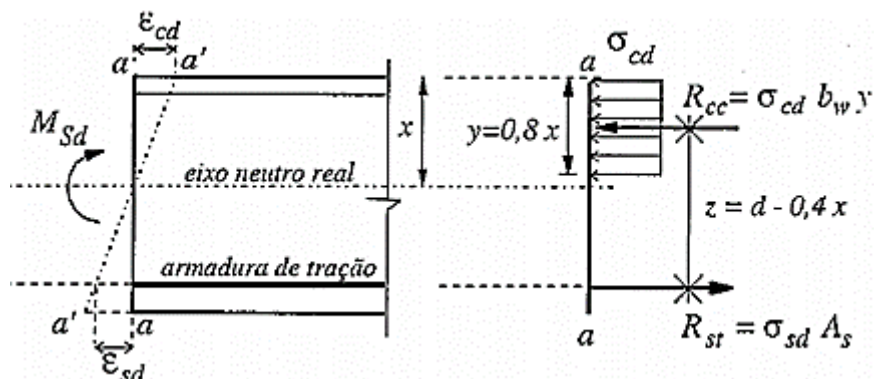


Figura 3.5: Esforços resistentes em uma seção de concreto armado fletida (CLÍMACO, 2005).

Fazendo o equilíbrio de momentos na seção da Figura 3.5:

$$M_{Sd} = R_{cc} \cdot z = R_{st} \cdot z \quad (\text{Eq. 3.12})$$

onde:

$R_{cc}$  é a resultante dos esforços de compressão no concreto;

$R_{st}$  é a resultante dos esforços de tração nas armaduras; e

$z$  é a distância entre as duas resultantes ou braço de alavanca.

Seguindo os princípios recomendados pela ABNT NBR 6118 (2014) para o dimensionamento no ELU, a resultante dos esforços de compressão no concreto ( $R_{cc}$ ) pode ser escrita:

$$R_{cc} = (0,85 \cdot f_{cd}) \cdot (b_w) \cdot (0,8 \cdot x) \quad (\text{Eq. 3.13})$$

onde:

$f_{cd}$  é a resistência a compressão do concreto de cálculo,

$b_w$  é a largura da seção transversal do elemento, e

$x$  é a profundidade da linha neutra.

O braço de alavanca  $z$  é calculado conforme indicado na Figura 3.5:

$$z = d - 0,4x \quad (\text{Eq. 3.14})$$

onde  $d$  é a altura útil da seção.

Substituindo-se as Equações 3.13 e 3.14 na Eq. 3.12, ter-se-á:

$$M_{Sd} = (0,85 \cdot f_{cd}) \cdot (b_w) \cdot (0,8x) \cdot (d - 0,4x) = b_w \cdot f_{cd} \cdot 0,68 \cdot x \cdot (d - 0,4 \cdot x)$$

ou,

$$M_{Sd} = (0,68 \cdot x \cdot d - 0,272 \cdot x^2) \cdot b_w \cdot f_{cd} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Definidos os parâmetros da seção transversal – largura e altura útil –, a resistência à compressão do concreto e o momento solicitante ( $M_{sd}$ ), determina-se a profundidade da linha neutra ( $x$ ).

A resultante dos esforços de tração nas armaduras ( $R_{st}$ ) é o produto da área de aço pela tensão atuante no aço que, para o dimensionamento, é considerada como a tensão de escoamento, visando melhor aproveitamento das armaduras. Assim:

$$R_{st} = A_s \cdot f_{yd} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

onde  $A_s$  é a área de aço da armadura tracionada e  $f_{yd}$  é a resistência ao escoamento de cálculo das armaduras.

Substituindo a Eq. 3.16 na Eq. 3.12, resulta:

$$A_s = \frac{M_{Sd}}{z \cdot f_{yd}} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

### 3.5.2 LAJES DE CONCRETO PROTENDIDO

A consideração das armaduras ativas (protendidas) nos esforços resistentes deve ser feita a partir dos diagramas tensão-deformação e da consideração do pré-alongamento delas. O pré-alongamento deve ser calculado com base nas tensões iniciais de protensão com valores de cálculo e com a consideração de perdas na idade  $t$  em análise.

Para uma seção transversal composta por armadura passiva e ativa, os esforços internos resistentes consideram também a parcela relativa ao aço de protensão (Figura 3.6).

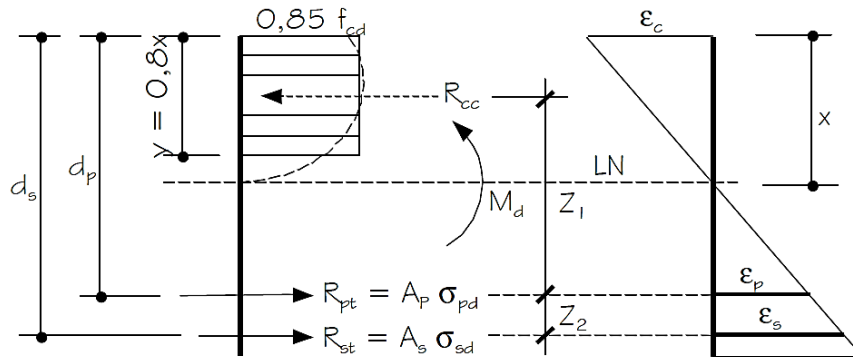


Figura 3.6: Esforços resistentes em uma seção de concreto protendido fletida (EMERICK, 2005).

Nesta condição, do equilíbrio estático de forças, tem-se:

$$\sum F_H = 0 \rightarrow R_{cc} = R_{pt} + R_{st} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

$$\sum M = 0 \rightarrow M_{Sd} = R_{cc}z_1 + R_{st}z_2 \quad (\text{Eq. 3.19})$$

Veríssimo e César Jr. (1998) apresentam o seguinte procedimento para o cálculo da capacidade resistente de uma seção de concreto protendido na flexão:

a) Determinação do valor de cálculo da força de protensão:

A força de protensão de cálculo ( $P_d$ ) é calculada a partir da força de protensão efetivamente aplicada no cabo, descontando-se as perdas ( $P_k$ ), majorada ou não por um coeficiente  $\gamma_p$ .

$$P_d = \gamma_p \cdot P_k \quad (\text{Eq. 3.20})$$

O coeficiente  $\gamma_p$  assume os seguintes valores:

- $\gamma_p = 0,9$  em situações onde o esforço de protensão é favorável;
- $\gamma_p = 1,2$  em situações onde o esforço de protensão é desfavorável.

b) Cálculo do pré-alongamento da armadura ativa:

O pré-alongamento consiste na deformação da armadura ativa capaz de balancear a deformação causada pela compressão do concreto na região da protensão. Para calcular o pré-alongamento, basta adicionar à deformação da armadura ativa, uma deformação igual à sofrida pelo concreto em função da tensão de compressão.

c) Determinação do alongamento e da respectiva tensão no aço de protensão:

Se a protensão for do tipo aderente, pode-se considerar a hipótese de aderência perfeita entre o aço e o concreto.

Em caso de protensão utilizando cordoalhas engraxadas – não aderentes – a análise pode ser feita de forma aproximada considerando-se um coeficiente de aderência entre o cabo e a laje. Para levar em conta este efeito, a ABNT NBR 6118 (2014) apresenta os limites de acréscimo de tensões nestas cordoalhas, conforme apresentado no item 3.5-c.

d) Verificação do equilíbrio da seção:

No cálculo, usualmente admite-se que não existe armadura passiva na seção, e verifica-se se a armadura ativa é suficiente. Logo, a força de protensão deve estar em equilíbrio com a resultante da força de compressão no concreto e com o momento fletor interno solicitante. Se a força na armadura ativa for menor que a força de compressão no concreto, deve-se acrescentar armadura passiva complementar. Caso a força de tração na armadura ativa seja maior ou igual a força de compressão no concreto, a



armadura é suficiente para suportar o carregamento atuante. Nesse caso, deve-se colocar a armadura passiva mínima recomendada pela ABNT NBR 6118 (2014), apresentada no item 3.1.1.

### 3.6 ESTADOS-LIMITES DE SERVIÇO (ELS)

A ABNT NBR 6118 (2014) estabelece que os ELS são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, à aparência, ao conforto do usuário e à boa utilização funcional delas.

Os cálculos e verificações nos ELS são fundamentais para garantir desempenho satisfatório das estruturas quando em uso normal, ou seja, nas condições de utilização (serviço) para as quais foram projetadas.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), a segurança das estruturas de concreto pode exigir a verificação de alguns dos seguintes ELS:

- a) Estado-limite de formação de fissuras (ELS-F): estado em que se inicia a formação de fissuras. É uma verificação usual em elementos de concreto protendido;
- b) Estado-limite de abertura de fissuras (ELS-W): estado em que as fissuras se apresentam com aberturas características ( $w_k$ ) iguais aos máximos especificados;
- c) Estado-limite de deformação excessiva (ELS-DEF): estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para utilização normal da estrutura;
- d) Estado-limite de descompressão (ELS-D): estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção. É uma verificação usual em elementos de concreto protendido;
- e) Estado-limite de descompressão parcial (ELS-DP): estado no qual garante-se a compressão na seção transversal, na região onde existem armaduras ativas;
- f) Estado-limite de compressão excessiva (ELS-CE): estado em que as tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido.

Usual no caso do concreto protendido na ocasião da aplicação da protensão;

- g) Estado-limite de vibrações excessivas (ELS-VE): estado em que as vibrações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção.

### 3.6.1 ESTADO-LIMITE DE FORMAÇÃO DE FISSURAS (ELS-F)

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), o ELS-F é aquele em que se inicia a formação de fissuras. Admite-se que este estado limite é atingido quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a  $f_{ct,f}$  (resistência do concreto à tração na flexão).

Para caracterização da abertura de fissuras é interessante identificar o estágio de comportamento em que a peça de concreto se encontra. Geralmente, nas verificações em serviço, as peças de concreto se encontram nos estádios I ou II.

No estágio I, a tensão de tração no concreto não ultrapassa sua resistência à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ), e não há fissuras de flexão visíveis; nesse estágio, o diagrama de tensão normal ao longo da seção é linear e as tensões nas fibras mais comprimidas são proporcionais às deformações, correspondendo ao trecho linear do diagrama tensão-deformação do concreto. Já o estágio II é caracterizado pela presença de fissuras nas zonas de tração e, portanto, o concreto situado nessas regiões é desprezado; nesse estágio, a tensão de tração na maioria dos pontos situados na região tracionada da seção tem valor superior ao da resistência do concreto à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ), e as fissuras de flexão são visíveis (SILVA, 2005).

O limite entre os estádios I e II é caracterizado por um momento fletor capaz de produzir a primeira fissura na peça, denominado de momento fletor de fissuração ( $M_r$ ). Se o momento fletor atuante numa dada seção da peça for menor do que o momento de fissuração, a seção não está fissurada e, portanto, encontra-se no estágio I. Caso contrário, a seção encontra-se fissurada e, portanto, no estágio II. Estando a peça no estágio II, significa que foi ultrapassado o estado-limite de formação de fissuras.

Nas estruturas de concreto armado a verificação do estado-limite de formação de fissuras deve ser feita utilizando a combinação rara de serviço para determinação das ações e esforços.

Para estruturas de concreto protendido com pós-tração, o estado limite de formação de fissuras deve ser verificado utilizando a combinação frequente ou rara, dependendo do nível de protensão adotado no elemento estrutural (Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118, 2014).

### 3.6.2 ESTADO-LIMITE DE ABERTURA DE FISSURAS (ELS-W)

Para evitar que surjam problemas relativos à funcionalidade e à durabilidade das estruturas, as fissuras não devem ter aberturas grandes. Outro grave problema que pode ser evitado pela limitação da abertura das fissuras é a corrosão das armaduras; aberturas excessivas facilitam a penetração de agentes agressivos do meio externo para o interior da massa de concreto e, também, das armaduras. Além disso, fissuras com aberturas exageradas geram certo desconforto psicológico aos usuários, prejudicando, ainda, a estética (SILVA, 2005).

Para atender ao ELS-W, a peça deve apresentar aberturas características inferiores ao máximo especificado pela ABNT NBR 6118 (2014) em função da classe de agressividade ambiental.

O Quadro 3.6 apresenta os limites de abertura máxima de fissuras ( $w_{k,máx}$ ) para estruturas de concreto armado em função da classe de agressividade ambiental. Nesta situação as aberturas devem ser verificadas utilizando a combinação frequente de serviço.

Quadro 3.6: Limites de abertura de fissuras para estruturas de concreto armado (ABNT NBR 6118, 2014).

Classe de agressividade ambiental	$w_{k,máx}$ (mm)	Combinações de ações em serviço
I	0,4	Frequente
II	0,3	Frequente
III	0,3	Frequente
IV	0,2	Frequente

Para estruturas em concreto protendido com pós-tração, a ABNT NBR 6118 (2014) permite abertura de fissuras somente em ambientes com classe de agressividade I ou II. Esta medida visa proteger as armaduras ativas quando em ambientes muito agressivos, para garantir a segurança da estrutura protendida. Nestes casos, a abertura máxima de fissuras ( $w_k$ ) limita-se a 0,2 mm, calculada na combinação frequente de serviço (Quadro 3.16).

### 3.6.3 ESTADO-LIMITE DE DEFORMAÇÃO EXCESSIVA (ELS-DEF)

A verificação do ELS-DEF tem por objetivo assegurar as boas condições de uso da estrutura. Além do aspecto visual desagradável, a ocorrência de flechas com valores que ultrapassem determinados limites (deslocamentos limites) pode gerar desconforto aos usuários e causar danos a elementos estruturais e não estruturais, interferindo de modo desfavorável no funcionamento e na durabilidade da estrutura (SILVA, 2005).

A ABNT NBR 6118 (2014) classifica os deslocamentos excessivos e tendência à vibração dos elementos estruturais em quatro grupos básicos, indicados a seguir:

- a) Aceitabilidade sensorial: o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. O Quadro 3.7 apresenta os limites para estes casos;
- b) Efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção, como deformações em pavimentos que devem permanecer planos, drenar água ou que suportem equipamentos sensíveis;
- c) Efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão ligados a ela, como por exemplo alvenarias, caixilhos, revestimentos, divisórias internas etc.;
- d) Efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-as ao modelo estrutural adotado.

No Quadro 3.7 o valor do vão ( $L$ ) corresponde a distância entre os apoios. No caso de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.

Quadro 3.7: Limites para deslocamentos considerando o efeito de aceitabilidade sensorial (ABNT NBR 6118, 2014).

Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	L/250
Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	L/350

O cálculo das flechas deve ser feito por meio de modelos que considerem a rigidez efetiva da seção da laje, ou seja, que incluam a presença de armaduras, a possível existência de fissuras no concreto e as deformações diferidas no tempo.

Para a verificação do estado limite de serviço de deformações excessivas, a ABNT NBR 6118 (2014) recomenda a utilização da combinação quase permanente, uma vez que é a combinação que ocorre durante grande parte da vida útil da estrutura.

A ABNT NBR 6118 (2014) permite que as flechas sejam avaliadas no estágio I, admitindo-se um comportamento elástico e linear do concreto e do aço quando os esforços forem inferiores aos que iniciam a fissuração; e no estágio II, quando ultrapassarem. Nesse caso, deve-se utilizar o conceito de rigidez equivalente, dada pela seguinte expressão:

$$(E \cdot I)_{eq,t0} = E_{CS} \left\{ \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[ 1 - \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{CS} \cdot I_c \quad (\text{Eq. 3.21})$$

onde:

$I_c$  é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

$I_{II}$  é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II;

$M_a$  é o momento fletor na seção crítica do vão considerado;

$M_r$  é o momento de fissuração do elemento estrutural;

$E_{CS}$  é o módulo de elasticidade secante do concreto.

O momento de fissuração ( $M_r$ ) pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

sendo:

$\alpha = 1,2$  para seções T ou duplo T;

$\alpha = 1,3$  para seções I ou T invertido;

$\alpha = 1,5$  para seções retangulares.

onde:

$\alpha$  é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;

$y_t$  é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

$f_{ct}$  é a resistência à tração direta do concreto.

A flecha adicional diferida no tempo, decorrente das ações de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator  $\alpha_f$  dado pela expressão:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'} \quad (\text{Eq. 3.23})$$

onde:

$\rho'$  é a taxa geométrica de armadura longitudinal de compressão dada por

$$\frac{A_s'}{bd} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

$\xi$  é um coeficiente em função do tempo, calculado pelas expressões:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (\text{Eq. 3.25})$$

$$\xi(t) = 0,68(0,996^t)t^{0,32} \quad \text{para } t \leq 70 \text{ meses} \quad (\text{Eq. 3.26})$$

$$\xi(t) = 2 \quad \text{para } t > 70 \text{ meses} \quad (\text{Eq. 3.27})$$

onde:

$t$  é o tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida;

$t_0$  é a idade, em meses, relativa à data de aplicação da carga de longa duração.

O valor da flecha total deve ser obtido multiplicando a flecha imediata por  $(1 + \alpha_f)$ .

Nos elementos estruturais com armaduras ativas, a rigidez é da seção bruta ( $E_{CS} \cdot I_C$ ), desde que não seja ultrapassado o estado-limite de formação de fissuras. Caso contrário, a expressão da Eq. 3.21 pode ser utilizada para encontrar uma rigidez equivalente aproximada. A protensão deve ser incluída como uma ação externa equivalente.

### 3.6.4 ESTADO-LIMITE DE DESCOMPRESSÃO (ELS-D)

O ELS-D é o estado no qual em um ou mais pontos da seção transversal a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção. Dessa forma, toda a seção do elemento estrutural estará comprimida, evitando-se a formação de fissuras.

A ABNT NBR 6118 (2014) recomenda a verificação do ELS-D em estruturas de concreto protendido com pós-tração, limitada ou completa (Quadro 3.16).

### 3.6.5 ESTADO-LIMITE DE DESCOMPRESSÃO PARCIAL (ELS-DP)

É o estado limite associado às estruturas protendidas, no qual se garante a compressão da seção transversal na região onde existem armaduras ativas. Essa região deve se estender até uma distância  $a_p$  da face mais próxima da cordoalha ou bainha de protensão (Figura 3.7).

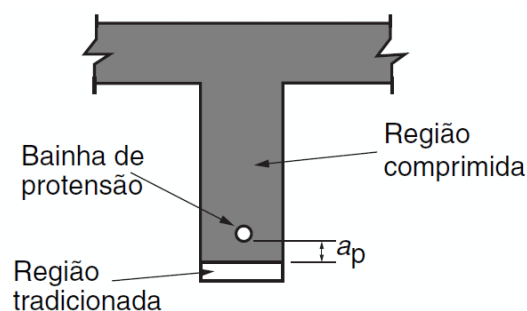


Figura 3.7: ELS-DP(ABNT NBR 6118, 2014).

A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP, com  $a_p = 50$  mm.

### 3.6.6 ESTADO-LIMITE DE COMPRESSÃO EXCESSIVA (ELS-CE)

O ELS-CE ocorre quando as tensões de compressão na peça atingem o limite convencional estabelecido. Também é chamado de estado limite último no ato da protensão.

Esta verificação deve ser feita após o tensionamento da armadura de protensão com a ação dos esforços de carga permanente.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), a segurança, em relação à ruptura, no ato da protensão, é verificada conforme hipóteses apresentadas no item 3.5, em relação ao ELU, respeitando as seguintes hipóteses suplementares:

- a) Considera-se a resistência característica do concreto  $f_{ckj}$  aquela correspondente à idade fictícia  $j$  (em dias), no ato da protensão. A resistência  $f_{ckj}$  deve ser claramente especificada no projeto;
- b) Para esta verificação, admitem-se os seguintes valores para os coeficientes de ponderação:
  - coeficiente de minoração da resistência do concreto  $\gamma_c = 1,2$ ;
  - coeficiente de minoração da resistência do aço  $\gamma_s = 1,15$ ;
  - coeficiente de majoração das cargas na pré-tração  $\gamma_p = 1,0$ ;
  - coeficiente de majoração das cargas na pós-tração  $\gamma_p = 1,1$ ;
  - coeficiente de majoração das ações desfavoráveis  $\gamma_f = 1,0$ ;
  - coeficiente de majoração das ações favoráveis  $\gamma_f = 0,9$ ;

Apenas as cargas que efetivamente atuam na ocasião da protensão devem ser consideradas.

A ABNT NBR 6118 (2014) apresenta uma verificação simplificada, onde admite-se que a segurança em relação ao estado limite último no ato da protensão seja verificada no estágio I (concreto não fissurado e comportamento elástico linear dos materiais), desde que as seguintes condições sejam satisfeitas:



- a) a tensão máxima de compressão na seção de concreto, obtida com as solicitações ponderadas de  $\gamma_p = 1,1$  e  $\gamma_f = 1,0$ , não pode ultrapassar 70% da resistência característica  $f_{ckj}$  prevista para a idade de aplicação da protensão;
- b) a tensão máxima de tração do concreto não pode ultrapassar 1,2 vezes a resistência à tração  $f_{ctm}$  correspondente ao valor de  $f_{ckj}$  especificado;
- c) quando nas seções transversais existirem tensões de tração, deve haver armadura de tração calculada no estágio II. Para efeitos de cálculo, nessa fase da construção, a força nessa armadura pode ser considerada igual à resultante das tensões de tração no concreto no estágio I. Essa força não pode provocar, na armadura correspondente, acréscimos de tensão superiores a 150 MPa no caso de fios ou barras lisas e a 250 MPa em barras nervuradas.

### 3.6.7 ESTADO-LIMITE DE VIBRAÇÕES EXCESSIVAS (ELS-VE)

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais. Para assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a frequência própria da estrutura ( $f$ ) da frequência crítica ( $f_{crit}$ ), que depende da destinação da respectiva edificação. A condição abaixo deve ser satisfeita:

$$f > 1,2f_{crit} \quad (\text{Eq. 3.28})$$

A ABNT NBR 6118:2014 indica que na falta de valores determinados experimentalmente, podem ser adotados os valores indicados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8: Frequência crítica ( $f_{crit}$ ) para vibrações verticais para alguns casos (ABNT NBR 6118, 2014).

Caso	$f_{crit}$ (Hz)
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

## 3.7 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

A ABNT NBR 8681 (2003) estabelece procedimentos para a ponderação e combinações das ações e verificação da segurança das estruturas. As combinações

das ações devem ser feitas de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. A verificação da segurança em relação aos ELU's e aos ELS's deve ser realizada em função de combinações últimas e de combinações de serviço, respectivamente.

### 3.7.1 COMBINAÇÕES ÚLTIMAS

Uma combinação última pode ser classificada como normal, especial ou de construção e excepcional.

Na combinação última normal, devem estar incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos, e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação.

A ABNT NBR 8681 (2003) estabelece que a combinação última normal é dada pela expressão dada na Eq. 3.29.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{gi,k} + \gamma_q \cdot \left[ F_{q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} \cdot F_{qj,k} \right] \quad (\text{Eq. 3.29})$$

onde:

$F_d$  é a solicitação de cálculo;

$\gamma_{gi}$  é o coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$F_{gi,k}$  é o valor característico das ações permanentes;

$\gamma_q$  é o coeficiente de ponderação das ações variáveis;

$F_{qj,k}$  é o valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação; e

$\Psi_{0j} \cdot F_{qj,k}$  é o valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis.

Na combinação última especial ou de construção, devem estar presentes as ações permanentes e a ação variável especial, quando existir, com seus valores característicos, e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos, conforme ABNT NBR 8681 (2003).

Para a combinação última excepcional, devem figurar as ações permanentes e a ação variável excepcional, quando existir, com seus valores representativos, e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea com seus valores reduzidos de combinação, conforme ABNT NBR 8681 (2003).

A ABNT 8681 (2003) estabelece que os coeficientes de ponderação das ações permanentes majoram os valores representativos das ações permanentes que provocam efeitos desfavoráveis e minoram os valores representativos daquelas que provocam efeitos favoráveis para a segurança da estrutura. O Quadro 3.9 fornece os valores do coeficiente de ponderação a considerar para cada uma das ações permanentes, consideradas separadamente. No Quadro 3.10, é fornecido o valor do coeficiente de ponderação a considerar se, numa combinação, as ações forem agrupadas.

Para efeitos de recalque de apoio e retração de materiais, a ABNT NBR 8681 (2003) recomenda os coeficientes de ponderação indicados no Quadro 3.11.

Quadro 3.9: Coeficientes de ponderação para ações permanentes consideradas separadamente (ABNT NBR 8681, 2003)

Combinação	Tipo de Ação	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Peso próprio de estruturas metálicas	1,25	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,30	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados <sup>1</sup>	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições in loco	1,40	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos <sup>2</sup>	1,50	1,0
Especial ou de construção	Peso próprio de estruturas metálicas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,20	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados <sup>1</sup>	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições in loco	1,30	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos <sup>2</sup>	1,40	1,0
Excepcional	Peso próprio de estruturas metálicas	1,10	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados <sup>1</sup>	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições in loco	1,20	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos <sup>2</sup>	1,30	1,0

<sup>1</sup> Por exemplo: paredes e fachadas pré-moldadas, gesso acartonado.

<sup>2</sup> Por exemplo: paredes de alvenaria e seus revestimentos, contrapisos.

Quadro 3.10: Coeficientes de ponderação para ações permanentes agrupadas (ABNT NBR 8681, 2003).

Combinação	Tipo de estrutura	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Grandes pontes <sup>1</sup>	1,30	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral <sup>2</sup>	1,35	1,0
	Edificações tipo 2 <sup>3</sup>	1,40	1,0
Especial ou de construção	Grandes pontes <sup>1</sup>	1,20	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral <sup>2</sup>	1,25	1,0
	Edificações tipo 2 <sup>3</sup>	1,30	1,0
Excepcional	Grandes pontes <sup>1</sup>	1,10	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral <sup>2</sup>	1,15	1,0
	Edificações tipo 2 <sup>3</sup>	1,20	1,0
<sup>1</sup> Grandes pontes são aquelas em que o peso próprio da estrutura supera 75% da totalidade das ações <sup>2</sup> Edificações tipo 1 são aquelas onde as cargas acidentais superam 5 kN/m <sup>2</sup> . <sup>3</sup> Edificações tipo 2 são aquelas onde as cargas acidentais não superam 5 kN/m <sup>2</sup>			

Quadro 3.11: Coeficientes de ponderação para efeitos de recalque de apoio e de retração de materiais (ABNT NBR 8681, 2003).

Combinação	Efeitos	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normal	1,20	0,0
Especial ou de construção	1,20	0,0
Excepcional	0,00	0,0

Os coeficientes de ponderação das ações variáveis majoram os valores representativos das ações que provocam efeitos desfavoráveis para a segurança da estrutura. As ações variáveis que provocam efeitos favoráveis não são consideradas nas combinações de ações, admitindo-se que sobre a estrutura atuem apenas as parcelas de ações variáveis que produzam efeitos desfavoráveis.

O Quadro 3.12 apresenta os coeficientes de ponderação das ações variáveis consideradas separadamente. No Quadro 3.13 são apresentados os coeficientes para as ações variáveis consideradas conjuntamente.

Seguindo as diretrizes da ABNT NBR 8681 (2003), a ABNT NBR 6118 (2014) apresenta os coeficientes indicados no Quadro 3.14 para combinações últimas.

Quadro 3.12: Coeficientes de ponderação para ações variáveis consideradas separadamente (ABNT NBR 8681, 2003).

Combinação	Tipo de ação	Coeficiente de ponderação
Normal	Ações truncadas <sup>1</sup>	1,20
	Efeito de temperatura	1,20
	Ação do vento	1,40
	Ações variáveis em geral	1,50
Especial ou de construção	Ações truncadas <sup>1</sup>	1,10
	Efeito de temperatura	1,00
	Ação do vento	1,20
	Ações variáveis em geral	1,30
Excepcional	Ações variáveis em geral	1,00

<sup>1</sup> Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico de modo que o valor dessa ação não pode superar o limite correspondente.

Quadro 3.13: Coeficientes de ponderação para ações variáveis consideradas conjuntamente (ABNT NBR 8681, 2003).

Combinação	Tipo de estrutura	Coeficiente de ponderação
Normal	Pontes e edificações tipo 1	1,50
	Edificações tipo 2	1,40
Especial ou de construção	Pontes e edificações tipo 1	1,30
	Edificações tipo 2	1,20
Excepcional	Estruturas em geral	1,00

<sup>1</sup> Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico de modo que o valor dessa ação não pode superar o limite correspondente.

Quadro 3.14: Coeficientes de ponderação das ações nas combinações últimas (ABNT NBR 6118, 2014).

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes ( <i>g</i> )		Variáveis ( <i>q</i> )		Protensão ( <i>p</i> )		Recalque de apoio e retração	
	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>T</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>F</i>
Normais	1,4 <sup>a</sup>	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,0	1,2	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

Onde  
*D* é desfavorável, *F* é favorável, *G* representa as cargas variáveis em geral e *T* é a temperatura.  
<sup>a</sup> Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

### 3.7.2 COMBINAÇÕES DE SERVIÇO

Nas combinações de serviço são consideradas todas as ações permanentes, inclusive deformações impostas, e as ações variáveis correspondentes a cada um dos tipos de combinações.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), as combinações de serviço são classificadas de acordo com sua permanência na estrutura e devem ser verificadas como estabelecido a seguir:

- a) quase permanentes: podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de deformações excessivas. Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes, conforme Eq. 3.30.

$$F_{d,ser} = \sum F_{Gi,k} + \sum \Psi_{2j} \cdot F_{qj,k} \quad (\text{Eq. 3.30})$$

onde:

$\Psi_{2j}$  é o fator redutor para a combinação quase permanente, conforme ABNT NBR 8681 (2003).

- b) frequentes: repetem-se muitas vezes durante o período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação dos estados-limites de formação de fissuras, de abertura de fissuras e de vibrações excessivas. Podem também ser consideradas para verificações de estados-limites de deformações excessivas decorrentes de vento ou temperatura que podem comprometer as vedações. Nas combinações frequentes de serviço, a ação variável principal ( $F_{q1}$ ) é tomada com seu valor frequente  $\Psi_1 \cdot F_{q1k}$  e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes  $\Psi_2 \cdot F_{qk}$ , conforme Eq. 3.31.

$$F_{d,ser} = \sum F_{Gi,k} + \Psi_1 \cdot F_{q1,k} + \sum \Psi_{2j} \cdot F_{qj,k} \quad (\text{Eq. 3.31})$$

- c) raras: ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de formação de fissuras. Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal é tomada com

seu valor característico ( $F_{q1,k}$ ) e todas as demais ações são tomadas com seus valores frequentes  $\Psi_1 \cdot F_{qk}$ , conforme Eq. 3.32.

$$F_{d,ser} = \sum F_{Gi,k} + F_{q1,k} + \sum \Psi_{1j} \cdot F_{qj,k} \quad (\text{Eq. 3.32})$$

Os fatores de combinação ( $\Psi_0$ ) estão indicados no Quadro 3.15, juntamente com os fatores de redução ( $\Psi_1$  e  $\Psi_2$ ).

Quadro 3.15: Valores dos fatores de combinação ( $\Psi_0$ ) e de redução ( $\Psi_1$  e  $\Psi_2$ ) (ABNT NBR 8681, 2003)

Ações		$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
<b>Cargas acidentais de edifícios</b>	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>1</sup>	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>2</sup>	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
<b>Vento</b>	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
<b>Temperatura</b>	Variações uniformes de temperatura em relação à média local	0,6	0,5	0,3
<sup>1</sup> Edifícios residenciais.				
<sup>2</sup> Edifícios comerciais, de escritório, estações e edifícios públicos.				

### 3.8 CONTROLE DA FISSURAÇÃO E PROTEÇÃO DAS ARMADURAS

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), a abertura máxima característica ( $w_k$ ) das fissuras, desde que não exceda valores da ordem de 0,2 mm a 0,4 mm, (conforme Quadro 3.16) sob ação das combinações frequentes, não tem importância significativa na corrosão das armaduras passivas. Para as armaduras ativas, em virtude da possibilidade de corrosão sob tensão, esses limites devem ser mais restritos e função direta da agressividade ambiental.

O Quadro 3.16 mostra os valores limites, assim como outras providências, com o objetivo de garantir proteção às armaduras quanto à corrosão.

Quadro 3.16: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental (ABNT NBR 6118, 2014).

<b>Tipo de concreto estrutural</b>	<b>Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão</b>	<b>Exigências relativas à fissuração</b>	<b>Combinação de ações em serviço a utilizar</b>
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas combinações abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação quase-permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas combinações abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação frequente

<sup>a</sup> A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com  $a_p = 50$  mm.

A ABNT NBR 6118 (2014) permite que para lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente de ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

### 3.9 PUNÇÃO

A ABNT NBR 6118 (2014) estabelece no item 19.5.1 o modelo de cálculo para o dimensionamento de lajes à punção. O modelo consiste na verificação do cisalhamento em duas ou mais superfícies críticas definidas no entorno de forças concentradas.

A tensão de compressão diagonal do concreto deve ser verificada, indiretamente, por meio da tensão de cisalhamento no perímetro do pilar ou da carga concentrada (contorno C).

No perímetro afastado de duas vezes a altura útil da laje em relação ao perímetro do pilar ou carga concentrada (contorno C'), deve ser verificada a capacidade da ligação à punção, associada à resistência à tração diagonal.

A terceira superfície crítica (contorno C'') apenas deve ser verificada quando for necessário reforçar a ligação com armadura transversal. A Figura 3.8 ilustra os perímetros críticos de um pilar interno.



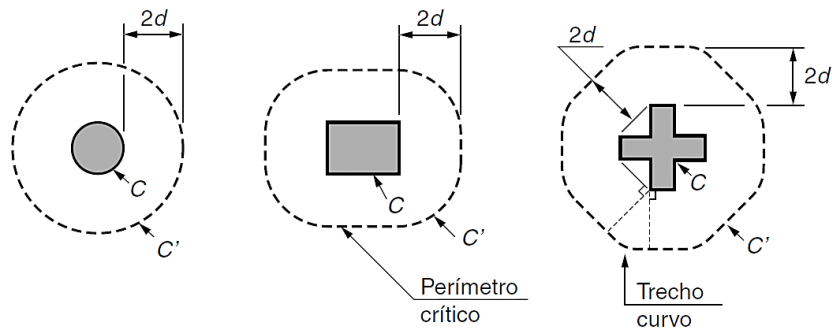


Figura 3.8: Perímetro crítico em pilares internos (ABNT NBR 6118, 2014).

Nos casos em que o efeito do carregamento pode ser considerado simétrico, como em pilares internos (Figura 3.8), a tensão solicitante é dada por:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u \cdot d} \quad (\text{Eq. 3.33})$$

onde:

$d$  é a altura útil da laje ao longo do contorno crítico  $C'$ , externo ao contorno  $C$  da área de aplicação da força e deste distante  $2d$  no plano da laje;

$u$  é o perímetro do contorno  $C'$ ;

$F_{Sd}$  é a força ou a reação concentrada de cálculo.

Em pilares onde exista, além da força vertical, momento de flexão resultante da transferência da laje para o pilar, o efeito da assimetria deve ser considerado no cálculo da tensão.

As tensões tangenciais solicitantes devem ser calculadas conforme item 19.5 da ABNT NBR 6118 (2014).

Em lajes protendidas, a ABNT NBR 6118 (2014) estabelece que na verificação à punção a tensão tangencial atuante ( $\tau_{Sd}$ ) pode ser reduzida da tensão gerada pelos cabos protendidos inclinados ( $\tau_{Pd}$ ) que atravessam o contorno considerado passando a menos de  $d/2$  da face do pilar, ou seja:

$$\tau_{Sd,ef} = \tau_{Sd} - \tau_{Pd} \quad (\text{Eq. 3.34})$$

sendo:

$$\tau_{Pd} = \frac{\sum P_{k,inf,i} \cdot \text{sen } \alpha_i}{u \cdot d} \quad (\text{Eq. 3.35})$$

onde:

$P_{k,inf,i}$  é a força de protensão no cabo  $i$ ;

$\alpha_i$  é a inclinação do cabo  $i$  em relação ao plano da laje no contorno considerado;

$u$  é o perímetro crítico do contorno considerado, em que se calculam  $\tau_{Sd,ef}$  e  $\tau_{Sd}$ .

Esse efeito favorável pode ser observado na Figura 3.9.

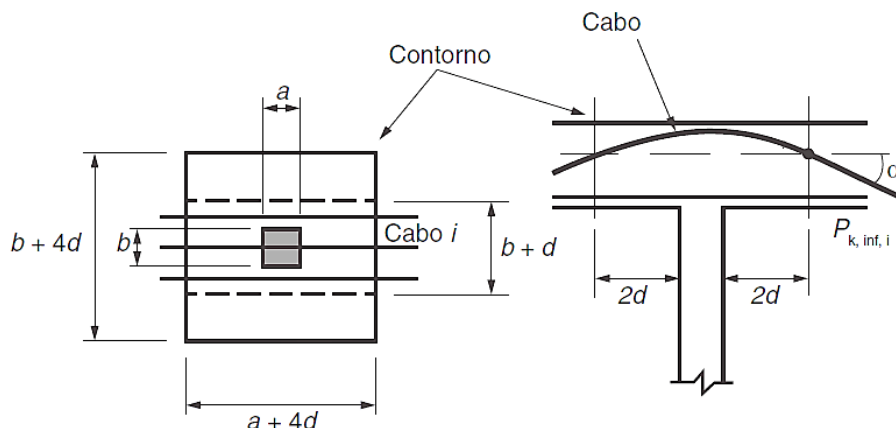


Figura 3.9: Efeito favorável dos cabos inclinados (ABNT NBR 6118, 2014).

### 3.10 COLAPSO PROGRESSIVO

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), para garantir a ductilidade e a proteção contra o colapso progressivo, a armadura de flexão inferior que atravessa o contorno  $C$  deve estar suficientemente ancorada além do contorno  $C'$  ou  $C''$  (Figura 3.10), e deve ser tal que:

$$f_{yd} \cdot A_{s,ccp} \geq 1,5 \cdot F_{Sd} \quad (\text{Eq. 3.36})$$

onde:

$A_{s,ccp}$  é o somatório de todas as áreas das barras inferiores que cruzam cada uma das faces do pilar;

$F_{Sd}$  pode ser calculado com coeficiente de ponderação igual a 1,2.

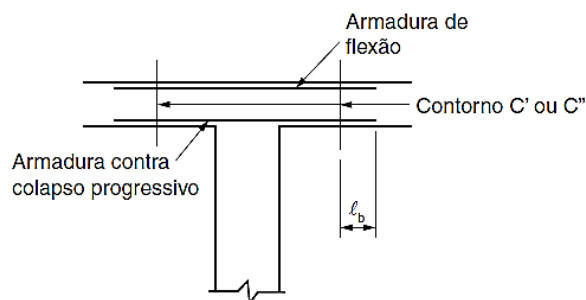


Figura 3.10: Armadura contra colapso progressivo (ABNT NBR 6118, 2014).

## 4 ESTUDO DE CASO

---

Com a finalidade de avaliar o comportamento estrutural e os custos das soluções em lajes sem vigamento, desenvolveu-se o estudo de caso aqui apresentado. Foram avaliadas três situações distintas de vãos (8,0 m; 10,50 m e 13,50 m), aplicadas a um edifício garagem, utilizando sistemas estruturais em laje nervurada em concreto armado, laje nervurada em concreto protendido e laje *BubbleDeck* em concreto armado.

As modelagens computacionais foram desenvolvidas no *software* CAD/TQS®, desenvolvido pela TQS Inf. Ltda, aplicando recomendações normativas da ABNT NBR 6118 (2014). Todas as unidades de força encontram-se em tonelada força (tf) por restrição do programa.

As estimativas de custos utilizaram composições do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), todas referenciadas à cidade de Belo Horizonte/MG. O Anexo A mostra todas as composições de custos utilizadas.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

O projeto piloto refere-se a um edifício garagem composto de térreo elevado (+ 1,20), três pavimentos-tipo e cobertura, com altura total de 13,20 m e dimensões em planta de 33,38 m por 31,18 m, totalizando 1041 m<sup>2</sup> de área estruturada. Os pavimentos se interligam por rampas semicirculares externas à edificação. A exceção é o pavimento térreo, que tem acesso por rampa em tangente apoiada sobre o terreno. Um elevador de passageiros e uma escada metálica externa dão acesso aos pavimentos superiores.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a planta arquitetônica do pavimento térreo (em estudo) e o corte vertical da edificação, respectivamente. A área da laje do pavimento térreo é de 988 m<sup>2</sup>.

As estimativas das espessuras das lajes seguiram as recomendações do PTI (2006) e do fabricante do sistema *BubbleDeck*, conforme descrito nos itens 2.6.4 e 3.3 desse trabalho.

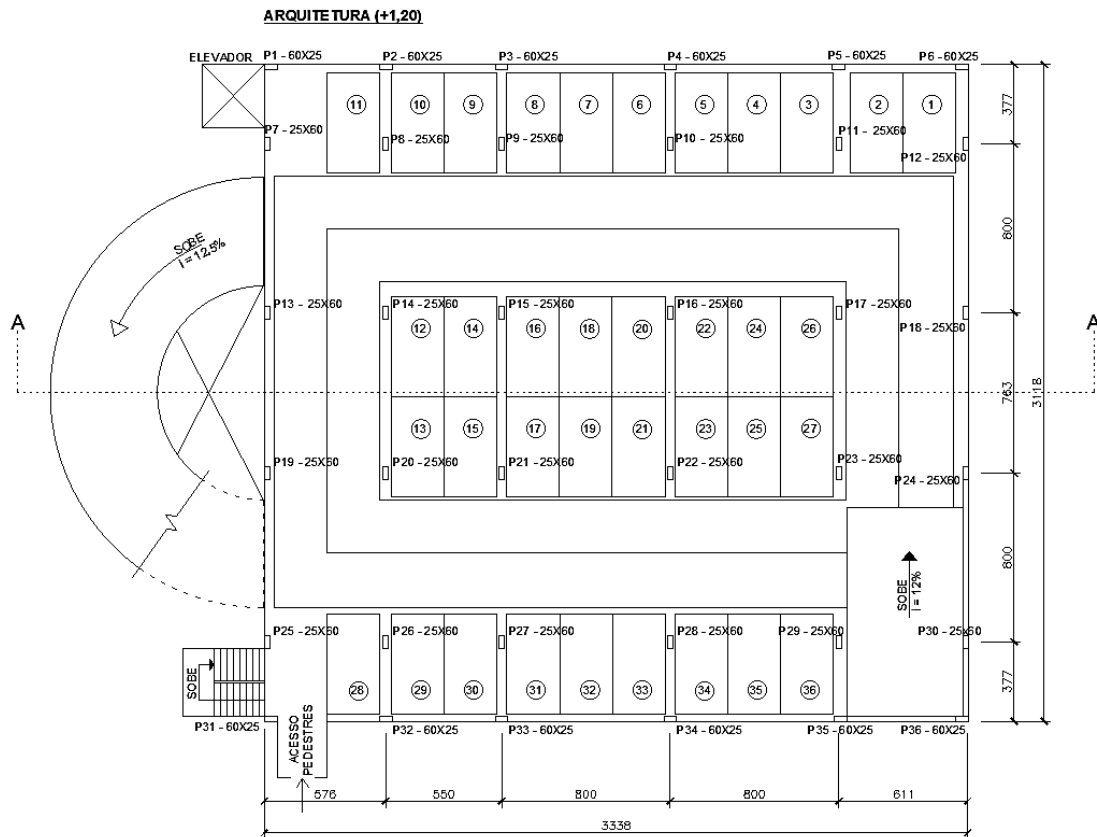


Figura 4.1: Planta baixa do pavimento térreo (medidas em cm).

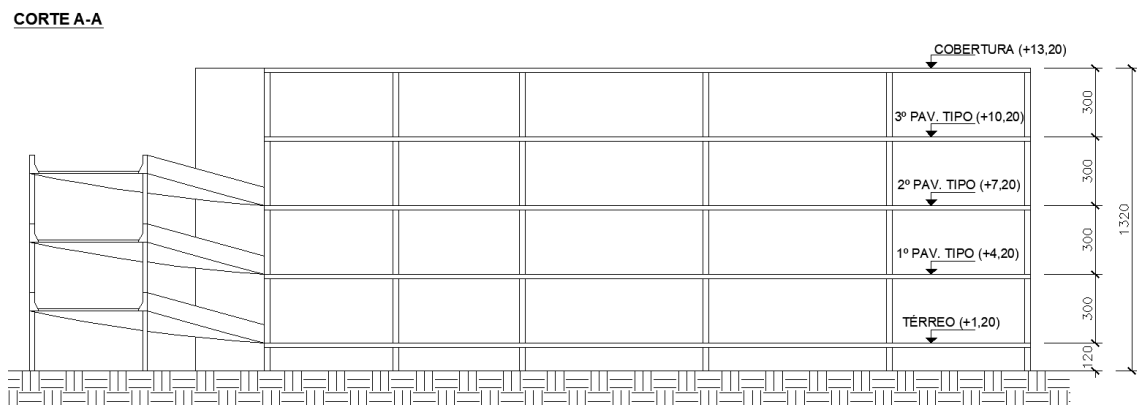


Figura 4.2: Corte vertical do edifício (medidas em cm).

Foram avaliados os seguintes parâmetros: vão (8,00 m; 10,50 m e 13,50 m), sistema estrutural (laje nervurada armada; laje nervurada protendida; laje *BubbleDeck* armada) e espessura da laje.

O Quadro 4.1 resume os casos analisados nessa pesquisa.

Quadro 4.1: Resumo dos casos analisados.

Projeto A: vão máximo de 8,00 m		Projeto B: vão máximo de 10,50 m		Projeto C: vão máximo de 13,50 m	
A1	Concreto armado	B1	Concreto armado	C1	Concreto armado
	Laje nervurada		Laje nervurada		Laje nervurada
	Espessura: 28,5 cm		Espessura: 37,5 cm		Espessura: 50 cm
A2	Concreto protendido	B2	Concreto protendido	C2	Concreto protendido
	Laje nervurada		Laje nervurada		Laje nervurada
	Espessura: 23,5 cm		Espessura: 33,5 cm		Espessura: 37,5 cm
A3	Concreto armado	B3	Concreto armado	C3	Concreto armado
	<i>BubbleDeck</i>		<i>BubbleDeck</i>		<i>BubbleDeck</i>
	Espessura: 28 cm		Espessura: 34 cm		Espessura: 40 cm

Para fins de análise estrutural, foram consideradas as seguintes características: concreto C35 ( $f_{ck} = 35$  MPa); Classe de Agressividade Ambiental II; aço CA-50; aço CP 190-RB (quando aplicável).

Nos projetos em concreto protendido, foram utilizadas as seguintes propriedades:

- cordoalhas engraxadas CP 190-RB Ø12,7 mm;
- coeficiente de atrito cabo-bainha = 0,05;
- coeficiente de perda = 0,0035/m;
- acomodação da ancoragem = 6 mm;
- perdas diferidas = 15%;
- força inicial de protensão = 150 kN;
- $f_{ckj}$  no ato da protensão = 21 MPa;
- $f_{ctm}$  no ato da protensão =  $0,3 \cdot f_{ckj}^{2/3} = 2,28$  MPa.

Os carregamentos considerados foram:

- Permanentes: peso próprio (calculado automaticamente – peso específico do concreto igual a 25 kN/m<sup>3</sup>); sobrecarga permanente de 1 kN/m<sup>2</sup> e alvenaria de contorno de 3 kN/m (muretas com 1,5 m de altura);

- Acidental: 3 kN/m<sup>2</sup> (cat. I da Tab. 13 da ABNT NBR 6120, 2019). A análise estrutural não considerou a atuação de cargas móveis concentradas.

## 4.2 PROJETO A – VÃO DE 8,00 m

O Projeto A é composto por uma laje apoiada em 36 pilares de 60 cm x 25 cm com vãos máximos de 8 m.

Foram estudadas três soluções: laje nervurada em concreto armado (projeto A1), laje nervurada protendida (projeto A2) e laje *BubbleDeck* (projeto A3).

### 4.2.1 PROJETO A1 – LAJE NERVURADA EM CONCRETO ARMADO

A Figura 4.3 apresenta a planta de forma do projeto A1.

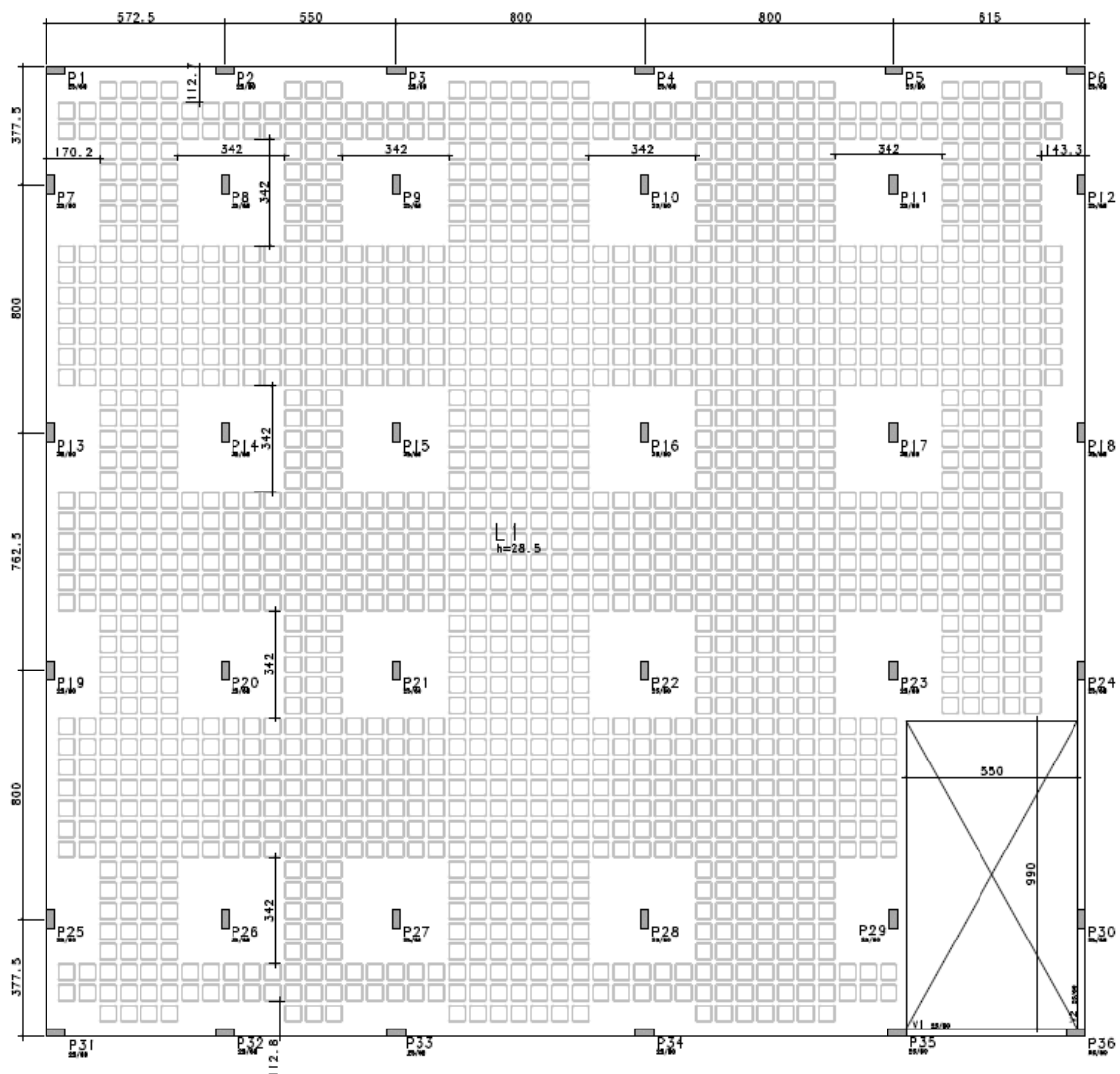


Figura 4.3: Projeto A1 - Planta de forma (dimensões em cm).

No contorno dos pilares foram deixadas regiões maciças para resistir aos momentos negativos e combater os efeitos da punção.

Foram empregadas formas plásticas Atex, modelo 660, com capa de concreto de 7,5 cm e espessura total de 28,5 cm, conforme mostra a Figura 4.4.

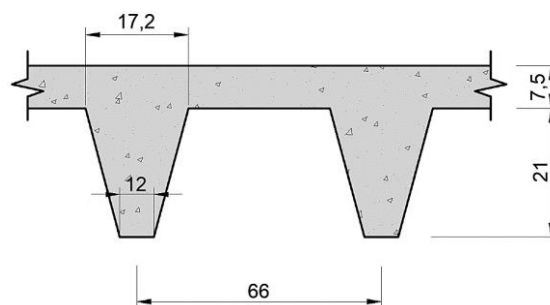


Figura 4.4: Projeto A1 - Seção da laje nervurada.

A Tabela 4.1 apresenta as principais propriedades da seção transversal obtida com a forma plástica empregada no projeto A1.

Tabela 4.1: Projeto A1 - Propriedades da seção transversal.

Área da seção (cm <sup>2</sup> )	802
Distância do C.G. à face superior (cm)	9,0
Inércia por nervura (cm <sup>4</sup> )	48.625
Volume do vazio (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,127
Peso próprio (kN/m <sup>2</sup> )	3,95
Volume de concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,158

#### 4.2.1.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural foi realizada com o programa CAD/TQS. Adotou-se, para o espaçamento entre as barras da grelha, 66 cm na região das nervuras e 33 cm nas regiões maciças sobre os pilares.

A Figura 4.5 mostra os momentos de flexão nas barras da grelha equivalente da laje. Os valores indicados foram calculados para a combinação:

$$\text{COMB1} = \text{PP} + \text{PERM} + \text{ACID} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde:

PP é o carregamento de peso próprio;

PERM são as cargas permanentes de revestimento e alvenaria;

ACID é o carregamento accidental.

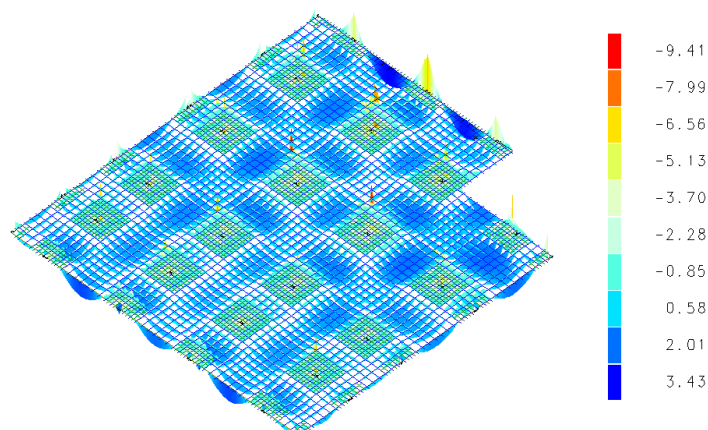


Figura 4.5: Projeto A1 - Momento de flexão nas direções x e y (x10 kN-m/barra).

O dimensionamento das armaduras foi realizado com o uso do programa CAD/TQS, de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 6118 (2014).

O detalhamento das armaduras encontra-se no Anexo B desse trabalho.

A Tabela 4.2 resume as estimativas de materiais calculadas a partir dos resultados obtidos para o projeto A1.

Tabela 4.2: Projeto A1 - Quantitativos de aço, forma e concreto.

	Quantidade	Und.	Consumo
<b>Aço CA-50</b>	18.287,00	kg	18,51 kg/m <sup>2</sup>
<b>Concreto</b>	186,86	m <sup>3</sup>	0,19 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Maciça</b>	271,00	m <sup>2</sup>	0,27 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Nervurada</b>	717,00	m <sup>2</sup>	0,73 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

#### 4.2.1.2 DESEMPENHO EM SERVIÇO

As flechas totais (imediatas e diferidas) foram obtidas por meio do sistema de grelha não-linear do CAD-TQS, para a combinação quase permanente. Os carregamentos verticais foram divididos em 20 parcelas incrementais, sendo a rigidez à flexão da laje recalculada a cada incremento de carga.



Para determinação da flecha diferida considerou-se, de maneira aproximada, o produto da flecha imediata pelo fator  $\alpha_f$ , conforme item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118 (2014).

Segundo recomendação do manual do CAD/TQS, adotou-se  $\alpha_f$  igual a 1,5, para o peso próprio estrutural, e 1,3, para sobrecarga permanente.

A Figura 4.6 apresenta as flechas máximas, em centímetros, obtidas na análise não-linear. Valores negativos indicam flechas no sentido gravitacional.

De acordo com o item 13.3 da ABNT NBR 6118 (2014), o deslocamento limite é dado por:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{250} = \frac{800}{250} = 3,2 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Logo, a flecha máxima apresentada em serviço (1,17 cm) é menor que o limite normativo.

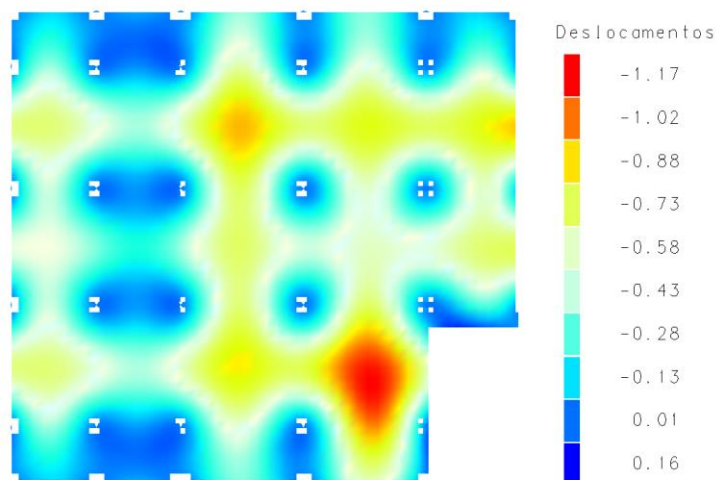


Figura 4.6: Projeto A1 - Flechas totais (cm) em tempo infinito.

A Figura 4.7 apresenta, em vermelho, as barras da grelha em que ocorrem microfissuras, a partir da análise não-linear incremental. A maior abertura de fissura encontrada foi de 0,17 mm. Logo, inferior ao limite de 0,3 mm, para a classe de agressividade II, conforme Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118 (2014).

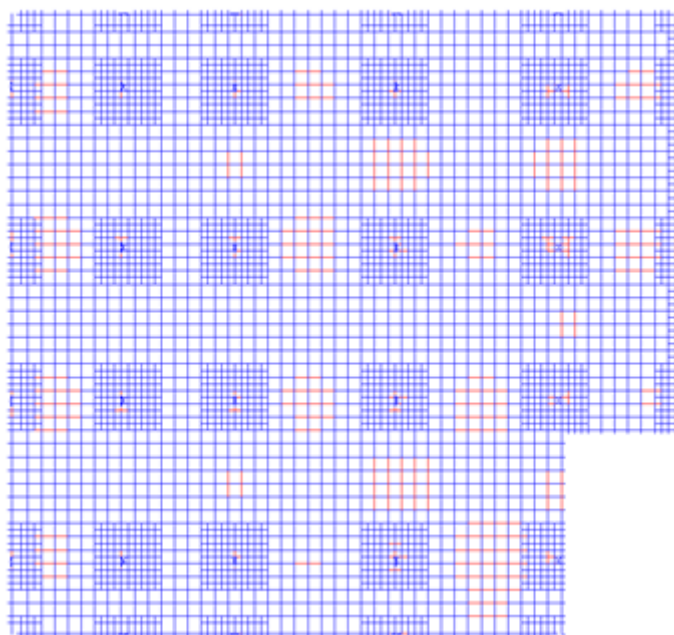


Figura 4.7: Projeto A1 – Barras em vermelho com indicação de microfissuras.

#### 4.2.1.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS

A Tabela 4.3 apresenta a estimativa de custos para execução da laje do pavimento térreo do projeto A1. Os insumos e índices utilizados nas composições de custos estão detalhados no Anexo A deste trabalho. As composições de custos relacionadas à montagem e desmontagem de forma contemplam o aluguel de estrutura de escoramento, conforme detalhado no Anexo A.

A Figura 4.8 apresenta, graficamente, a participação dos serviços de concretagem, forma e armadura no custo total do projeto A1.

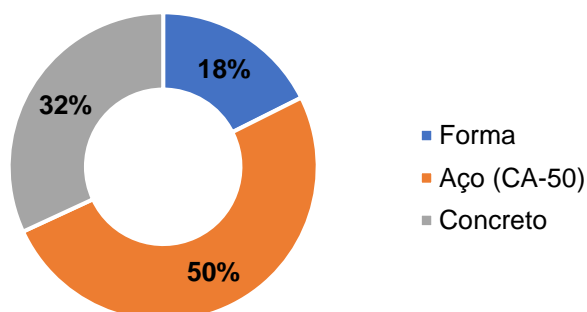


Figura 4.8: Projeto A1 – Participação dos serviços no custo direto total.

Tabela 4.3: Projeto A1 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.

CÓD.	BASE DE REF.	SERVIÇO	UND	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
SER01	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (66 x 66 x 21 cm) e assoalho com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	717,00	R\$ 44,05	R\$ 31.583,85
92514	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	271,00	R\$ 24,49	R\$ 6.636,79
92769	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af_12/2015	kg	694,00	R\$ 7,52	R\$ 5.218,88
92770	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 8,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	4.243,00	R\$ 7,54	R\$ 31.992,22
92771	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	626,00	R\$ 6,17	R\$ 3.862,42
92772	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af_12/2015	kg	4.702,00	R\$ 5,59	R\$ 26.284,18
92773	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	7.211,00	R\$ 5,30	R\$ 38.218,30
92774	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 20,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	811,00	R\$ 4,95	R\$ 4.014,45
SER02	SINAPI/MG - out/19	Concretagem de vigas e lajes, $f_{ck}=35$ MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m <sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af_12/2015	m <sup>3</sup>	186,86	R\$ 370,43	R\$ 69.218,55
<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>						<b>R\$ 217.029,64</b>
<b>CUSTO/m<sup>2</sup></b>						<b>R\$ 219,67</b>

#### 4.2.2 PROJETO A2 – LAJE NERVURADA PROTENDIDA

O projeto A2 caracteriza-se pelo uso da protensão como armadura principal de flexão. Com isso, foi possível diminuir a espessura da laje nervurada, aumentando a altura livre do pavimento. A Figura 4.9 apresenta a planta de forma do projeto A2.

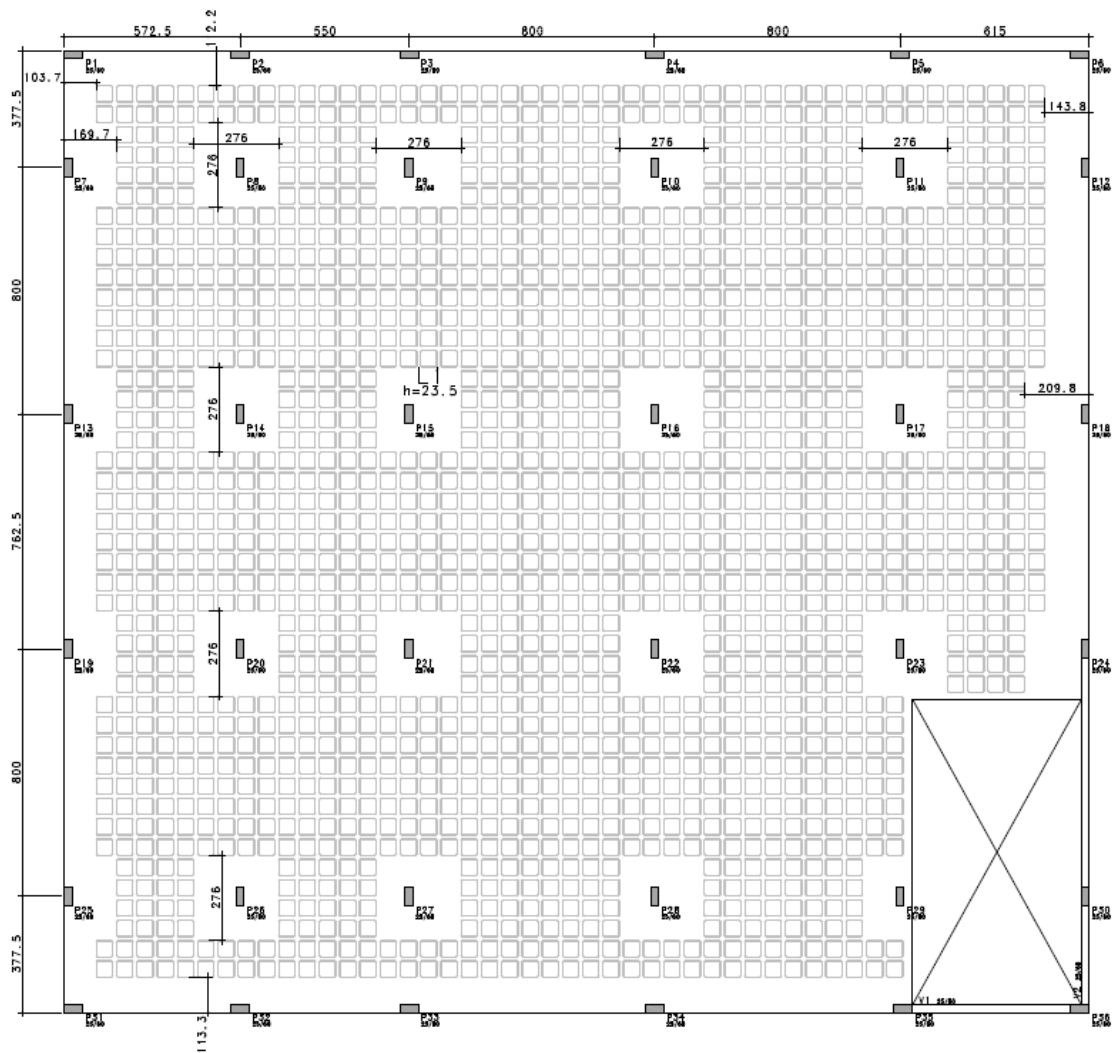


Figura 4.9: Projeto A2 - Planta de forma (dimensões em cm).

Foram empregadas formas plásticas Atex, modelo 660, com capa de concreto de 7,5 cm e espessura total de 23,5 cm, conforme mostra a Figura 4.10. Essas dimensões atendem às prescrições normativas da ABNT NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho.

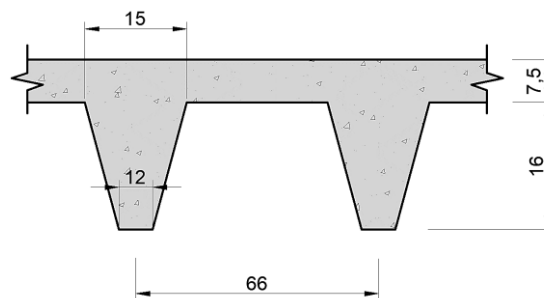


Figura 4.10: Projeto A2 - Seção da laje nervurada (dimensões em cm).

A Tabela 4.4 apresenta as principais propriedades da seção transversal obtida com a forma plástica empregada no projeto A2.

Tabela 4.4: Projeto A2 - Propriedades da seção transversal.

Área da seção (cm <sup>2</sup> )	711
Distância do C.G. à face superior (cm)	7,2
Inércia por nervura (cm <sup>4</sup> )	26.637
Volume do vazio (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,101
Peso próprio (kN/m <sup>2</sup> )	3,35
Volume de concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,134

Os cabos de protensão foram distribuídos nas nervuras da laje, em feixes de até duas cordoalhas de 12,7 mm. No total foram utilizadas 130 cordoalhas engraxadas de Relaxação Baixa (RB) do tipo CP-190RB, distribuídas conforme as Figuras 4.11 e 4.12.

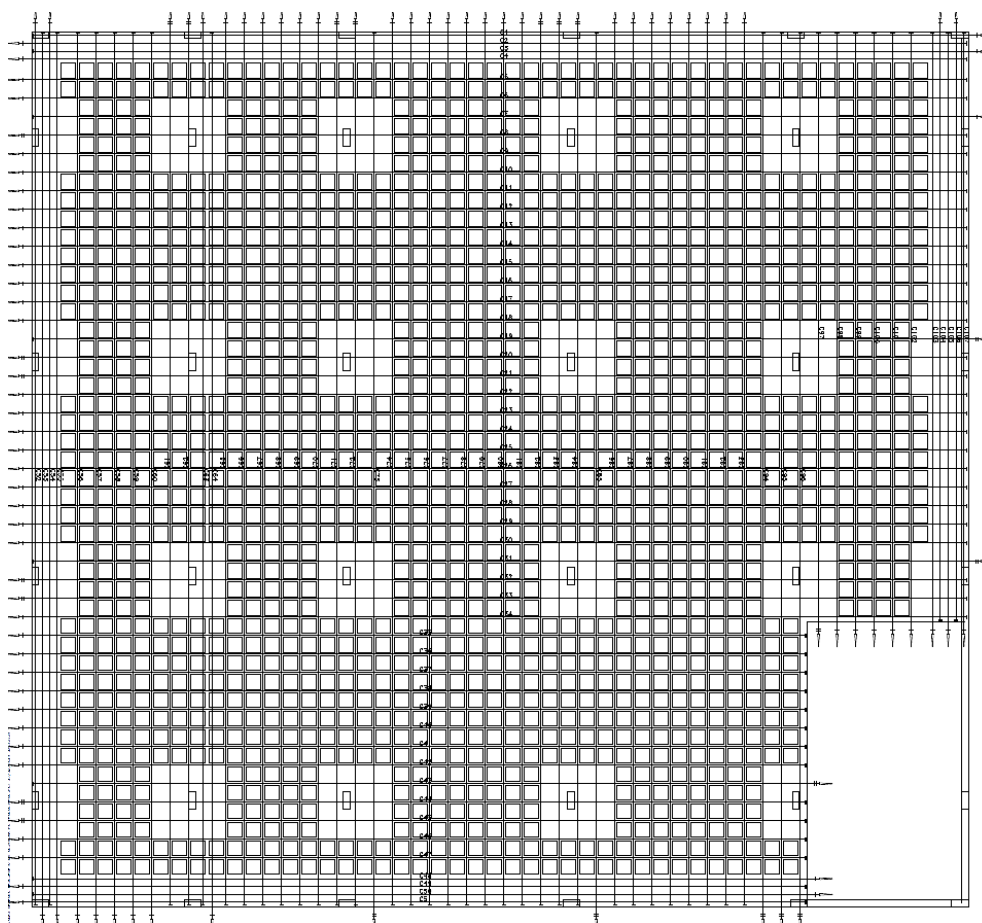


Figura 4.11: Projeto A2 – Distribuição das cordoalhas de protensão em planta.

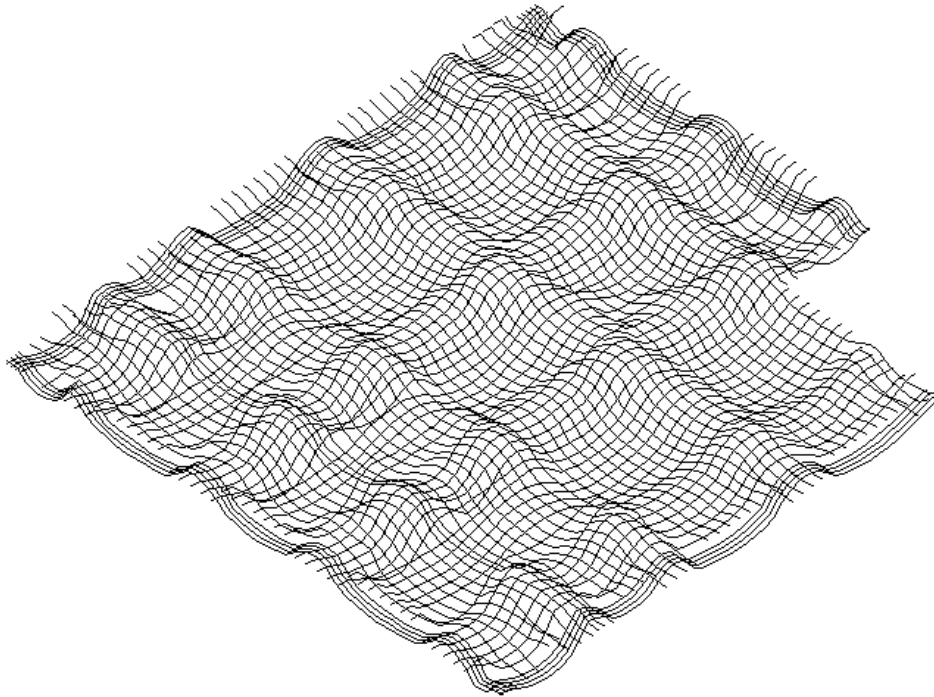


Figura 4.12: Projeto A2 – Vista espacial das cordoalhas de protensão.

#### 4.2.2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural foi realizada com o programa CAD/TQS. O espaçamento adotado entre as barras da grelha foi de 66 cm, na região das nervuras, e de 33 cm, nas regiões maciças sobre os pilares.

A Figura 4.13 mostra os momentos de flexão nas barras da grelha equivalente. Os valores indicados foram obtidos da combinação:

$$\text{COMB2} = \text{PP} + \text{PERM} + 0,86\text{HIPER} + \text{ACID} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

onde HIPER é o hiperestático de protensão.

Conforme explicitado na Eq. 4.3, aplicou-se o fator redutor 0,86 ao hiperestático de protensão para que, quando multiplicado pelo coeficiente de ponderação de 1,4 (para obtenção dos esforços no estado limite último) resulte em um coeficiente de 1,2, em atendimento à Tabela 3 da ABNT NBR 8681 (2003).

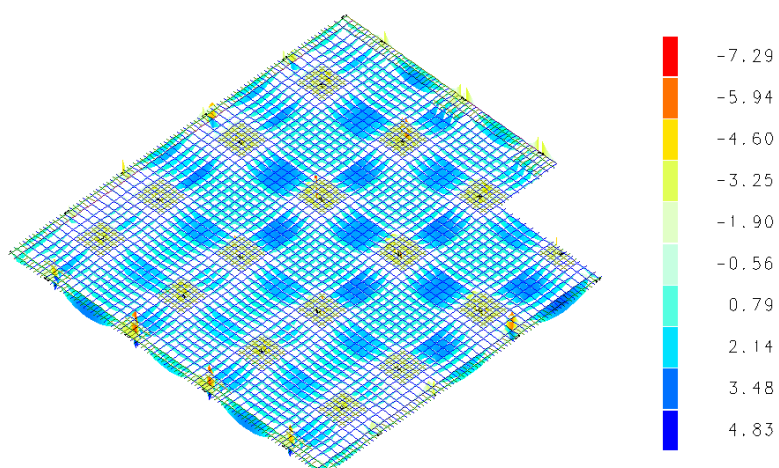


Figura 4.13: Projeto A2 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra).

A Figura 4.14 apresenta os momentos fletores devidos às forças de protensão, exclusivamente.

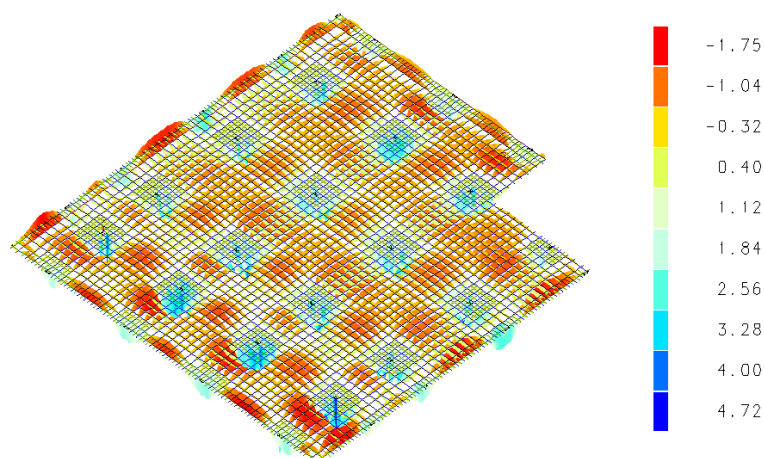


Figura 4.14: Projeto A2 – Momentos de flexão devidos às forças de protensão (x10 kN·m/barra).

Para verificação dos limites de tensões no concreto, no ato da protensão e na combinação frequente de ações, foi necessária a definição das chamadas RTE's – Regiões de Transferência de Esforços. Segundo o manual do usuário do CAD/TQS (2015), as RTE's definem a região de extração dos esforços a serem transferidos para as RPU's – Regiões de Protensão Uniforme, que correspondem às faixas de distribuição dos cabos.

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam os resultados das tensões nas fibras de uma das RPU's para a combinação frequente e no ato da protensão, respectivamente.

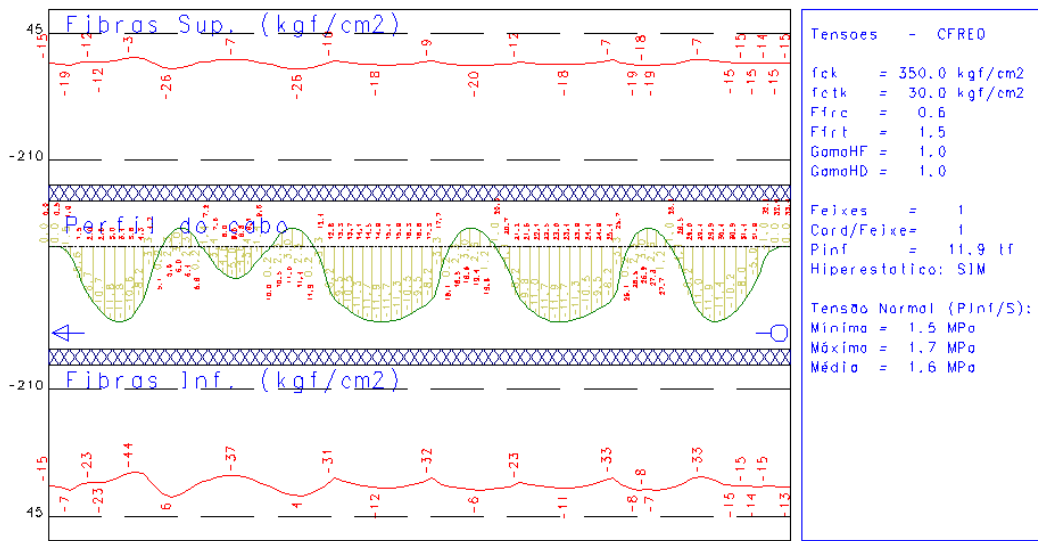


Figura 4.15: Projeto A2 - Diagrama de tensões (combinação frequente).

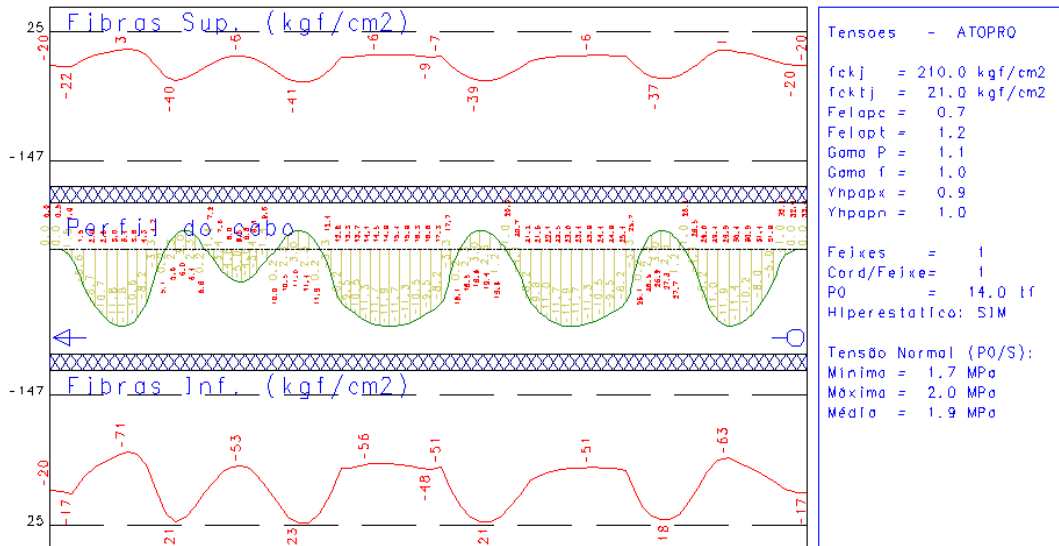


Figura 4.16: Projeto A2 - Diagrama de tensões (ato da protensão).

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), a tensão máxima de compressão na seção de concreto não pode ultrapassar 70% da resistência característica  $f_{ckj}$  prevista para a idade de aplicação da protensão. A tensão máxima de tração do concreto não pode ultrapassar 1,2 vezes a resistência à tração  $f_{ctm}$  correspondente ao  $f_{ckj}$  especificado. Assim, as Equações 4.4 e 4.5 apresentam os valores limites para as tensões de compressão e tração, respectivamente.

$$\sigma_{c,m\acute{a}x} = 0,7 \cdot 21 = 14,7 \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$\sigma_{t,m\acute{a}x} = 1,2 \cdot 2,28 = 2,74 \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 4.5})$$



Nota-se da 4.16, que as tensões solicitantes no ato da protensão encontram-se dentro dos limites admissíveis da ABNT NBR 6118 (2014) - item 17.2.4.3.

Para cada RPU foram verificadas as aberturas de fissuras calculadas pela combinação frequente, em atendimento ao ELS-W ( $w_k \leq 0,2$  mm).

A Figura 4.17 mostra a armadura passiva calculada pelo programa CAD/TQS para atendimento à envoltória de esforços.

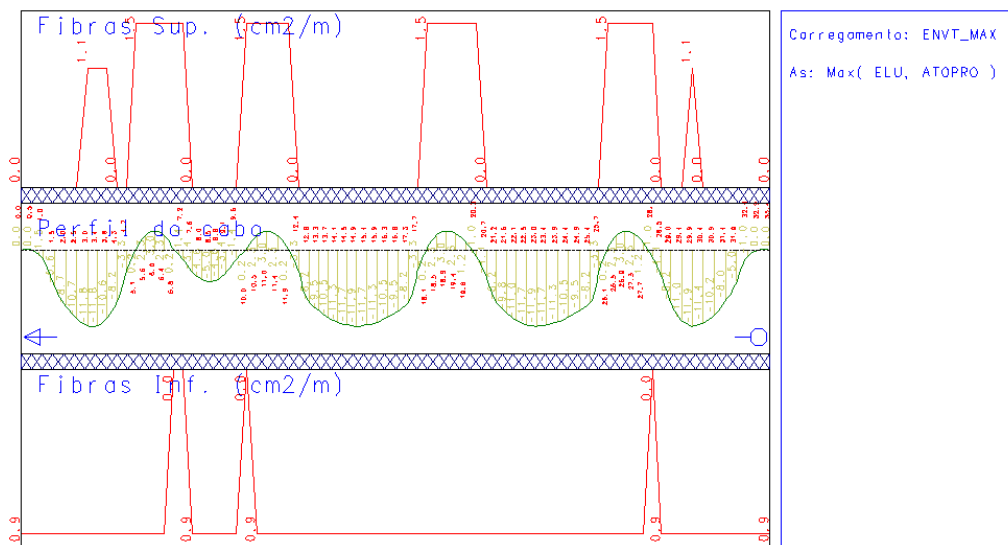


Figura 4.17: Projeto A2 - Armadura passiva calculada (cm²/m).

A Figura 4.18 apresenta as forças de protensão ao longo da cordoalha, no momento da aplicação da carga ( $t=0$ ) e após as perdas diferidas ( $t=\infty$ ).

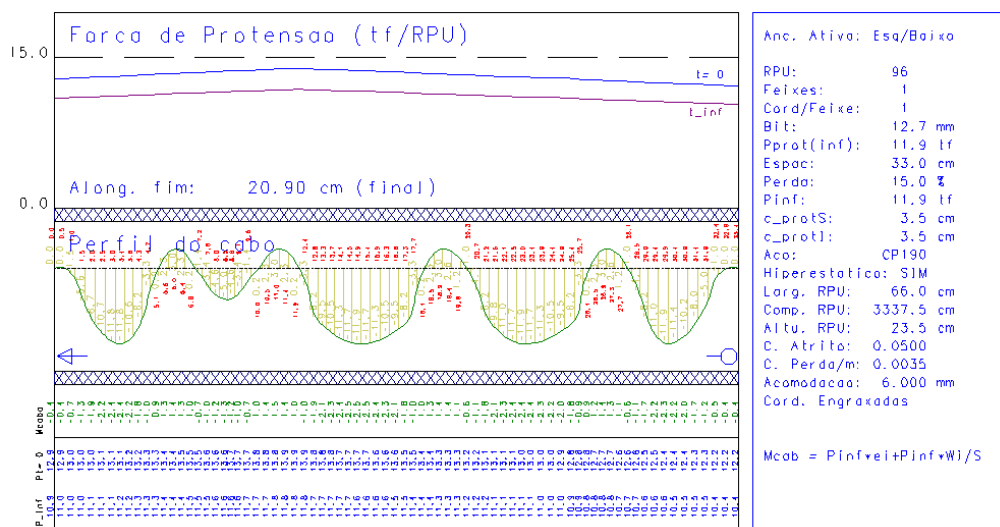


Figura 4.18: Projeto A2 - Força de protensão ao longo do cabo.

O detalhamento das armaduras encontra-se no Anexo B desse trabalho.

A Tabela 4.5 resume as estimativas dos materiais, calculadas a partir dos resultados obtidos.

Tabela 4.5: Projeto A2 – Quantitativos de aço, forma e concreto.

		Quantidade	Und.	Consumo
<b>Aço</b>	<b>CA-50</b>	8.744,00	kg	8,85 kg/m <sup>2</sup>
	<b>CP-190 RB</b>	3.564,00	kg	3,61 kg/m <sup>2</sup>
<b>Concreto</b>		154,30	m <sup>3</sup>	0,16 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Maciça</b>		248,35	m <sup>2</sup>	0,25 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Nervurada</b>		739,65	m <sup>2</sup>	0,75 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

#### 4.2.2.2 DESEMPENHO EM SERVIÇO

As flechas imediatas do pavimento, para as cargas permanentes, são apresentadas na Figura 4.19. Nesta combinação, tem-se:

$$\delta_{imed} = PP + PROT \quad (\text{Eq. 4.6})$$

onde PROT é o carregamento de protensão.

Valores negativos indicam flechas no sentido gravitacional.

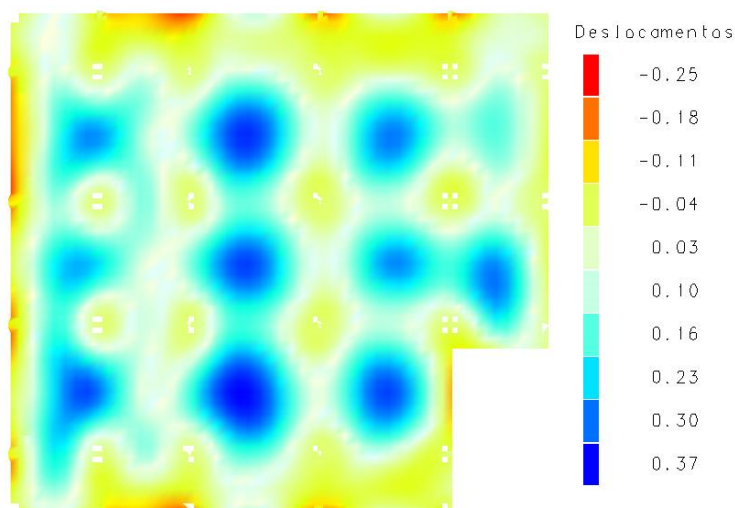


Figura 4.19: Projeto A2 – Flechas imediatas (cm).

Para a análise da deformação ao longo do tempo, utilizou-se a combinação dada na Eq. 4.7, recomendada pelo sistema CAD/TQS. A combinação considera fatores amplificadores das deformações a longo prazo na estrutura de maneira simplificada. As flechas em tempo infinito são apresentadas na Figura 4.20.

$$\delta_{t=\text{inf}} = 2,3\text{PP} + 2\text{PERM} + 2,5\text{PROT} + 0,4\text{ACID} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

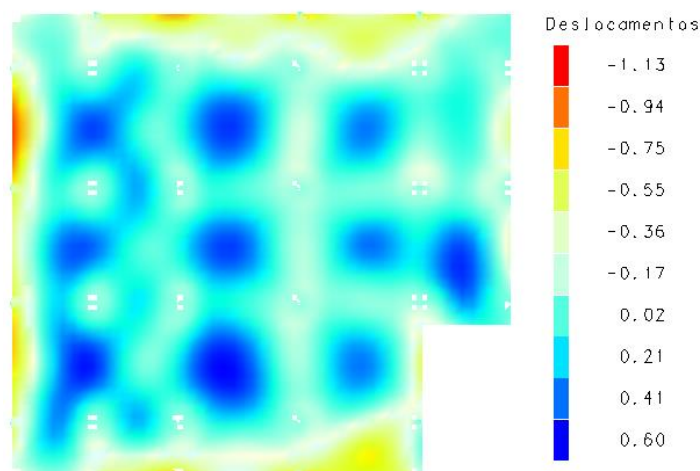


Figura 4.20: Projeto A2 – Flechas totais (cm) em tempo infinito.

Verifica-se que as flechas máximas do pavimento, no projeto A2, são inferiores ao limite de 3,2 cm.

#### 4.2.2.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS

A Tabela 4.6 apresenta a estimativa de custos para execução de uma laje do pavimento térreo do projeto A2.

Os insumos e índices utilizados nas composições de custos estão detalhados no Anexo A deste trabalho. As composições de custos relacionadas à montagem e desmontagem de forma contemplam o aluguel de estrutura de escoramento, conforme detalhado no Anexo A.

A Figura 4.21 apresenta, graficamente, o percentual do custo entre concreto, forma, aço e operação de protensão para o projeto A2.

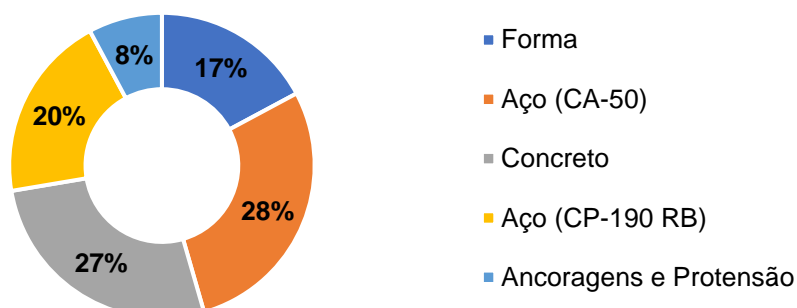


Figura 4.21: Projeto A2 – Participação dos serviços no custo direto total.

Tabela 4.6: Projeto A2 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.

CÓD.	BASE DE REF.	SERVIÇO	UND	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
SER06	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (66 x 66 x 16 cm) e assoalho com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	739,65	R\$ 41,29	R\$ 30.540,15
92514	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	248,35	R\$ 24,49	R\$ 6.082,09
92769	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af_12/2015	kg	3.113,00	R\$ 7,52	R\$ 23.409,76
92770	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 8,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	3.114,00	R\$ 7,54	R\$ 23.479,56
92771	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	13,00	R\$ 6,17	R\$ 80,21
92772	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af_12/2015	kg	857,00	R\$ 5,59	R\$ 4.790,63
92773	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	1.646,00	R\$ 5,30	R\$ 8.723,80
SER03	SICRO/MG - out/19	Ancoragem ativa para lajes para cordoalhas engraxadas D = 12,7 mm com placa de ancoragem, cunha tripartida e protensão	un	130,00	R\$ 92,88	R\$ 12.074,40
SER04	SICRO/MG - out/19	Ancoragem passiva aderente para lajes com 1 cordoalha D = 12,7 mm - fornecimento e instalação	un	130,00	R\$ 35,35	R\$ 4.595,50
SER05	SICRO/MG - out/19	Cordoalha engraxada CP 190 RB D = 12,7 mm - fornecimento, preparo e colocação	kg	3.564,00	R\$ 11,87	R\$ 42.304,68
SER02	SINAPI/MG - out/19	Concretagem de vigas e lajes, f <sub>ck</sub> =35 MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m <sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af_12/2015	m <sup>3</sup>	154,30	R\$ 370,43	R\$ 57.157,35
<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>						<b>R\$ 213.238,13</b>
<b>CUSTO/m<sup>2</sup></b>						<b>R\$ 215,83</b>



A inclusão das esferas promove redução de 34% do peso próprio da laje. Contudo, a rigidez à flexão da laje precisa ser reduzida para 87% da rigidez de uma laje maciça de mesma espessura, conforme apresentado no item 2.5 deste trabalho. Assim, para considerar estes efeitos no programa, o cálculo do peso próprio automático foi desabilitado e inserido manualmente no modelador estrutural com as rigidezes das barras da grelha reduzidas, exceto na região dos capitéis, onde a laje é maciça.

#### 4.2.3.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

Os momentos de flexão da grelha equivalente são apresentados na Figura 4.24 para a combinação dada na Eq. 4.1. O espaçamento adotado entre as barras da grelha foi de 60 cm, fora das regiões dos pilares, e de 30 cm, nas zonas maciças sobre os pilares, em virtude da limitação de quantidade de barras e nós do programa. O espaçamento entre barras da grelha foi diferente, em relação às lajes nervuradas, devido ao fato de que nas lajes nervuradas as barras da grelha precisam coincidir com as nervuras.

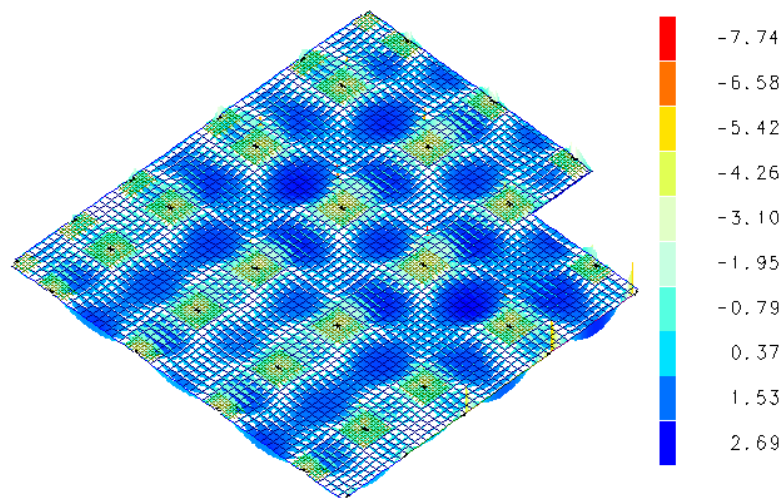


Figura 4.24: Projeto A3 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra).

O dimensionamento das armaduras foi realizado pelo programa CAD/TQS de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 6118 (2014). O detalhamento das armaduras encontra-se no Anexo B desse trabalho.

A Tabela 4.7 resume as estimativas de materiais calculadas a partir dos resultados obtidos.

Tabela 4.7: Projeto A3 – Quantitativos de aço, forma e concreto.

	Quantidade	Und.	Consumo
<b>Aço CA-50</b>	20.400,00	kg	20,65 kg/m <sup>2</sup>
<b>Concreto</b>	197,69	m <sup>3</sup>	0,20 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Maciça</b>	988,00	m <sup>2</sup>	1,00 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Esferas/Bubbles</b>	829,32	m <sup>2</sup>	0,84 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

#### 4.2.3.2 DESEMPENHO EM SERVIÇO

As flechas totais (imediatas e diferidas) foram obtidas a partir do sistema de grelha não-linear do CAD-TQS, para a combinação de ações quase permanente. Os carregamentos verticais foram divididos em 20 parcelas incrementais, sendo a rigidez à flexão da laje recalculada a cada incremento de carga.

Para determinação da flecha diferida, considerou-se, de maneira aproximada, o produto da flecha imediata pelo fator  $\alpha_i$ , conforme item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118:2014. Segundo recomendação do manual do CAD/TQS, adotou-se  $\alpha_i$  igual a 1,5, para o peso próprio estrutural, e 1,3, para sobrecarga permanente.

A Figura 4.25 apresenta as flechas totais, em centímetros, obtidas da análise não-linear. Os valores negativos indicam flechas no sentido gravitacional.

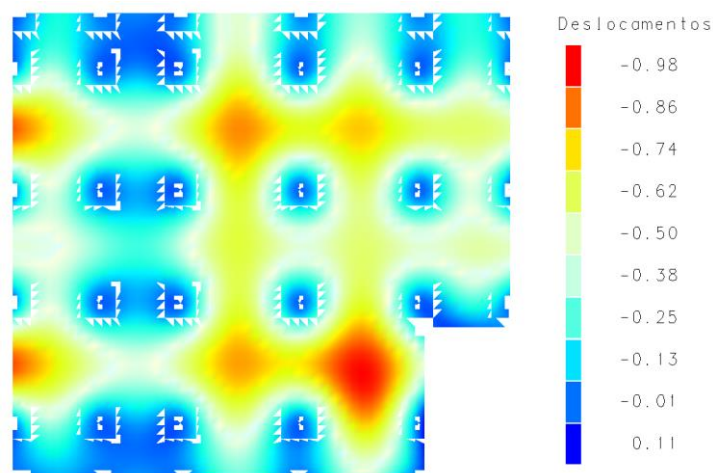


Figura 4.25: Projeto A3 – Flechas totais (cm) em tempo infinito.

De acordo com o item 13.3 da ABNT NBR 6118 (2014), o deslocamento limite é dado por:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{250} = \frac{800 \text{ cm}}{250} = 3,2 \text{ cm}$$

Logo, a flecha máxima apresentada em serviço (0,98 cm) é menor que o limite normativo.

A Figura 4.26 apresenta as barras da grelha em que ocorrem microfissuras, da análise não-linear incremental. A maior abertura de fissura calculada foi de 0,1 mm. Logo, inferior ao limite de 0,3 mm, para a classe de agressividade II, conforme Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118 (2014).

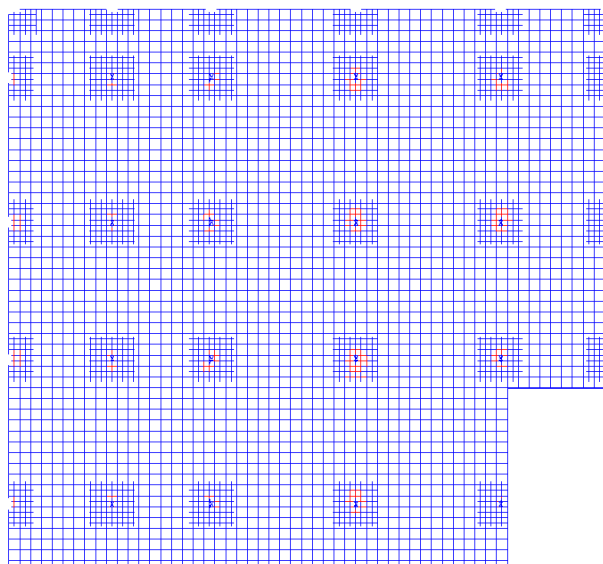


Figura 4.26: Projeto A3 – Barras em vermelho com indicação de microfissuras.

#### 4.2.3.3 ESTIMATIVA DE CUSTO

A Tabela 4.8 apresenta a estimativa de custos para execução da laje do pavimento térreo do projeto A3, considerando-se que a laje é totalmente moldada no local da obra.

Os insumos e índices utilizados nas composições de custos estão detalhados no Anexo A deste trabalho. As composições de custos relacionadas à montagem e desmontagem de forma contemplam o aluguel de estrutura de escoramento, conforme detalhado no Anexo A.

A Figura 4.27 apresenta, graficamente, o percentual do custo entre concreto, forma e aço para o projeto A3.

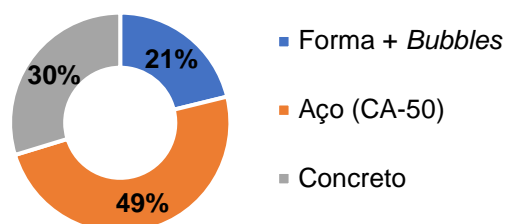


Figura 4.27: Projeto A3 – Participação dos serviços no custo direto total.



Tabela 4.8: Projeto A3 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.

CÓD.	BASE DE REF.	SERVIÇO	UND	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
92514	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	988,00	R\$ 24,49	R\$ 24.196,12
92769	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af_12/2015	kg	1.239,00	R\$ 7,52	R\$ 9.317,28
92770	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 8,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	624,00	R\$ 7,54	R\$ 4.704,96
92771	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	9.675,00	R\$ 6,17	R\$ 59.694,75
92772	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af_12/2015	kg	2.982,00	R\$ 5,59	R\$ 16.669,38
92773	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	4.226,00	R\$ 5,30	R\$ 22.397,80
92774	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 20,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	1.651,00	R\$ 4,95	R\$ 8.172,45
SER07	COTAÇÃO - out/19	Esferas de polipropileno com diâmetro de 22,5 cm - fornecimento e posicionamento	m <sup>2</sup>	829,32	R\$ 33,75	R\$ 27.989,55
SER02	SINAPI/MG - out/19	Concretagem de vigas e lajes, $f_{ck}=35$ MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m <sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af_12/2015	m <sup>3</sup>	197,69	R\$ 370,43	R\$ 73.230,31
<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>						<b>R\$ 246.372,60</b>
<b>CUSTO/m<sup>2</sup></b>						<b>R\$ 249,36</b>

### 4.3 PROJETO B – VÃO DE 10,50 m

O projeto B é composto por uma laje apoiada em 30 pilares de 80 cm x 30 cm espaçados de, no máximo, 10,50 m.

Foram estudadas três soluções: laje nervurada em concreto armado (Projeto B1), laje nervurada protendida (projeto B2) e laje *BubbleDeck* (projeto B3).

### 4.3.1 PROJETO B1 – LAJE NERVURADA EM CONCRETO ARMADO

A Figura 4.28 apresenta a planta de forma do projeto B1.

No entorno dos pilares foram deixadas regiões maciças para resistir aos momentos de flexão negativos e combater os efeitos da punção.

Foram empregadas caixas plásticas Atex, modelo 660, com capa de concreto de 7,5 cm e espessura total de 37,5 cm, conforme mostra a Figura 4.29.

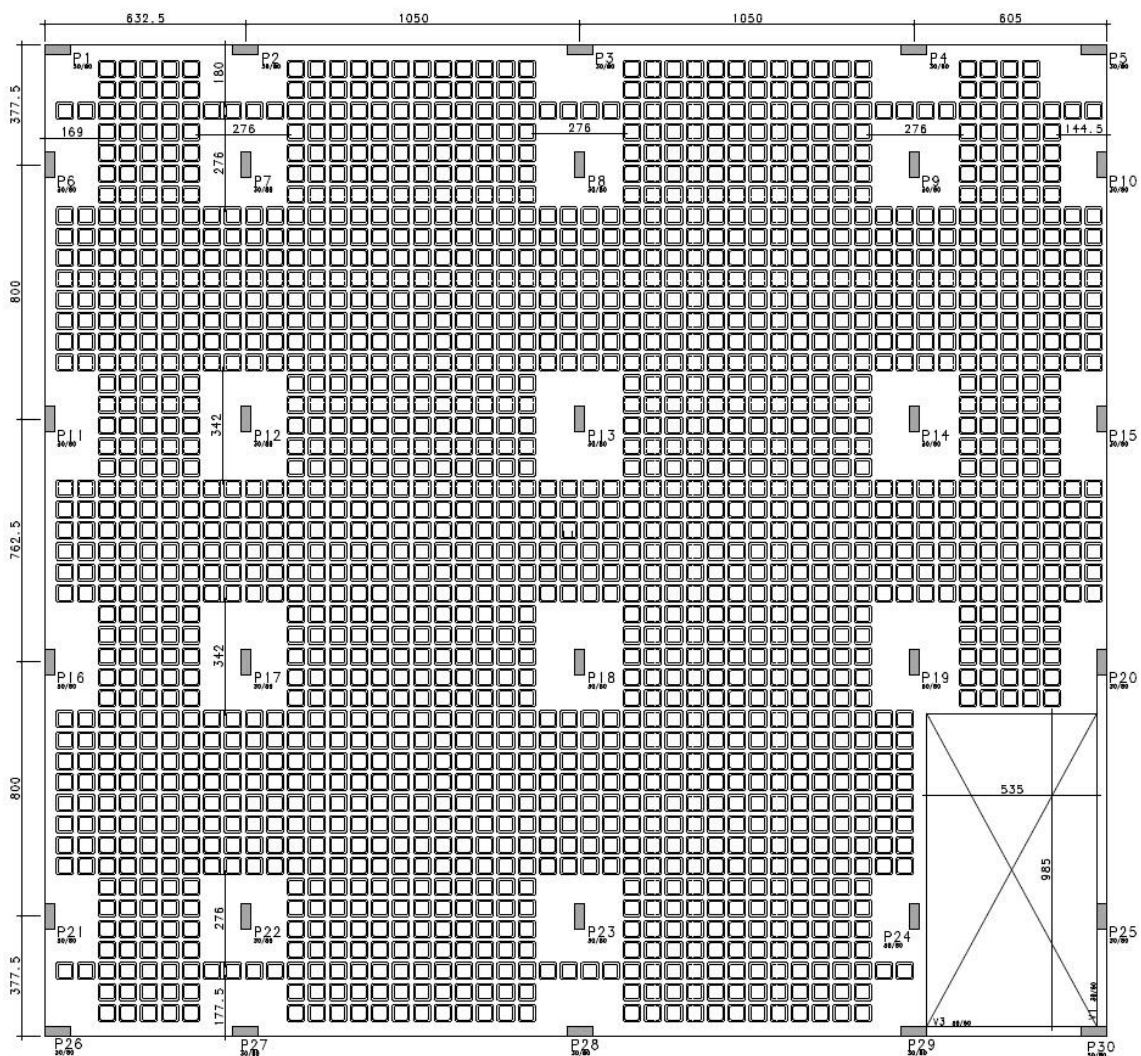


Figura 4.28: Projeto B1 - Planta de forma (dimensões em cm).

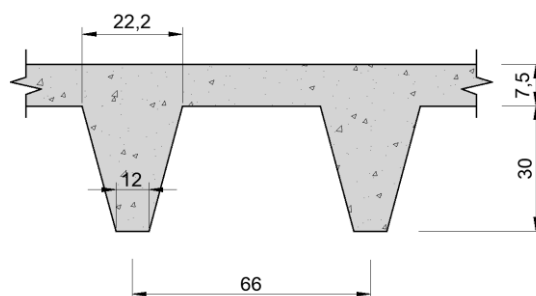


Figura 4.29: Projeto B1 - Seção da laje nervurada (dimensões em cm).

A Tabela 4.9 apresenta as principais propriedades da seção transversal obtida com a forma plástica empregada no projeto B1.

Tabela 4.9: Projeto B1 - Propriedades da seção transversal.

Área da seção (cm <sup>2</sup> )	1.008
Distância do C.G. à face superior (cm)	12,5
Inércia por nervura (cm <sup>4</sup> )	114.715
Volume do vazio (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,165
Peso próprio (kN/m <sup>2</sup> )	5,25
Volume de concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,210

#### 4.3.1.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural foi realizada com o programa CAD/TQS. Adotou-se, para o espaçamento entre as barras da grelha, 66 cm na região das nervuras e 33 cm nas regiões maciças sobre os pilares.

A Figura 4.30 mostra os momentos de flexão nas barras da grelha equivalente da laje. Os valores indicados foram calculados para a cominação da Eq. 4.1.

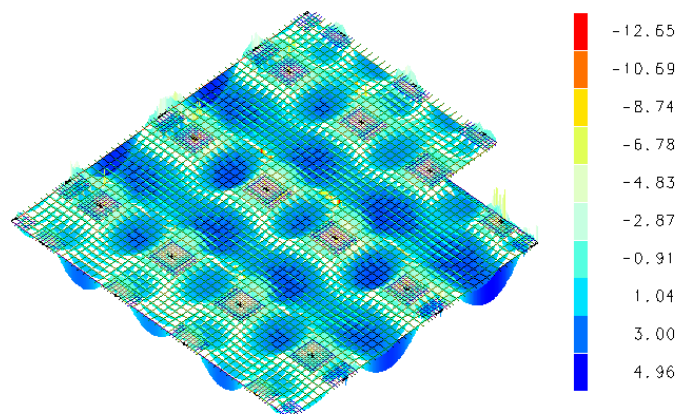


Figura 4.30: Projeto B1 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN.m/barra)

O dimensionamento das armaduras foi realizado pelo programa CAD/TQS de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 6118 (2014).

O detalhamento das armaduras encontra-se no Anexo B desse trabalho.

A Tabela 4.10 resume as estimativas de materiais calculadas a partir dos resultados obtidos.

Tabela 4.10: Projeto B1 – Quantitativos de aço, forma e concreto.

	Quantidade	Und.	Consumo
<b>Aço CA-50</b>	22.152,00	kg	22,42 kg/m <sup>2</sup>
<b>Concreto</b>	259,30	m <sup>3</sup>	0,26 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Maciça</b>	189,00	m <sup>2</sup>	0,19 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Nervurada</b>	799,00	m <sup>2</sup>	0,81 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

#### 4.3.1.2 DESEMPENHO EM SERVIÇO

A Figura 4.31 apresenta as flechas totais, em centímetros, obtidas da análise não-linear. Valores negativos indicam flechas no sentido gravitacional.

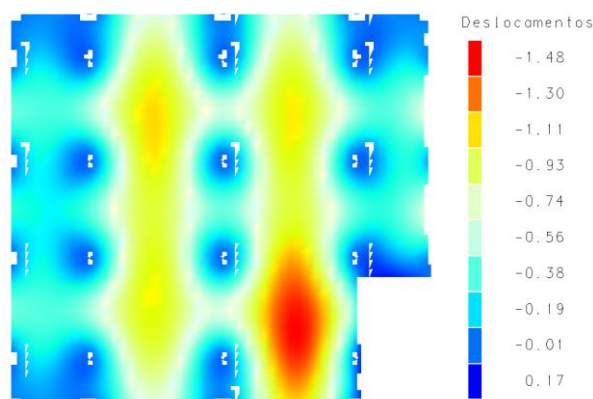


Figura 4.31: Projeto B1 – Flechas totais (cm) em tempo infinito.

A flecha máxima admissível para o maior vão (10,50 m) é de:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{1050}{250} = 4,2 \text{ cm}$$

Logo, a flecha máxima apresentada em serviço (1,48 cm) é menor que o limite normativo (item 13.3 da ABNT NBR 6118, 2014).

A Figura 4.32 apresenta as barras da grelha em que ocorrem microfissuras. A maior abertura de fissura calculada foi de 0,13 mm, portando inferior ao limite de 0,3

mm, para a classe de agressividade II, conforme prescrito na Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118 (2014).

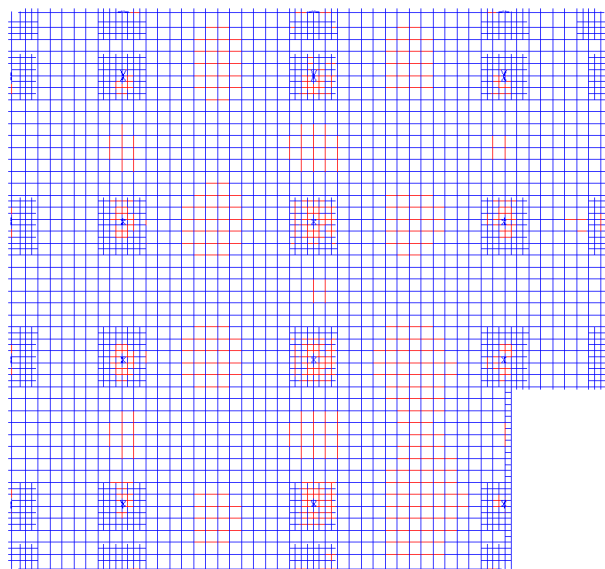


Figura 4.32: Projeto B1 – Barras em vermelho com indicação de microfissuras.

#### 4.3.1.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS

A Tabela 4.11 apresenta a estimativa de custos para a execução da laje do pavimento térreo do projeto B1.

Os insumos e índices utilizados nas composições de custos estão detalhados no Anexo A deste trabalho. As composições de custos relacionadas à montagem e desmontagem de forma contemplam o aluguel de estrutura de escoramento, conforme detalhado no Anexo A.

A Figura 4.33 apresenta, graficamente, o percentual do custo entre concreto, forma e aço para o projeto B1.

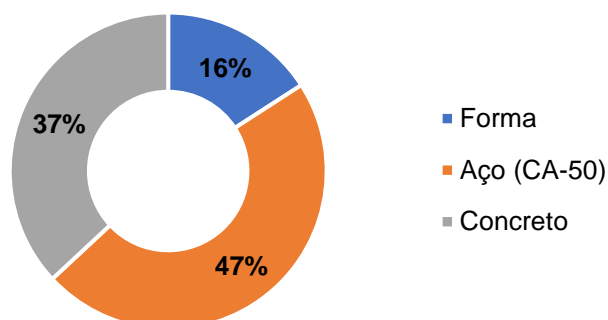


Figura 4.33: Projeto B1 – Participação dos serviços no custo direto total

Tabela 4.11: Projeto B1 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.

CÓD.	BASE DE REF.	SERVIÇO	UND	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
SER08	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (66 x 66 x 30 cm) e assoalho com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	799,00	R\$ 45,89	R\$ 36.666,11
92514	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	189,00	R\$ 24,49	R\$ 4.628,61
92769	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af_12/2015	kg	665,00	R\$ 7,52	R\$ 5.000,80
92770	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 8,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	915,00	R\$ 7,54	R\$ 6.899,10
92771	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	2.024,00	R\$ 6,17	R\$ 12.488,08
92772	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af_12/2015	kg	6.723,00	R\$ 5,59	R\$ 37.581,57
92773	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	6.309,00	R\$ 5,30	R\$ 33.437,70
92774	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 20,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	5.515,00	R\$ 4,95	R\$ 27.299,25
SER02	SINAPI/MG - out/19	Concretagem de vigas e lajes, $f_{ck}=35$ MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m <sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af_12/2015	m <sup>3</sup>	259,30	R\$ 370,43	R\$ 96.052,50
<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>						<b>R\$ 260.053,72</b>
<b>CUSTO/m<sup>2</sup></b>						<b>R\$ 263,21</b>

#### 4.3.2 PROJETO B2 – LAJE NERVURADA PROTENDIDA

O projeto B2 assemelha-se ao projeto B1, porém com o uso da protensão como armadura principal. Com isso, foi possível reduzir a espessura da laje nervurada, aumentando a altura livre do pavimento. A Figura 4.34 apresenta a planta de forma do projeto B2.

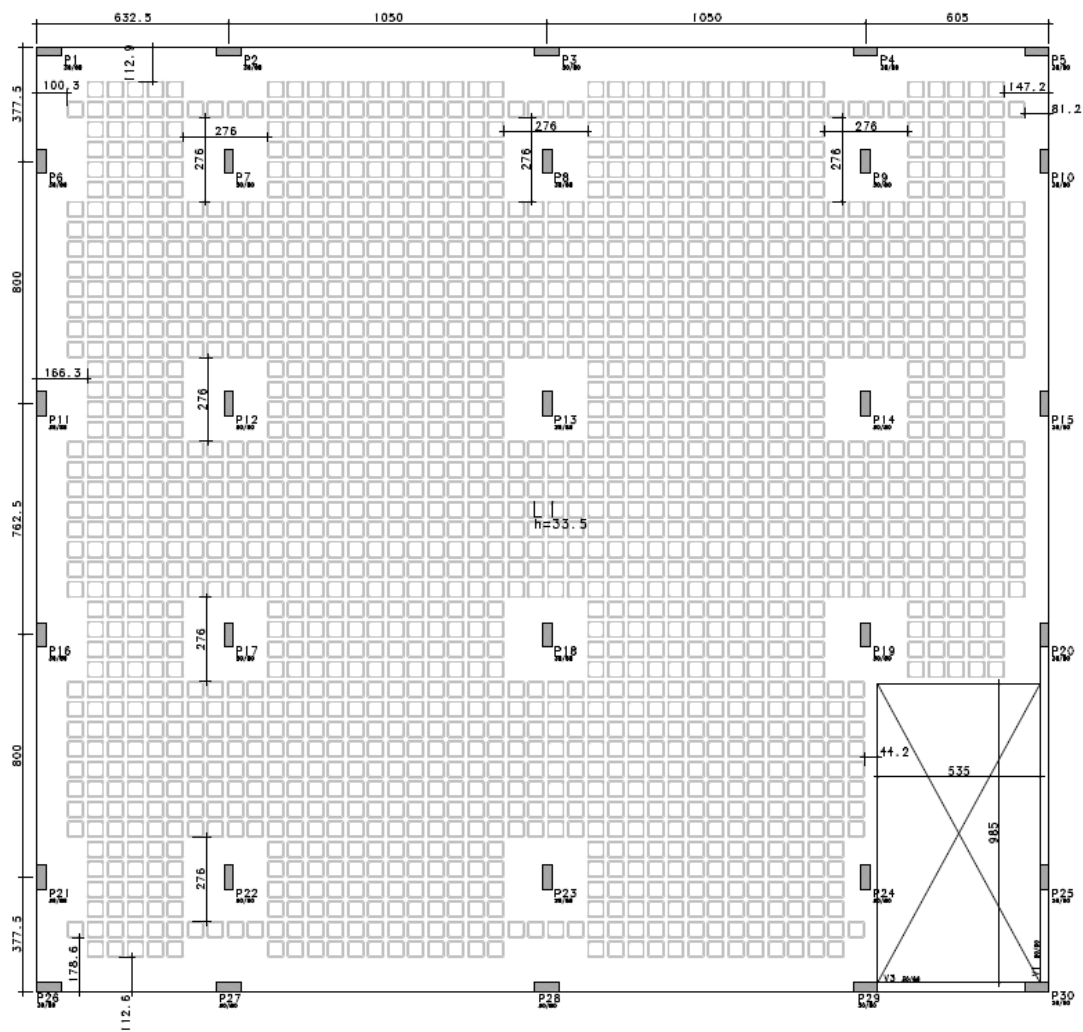


Figura 4.34: Projeto B2 – Planta de forma (dimensões em cm).

Foram empregadas caixas plásticas Atex, modelo 660, com capa de concreto de 7,5 cm e espessura total de 33,5 cm, conforme mostra a Figura 4.35. Essas dimensões atendem às prescrições normativas da ABNT NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho.

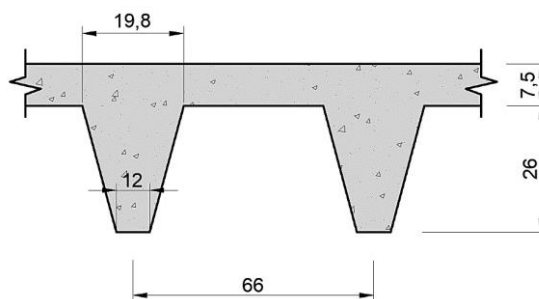


Figura 4.35: Projeto B2 - Seção de laje nervurada (dimensões em cm).

A Tabela 4.12 apresenta as principais propriedades da seção transversal obtida com a forma plástica empregada no projeto B2.

Tabela 4.12: Projeto B2 - Propriedades da seção transversal.

Área da seção (cm <sup>2</sup> )	908
Distância do C.G. à face superior (cm)	10,9
Inércia por nervura (cm <sup>4</sup> )	80.525
Volume do vazio (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,150
Peso próprio (kN/m <sup>2</sup> )	4,63
Volume de concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,185

Os cabos de protensão foram distribuídos nas nervuras da laje, em feixes de até duas cordoalhas de 12,7 mm. No total foram utilizadas 126 cordoalhas engraxadas e plastificadas do tipo CP-190RB, distribuídas conforme as Figuras 4.36 e 4.37.

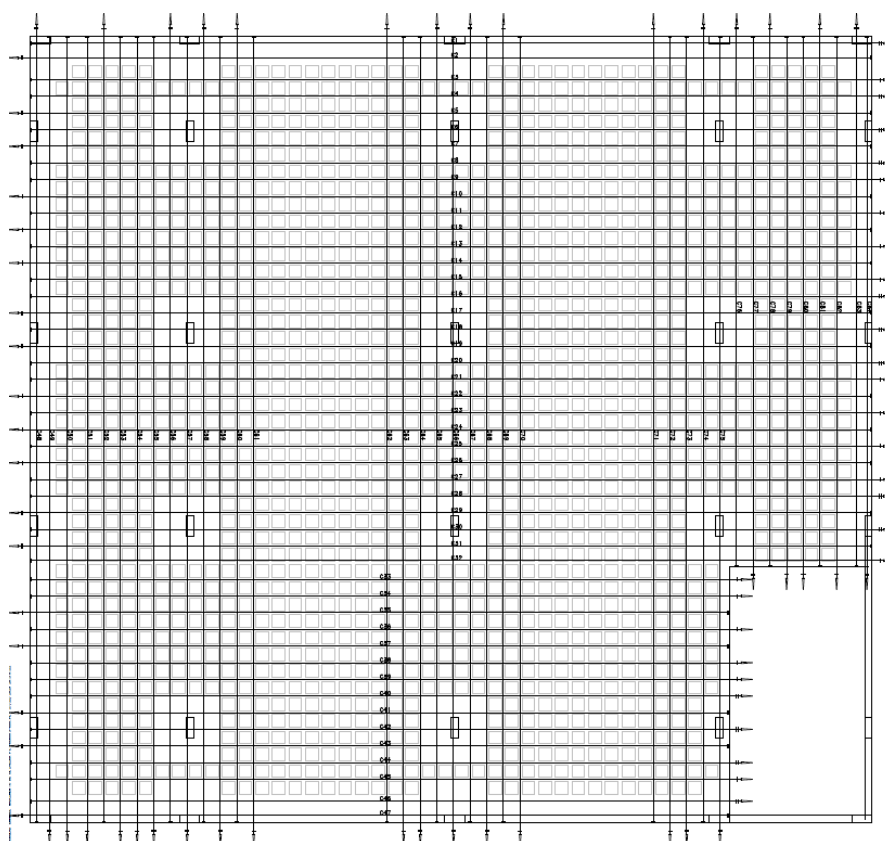


Figura 4.36: Projeto B2 – Distribuição das cordoalhas de protensão em planta.



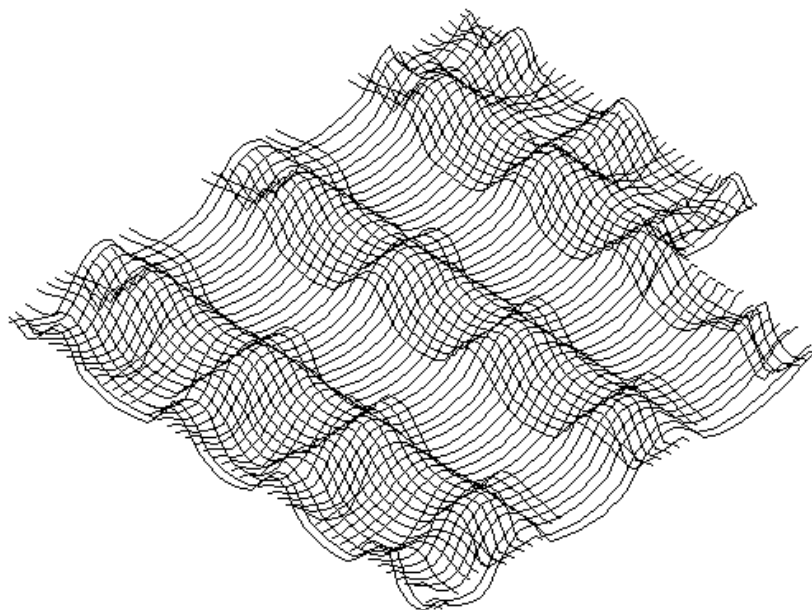


Figura 4.37: Projeto B2 – Vista espacial das cordoalhas de protensão.

#### 4.3.2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural foi realizada com o programa CAD/TQS. O espaçamento adotado entre as barras da grelha foi de 66 cm, na região das nervuras, e de 33 cm, nas regiões maciças sobre os pilares.

A Figura 4.38 mostra os momentos de flexão nas barras da grelha equivalente. Os valores indicados foram obtidos a partir da combinação de ações da Eq. 4.3.

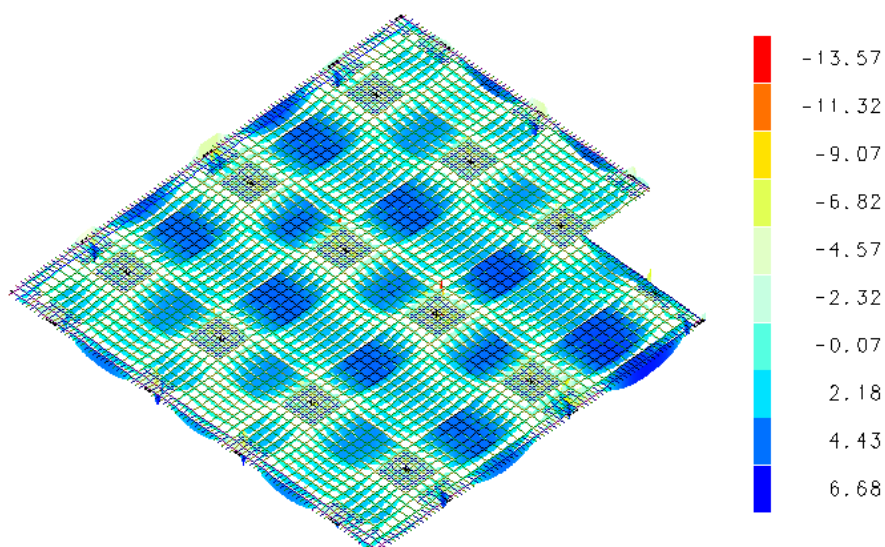


Figura 4.38: Projeto B2 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN.m/barra).

A Figura 4.39 apresenta os momentos de flexão devidos às forças de protensão, exclusivamente.

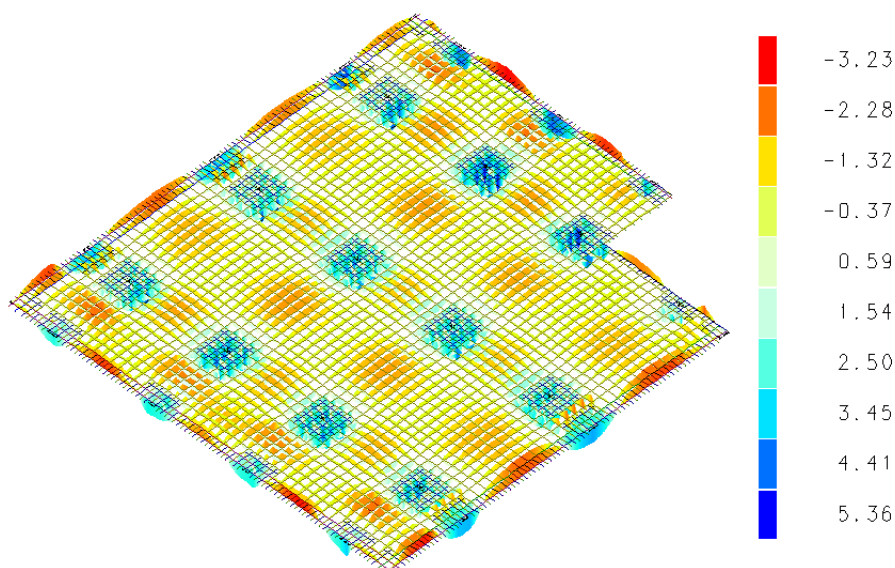


Figura 4.39: Projeto B2 - Momentos de flexão devidos às forças de protensão (x10 kN.m/barra).

As Figuras 4.40 e 4.41 apresentam os resultados das tensões nas fibras de uma das RPU's para a combinação frequente e no ato da protensão, respectivamente.

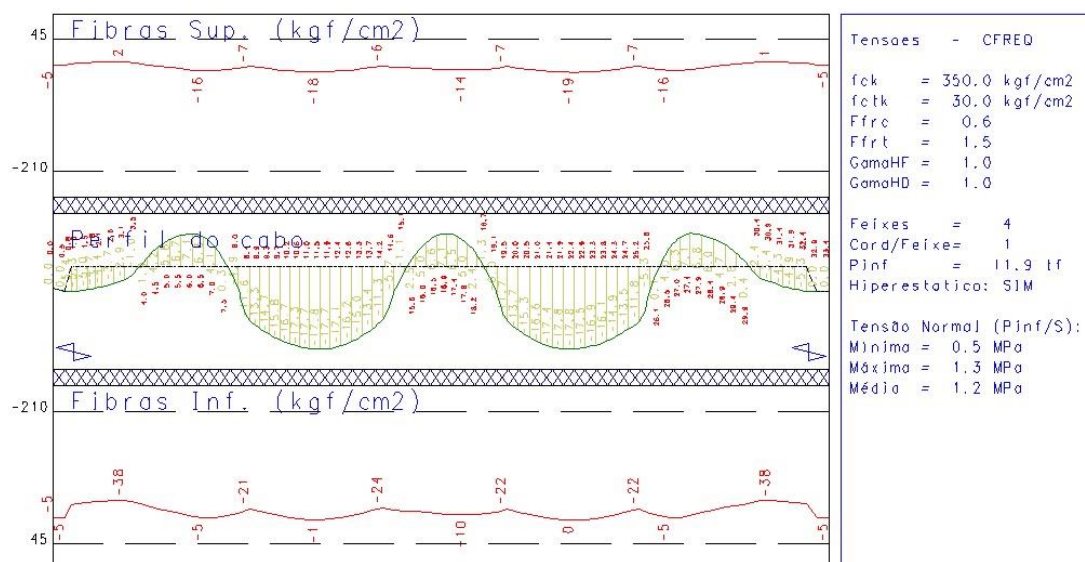


Figura 4.40: Projeto B2 - Diagrama de tensões (combinação frequente).

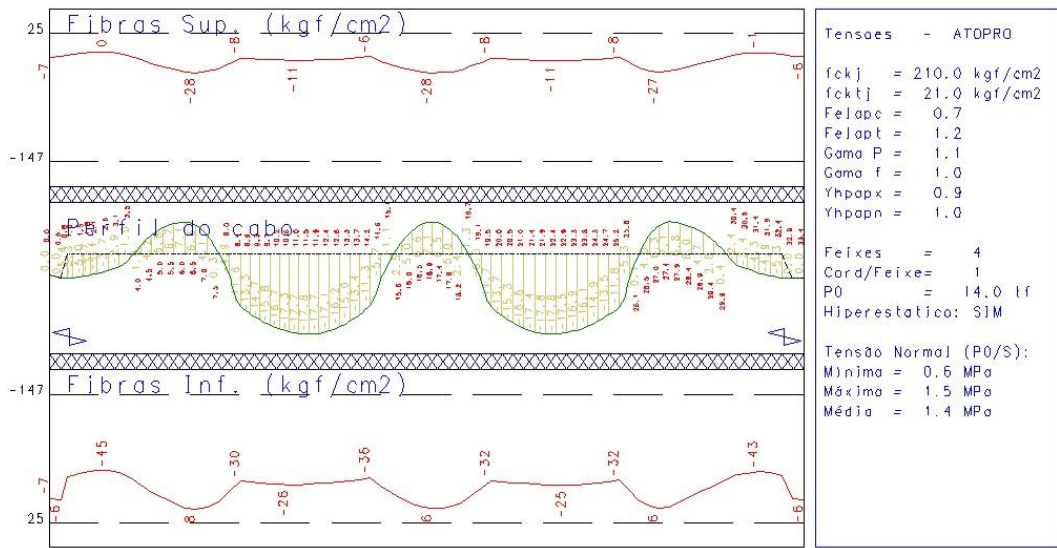


Figura 4.41: Projeto B2 - Diagrama de tensões (ato da protensão).

Nota-se da Figura 4.41, que as tensões solicitantes no ato da protensão encontram-se dentro dos limites admissíveis da ABNT NBR 6118 (2014), conforme calculado no item 4.2.2.1.

Para cada RPU foram verificadas as aberturas de fissuras calculadas pela combinação frequente, em atendimento ao ELS-W ( $w_k \leq 0,2$  mm).

A Figura 4.42 mostra a armadura passiva calculada pelo programa CAD/TQS para atendimento à envoltória de esforços.

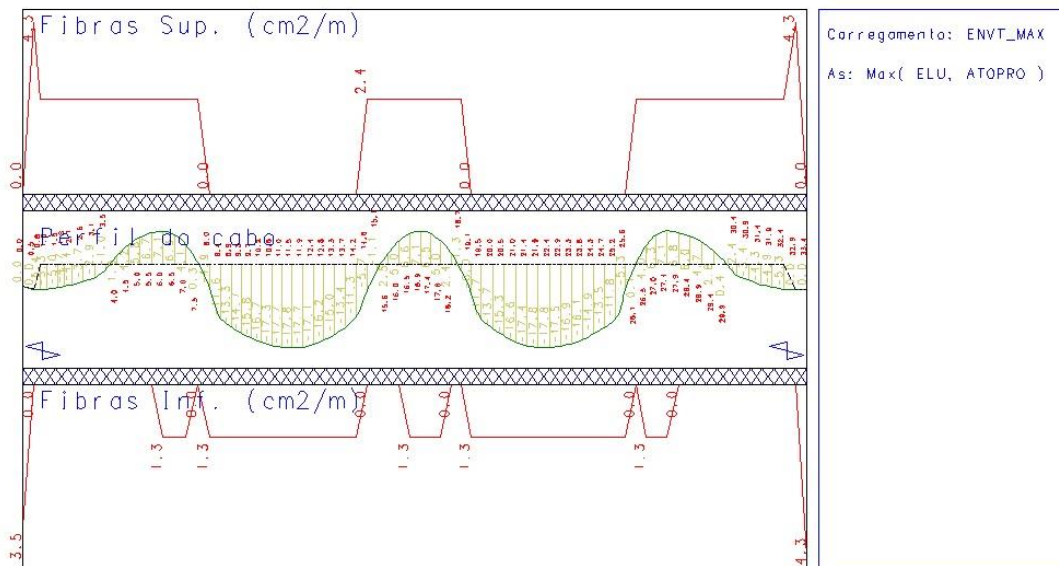


Figura 4.42: Projeto B2 - Armadura passiva calculada (cm²/m).

A Figura 4.43 apresenta as forças de protensão ao longo da RPU, no momento da aplicação da carga (t=0) e após as perdas diferidas (t=inf).

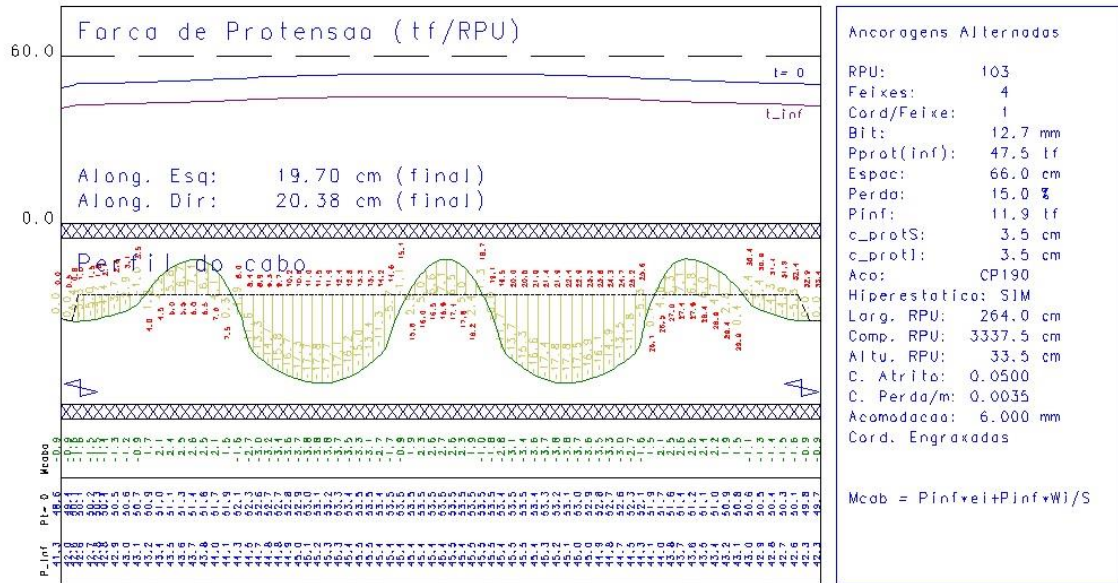


Figura 4.43: Projeto B2 - Força de protensão ao longo da RPU.

O detalhamento das armaduras encontra-se no Anexo B desse trabalho.

A Tabela 4.13 resume as estimativas dos materiais, calculadas a partir dos resultados obtidos.

Tabela 4.13: Projeto B2 – Quantitativos de aço, forma e concreto.

		Quantidade	Und.	Consumo
<b>Aço</b>	<b>CA-50</b>	11.396,00	kg	11,53 kg/m <sup>2</sup>
	<b>CP-190 RB</b>	3.452,00	kg	3,49 kg/m <sup>2</sup>
<b>Concreto</b>		213,00	m <sup>3</sup>	0,22 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Maciça</b>		217,86	m <sup>2</sup>	0,22 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Nervurada</b>		770,14	m <sup>2</sup>	0,78 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

#### 4.3.2.2 DESEMPENHO EM SERVIÇO

As flechas imediatas, calculadas a partir da combinação de ações da Eq. 4.6, são apresentadas na Figura 4.44. Ressalta-se que os valores negativos das flechas são no sentido gravitacional.

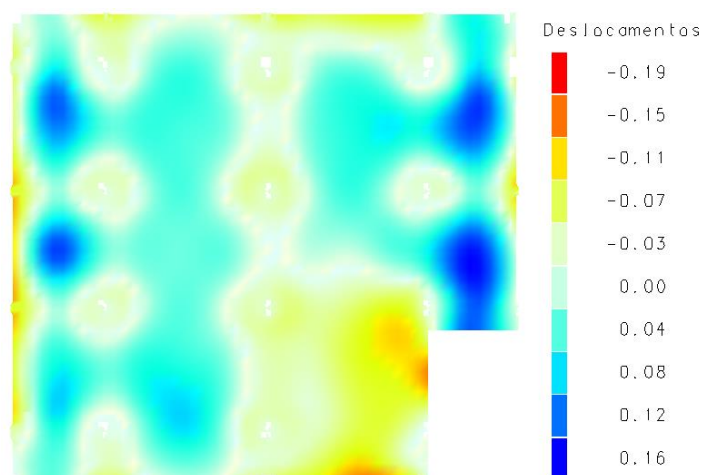


Figura 4.44: Projeto B2 – Flechas imediatas (cm).

Para a análise das flechas ao longo do tempo, utilizou-se a combinação dada na Eq. 4.7, recomendada pelo Sistema CAD/TQS. O resultado das flechas totais no tempo infinito é apresentado na Figura 4.45.

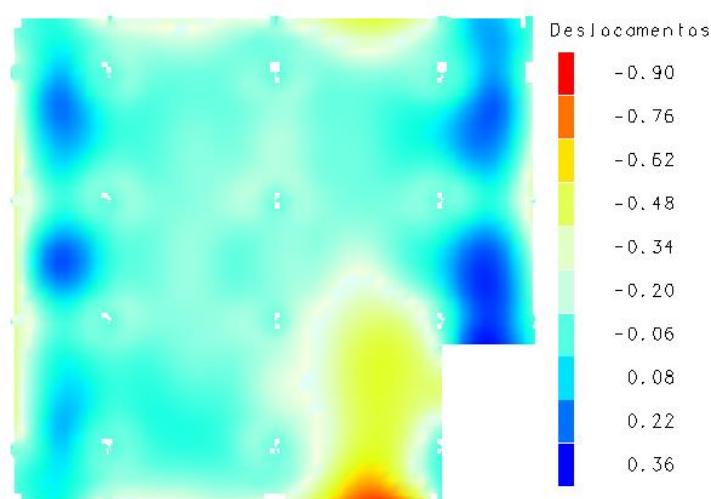


Figura 4.45: Projeto B2 – Flechas totais (cm) em tempo infinito.

Verifica-se que o deslocamento vertical máximo do pavimento, no projeto B2, é inferior ao limite de 4,2 cm.

### 4.3.2.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS

A Tabela 4.14 apresenta a estimativa de custos para execução da laje do pavimento térreo do projeto B2.

Os insumos e índices utilizados nas composições de custos estão detalhados no Anexo A deste trabalho. As composições de custos relacionadas à montagem e desmontagem de forma contemplam o aluguel de estrutura de escoramento, conforme detalhado no Anexo A.

Tabela 4.14: Projeto B2 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.

CÓD.	BASE DE REF.	SERVIÇO	UND	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
SER09	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (66 x 66 x 26 cm) e assoalho com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	770,14	R\$ 44,66	R\$ 34.394,45
92514	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	217,86	R\$ 24,49	R\$ 5.335,39
92769	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af_12/2015	kg	1.068,00	R\$ 7,52	R\$ 8.031,36
92770	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 8,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	2.388,20	R\$ 7,54	R\$ 18.007,03
92771	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	3.858,90	R\$ 6,17	R\$ 23.809,41
92772	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af_12/2015	kg	905,90	R\$ 5,59	R\$ 5.063,98
92773	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	3.175,00	R\$ 5,30	R\$ 16.827,50
SER03	SICRO/MG - out/19	Ancoragem ativa para lajes para cordoalhas engraxadas D = 12,7 mm com placa de ancoragem, cunha tripartida e protensão	un	126,00	R\$ 92,88	R\$ 11.702,88
SER04	SICRO/MG - out/19	Ancoragem passiva aderente para lajes com 1 cordoalha D = 12,7 mm - fornecimento e instalação	un	126,00	R\$ 35,35	R\$ 4.454,10
SER05	SICRO/MG - out/19	Cordoalha engraxada CP 190 RB D = 12,7 mm - fornecimento, preparo e colocação	kg	3.452,00	R\$ 11,87	R\$ 40.975,24
SER02	SINAPI/MG - out/19	Concretagem de vigas e lajes, $f_{ck}=35$ MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m <sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af_12/2015	m <sup>3</sup>	213,00	R\$ 370,43	R\$ 78.901,59
<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>						<b>R\$ 247.502,94</b>
<b>CUSTO/m<sup>2</sup></b>						<b>R\$ 250,51</b>

A Figura 4.46 apresenta, graficamente, o percentual do custo entre concreto, forma e aço para o projeto B2.

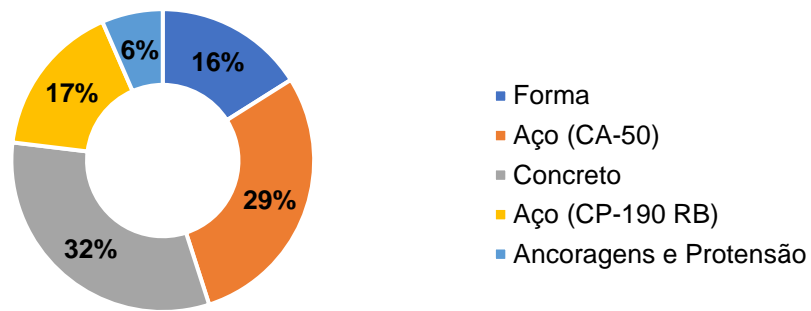


Figura 4.46: Projeto B2 – Participação dos serviços no custo direto total.

### 4.3.3 PROJETO B3 – LAJE *BUBBLEDECK*

O projeto B3 contempla a solução em laje *BubbleDeck*. A planta de forma é apresentada na Figura 4.47, indicando a localização das esferas e as dimensões das regiões maciças.

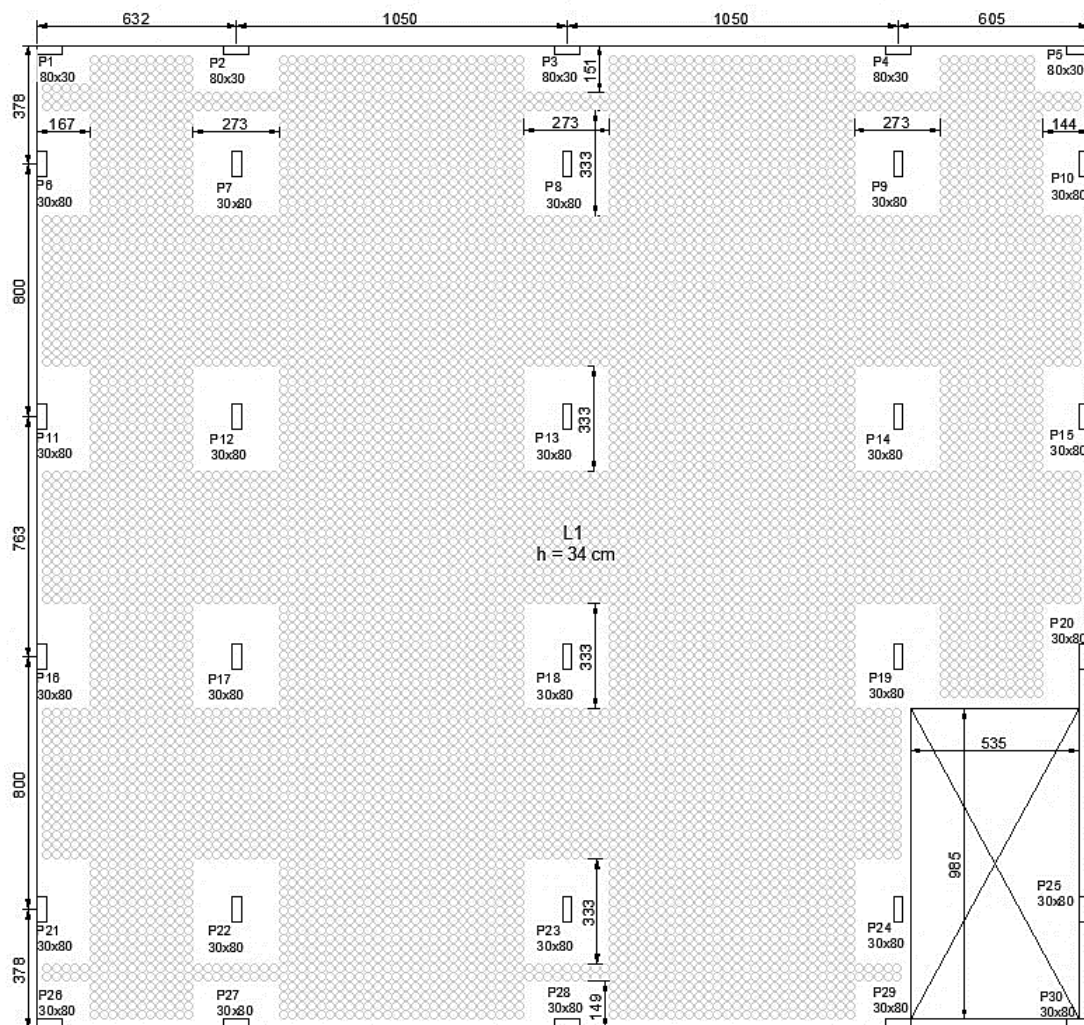


Figura 4.47: Projeto B3 - Planta de forma (dimensões em cm).

No projeto B3 foram empregadas esferas (*bubbles*) de 27 cm de diâmetro, com espaçamento entre eixos das esferas de 30 cm. A espessura total da laje é de 34 cm (Figura 4.48).

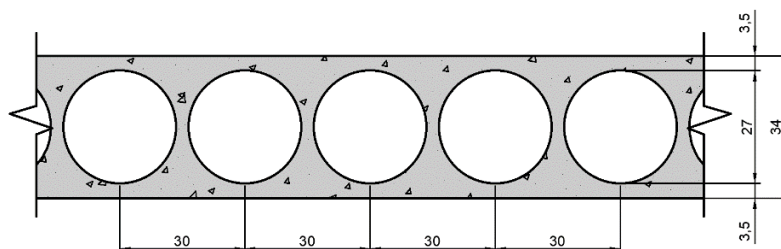


Figura 4.48: Projeto B3 – Seção transversal da laje *BubbleDeck* (dimensões em cm).

#### 4.3.3.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

Os momentos de flexão da grelha equivalente são apresentados na Figura 4.49 para a combinação dada na Eq. 4.1. O espaçamento entre as barras da grelha foi de 60 cm, fora das regiões dos pilares, e de 30 cm, nas zonas maciças sobre os pilares, em virtude da limitação de quantidade de barras e nós do programa.

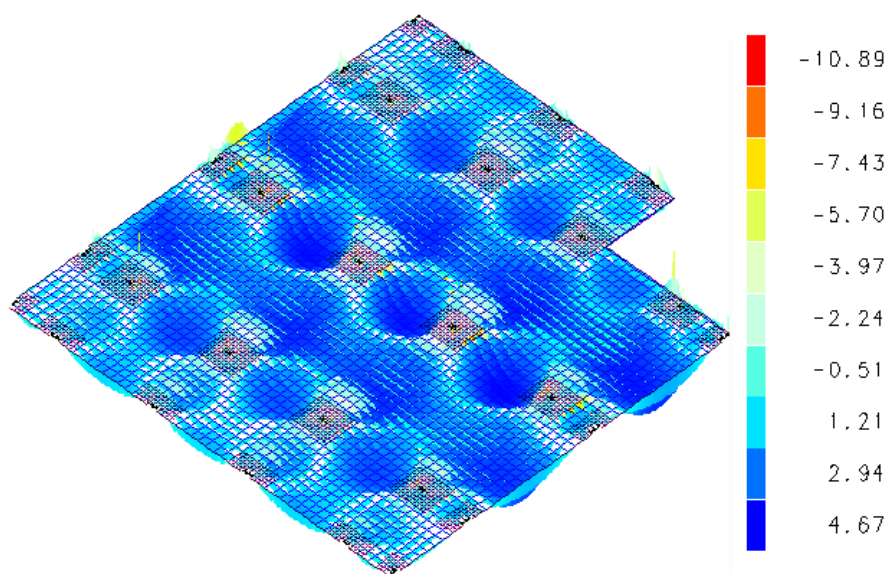


Figura 4.49: Projeto B3 – Momentos de flexão nas direções x e y ( $\times 10$  kN-m/barra).

O dimensionamento das armaduras foi realizado pelo programa CAD/TQS de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 6118 (2014).

O detalhamento das armaduras encontra-se no Anexo B desse trabalho.

A Tabela 4.15 resume as estimativas de materiais calculadas a partir dos resultados obtidos.



Tabela 4.15: Projeto B3 – Quantitativos de aço, forma e concreto.

	Quantidade	Und.	Consumo
<b>Aço CA-50</b>	25.901,00	kg	26,22 kg/m <sup>2</sup>
<b>Concreto</b>	238,73	m <sup>3</sup>	0,24 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Maciça</b>	988,00	m <sup>2</sup>	1,00 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Esferas/Bubbles</b>	883,54	m <sup>2</sup>	0,89 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

#### 4.3.3.2 DESEMPENHO EM SERVIÇO

As flechas totais (imediatas e diferidas) foram obtidas a partir do sistema de grelha não-linear do CAD-TQS, para a combinação de ações quase permanente. Os carregamentos verticais foram divididos em 20 parcelas incrementais, sendo a rigidez à flexão da laje recalculada a cada incremento de carga.

Para determinação da flecha diferida, considerou-se, de maneira aproximada, o produto da flecha imediata pelo fator  $\alpha_f$ , conforme item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118 (2014).

Conforme recomendação do manual do CAD/TQS, adotou-se  $\alpha_f$  igual a 1,5, para o peso próprio estrutural, e 1,3, para sobrecarga permanente.

A Figura 4.50 apresenta as flechas totais, em centímetros, obtidas da análise não-linear. Os valores negativos indicam flechas no sentido gravitacional.

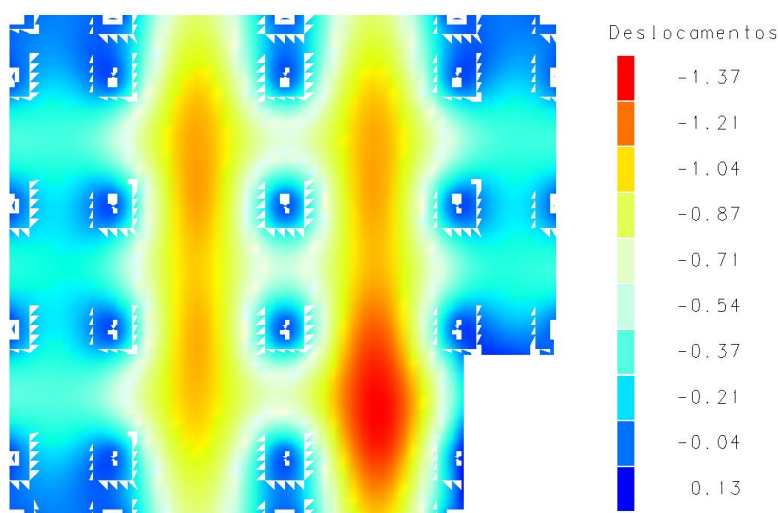


Figura 4.50: Projeto B3 – Flechas totais (cm) em tempo infinito.

As flechas calculadas são inferiores ao limite dado pela NBR 6118 (2014), calculado no item 4.3.1.2.

A Figura 4.51 apresenta as barras da grelha em que ocorrem microfissuras a partir da análise não-linear incremental. A maior abertura calculada foi de 0,12 mm, portanto inferior ao limite de 0,3 mm para a classe de agressividade II, conforme Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118 (2014).

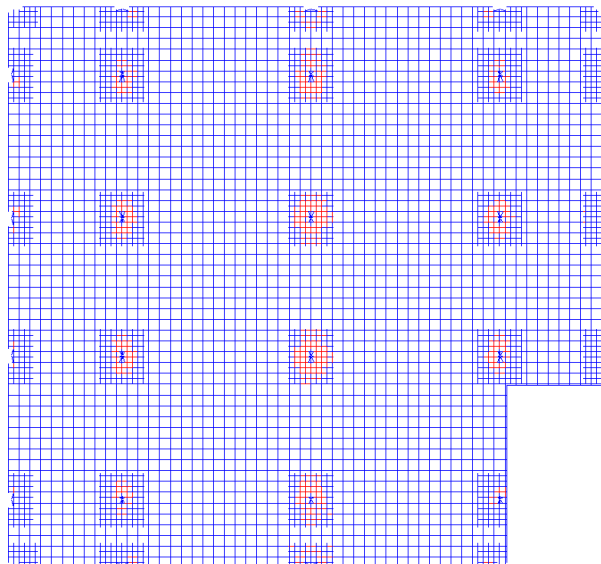


Figura 4.51: Projeto B3 - Barras em vermelho com indicação de microfissuras.

#### 4.3.3.3 ESTIMATIVA DE CUSTO

A Tabela 4.16 apresenta a estimativa de custos para execução da laje do pavimento térreo do projeto B3, considerando-se que a laje é totalmente moldada no local da obra.

Os insumos e índices utilizados nas composições de custos estão detalhados no Anexo A deste trabalho. As composições de custos relacionadas à montagem e desmontagem de forma contemplam o aluguel de estrutura de escoramento, conforme detalhado no Anexo A.

A Figura 4.52 apresenta, graficamente, o percentual do custo entre concreto, forma e aço para o projeto B3.

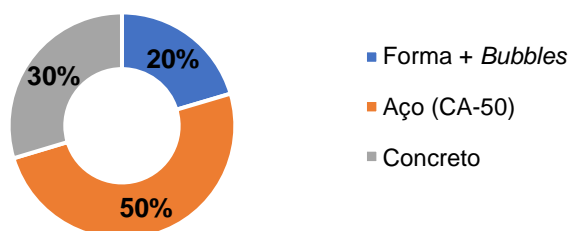


Figura 4.52: Projeto B3 – Participação dos serviços no custo direto total.

Tabela 4.16: Projeto B3 – Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.

CÓD.	BASE DE REF.	SERVIÇO	UND	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
92514	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	988,00	R\$ 24,49	R\$ 24.196,12
92769	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af_12/2015	kg	616,00	R\$ 7,52	R\$ 4.632,32
92770	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 8,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	588,00	R\$ 7,54	R\$ 4.433,52
92771	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	8.315,00	R\$ 6,17	R\$ 51.303,55
92772	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af_12/2015	kg	9.332,00	R\$ 5,59	R\$ 52.165,88
92773	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	4.576,00	R\$ 5,30	R\$ 24.252,80
92774	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 20,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	2.473,00	R\$ 4,95	R\$ 12.241,35
SER10	COTAÇÃO - out/19	Esferas de polipropileno com diâmetro de 27 cm - fornecimento e posicionamento	m <sup>2</sup>	883,54	R\$ 41,59	R\$ 36.746,43
SER02	SINAPI/MG - out/19	Concretagem de vigas e lajes, f <sub>ck</sub> =35 MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m <sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af_12/2015	m <sup>3</sup>	238,73	R\$ 370,43	R\$ 88.432,75
<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>						<b>R\$ 298.404,72</b>
<b>CUSTO/m<sup>2</sup></b>						<b>R\$ 302,03</b>

#### 4.4 PROJETO C – VÃO DE 13,50 m

O projeto C é composto por uma laje apoiada em 16 pilares de 150 cm x 50 cm ou 120 cm x 50 cm espaçados de, no máximo, 13,50 m.

Foram estudadas três soluções: laje nervurada em concreto armado (Projeto C1), laje nervurada protendida (projeto C2) e laje *BubbleDeck* (projeto C3).

#### 4.4.1 PROJETO C1 – LAJE NERVURADA EM CONCRETO ARMADO

A Figura 4.53 apresenta a planta de forma do projeto C1.

No contorno dos pilares foram deixadas regiões maciças para resistir aos momentos de flexão negativos e combater os efeitos da punção.

Foram empregadas caixas plásticas Atex, modelo 650, com capa de concreto de 10,0 cm e espessura total de 50,0 cm, conforme mostra a Figura 4.54.

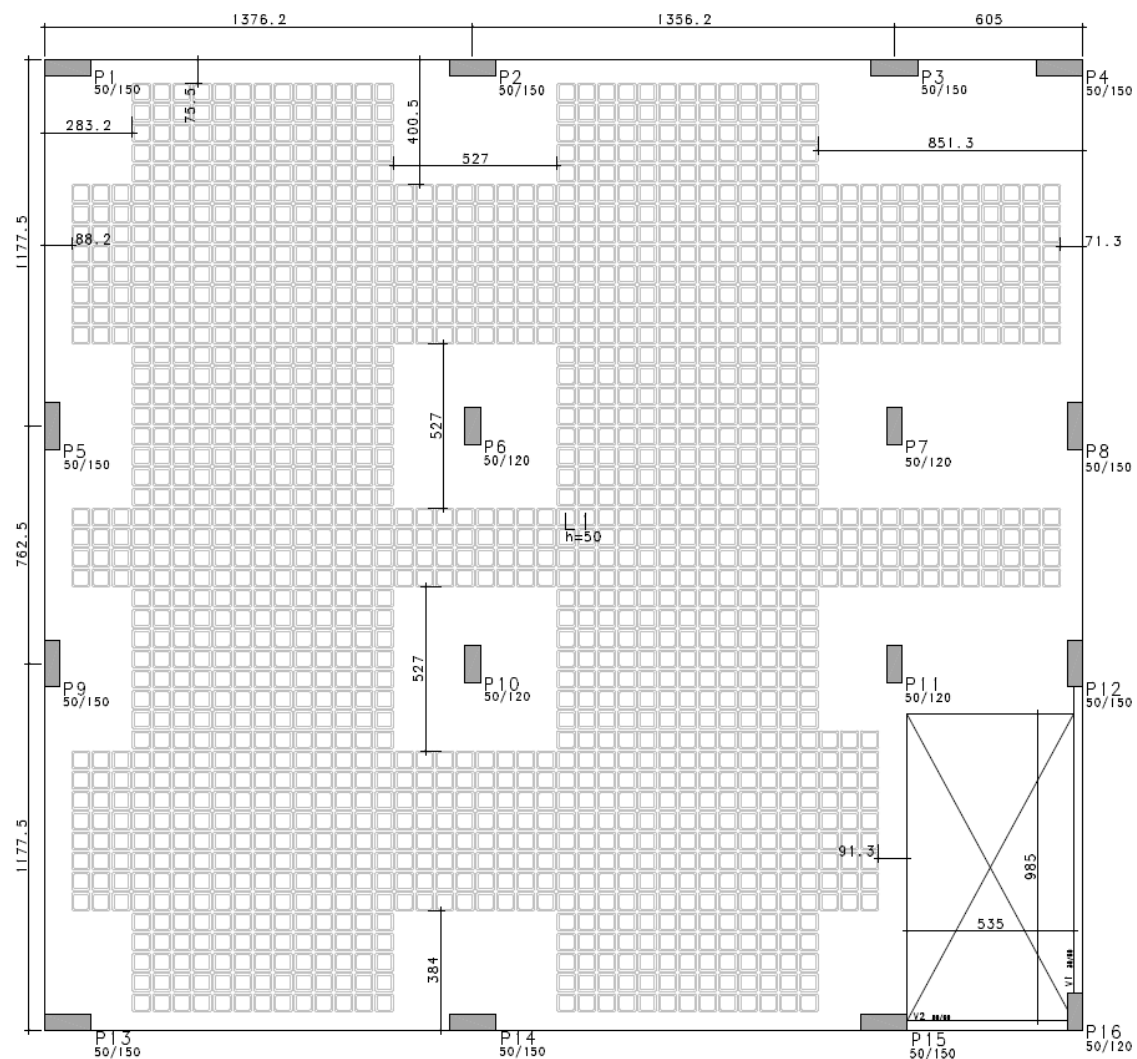


Figura 4.53: Projeto C1 - Planta de forma (dimensões em cm).

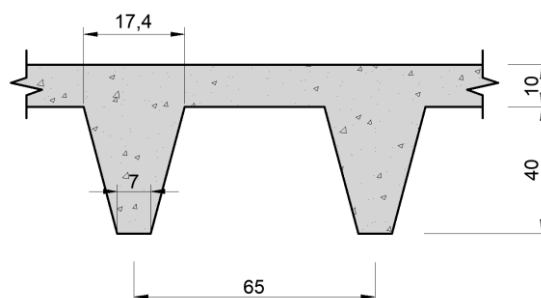


Figura 4.54: Projeto C1 - Seção da laje nervurada (dimensões em cm).

A Tabela 4.17 apresenta as principais propriedades da seção transversal obtida com a forma plástica empregada no projeto C1.

Tabela 4.17: Projeto C1 - Propriedades da seção transversal.

Área da seção (cm <sup>2</sup> )	1.138
Distância do C.G. à face superior (cm)	14,5
Inércia por nervura (cm <sup>4</sup> )	203.401
Volume do vazio (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,264
Peso próprio (kN/m <sup>2</sup> )	5,90
Volume de concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,236

#### 4.4.1.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural foi realizada com o programa CAD/TQS. Adotou-se, para o espaçamento entre as barras da grelha, 65 cm na região das nervuras e 32,5 cm nas regiões maciças sobre os pilares.

A Figura 4.55 mostra os momentos de flexão nas barras da grelha equivalente da laje. Os valores indicados foram calculados para a cominação da Eq. 4.1.

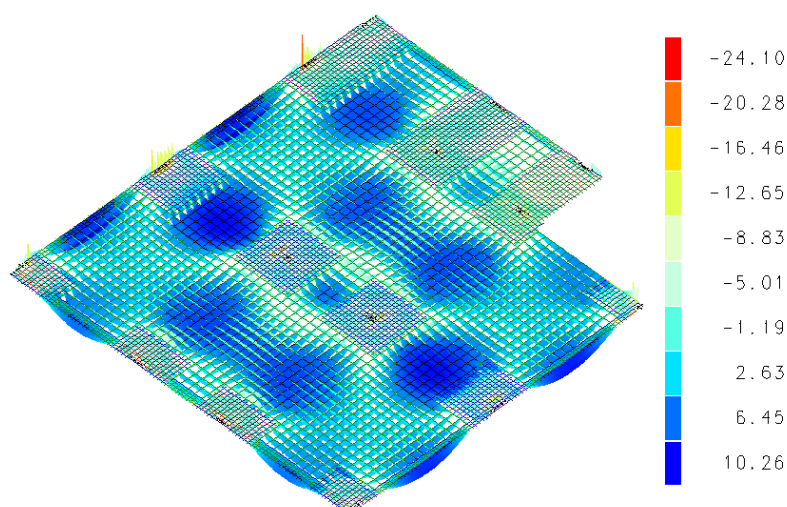


Figura 4.55: Projeto C1 – Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN.m/barra).

O dimensionamento das armaduras foi realizado com o uso do programa CAD/TQS, de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 6118 (2014).

O detalhamento das armaduras encontra-se no Anexo B desse trabalho.

A Tabela 4.18 resume as estimativas de materiais, calculadas a partir dos resultados obtidos.

Tabela 4.18: Projeto C1 – Quantitativos de aço, forma e concreto.

	Quantidade	Und.	Consumo
<b>Aço CA-50</b>	38.242,00	kg	38,71 kg/m <sup>2</sup>
<b>Concreto</b>	302,60	m <sup>3</sup>	0,31 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Maciça</b>	317,00	m <sup>2</sup>	0,32 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Nervurada</b>	671,00	m <sup>2</sup>	0,68 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

#### 4.4.1.2 DESEMPENHO EM SERVIÇO

A Figura 4.56 apresenta as flechas totais (imediatas e diferidas), em centímetros, obtidas da análise não-linear. Valores negativos indicam flechas no sentido gravitacional.

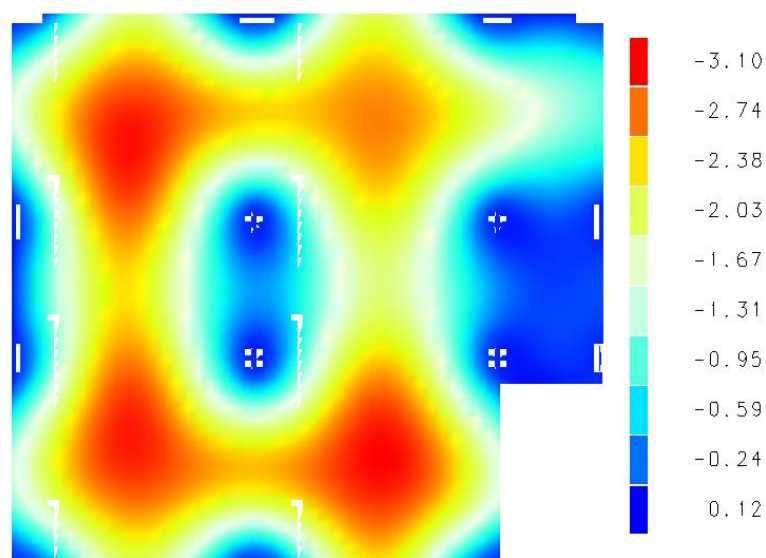


Figura 4.56: Projeto C1 – Flechas totais (cm) em tempo infinito.

Conforme o item 13.3 da ABNT NBR 6118 (2014), a flecha máxima admissível para o maior vão (13,50 m) é de:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{1350}{250} = 5,4 \text{ cm}$$

Logo, a flecha máxima apresentada em serviço (3,10 cm) é menor que o limite normativo.

A Figura 4.57 apresenta as barras da grelha em que ocorrem microfissuras, a partir da análise não-linear incremental. A maior abertura encontrada foi de 0,29 mm, portanto, inferior ao limite de 0,3 mm, para a classe de agressividade II, conforme prescrito na Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118 (2014).

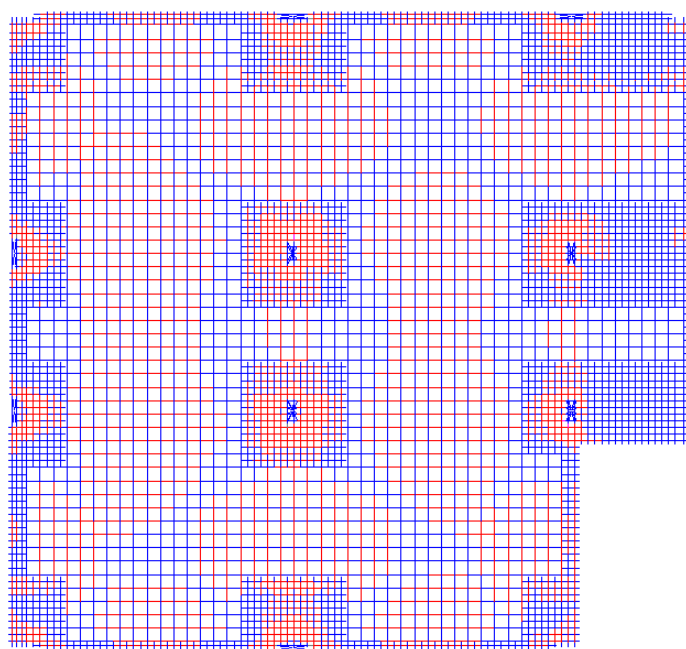


Figura 4.57: Projeto C1 – Barras em vermelho com indicação de microfissuras.

#### 4.4.1.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS

A Tabela 4.19 apresenta a estimativa de custos para a execução da laje do pavimento térreo do projeto C1.

Os insumos e índices utilizados nas composições de custos estão detalhados no Anexo A deste trabalho. As composições de custos relacionadas à montagem e desmontagem de forma contemplam o aluguel de estrutura de escoramento, conforme detalhado no Anexo A.

A Figura 4.58 apresenta, graficamente, o percentual do custo direto entre serviços de concretagem, forma e armadura para o projeto C1.

Tabela 4.19: Projeto C1 – Estimativa de custos para laje do pavimento térreo.

CÓD.	BASE DE REF.	SERVIÇO	UND	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
SER11	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (65 x 65 x 40 cm) e assoalho com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. af_12/2015	m <sup>2</sup>	671,00	R\$ 45,89	R\$ 30.792,19
92514	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	317,00	R\$ 24,49	R\$ 7.763,33
92769	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af_12/2015	kg	829,90	R\$ 7,52	R\$ 6.240,85
92771	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	5.719,20	R\$ 6,17	R\$ 35.287,46
92772	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af_12/2015	kg	3.129,60	R\$ 5,59	R\$ 17.494,46
92773	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	4.767,00	R\$ 5,30	R\$ 25.265,10
92774	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 20,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	23.797,70	R\$ 4,95	R\$ 117.798,62
SER02	SINAPI/MG - out/19	Concretagem de vigas e lajes, $f_{ck}=35$ MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m <sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af_12/2015	m <sup>3</sup>	302,60	R\$ 370,43	R\$ 112.092,12
<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>						<b>R\$ 352.734,13</b>
<b>CUSTO/m<sup>2</sup></b>						<b>R\$ 357,02</b>

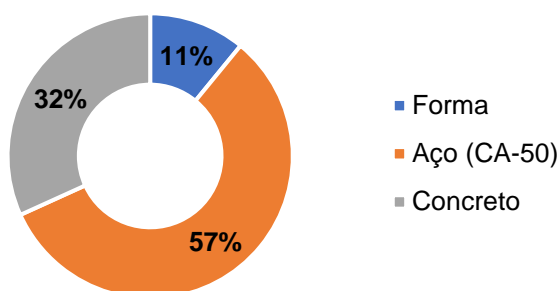


Figura 4.58: Projeto C1 - Participação dos serviços no custo direto total.



#### 4.4.2 PROJETO C2 – LAJE NERVURADA PROTENDIDA

O projeto C2 assemelha-se ao projeto C1, porém com o uso da protensão como armadura principal. Com isso, foi possível reduzir a espessura da laje nervurada, aumentando a altura livre do pavimento. A Figura 4.59 apresenta a planta de forma do projeto C2.

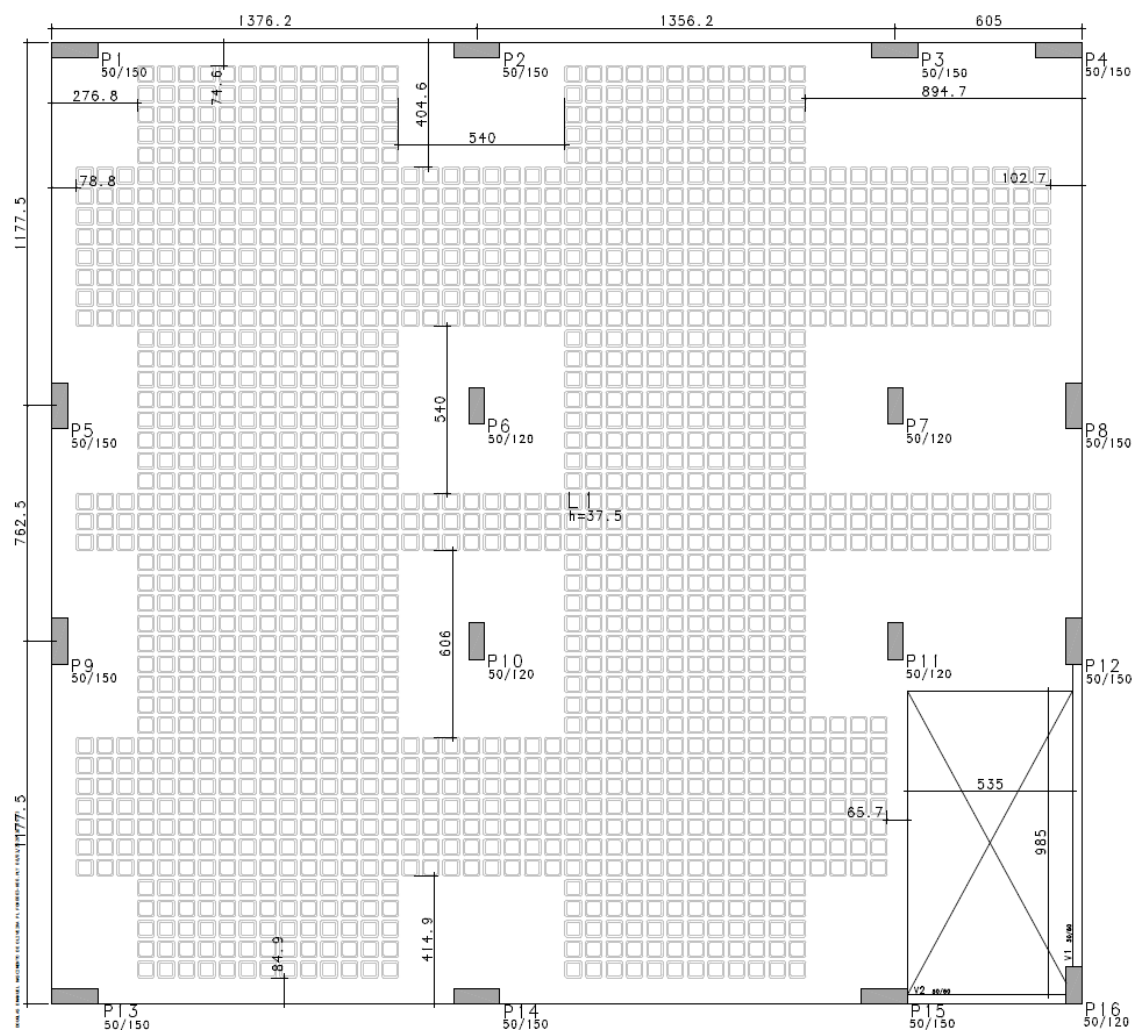


Figura 4.59: Projeto C2 - Planta de forma (dimensões em cm).

As caixas plásticas empregadas no projeto C2 possuem as mesmas dimensões e características indicadas na Figura 4.29 e Tabela 4.9 (projeto B1).

Os cabos de protensão foram distribuídos nas nervuras da laje, em feixes de até duas cordoalhas de 12,7 mm. No total foram utilizadas 174 cordoalhas engraxadas e plastificadas do tipo CP-190RB, distribuídas conforme as Figuras 4.60 e 4.61.

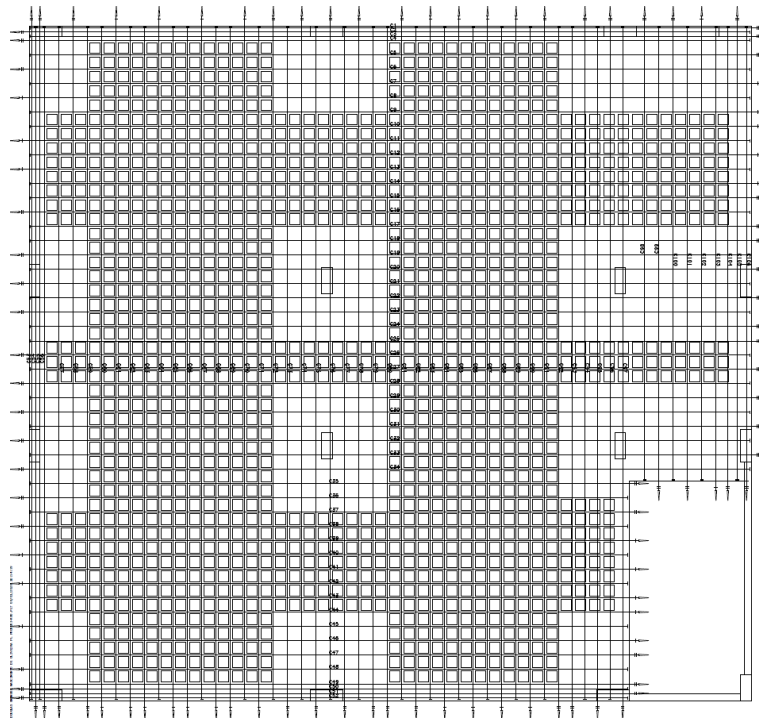


Figura 4.60: Projeto C2 – Distribuição das cordoalhas de protensão em planta.

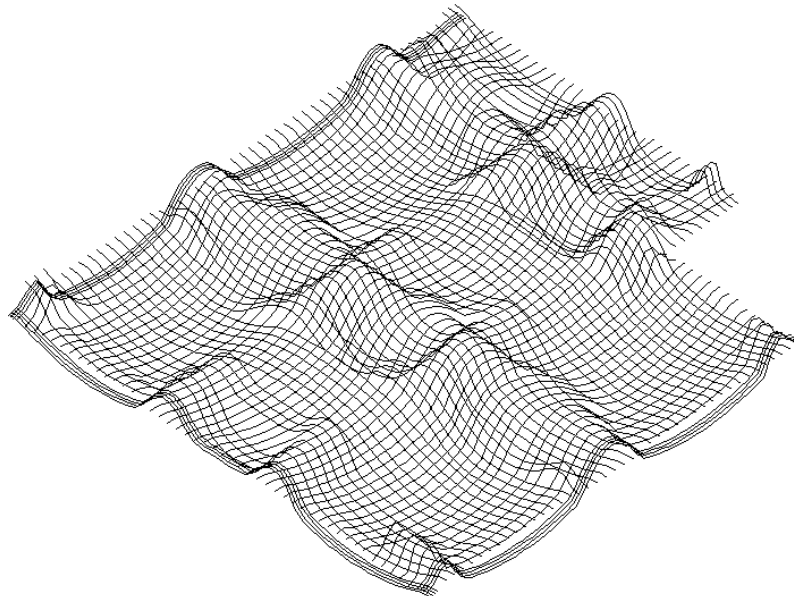


Figura 4.61: Projeto C2 - Vista espacial das cordoalhas de protensão.

#### 4.4.2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural foi realizada com o programa CAD/TQS. O espaçamento adotado entre as barras da grelha foi de 66 cm, na região das nervuras, e de 33 cm, nas regiões maciças sobre os pilares.

A Figura 4.62 apresenta os momentos de flexão nas barras da grelha equivalente. Os valores indicados foram obtidos a partir da combinação de ações da Eq. 4.3.

A Figura 4.63 apresenta os momentos de flexão devidos às forças de protensão, exclusivamente.

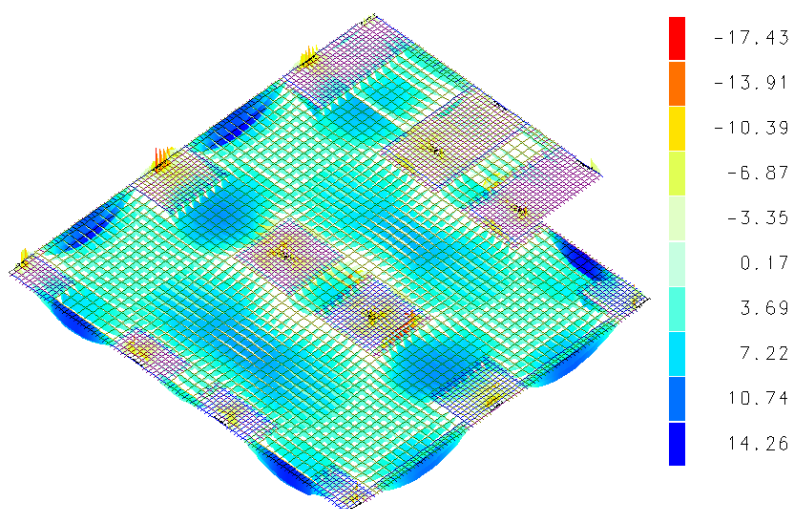


Figura 4.62: Projeto C2 - Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra).

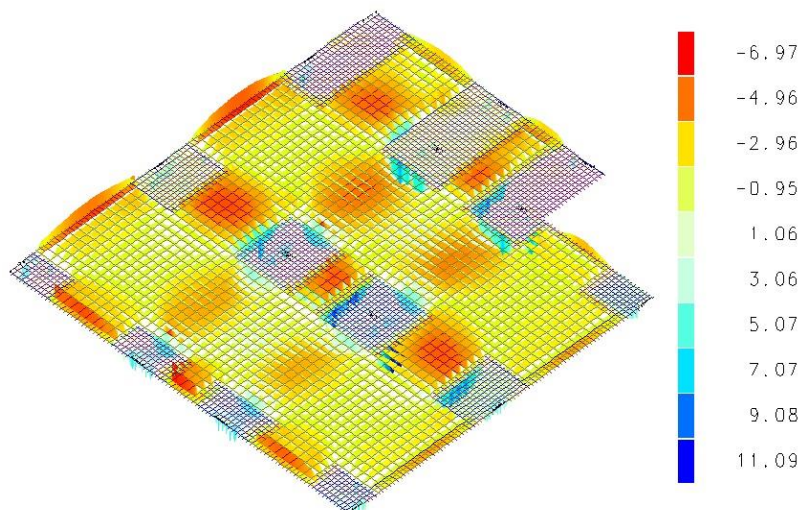


Figura 4.63: Projeto C2 - Momentos de flexão devidos às forças de protensão (x10 kN·m/barra).

As Figuras 4.64 e 4.65 apresentam os resultados das tensões nas fibras de uma das RPU's na combinação frequente de ações e no ato da protensão, respectivamente.

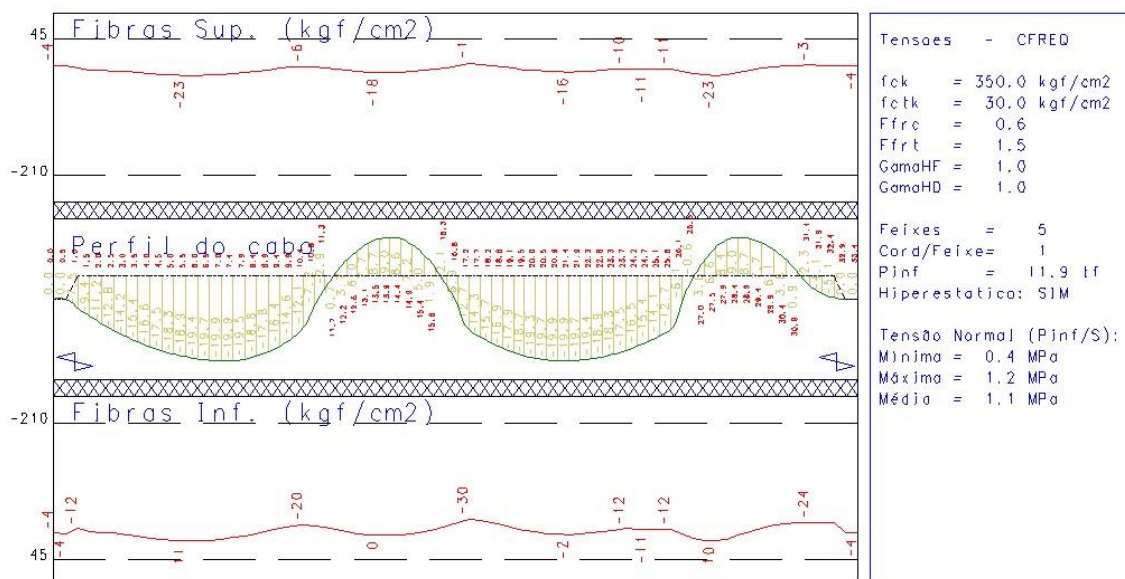


Figura 4.64: Projeto C2 - Diagrama de tensões (combinação frequente).

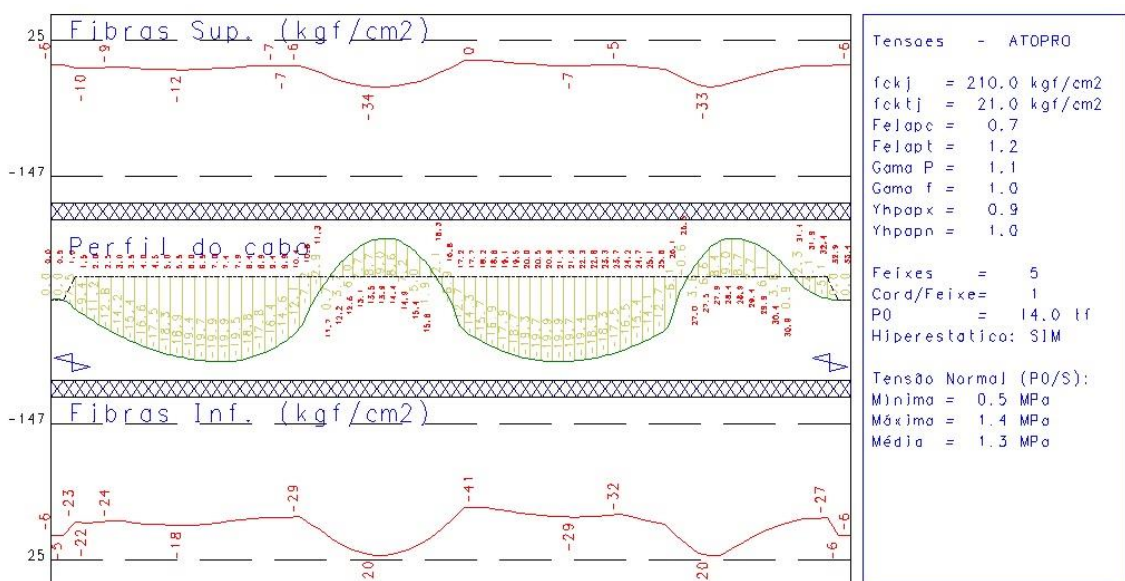


Figura 4.65: Projeto C2 - Diagrama de tensões (ato da protensão).

Nota-se da Figura 4.65 que as tensões solicitantes no ato da protensão encontram-se dentro dos limites admissíveis da ABNT NBR 6118 (2014), conforme calculado no item 4.2.2.1.

Para cada RPU foram verificadas as aberturas de fissuras calculadas pela combinação frequente, em atendimento ao ELS-W ( $w_k \leq 0,2$  mm).

A Figura 4.66 mostra a armadura passiva calculada pelo programa CAD/TQS para atendimento à envoltória de esforços.

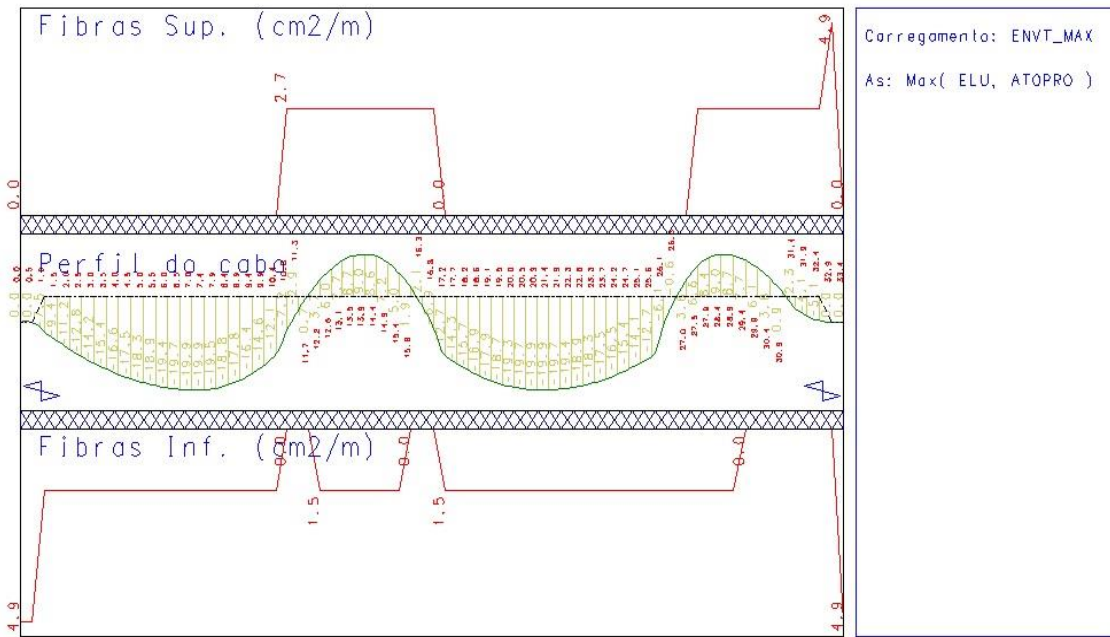


Figura 4.66: Projeto C2 - Armadura passiva calculada (cm<sup>2</sup>/m).

A Figura 4.67 apresenta as forças de protensão ao longo da cordoalha, no momento da aplicação da carga (t=0) e após as perdas diferidas (t=inf).

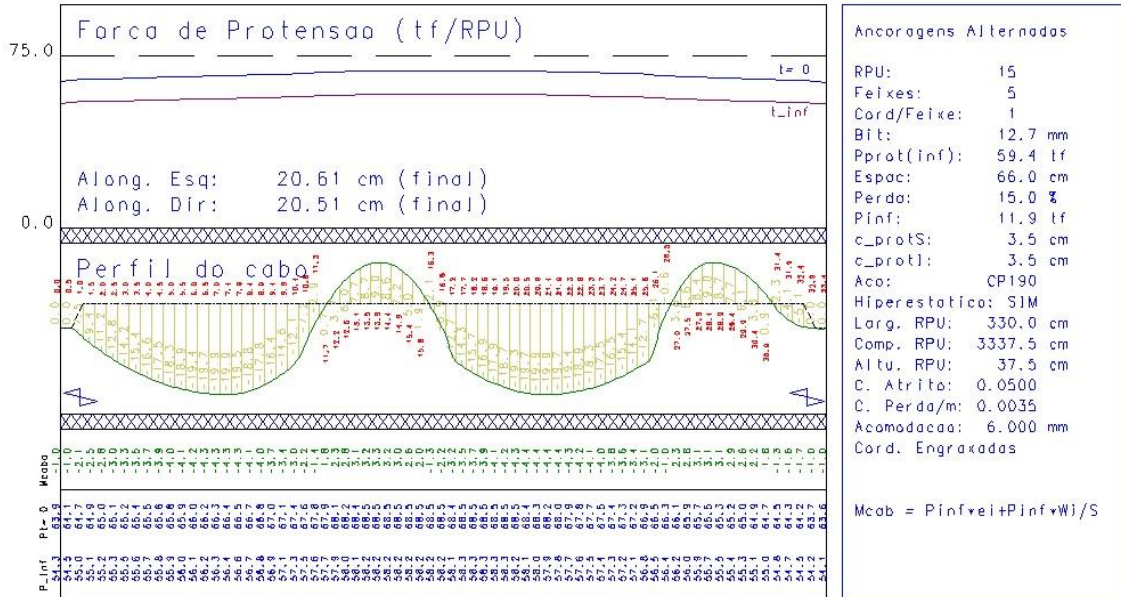


Figura 4.67: Projeto C2 - Força de protensão ao longo da RPU.

A Tabela 4.20 resume as estimativas dos materiais, calculadas a partir dos resultados obtidos.

Tabela 4.20: Projeto C2 - Quantitativos de aço, forma e concreto.

		Quantidade	Und.	Consumo
Aço	CA-50	19.325,30	kg	19,56 kg/m <sup>2</sup>
	CP-190 RB	4.780,00	kg	4,84 kg/m <sup>2</sup>
Concreto		271,30	m <sup>3</sup>	0,27 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
Forma de Laje Maciça		340,00	m <sup>2</sup>	0,34 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Forma de Laje Nervurada		648,00	m <sup>2</sup>	0,66 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

#### 4.4.2.2 DESEMPENHO EM SERVIÇO

As flechas imediatas, calculadas a partir da combinação de ações da Eq. 4.6, são apresentadas na Figura 4.68. Os valores negativos das flechas são no sentido gravitacional.

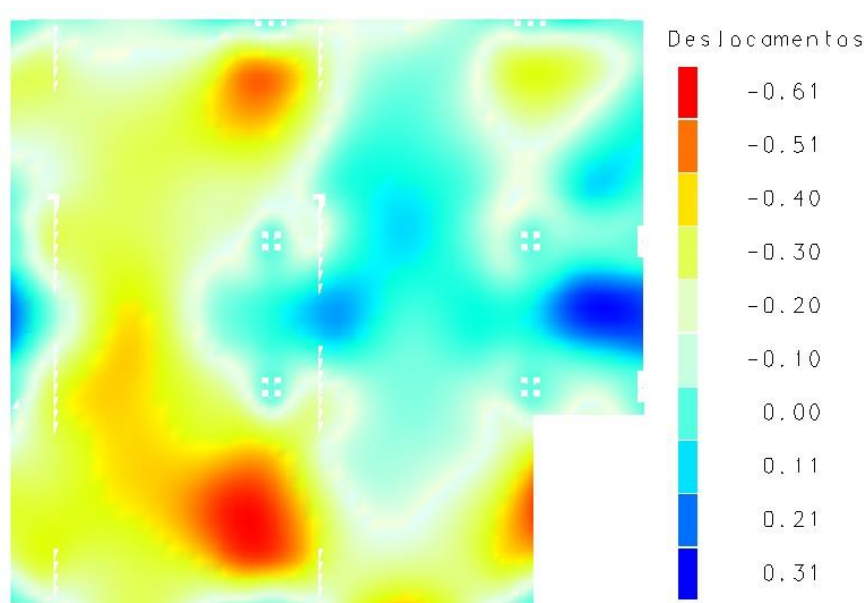


Figura 4.68: Projeto C2 - Flechas imediatas (cm).

Para a análise das flechas ao longo do tempo, utilizou-se a combinação dada na Eq. 4.7, recomendada pelo Sistema CAD/TQS. As flechas totais em tempo infinito são apresentadas na Figura 4.69.

Verifica-se que o deslocamento vertical máximo do pavimento, no projeto C2, é inferior ao limite de 5,4 cm.

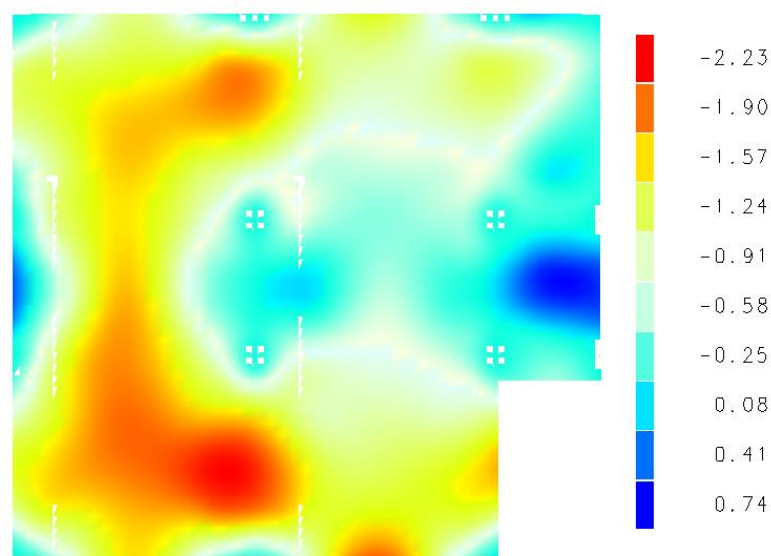


Figura 4.69: Projeto C2 - Flechas totais (cm) em tempo infinito.

#### 4.4.2.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS

A Tabela 4.21 apresenta a estimativa de custos para execução da laje do pavimento térreo do projeto C2.

Os insumos e índices utilizados nas composições de custos estão detalhados no Anexo A deste trabalho. As composições de custos relacionadas à montagem e desmontagem de forma contemplam o aluguel de estrutura de escoramento, conforme detalhado no Anexo A.

A Figura 4.70 apresenta, graficamente, o percentual do custo entre concreto, forma e aço para o projeto C2.

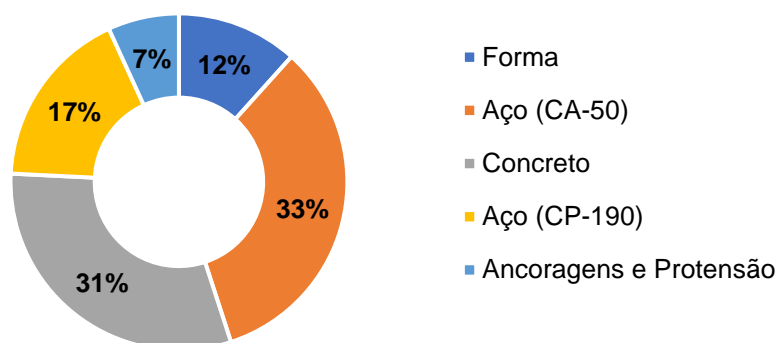


Figura 4.70: Projeto C2 - Participação dos serviços no custo direto total.

Tabela 4.21: Projeto C2 - Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.

CÓD.	BASE DE REF.	SERVIÇO	UND	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
SER08	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (66 x 66 x 30 cm) e assoalho com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	648,00	R\$ 45,89	R\$ 29.736,72
92514	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	340,00	R\$ 24,49	R\$ 8.326,60
92769	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af_12/2015	kg	906,50	R\$ 7,52	R\$ 6.816,88
92770	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 8,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	908,80	R\$ 7,54	R\$ 6.852,35
92771	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	2.607,70	R\$ 6,17	R\$ 16.089,51
92772	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af_12/2015	kg	7.947,00	R\$ 5,59	R\$ 44.423,73
92773	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	620,80	R\$ 5,30	R\$ 3.290,24
92774	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 20,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	6.334,40	R\$ 4,95	R\$ 31.355,28
SER03	SICRO/MG - out/19	Ancoragem ativa para lajes para cordoalhas engraxadas D = 12,7 mm com placa de ancoragem, cunha tripartida e protensão	un	174,00	R\$ 92,88	R\$ 16.161,12
SER04	SICRO/MG - out/19	Ancoragem passiva aderente para lajes com 1 cordoalha D = 12,7 mm - fornecimento e instalação	un	174,00	R\$ 35,35	R\$ 6.150,90
SER05	SICRO/MG - out/19	Cordoalha engraxada CP 190 RB D = 12,7 mm - fornecimento, preparo e colocação	kg	4.780,00	R\$ 11,87	R\$ 56.738,60
SER02	SINAPI/MG - out/19	Concretagem de vigas e lajes, $f_{ck}=35$ MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m <sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af_12/2015	m <sup>3</sup>	271,30	R\$ 370,43	R\$ 100.497,66
<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>						<b>R\$ 326.439,59</b>
<b>CUSTO/m<sup>2</sup></b>						<b>R\$ 330,40</b>



#### 4.4.3 PROJETO C3 – LAJE *BUBBLEDECK*

O projeto C3 contempla a solução em laje *BubbleDeck*. A planta de forma é apresentada na Figura 4.71, indicando a localização das esferas e as dimensões das regiões maciças.

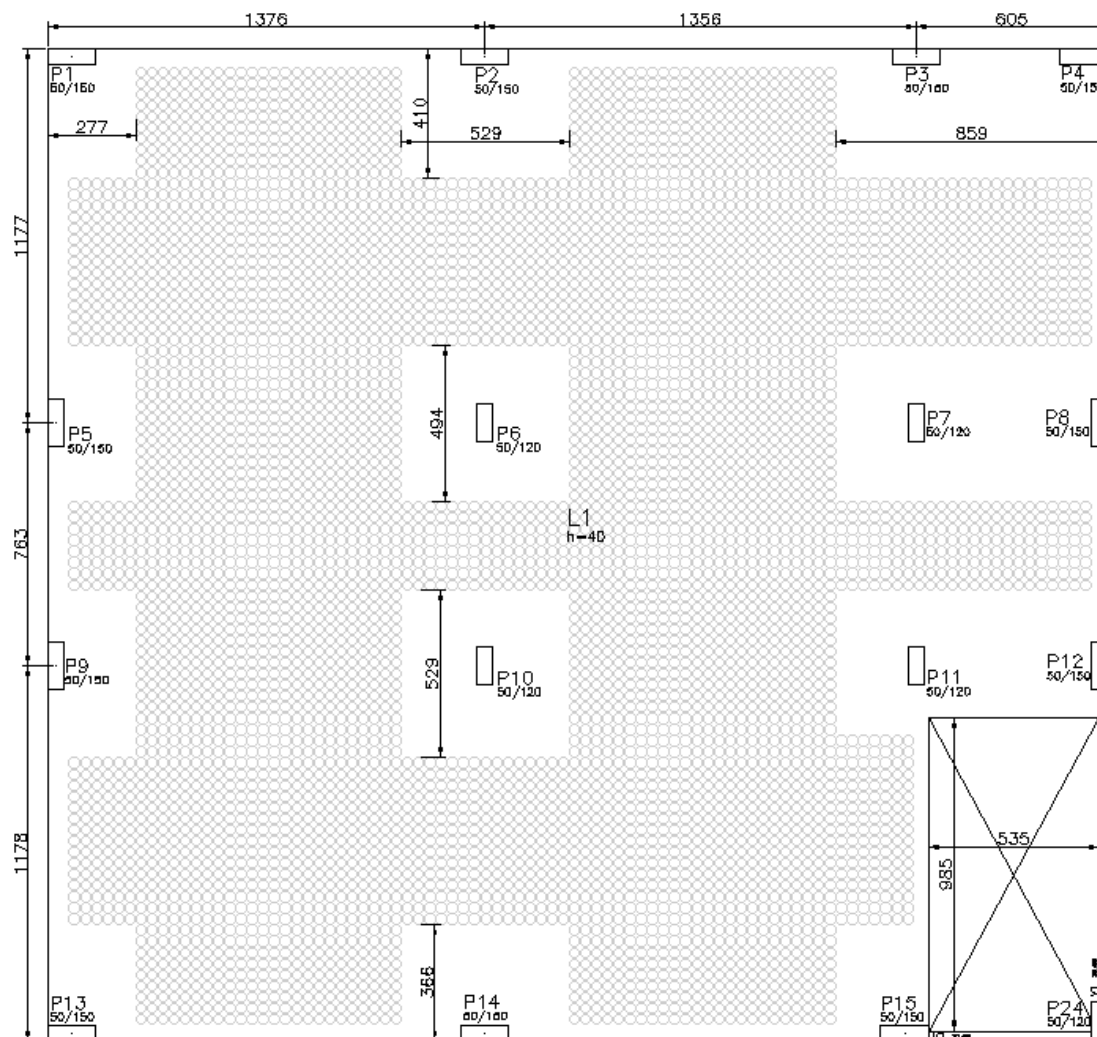


Figura 4.71: Projeto C3 - Planta de forma (dimensões em cm).

No projeto C3 foram empregadas esferas (*bubbles*) de 31,5 cm de diâmetro, com espaçamento entre eixos de 35 cm. A espessura total da laje é de 40 cm (Figura 4.72).

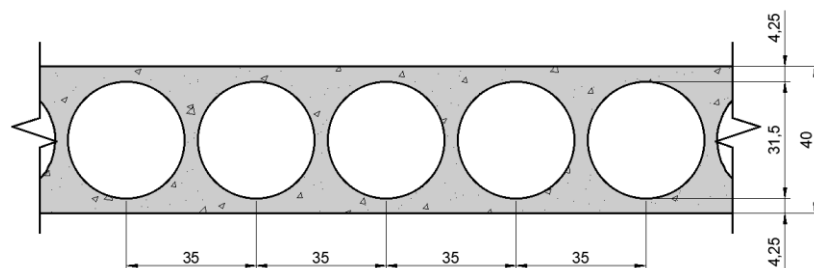


Figura 4.72: Projeto C3 - Seção transversal da laje *BubbleDeck* (dimensões em cm).

#### 4.4.3.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

Os momentos de flexão da grelha equivalente são apresentados na Figura 4.73 para a combinação dada na Eq. 4.1. O espaçamento adotado entre as barras da grelha foi de 60 cm, fora das regiões dos pilares, e de 30 cm, nas zonas maciças sobre os pilares, em virtude da limitação de quantidade de barras e nós do programa.

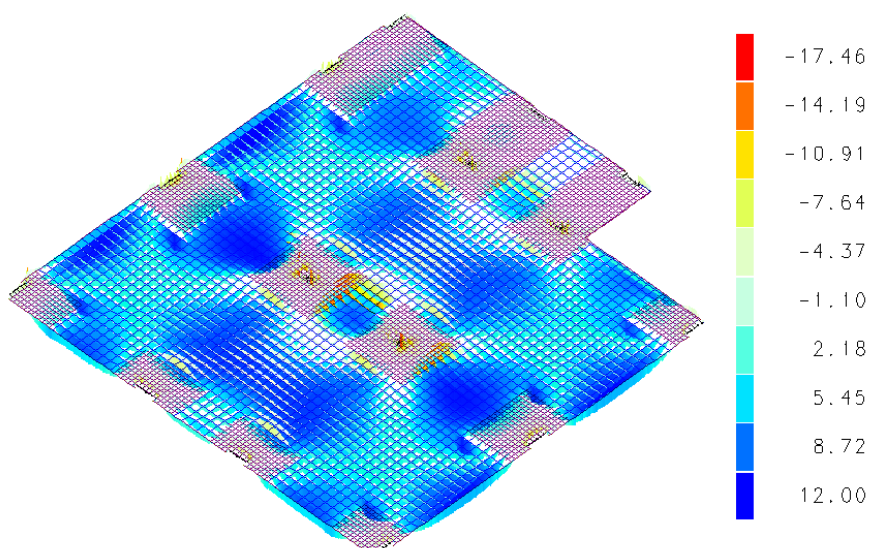


Figura 4.73: Projeto C3 - Momentos de flexão nas direções x e y (x10 kN·m/barra).

O dimensionamento das armaduras foi realizado pelo programa CAD/TQS, de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 6118 (2014).

O detalhamento das armaduras encontra-se no Anexo B desse trabalho.

A Tabela 4.22 resume as estimativas de materiais, calculadas a partir dos resultados obtidos.

Tabela 4.22: Projeto C3 - Quantitativos de aço, forma e concreto.

	Quantidade	Und.	Consumo
<b>Aço CA-50</b>	45.707,40	kg	46,26 kg/m <sup>2</sup>
<b>Concreto</b>	305,53	m <sup>3</sup>	0,31 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Forma de Laje Maciça</b>	988,00	m <sup>2</sup>	1,00 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Esferas/Bubbles</b>	679,36	m <sup>2</sup>	0,69 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

#### 4.4.3.2 DESEMPENHO EM SERVIÇO

As flechas totais (imediatas e diferidas) foram obtidas por meio do sistema de grelha não-linear do CAD-TQS, para a combinação de ações quase permanente. Os carregamentos verticais foram divididos em 20 parcelas incrementais, sendo a rigidez à flexão da laje recalculada a cada incremento de carga.

Para determinação da flecha diferida, considerou-se, de maneira aproximada, o produto da flecha imediata pelo fator  $\alpha_f$ , conforme item 17.3.2.1.2 da ABNT NBR 6118 (2014).

Segundo recomendação do manual do CAD/TQS, adotou-se  $\alpha_f$  igual a 1,5, para o peso próprio estrutural, e 1,3, para sobrecarga permanente.

A Figura 4.74 apresenta as flechas totais, em centímetros, obtidas da análise não-linear. Os valores negativos indicam flechas no sentido gravitacional.

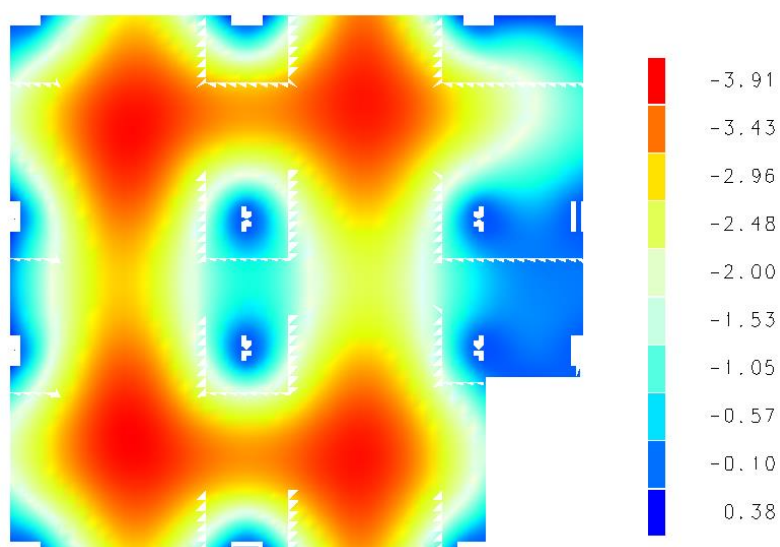


Figura 4.74: Projeto C3 - Flechas totais (cm) em tempo infinito.

As flechas calculadas são inferiores ao limite dado pela ABNT NBR 6118:2014 (5,4 cm)

A Figura 4.75 apresenta as barras da grelha em que ocorrem microfissuras, a partir da análise não-linear incremental. A maior abertura encontrada foi de 0,28 mm, portanto, inferior ao limite de 0,3 mm, para a classe de agressividade II, conforme prescrito na Tabela 13.4 da ABNT NBR 6118 (2014).

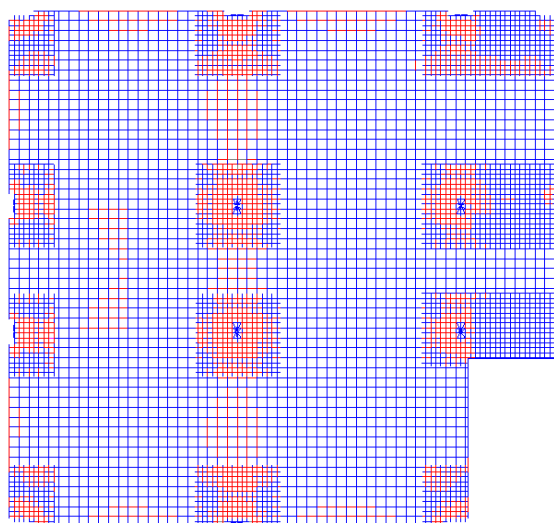


Figura 4.75: Projeto C3 - Barras em vermelho com indicação de microfissuras.

#### 4.4.3.3 ESTIMATIVA DE CUSTO

A Tabela 4.23 apresenta a estimativa de custos para execução da laje do pavimento térreo do projeto C3, considerando-se que a laje é totalmente moldada no local da obra.

Os insumos e índices utilizados nas composições de custos estão detalhados no Anexo A deste trabalho. As composições de custos relacionadas à montagem e desmontagem de forma contemplam o aluguel de estrutura de escoramento, conforme detalhado no Anexo A.

A Figura 4.76 apresenta, graficamente, o percentual do custo entre concreto, forma e aço para o projeto C3.

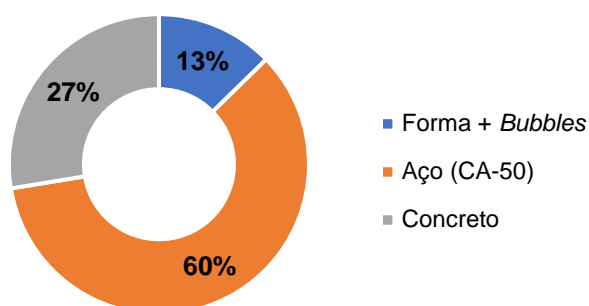


Figura 4.76: Projeto C3 - Participação dos serviços no custo direto total.

Tabela 4.23: Projeto C3 - Estimativa de custos para a laje do pavimento térreo.

CÓD.	BASE DE REF.	SERVIÇO	UND	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
92514	SINAPI/MG - out/19	Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m <sup>2</sup> , pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	988,00	R\$ 24,49	R\$ 24.196,12
92769	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af_12/2015	kg	799,10	R\$ 7,52	R\$ 6.009,23
92771	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	3.246,90	R\$ 6,17	R\$ 20.033,37
92772	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af_12/2015	kg	14.359,10	R\$ 5,59	R\$ 80.267,37
92773	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	10.486,70	R\$ 5,30	R\$ 55.579,51
92774	SINAPI/MG - out/19	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 20,0 mm - montagem. Af_12/2015	kg	16.815,70	R\$ 4,95	R\$ 83.237,72
SER12	COTAÇÃO - out/19	Esferas de polipropileno com diâmetro de 31,5 cm - fornecimento e posicionamento	m <sup>2</sup>	679,36	R\$ 41,01	R\$ 27.860,55
SER02	SINAPI/MG - out/19	Concretagem de vigas e lajes, $f_{ck}=35$ MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m <sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af_12/2015	m <sup>3</sup>	305,53	R\$ 370,43	R\$ 113.177,48
<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>						<b>R\$ 410.361,35</b>
<b>CUSTO/m<sup>2</sup></b>						<b>R\$ 415,35</b>

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são analisadas as respostas obtidas do estudo de caso desenvolvido no capítulo 4 e comparados com os resultados de outros autores. Com base nesses valores são propostos índices que têm por finalidade auxiliar na escolha do sistema estrutural mais apropriado em termos de consumos de materiais e custos.

### 5.1 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS

Este item apresenta o comparativo das flechas máximas, dos consumos de materiais e das estimativas de custos a partir dos resultados obtidos das soluções em laje nervurada em concreto armado (CA-N), laje nervurada em concreto protendido (CP-N) e laje *BubbleDeck* (CA-BD), para o pavimento térreo do edifício em estudo.

#### 5.1.1 FLECHAS

A Tabela 5.1 e a Figura 5.1 apresentam os resultados das flechas totais, em tempo infinito, para as três soluções propostas em função do vão máximo entre eixos de pilares. Os valores percentuais apresentados na Tabela 5.1 correspondem à diferença percentual entre a solução de referência e as demais soluções.

Tabela 5.1: Comparativo das flechas máximas ao longo do tempo.

				Solução		
				CA-N	CP-N	CA-BD
Vão	8,00 m	$\Delta$ (cm)		<b>1,170</b>	<b>1,130</b>	<b>0,980</b>
		Em relação à	CA-N	-	-3,42%	-16,24%
			CP-N	3,54%	-	-13,27%
	CA-BD		19,39%	15,31%	-	
	10,50 m	$\Delta$ (cm)		<b>1,480</b>	<b>0,900</b>	<b>1,370</b>
		Em relação à	CA-N	-	-39,2%	-7,43%
			CP-N	64,4%	-	52,2%
	CA-BD		8,03%	-34,3%	-	
	13,50 m	$\Delta$ (cm)		<b>3,10</b>	<b>2,23</b>	<b>3,91</b>
Em relação à		CA-N	-	-28,1%	26,1%	
		CP-N	39,0%	-	75,3%	
	CA-BD	-20,7%	-43,0%	-		

Observa-se que, para o vão de 8,00 m, as três soluções apresentaram resultados próximos, com a laje *BubbleDeck* indicando a menor flecha. Para os vãos de 10,50 m e

de 13,50 m, a solução em laje nervurada protendida mostrou flechas significativamente menores.

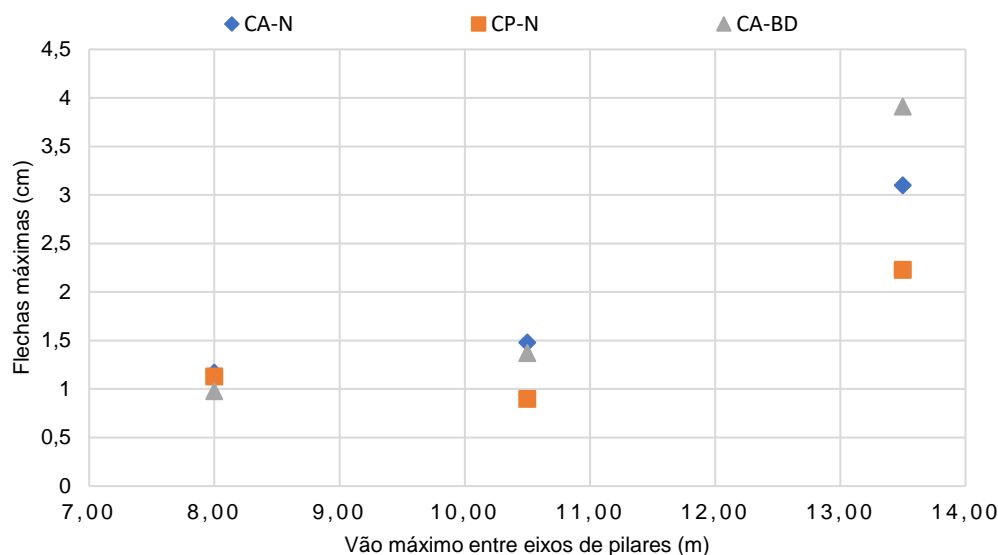


Figura 5.1: Comparativo das flechas máximas ao longo do tempo.

Nota-se que, diferentemente do que ocorreu com as soluções em laje nervurada em concreto armado e *BubbleDeck*, em que houve um incremento crescente das flechas em função do aumento do vão, na laje nervurada protendida a flecha obtida para o vão de 10,50 m foi menor do que aquela observada para o vão de 8,00 m. Isso se deve à força de protensão aplicada em cada uma das soluções, associada ao aumento da excentricidade dos cabos. Evidentemente, flechas ainda menores poderiam ser observadas com o aumento da taxa de armadura ativa.

### 5.1.2 CONSUMO DE CONCRETO E ESPESSURA MÉDIA

Conforme mostra a Tabela 5.2, a solução em laje nervurada protendida foi a que consumiu a menor quantidade de concreto e, por conseguinte, apresentou menor espessura média. Tomando como referência a laje nervurada protendida, as soluções nervurada armada e *BubbleDeck* apresentaram consumos maiores de 11,54% (vão de 13,50 m) a 21,7% (vão de 10,50 m) e de 12,08% (vão de 10,50 m) a 28,1% (vão de 8,00 m), respectivamente.

Tabela 5.2: Comparativo do consumo de concreto.

				Solução		
				CA-N	CP-N	CA-BD
Vão	8,00 m	C (m³)		186,9	154,3	197,7
		esp. méd. (cm)		20,8	17,46	21,85
		Em relação à	CA-N	-	-17,4%	5,8%
			CP-N	21,1%	-	28,1%
			CA-BD	-5,5%	-21,9%	-
		10,50 m	C (m³)		259	213
	esp. méd. (cm)		28,6	24,0	26,6	
	Em relação à		CA-N	-	-17,86%	-7,93%
			CP-N	21,7%	-	12,08%
			CA-BD	8,62%	-10,78%	-
	13,50 m		C (m³)		303	271
		esp. méd. (cm)		34,5	31,3	34,8
Em relação à		CA-N	-	-10,34%	0,97%	
		CP-N	11,54%	-	12,62%	
		CA-BD	-0,96%	-11,20%	-	

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram, graficamente, os consumos de concreto e espessuras médias em função dos vãos.

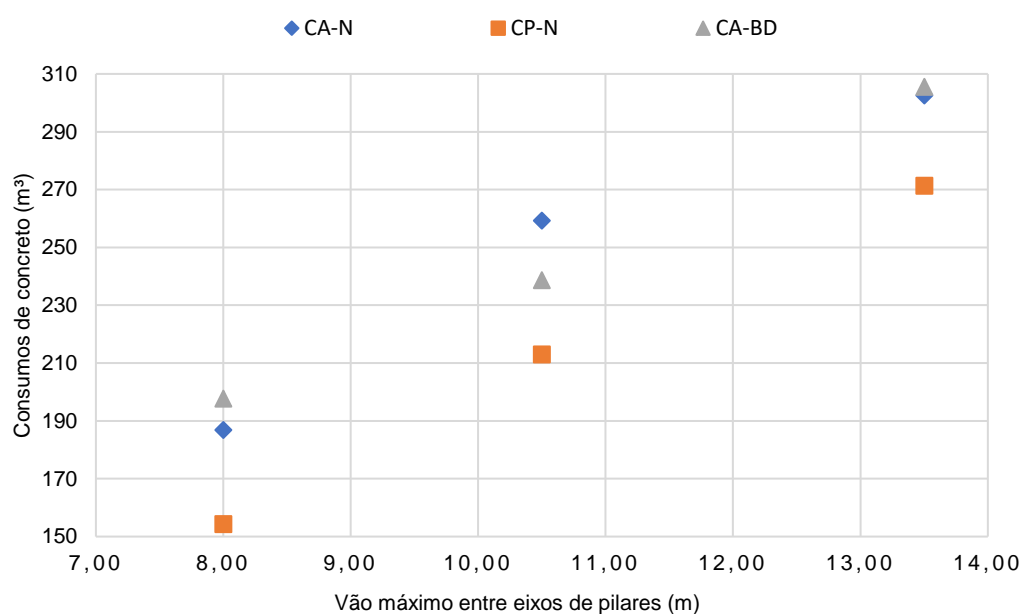


Figura 5.2: Consumos de concreto.



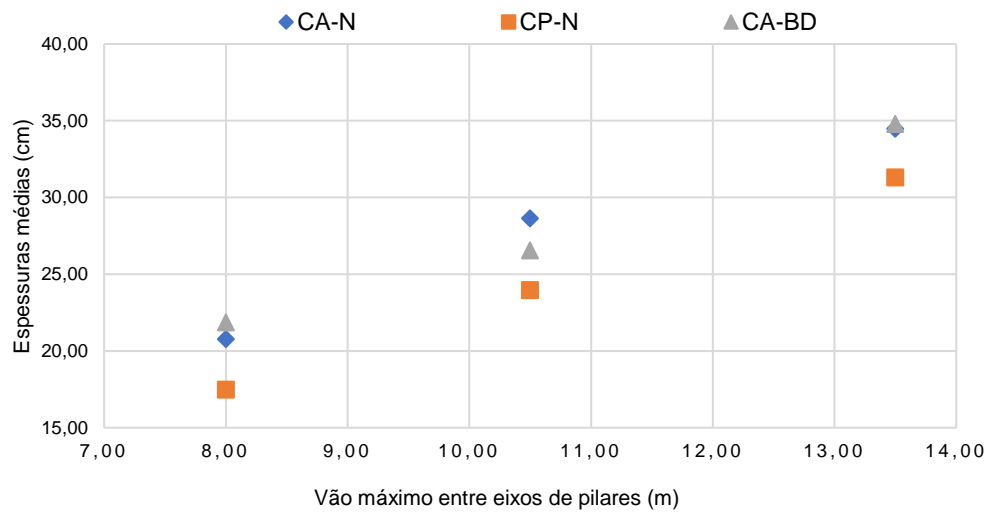


Figura 5.3: Espessuras médias.

### 5.1.3 CONSUMO DE AÇO

A Tabela 5.3 e a Figura 5.4 apresentam os consumos de aço obtidos das soluções analisadas.

Tabela 5.3: Consumos de aço.

Consumo de aço (kg/m <sup>2</sup> )			
Vão (m)	8,00	10,50	13,50
CA-N	18,51	22,4	38,7
CP-N	CA-50	8,85	11,53
	CP-190RB	3,61	3,49
CA-BD	20,7	26,2	46,3

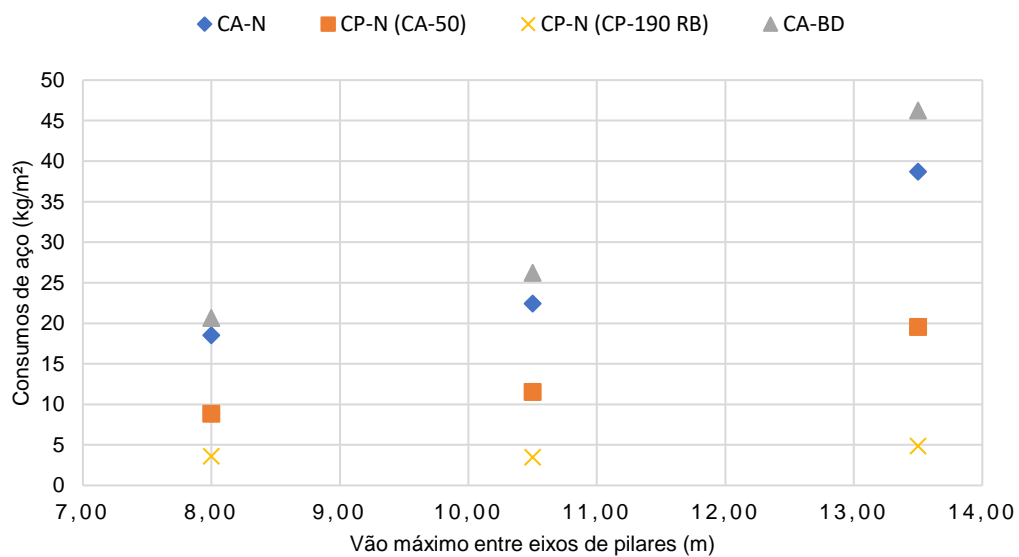


Figura 5.4: Consumos de aço.

Para fins de comparação do consumo total de aço entre as soluções apresentadas, considerou-se que a eficiência da armadura de protensão (CP-190 RB) corresponde a cerca de 2,4 vezes a da armadura convencional (CA-50). A Tabela 5.4 resume os consumos totais.

Tabela 5.4: Consumos de aço totais.

Consumo de aço (kg/m <sup>2</sup> )			
Vão (m)	8,00	10,50	13,50
CA-N	18,51	22,4	38,7
CP-N <sup>1</sup>	17,51	19,91	31,2
CA-BD	20,7	26,2	46,3

A Tabela 5.5 apresenta o comparativo dos consumos totais de aço, já considerando o fator de equivalência de 2,4 sobre a armadura ativa.

Tabela 5.5: Comparativo dos consumos totais de aço.

			Solução				
			CA-N	CP-N	CA-BD		
Vão	8,00 m	C (kg/m <sup>2</sup> )			18,51	17,51	20,7
		Em relação à	CA-N	-	-5,40%	11,56%	
			CP-N	5,71%	-	17,93%	
			CA-BD	-10,36%	-15,2%	-	
	10,50 m	C (kg/m <sup>2</sup> )			22,4	19,91	26,2
		Em relação à	CA-N	-	-11,20%	16,95%	
			CP-N	12,6%	-	31,7%	
			CA-BD	-14,49%	-24,1%	-	
	13,50 m	C (kg/m <sup>2</sup> )			38,7	31,2	46,3
Em relação à		CA-N	-	-19,40%	19,50%		
		CP-N	24,1%	-	48,3%		
		CA-BD	-16,32%	-32,6%	-		

Observa-se que o consumo de aço da solução pretendida foi menor do que os das demais soluções. Nesse sentido, a solução em laje nervurada em concreto armado apresentou consumo de 5,71% (vão de 8,00 m) a 24,1% (vão de 13,50 m) maior do que a solução pretendida, enquanto na solução *BubbleDeck* essa variação foi de 17,93% (vão de 8,00 m) a 48,3% (vão de 13,50 m).

<sup>1</sup> Aplicado fator de equivalência de 2,4 sobre a armadura ativa, que corresponde à relação entre a tensão dos cabos em tempo infinito – com perdas totais da ordem de 20% - sobre a tensão de escoamento da armadura passiva  $\{(0,8 \cdot f_{ptk} \cdot (1 - 0,2)) / f_{yk}\}$ .

Comparando exclusivamente as soluções em concreto armado, a solução *BubbleDeck* apresentou consumo de 11,56% (vão de 8,00 m) a 19,50% (vão de 13,50 m) superior à laje nervurada.

#### 5.1.4 ESTIMATIVA DE CUSTOS

A Tabela 5.6 resume a estimativa de custo total da estrutura de cada laje analisada no estudo de caso, enquanto a Tabela 5.7 apresenta o comparativo de custo unitário, obtido pela razão entre o custo total e a área da laje.

Tabela 5.6: Estimativa de custo total da estrutura da laje.

	Vão		
	8,00 m	10,50 m	13,50 m
<b>CA-N</b>	R\$ 217.029,64	R\$ 260.053,72	R\$ 352.734,13
<b>CP-N</b>	R\$ 213.238,13	R\$ 247.502,94	R\$ 326.439,59
<b>CA-BD</b>	R\$ 246.372,60	R\$ 298.404,72	R\$ 410.361,35

Tabela 5.7: Comparativo da estimativa de custo unitário.

			Solução			
			CA-N	CP-N	CA-BD	
Vão	8,00 m	CU (R\$/m <sup>2</sup> )	<b>219,67</b>	<b>215,83</b>	<b>249,36</b>	
		Em relação à	CA-N	-	-1,748%	13,52%
			CP-N	1,779%	-	15,54%
			CA-BD	-11,91%	-13,45%	-
	10,50 m	CU (R\$/m <sup>2</sup> )	<b>263,21</b>	<b>250,51</b>	<b>302,03</b>	
		Em relação à	CA-N	-	-4,83%	14,75%
			CP-N	5,07%	-	20,6%
			CA-BD	-12,85%	-17,06%	-
	13,50 m	CU (R\$/m <sup>2</sup> )	<b>357,02</b>	<b>330,81</b>	<b>415,35</b>	
		Em relação à	CA-N	-	-7,34%	16,34%
			CP-N	7,92%	-	25,6%
			CA-BD	-14,04%	-20,4%	-

Observa-se, a partir dos resultados, que a solução em laje nervurada protendida foi a mais econômica, com variação de custo de 1,748% (vão de 8,00 m) a 7,34% (vão de 13,50 m) menor do que a laje nervurada de concreto armado e de 13,45% (vão de 8,00 m) a 20,4% (vão de 13,50 m) em relação à solução *BubbleDeck*.

Dentre as soluções em concreto armado, a laje nervurada apresentou o menor custo unitário, sendo até 16,34% (vão de 13,50 m) mais econômica do que a solução em laje *BubbleDeck*. Vale observar que a espessura adotada para a laje *BubbleDeck* do projeto C3 (40 cm) seguiu a recomendação do Quadro 3.5 apresentado no capítulo 3 desse trabalho. A adoção de maior espessura da laje poderia reduzir a taxa de armadura passiva. Em contrapartida, seria evidente o aumento do volume de concreto que, por sua vez, tem menor influência no custo final da laje, tornando a solução *BubbleDeck* menos onerosa e mais atrativa.

A Figura 5.5 apresenta, graficamente, o comparativo dos custos unitários obtidos.

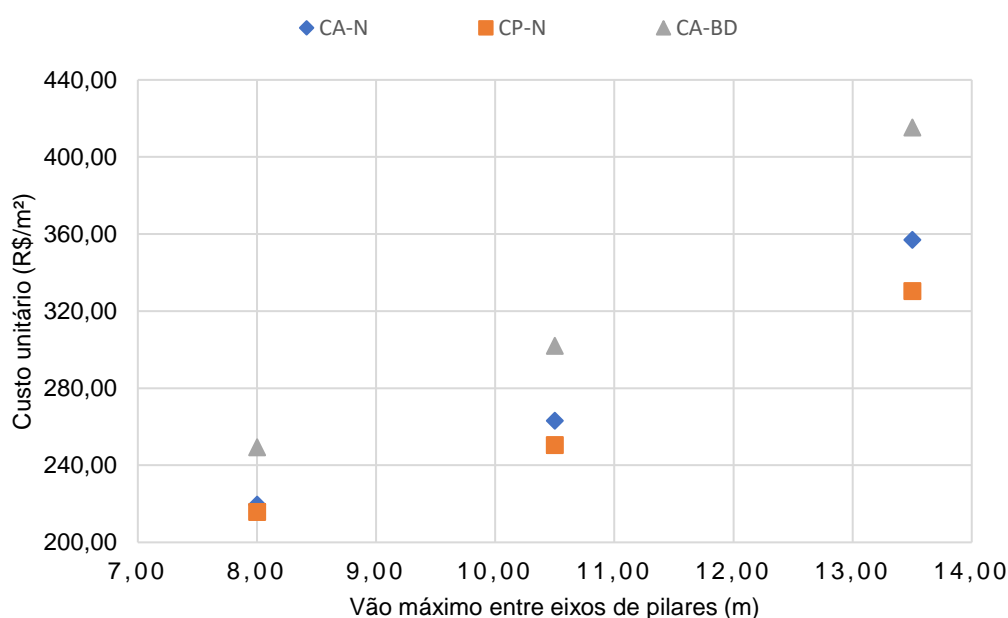
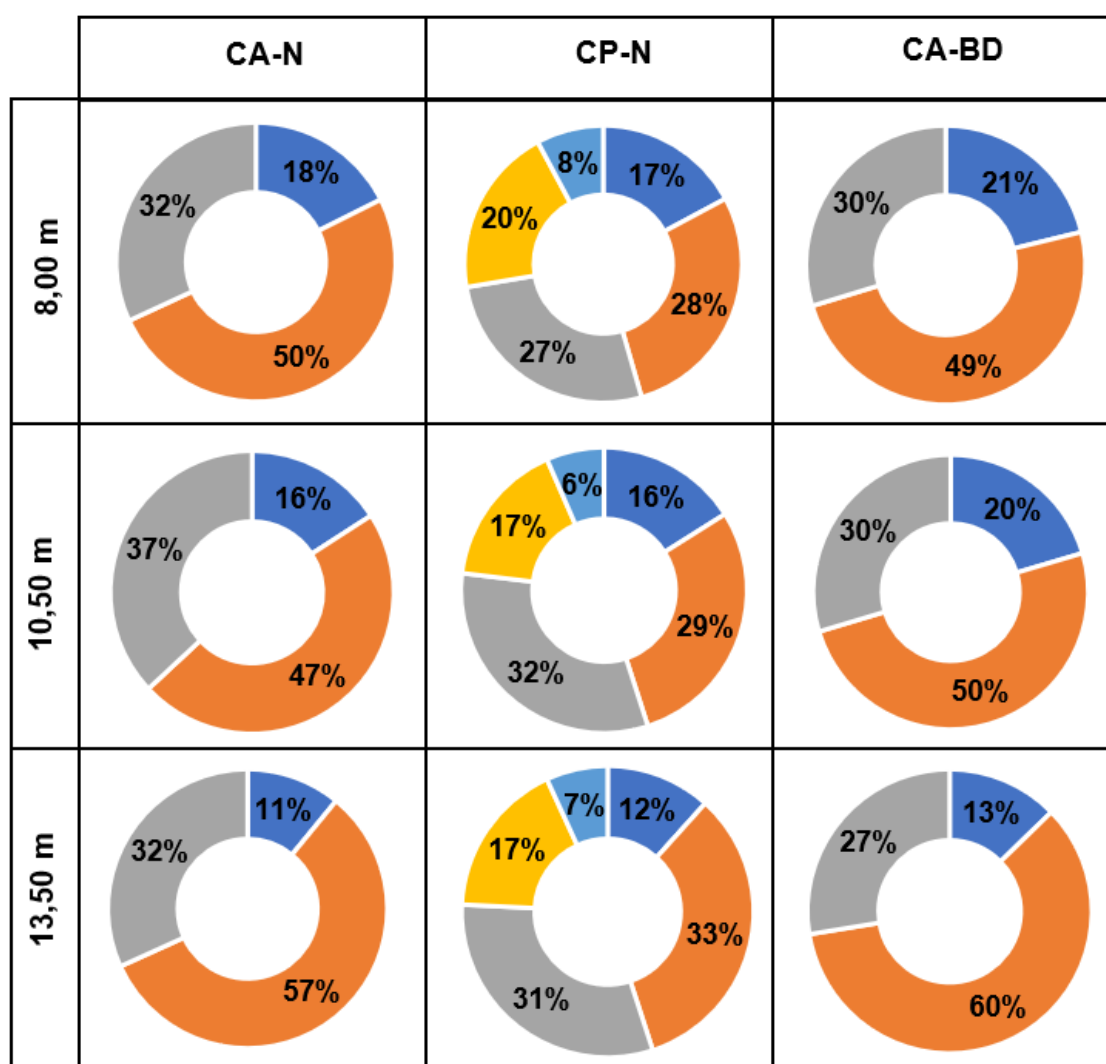


Figura 5.5: Comparativo das estimativas de custos unitários.

A Figura 5.6 resume o comparativo de custos percentuais, de materiais e serviços, de cada uma das soluções analisadas.

Nota-se que o serviço de fornecimento, preparação e montagem de aço, tanto ativo como passivo, é responsável por aproximadamente 50% do custo de execução da laje. Dessa forma, como a solução em laje protendida consome menor quantidade de aço, esta torna-se mais vantajosa economicamente. Contudo, o emprego da armadura ativa implica na necessidade de ancoragens, cunhas e operação de protensão, que representa de 7% a 8% do custo direto, de acordo com os resultados obtidos.



#### Legenda:

- Forma
- Aço (CA-50)
- Concreto
- Aço (CP-190 RB)
- Ancoragens e Protensão

Figura 5.6: Comparativo dos custos percentuais dos materiais e serviços.

### 5.1.5 COMPARAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS

Os resultados obtidos foram comparados com trabalhos publicados e com um projeto real em laje *BubbleDeck*, além de dados de projetos de lajes nervuradas protendidas, cedidos gentilmente pelo escritório de projetos estruturais MD Engenheiros Associados.

#### 5.1.5.1 LAJES NERVURADAS EM CONCRETO ARMADO

Marchiori *et al* (2017) compararam os sistemas de laje *BubbleDeck* e nervurada em concreto armado empregando concretos de diferentes resistências. Os autores consideraram as opções de espaçamento entre eixos de pilares de 7,50 m e 15,00 m,

sobrecarga de 3 kN/m<sup>2</sup> e carga de revestimento de 0,85 kN/m<sup>2</sup>, além de  $f_{ck}$  de 25 MPa ou 50 MPa.

As Figuras 5.7 e 5.8 comparam as espessuras médias e os consumos de aço de lajes nervuradas de concreto armado desse trabalho com os resultados de Marchiori *et al* (2017) com vão de 7,5 m.

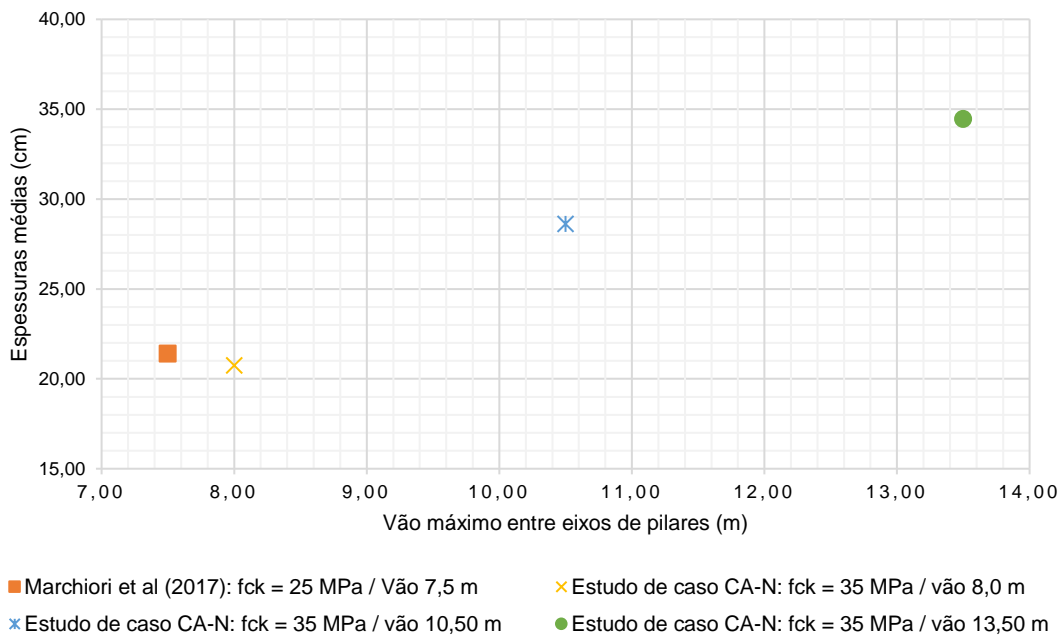


Figura 5.7: Comparativo de espessuras médias (cm) de lajes nervuradas em concreto armado.

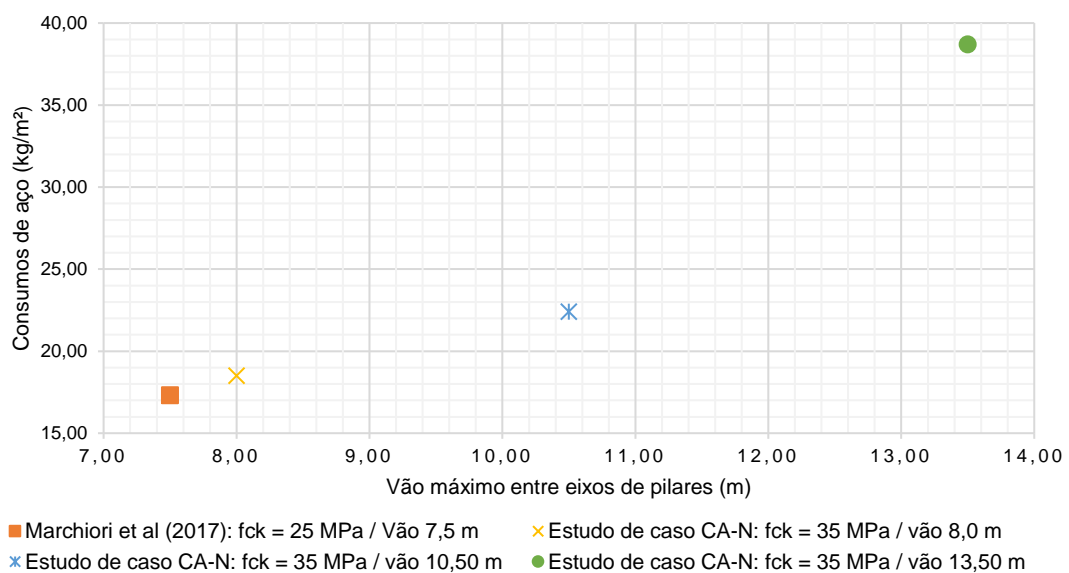


Figura 5.8: Comparativo dos consumos de aço (kg/m<sup>2</sup>) de lajes nervuradas em concreto armado.

### 5.1.5.2 LAJES NERVURADAS PROTENDIDAS

Os resultados obtidos nesse trabalho foram comparados com dados de projetos reais fornecidos pelo escritório de projetos estruturais MD Engenheiros Associados (Tabela 5.8).

Tabela 5.8: Dados de projetos de lajes nervuradas protendidas (MD Engenheiros Associados).

PROJ.	CARGAS (kN/m <sup>2</sup> )		CONSUMO ARM. PASSIVA	CONSUMO ARM. ATIVA	CAPA DE CONCRETO	ALTURA DA LAJE (cm)	ESPESSURA MÉDIA (cm)	MAIOR VÃO (m)
	PERM.	ACID.	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> )				
MD-1	3,00	2,00	9,20	2,49	5 cm	26	20,0	8,32
MD-2	3,00	2,00	12,80	3,07	5 cm	31	26,2	9,33
MD-3	2,00	3,00	11,45	4,13	5 cm	31	26,9	10,07
MD-4	1,00	3,00	10,04	4,97	7 cm	33	27,0	10,75

A Figura 5.9 apresenta, graficamente, o comparativo de espessuras médias, enquanto as Figuras 5.10 e 5.11 comparam os consumos de aço CA-50 e CP-190 RB, respectivamente.

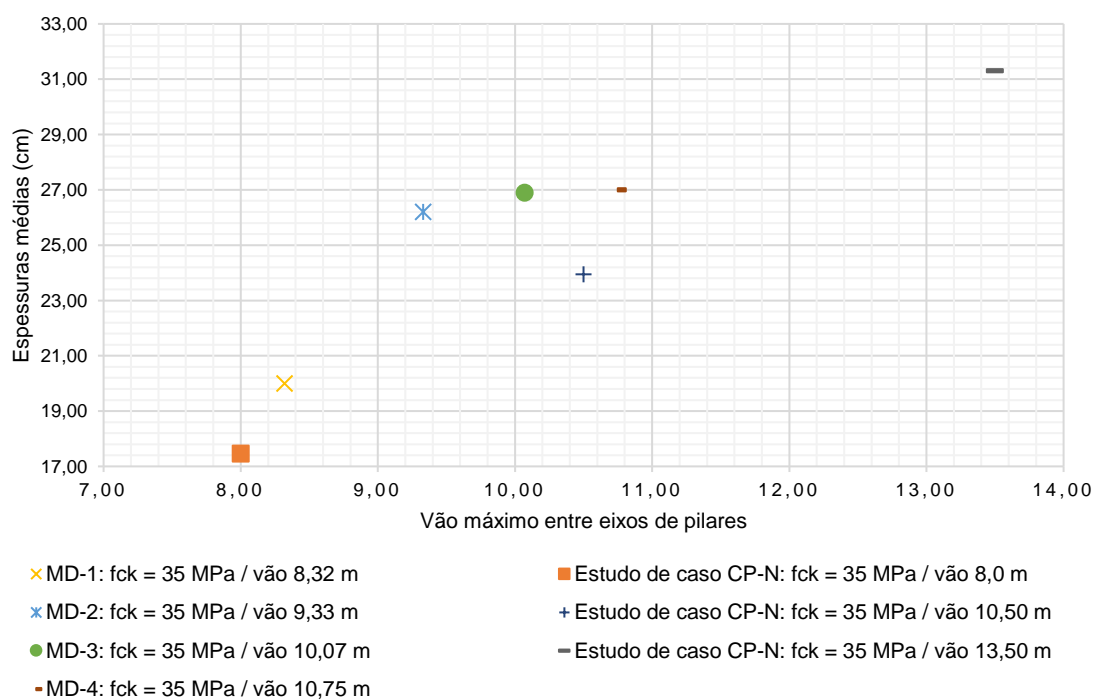


Figura 5.9: Comparativo de espessuras médias (cm) das lajes nervuradas em concreto protendido.

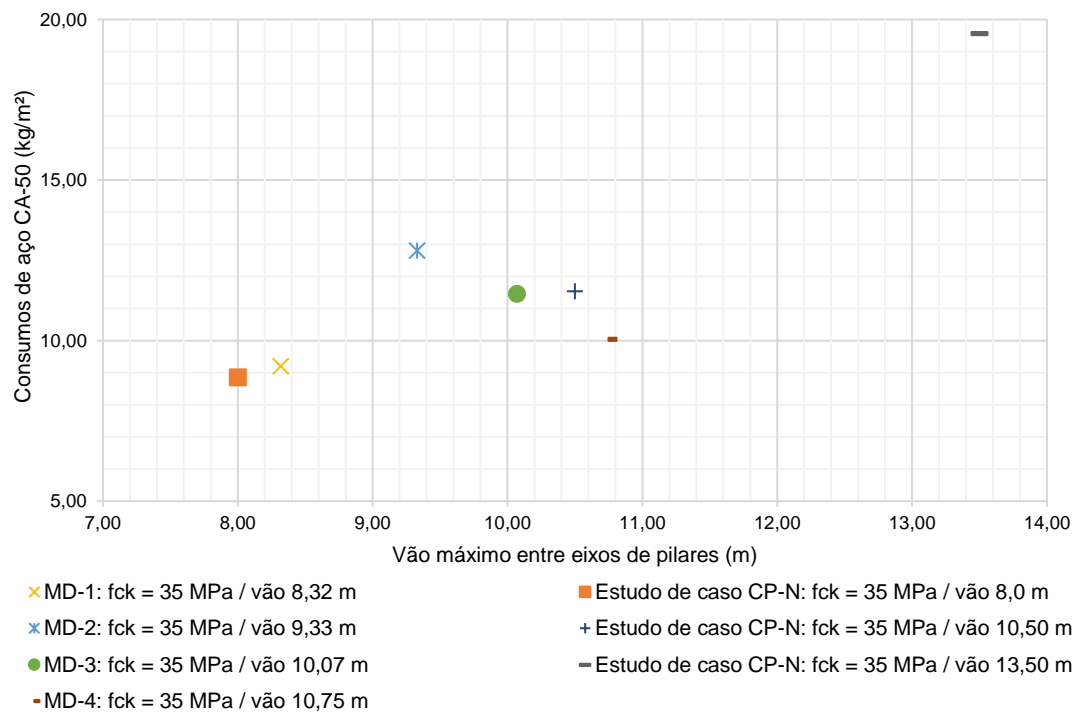


Figura 5.10: Comparativo dos consumos de aço passivo (kg/m<sup>2</sup>) de lajes nervuradas protendidas.

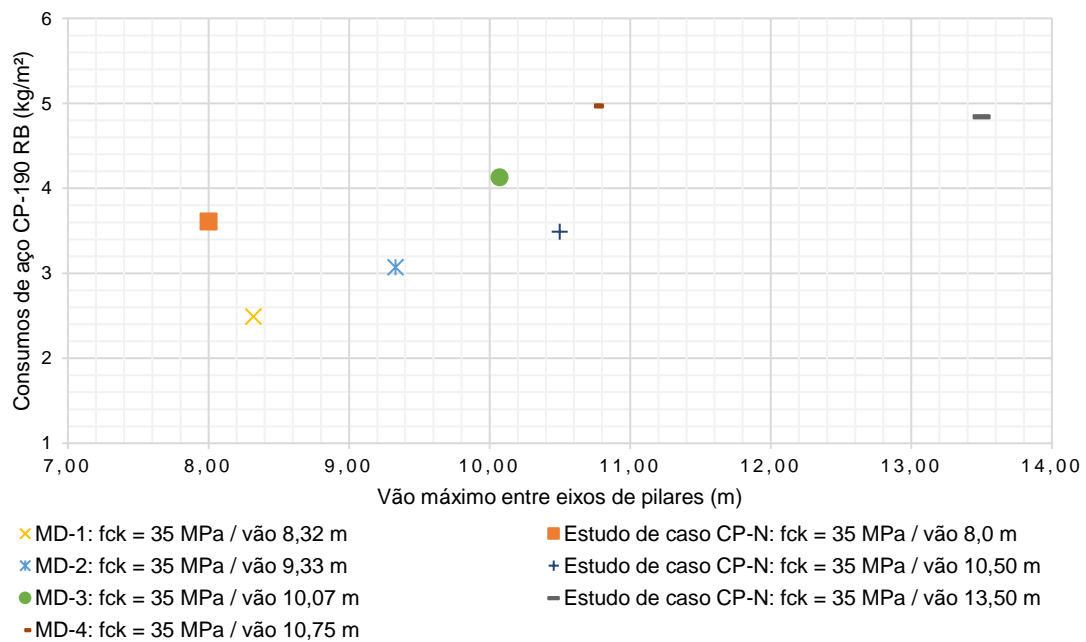


Figura 5.11: Comparativo dos consumos de aço de protensão (kg/m<sup>2</sup>) de lajes nervuradas protendidas.



### 5.1.5.3 LAJES BUBBLEDECK

Perlingeiro *et al* (2017) compararam os consumos entre soluções de lajes maciças de concreto armado e protendido, além de laje *BubbleDeck*, para vãos de 8,00 m e 10,50 m, com sobrecarga acidental de 3 kN/m<sup>2</sup> e sobrecarga permanente de 1 kN/m<sup>2</sup>. A resistência à compressão característica do concreto considerada foi de 35 MPa.

O projeto fornecido pelo escritório de projetos estruturais MD Engenheiros Associados é de um edifício de uso misto, projetado em laje *BubbleDeck* com 28 cm de espessura e  $f_{ck}$  de 35 MPa. O espaçamento máximo entre eixos de pilares é de 9,20 m. O projeto considerou a laje montada em módulos de armaduras içados (pré-moldados), com posterior complementação de armadura *in loco*. Informações adicionais são apresentadas no Anexo C deste trabalho.

A Figura 5.12 e a Figura 5.13 apresentam os gráficos comparativos de espessura média e de consumos de aço, respectivamente, das lajes *BubbleDeck* calculadas nesse trabalho e os obtidos pelos demais autores citados.

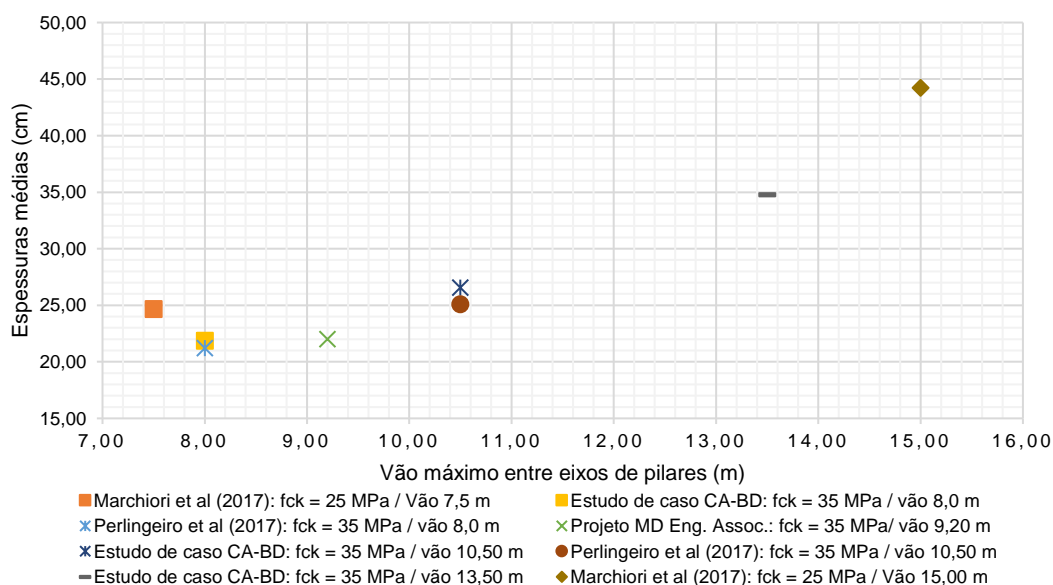


Figura 5.12: Comparativo de espessuras médias (cm) de lajes *BubbleDeck*.

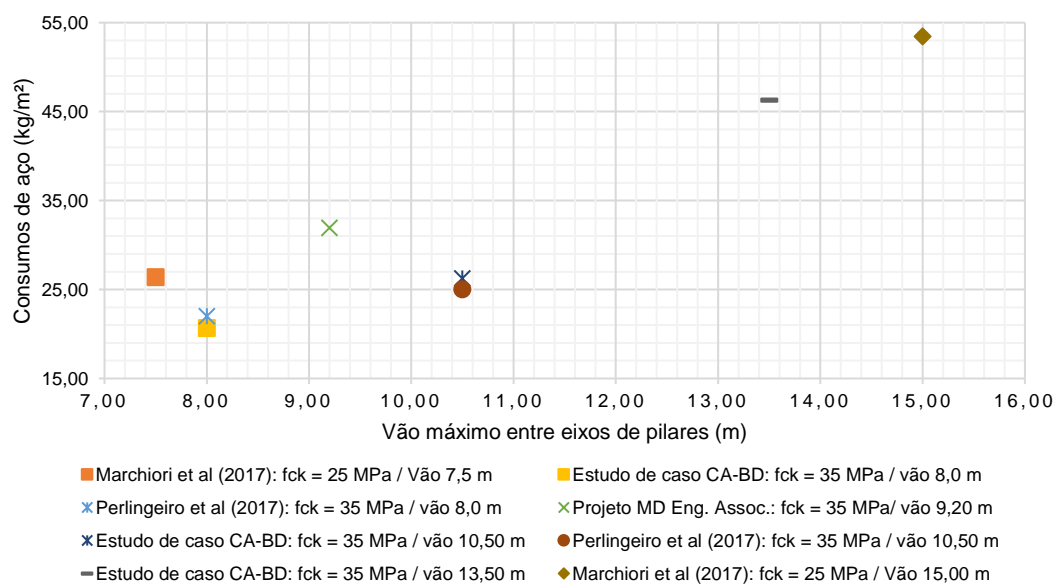


Figura 5.13: Comparativo dos consumos de aço (kg/m<sup>2</sup>) de lajes *BubbleDeck*.

#### 5.1.5.4 PROPOSIÇÃO DE ÍNDICES

A Figura 5.14 e a Figura 5.15 mostram as linhas de tendência de espessuras médias e de consumos de aço obtidas a partir dos resultados apresentados nos itens anteriores, em função do vão máximo entre eixos de pilares.

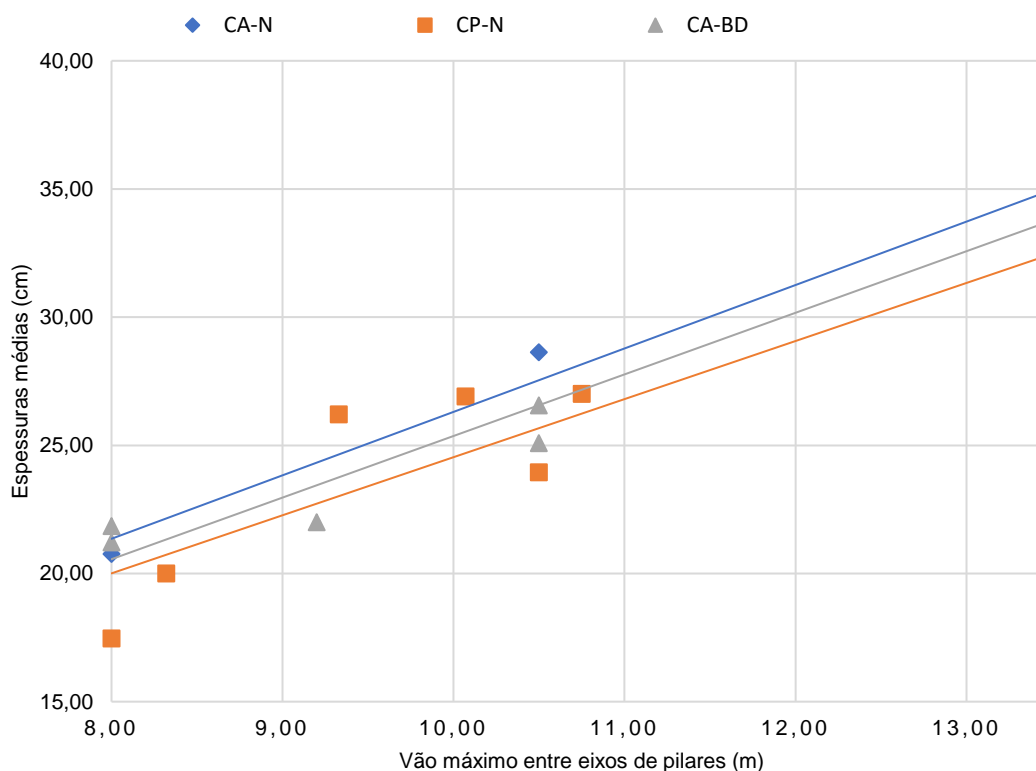


Figura 5.14: Linhas de tendência de espessuras médias.

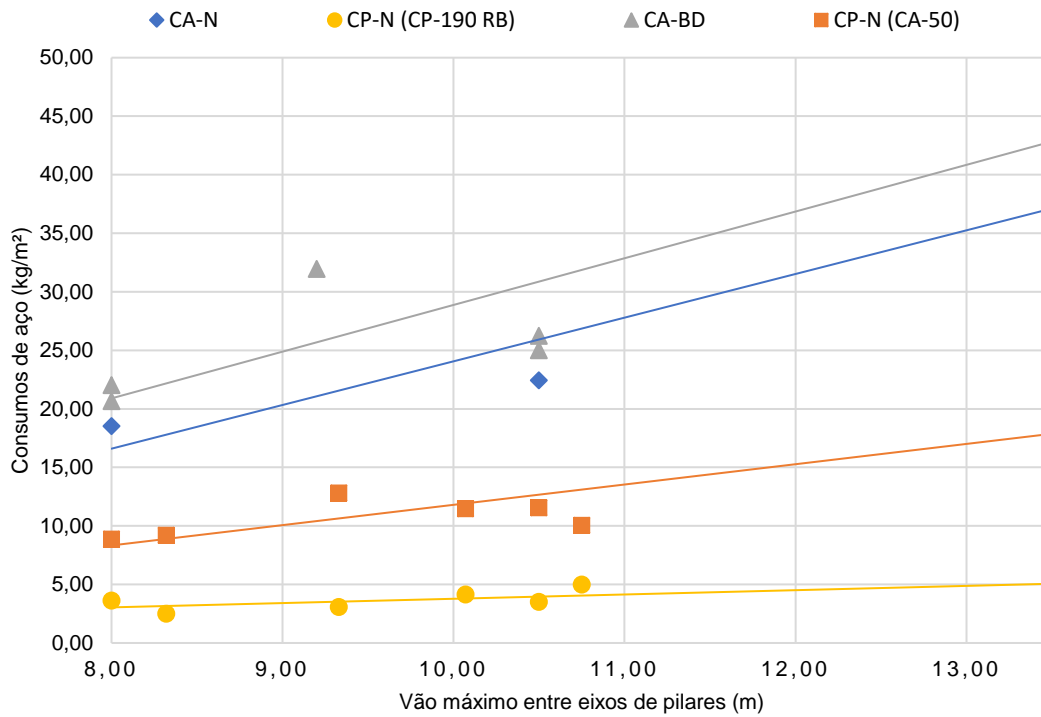


Figura 5.15: Linhas de tendência de consumos de aço.

A Figura 5.16 apresenta a tendência de custos unitários de cada solução em função do vão máximo entre eixos de pilares.

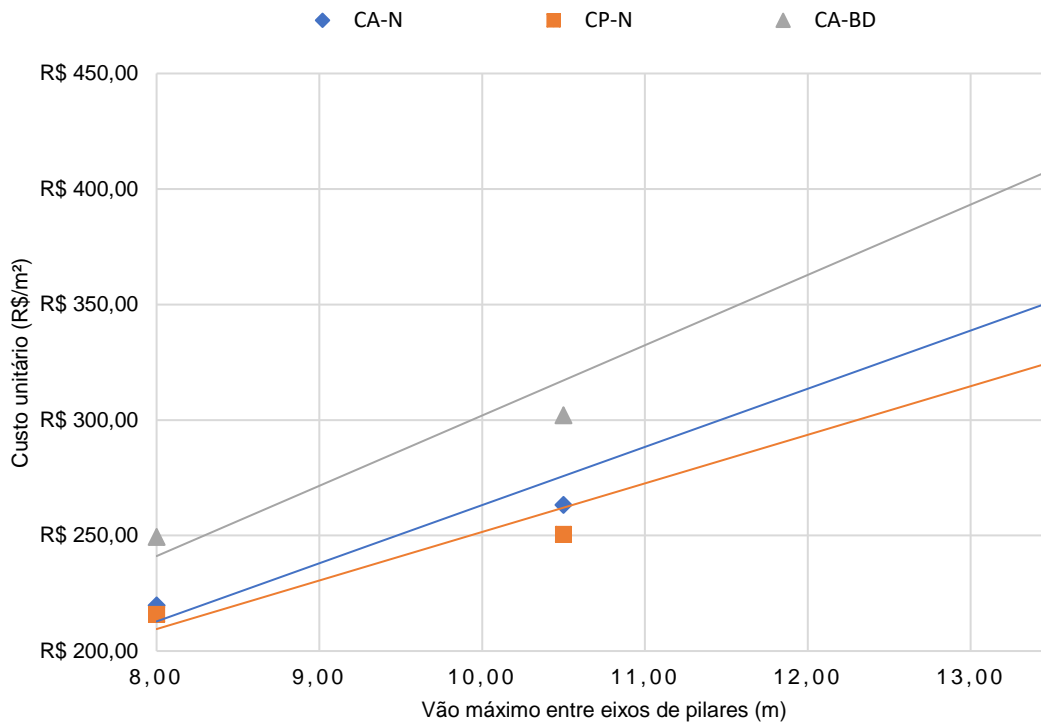


Figura 5.16: Tendência de custos unitário de cada solução.

## 6 CONCLUSÃO

---

O emprego das lajes maciças de concreto armado apoiadas sobre vigas é usual para vãos de até 6 m, quando as cargas atuantes não são muito elevadas. Em vãos maiores, o comportamento em serviço passa a ser preponderante e passa a demandar espessuras de laje antieconômicas e com elevado peso próprio. Diante disso, a adoção de um sistema estrutural que apresente comportamento similar ao de vigas na flexão – elevada rigidez e baixo peso próprio – porém, mantendo o comportamento de placa, torna-se vantajosa e eficiente. Nessas situações, as lajes nervuradas ganham destaque no Brasil, em contraponto à tecnologia das lajes *BubbleDeck*, que até os dias atuais ainda apresentam raras aplicações na construção civil.

Com a finalidade de avaliar o desempenho em serviço, os consumos típicos e a estimativa de custos de lajes lisas de grandes vãos, foram desenvolvidos modelos computacionais com o uso do programa comercial CAD/TQS. Os principais parâmetros variados foram: vão entre eixos de pilares, sistema estrutural (laje nervurada de concreto armado, laje nervurada de concreto protendido ou laje *BubbleDeck*) e espessura da laje. A partir dos resultados obtidos, observou-se:

- Entre as soluções em concreto armado, as lajes *BubbleDeck* apresentaram menores flechas em relação às lajes nervuradas para os vãos de 8,00 m e 10,50 m.
- Ainda em relação às soluções em concreto armado, as lajes *BubbleDeck* apresentaram menor quantidade de microfissuras, o que contribui para maior durabilidade, enquanto as lajes nervuradas em concreto armado mostraram maior fissuração, mas dentro do limite da ABNT NBR 6118 (2014).
- As lajes nervuradas em concreto armado são mais viáveis economicamente, quando comparadas às lajes *BubbleDeck*, haja vista a menor estimativa de custos diretos à medida que os vãos foram aumentando (economia de 11,91% para o vão de 8,00 m até 14,04% para o vão de 13,50 m).
- A protensão da laje nervurada trouxe três principais benefícios: redução dos deslocamentos verticais, diminuição da abertura de fissuras e redução dos custos de execução.

- A redução do consumo de armadura e de concreto tornou a solução protendida até 20,4% (vão de 13,50 m) mais econômica, em relação à solução *BubbleDeck*, e até 7,34% (vão de 13,50 m), em relação à solução em laje nervurada de concreto armado. Observou-se que a economia gerada pela aplicação da protensão aumenta à medida em que o vão máximo entre pilares também aumenta.
- Enquanto nas lajes nervuradas em concreto armado e *BubbleDeck* houve incremento crescente das flechas em função do aumento do vão, na laje nervurada protendida a flecha observada para o vão de 10,50 m foi menor do que aquela observada para o vão de 8,00 m, devido à força de protensão aplicada em cada solução, associada ao aumento da excentricidade das cordoalhas engraxadas. Para o vão de 13,50 m, a flecha máxima observada na laje nervurada protendida foi 28,1% menor do que a da laje nervurada em concreto armado e 43% menor do que a da laje *BubbleDeck*.
- Em todos os casos avaliados, os custos com os serviços de fornecimento, preparo e montagem das armaduras, tanto de protensão como passivas, representaram de 46% (laje nervurada protendida com vão máximo de 10,50 m) a 60% (laje *BubbleDeck* com vão máximo de 13,50 m) do custo direto total da laje, sendo o serviço mais representativo.
- A comparação das respostas obtidas nos modelos desenvolvidos com os resultados apresentados com outros autores, além de dados de projetos reais, possibilitou o traçado de linhas de tendência de espessuras médias e consumos de aço para os três tipos de lajes estudadas. Observou-se que pavimentos com lajes nervuradas de concreto armado tendem a apresentar maiores espessuras médias, seguidos dos de lajes *BubbleDeck* e dos executados com lajes nervuradas protendidas, respectivamente.
- O índice de consumo de aço de lajes *BubbleDeck* foi o maior entre as soluções analisadas. As lajes nervuradas protendidas, por outro lado, apresentaram os menores índices de consumo de aço, inclusive considerando um fator corretor de 2,4 para avaliar a eficiência da armadura de protensão.
- Quanto ao projeto estrutural, a solução em concreto protendido demanda maior esforço do projetista, visto que é necessário definir um arranjo de cabos que atenda aos estados limites e que não seja antieconômico. Ademais, é preciso

analisar a influência do hiperestático de protensão na análise estrutural da grelha. O detalhamento das lajes *BubbleDeck*, por sua vez, requer a compatibilização das armaduras com as esferas e, nos casos de módulos içados, é preciso prever armadura complementar de ligação entre os módulos, o que eleva o consumo de aço.

- A estimativa de custos da laje *BubbleDeck* considerou valores cotados no mercado para o fornecimento das esferas e tempo estimado de instalação, uma vez que não há nas publicações oficiais do SINAPI e SICRO composições de custos para esse serviço, haja vista a baixa utilização do sistema em edificações.

Em face de todo o exposto, conclui-se que a solução em laje nervurada protendida apresentou o melhor desempenho técnico e econômico para o estudo de caso analisado. Contudo, a escolha da melhor solução para um caso concreto depende de parâmetros como a localização do empreendimento, disponibilidade de mão de obra, materiais e equipamentos, além do tempo disponível para execução. Por fim, espera-se que os resultados desse trabalho auxiliem engenheiros e construtores na tomada de decisão quanto à opção por um tipo de laje lisa.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das conclusões obtidas, sugere-se como temas a serem explorados em trabalhos futuros:

- a) Avaliar os consumos dos materiais e os serviços de execução das fundações para os diferentes vãos dos sistemas estruturais apresentados nesse trabalho a fim de se obter o comparativo do custo global dessas estruturas.
- b) Desenvolver orçamentos completos com a inclusão dos custos indiretos e considerando o planejamento para a execução dos serviços com o objetivo de analisar o impacto no custo global das obras.
- c) Os custos de execução da solução *BubbleDeck* ainda não são totalmente conhecidos, principalmente no que tange à mão de obra para instalação das esferas. As tabelas de referência não contemplam esse custo. Dessa forma, torna-se necessário uma melhor avaliação desse item.

- d) Desenvolver modelos computacionais de lajes *BubbleDeck* protendidas para avaliação dos consumos e custos unitários. Ainda não há casos relatados do uso dessa solução no Brasil.
- e) Incluir nas curvas de tendência desse trabalho mais respostas de obras executadas com o objetivo de aprimorar os índices propostos de espessura média, de consumo de aço e de custo unitário de cada solução estrutural.
- f) Desenvolver programa experimental para avaliação da vibração das lajes armadas *BubbleDeck* e nervuradas protendidas com grandes vãos (maior que 10,50 m).
- g) Avaliar a estrutura utilizando o sistema *Holedeck*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AALAMI, B. O. **Post-Tensioned Buildings: Design and Construction**. 1. ed. Adapt Corporation, 2014. 404 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code Requirements for Structural Concrete - ACI 318M-14**. Farmington Hills: 2014. 519p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide to estimating prestress losses – ACI 423.10R-16**. Farmington Hills: 2016. 64p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Recommendations for Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons - ACI 423.3R-96**. Farmington Hills: 1996. 19p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: 2014. 221 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: 2019. 60 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: 2003. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: 2003. 31 p.

BHAGAT, S.; PARIKH, K. B. **Comparative Study of Voided Flat Plate Slab and Solid Flat Plate Slab**. In: International Journal of Innovative Research & Development, 3º., 2014, Dahod.

BRANCO, A. F. V. C. **Contribuição para o projeto de lajes cogumelo**. 1989. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

CALIN, S.; ASAVOAI, C. **Method for BubbleDeck Concrete Slab with Gaps**. 2009. 8f. Universidade Técnica Gheorghe Asachi, Iași.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado – volume 1**. 3. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2007. 367 p.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado – volume 2**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2009. 589 p.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em Concreto Protendido**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2012. 431 p.

CHUKAROV, A. **Biaxial hollow slab with innovative types of voids**. In: Construction of Unique Buildings and Structures, 6º., 2014, St. Petersburg.



CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto armado: Fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2. ed. Brasília: UnB, 2005. 410 p.

COELHO, E. L.; SOUZA, R. M.; GRECO, M. **Estudo Comparativo entre Sistemas Estruturais com Lajes Maciças, Nervuradas e Lajes Lisas**. In: Simpósio de Mecânica Computacional, 9<sup>o.</sup>, 2010, São João Del Rei.

DONIN, C. **Análise Numérica de Lajes Nervuradas por meio do Método dos Elementos Finitos**. 2007. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

DUARTE JÚNIOR, O. F. **Laje BubbleDeck: Características gerais e viabilidade executiva**. 2014. 14 f. Artigo Científico (Especialização em Gerenciamento de Obras, Tecnologia e Qualidade da Construção) – Instituto de Pós-Graduação, Goiânia.

EMERICK, A. A. **Projeto e Execução de Lajes Protendidas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005. 191 p.

FARIA, M. P. **Estruturas para Edifícios em Concreto Armado: Análise comparativa de soluções com Lajes Convencionais, Lisas e Nervuradas**. 2010. 98f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Sistemas Estruturais de Lajes sem Vigas: Subsídios para o projeto e execução**. 1989. 272f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

FREIRE, T. C. **Estudo Comparativo para Lajes Cogumelo Utilizando as Tecnologias “BubbleDeck” e Atex**. 2009. 52f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FUSCO, P. B. **Técnica de Armar as Estruturas de Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2013. 391 p.

GUEDES, N. D.; ANDRADE R. L. **Avaliação de Desempenho de Estruturas utilizando Lajes do tipo BubbleDeck**. 2015. 106f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

IBRAHIM, A. M.; ALI, N. K.; SALMAN, W. D. **Flexural Capacities of Reinforced Concrete Two-Way BubbleDeck Slabs of Plastic Spherical Voids**. In: Diyala Journal of Engineering Sciences, 6<sup>o.</sup>, 2013, Baquba.

LAI, T. **Structural Behavior of BubbleDeck® Slabs And Their Application to Lightweight Bridge Decks**. 2010. 42 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

LIMA, H.J.N. **Análise Experimental da Punção de Lajes Lisas do tipo BubbleDeck**. 2015. 113f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade Tecnológica, Universidade de Brasília, Brasília.

LOUREIRO, G. J. **Projeto de Lajes Protendidas com cordoalhas engraxadas**. In: Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 6<sup>o.</sup>, 2006, São Paulo.

MARAIS, C. C. **Design Adjustment Factors and The Economical Application of Concrete Flat-Slabs with internal Spherical Voids in South Africa**. 2009. 264f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de Pretória, Pretória.

MARCHIORI, E. M.; ROHDEN, A. B.; GODOY, L. G. G. **Análise comparativa entre o sistema de laje BubbleDeck e laje nervurada empregando concreto de diferentes resistências**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 59<sup>o.</sup>, 2017, Bento Gonçalves.

NOBRE, K. M. A. **Comparação entre Métodos de Análise de Lajes Protendidas**. 2009. 182f. Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

OUKAILI, N. K.; HUSAIN, L. L. **Punching Shear Strength of BubbleDecks under Eccentric Loads**. In: International Conference on Science, Engineering & Environment, 2<sup>o.</sup>, 2016, Osaka City.

OUKAILI, N. K.; MERIE, H. **CFRP Strengthening of BubbleDecks with openings**. In: International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites, 9<sup>o.</sup>, 2018, Paris.

OUKAILI, N. K.; YASEEN, H. H. **Response of Partially Prestressed Concrete Bubble Deck Slabs under Static Loads**. In: European Journal of Scientific Research, 126<sup>o.</sup>, 2014.

PERLINGEIRO, M. S. P. L.; JUDICE, F. M. S.; SILVA, J. C. M. **Comparação entre Consumos de Lajes Lisas com Diferentes Soluções Estruturais**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 59<sup>o.</sup>, 2017, Bento Gonçalves.

POST-TENSIONING INSTITUTE. **Post-Tensioning Manual**. 6<sup>a</sup> ed. Hardcover, 2006. 354 p.

PRESOTTO, A. C. **Dimensionamento de Laje Lisa Maciça de Concreto Armado e Laje BubbleDeck – Estudo Comparativo**. 2017. 90f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

RAISS, M. E.; BELL, G. A.; MATTHEW, P. W.; WHITTLE, R. T. **Post-tensioned Concrete Floors – Design Handbook**. 3. ed. The Concrete Society, 1994, 176 p.

REICH, E. V.; LIMA, M.; STRELETS, K. I. **Efficiency of applying sustainable technology of BubbleDeck technology in concrete in Russia**. In: Construction of Unique Buildings and Structures, 11<sup>o.</sup>, 2017, St. Petersburg.

SCHMID, M. T. **Lajes Planas Protendidas**. 3. ed. São Paulo: Rudloff Industrial Ltda, 2009. 30 p.

SILVA, A. R. **Análise comparativa de custos de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado.** 2002. 235f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVA, J. S.; CAMPI, B. F.; RAMIREZ, B. N. **Estudo Comparativo entre BubbleDeck e painel treliçado.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 58<sup>o</sup>., 2016, Belo Horizonte.

SILVA, M. A. F. **Projeto e Construção de Lajes Nervuradas de Concreto Armado.** 2005. 242f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SPOHR, V. H. **Análise Comparativa: Sistemas Estruturais Convencionais e Estruturas de Lajes Nervuradas.** 2008. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TEJA, P. P.; KUMAR, P. V.; ANUSHA, S.; MOUNIKA, CH.; SAHA, P. **Structural Behavior of Bubble Deck Slab.** In: IEEE – International Conference On Advances In Engineering, Science And Management, 2012, Negapatão.

TQS INFORMÁTICA LTDA. **Manual de Análise Estrutural.** São Paulo, 2015.

TQS INFORMÁTICA LTDA. **Manual de dimensionamento, detalhamento e desenho.** São Paulo, 2015.

TQS INFORMÁTICA LTDA. **Manual de Lajes protendidas.** São Paulo, 2015.

VERÍSSIMO, G. S.; CESÁR JR., K. L. M. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos.** 4. ed. Universidade Federal de Viçosa, 1998.

## SÍTIOS DE INTERNET

---

ATEX DO BRASIL, disponível em <https://www.atex.com.br/pt/>. Acesso em: 25 fev. 2020.

BUBBLEDECK BRASIL, Disponível em: <http://www.BubbleDeckbrasil.com.br>. Acesso em: 29 abr. 2019.

BUBBLEDECK INTERNACIONAL, **BubbleDeck Design Guide**. Disponível em: <http://www.BubbleDeck-uk.com>. Acesso em: 3 mar. 2017.

SINDUSCON-MG. **Custos Unitários Básicos de Construção (NBR 12.721:2006 – CUB 2006) – Outubro de 2019**. Disponível em [http://www.sinduscon-mg.org.br/wp-content/uploads/2019/11/tabela\\_cub\\_outubro\\_2019.pdf](http://www.sinduscon-mg.org.br/wp-content/uploads/2019/11/tabela_cub_outubro_2019.pdf). Acesso em: 04/02/2020.

TERRA, M. C; ATEX DO BRASIL. **Estudo de Caso – Laje maciça x Nervurada com ou sem protensão**. Disponível em [https://www.atex.com.br/upload/ApoioTecnico/MACICOXNERVcomesemproten\\_636451466706051145.pdf](https://www.atex.com.br/upload/ApoioTecnico/MACICOXNERVcomesemproten_636451466706051145.pdf). Acesso em: 22 jan. 2020.

## ANEXO A

Neste anexo são detalhadas as composições de custos unitários utilizadas para a estimativa de custos das soluções analisadas. Todos os custos consideram a não desoneração da folha de pagamento e se referem à obra executada na cidade de Belo Horizonte/MG com data de referência de outubro de 2019.

**Composição:** Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (66 x 66 x 21 cm) e assoalho com área média maior que 20 m<sup>2</sup>, pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **SER01** (92490 Adap.) / Und. m<sup>2</sup>      **Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
2692	Desmoldante protetor para formas de madeira, de base oleosa emulsionada em água	L	0,008	R\$ 5,21	R\$ 0,04
10749	Locação de escora metálica telescópica, com altura regulável de *1,80* a *3,20* m, com capacidade de carga de no mínimo 1000 kgf (10 kN), incluso tripé e forçado	mês	0,397	R\$ 5,49	R\$ 2,18
40270	Viga de escoramento h20, de madeira, peso de 5,00 a 5,20 kg/m, com extremidades plásticas	m	0,03	R\$ 44,75	R\$ 1,34
INS01	Locação de forma plástica para laje nervurada, dimensões de 66 x 66 x 21 cm	mês	1,03	R\$ 11,31	R\$ 11,65
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	h	0,176	R\$ 16,83	R\$ 2,96
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	h	0,954	R\$ 20,40	R\$ 19,46
92267	Fabricação de forma para lajes, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	0,257	R\$ 24,96	R\$ 6,41
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 44,05</b>

**Composição:** Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (66 x 66 x 16 cm) e assoalho com área média maior que 20 m<sup>2</sup>, pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **SER06** (92490 Adap.) / Und. m<sup>2</sup>

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
2692	Desmoldante protetor para formas de madeira, de base oleosa emulsionada em água	L	0,008	R\$ 5,21	R\$ 0,04
10749	Locação de escora metálica telescópica, com altura regulável de *1,80* a *3,20* m, com capacidade de carga de no mínimo 1000 kgf (10 kN), incluso tripé e forçado	mês	0,397	R\$ 5,49	R\$ 2,18
40270	Viga de escoramento h20, de madeira, peso de 5,00 a 5,20 kg/m, com extremidades plásticas	m	0,03	R\$ 44,75	R\$ 1,34
INS02	Locação de forma plástica para laje nervurada, dimensões de 66 x 66 x 16 cm	mês	1,03	R\$ 8,63	R\$ 8,89
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	h	0,176	R\$ 16,83	R\$ 2,96
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	h	0,954	R\$ 20,40	R\$ 19,46
92267	Fabricação de forma para lajes, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	0,257	R\$ 24,96	R\$ 6,41
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 41,29</b>

**Composição:** Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (66 x 66 x 30 cm) e assoalho com área média maior que 20 m<sup>2</sup>, pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **SER08** (92490 Adap.) / Und. m<sup>2</sup>

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
2692	Desmoldante protetor para formas de madeira, de base oleosa emulsionada em água	L	0,008	R\$ 5,21	R\$ 0,04
10749	Locação de escora metálica telescópica, com altura regulável de *1,80* a *3,20* m, com capacidade de carga de no mínimo 1000 kgf (10 kN), incluso tripé e forçado	mês	0,397	R\$ 5,49	R\$ 2,18
40270	Viga de escoramento h20, de madeira, peso de 5,00 a 5,20 kg/m, com extremidades plásticas	m	0,03	R\$ 44,75	R\$ 1,34
INS03	Locação de forma plástica para laje nervurada, dimensões de 66 x 66 x 30 cm	mês	1,03	R\$ 13,09	R\$ 13,49
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	h	0,176	R\$ 16,83	R\$ 2,96
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	h	0,954	R\$ 20,40	R\$ 19,46
92267	Fabricação de forma para lajes, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	0,257	R\$ 24,96	R\$ 6,41
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 45,89</b>

**Composição:** Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (66 x 66 x 26 cm) e assoalho com área média maior que 20 m<sup>2</sup>, pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **SER09**(92490 Adap.) / Und. m<sup>2</sup>

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
2692	Desmoldante protetor para formas de madeira, de base oleosa emulsionada em água	L	0,008	R\$ 5,21	R\$ 0,04
10749	Locação de escora metálica telescópica, com altura regulável de *1,80* a *3,20* m, com capacidade de carga de no mínimo 1000 kgf (10 kN), incluso tripé e forçado	mês	0,397	R\$ 5,49	R\$ 2,18
40270	Viga de escoramento h20, de madeira, peso de 5,00 a 5,20 kg/m, com extremidades plásticas	m	0,03	R\$ 44,75	R\$ 1,34
INS04	Locação de forma plástica para laje nervurada, dimensões de 66 x 66 x 26 cm	mês	1,03	R\$ 11,90	R\$ 12,26
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	h	0,176	R\$ 16,83	R\$ 2,96
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	h	0,954	R\$ 20,40	R\$ 19,46
92267	Fabricação de forma para lajes, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. Af_12/2015	m <sup>2</sup>	0,257	R\$ 24,96	R\$ 6,41
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 44,66</b>

**Composição:** Montagem e desmontagem de forma de laje nervurada com cubeta (65 x 65 x 40 cm) e assoalho com área média maior que 20 m<sup>2</sup>, pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **SER11**(92490 Adap.) / Und. m<sup>2</sup>

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
2692	Desmoldante protetor para formas de madeira, de base oleosa emulsionada em água	L	0,008	R\$ 5,21	R\$ 0,04
10749	Locação de escora metálica telescópica, com altura regulável de *1,80* a *3,20* m, com capacidade de carga de no mínimo 1000 kgf (10 kN), incluso tripé e forçado	MES	0,397	R\$ 5,49	R\$ 2,18
40270	Viga de escoramento h20, de madeira, peso de 5,00 a 5,20 kg/m, com extremidades plásticas	M	0,03	R\$ 44,75	R\$ 1,34
INS05	Locação de forma plástica para laje nervurada, dimensões de 65 x 65 x 40 cm	MES	1,03	R\$ 13,09	R\$ 13,49
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	H	0,176	R\$ 16,83	R\$ 2,96
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	H	0,954	R\$ 20,40	R\$ 19,46
92267	Fabricação de forma para lajes, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. Af_12/2015	M2	0,257	R\$ 24,96	R\$ 6,41
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 45,89</b>

**Composição:** Montagem e desmontagem de forma de laje maciça com área média maior que 20 m<sup>2</sup>, pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 4 utilizações. Af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **92514** / Und. m<sup>2</sup>

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
2692	Desmoldante protetor para formas de madeira, de base oleosa emulsionada em água	L	0,010	R\$ 5,21	R\$ 0,05
10749	Locação de escora metálica telescópica, com altura regulável de *1,80* a *3,20* m, com capacidade de carga de no mínimo 1000 kgf (10 kN), incluso tripé e forçado	mês	0,397	R\$ 5,49	R\$ 2,18
40270	Viga de escoramento h20, de madeira, peso de 5,00 a 5,20 kg/m, com extremidades plásticas	h	0,030	R\$ 44,75	R\$ 1,34
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	h	0,097	R\$ 16,83	R\$ 1,63
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	m <sup>2</sup>	0,528	R\$ 20,40	R\$ 10,77
92267	Fabricação de forma para lajes, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. Af_12/2015	mês	0,341	R\$ 24,96	R\$ 8,51
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 24,49</b>

**Composição:** Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA -50 de 6,3 mm - montagem. Af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **92769** / Und. kg

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
337	Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	kg	0,025	R\$ 10,00	R\$ 0,25
39017	Espaçador / distanciador circular com entrada lateral, em plástico, para vergalhão *4,2 a 12,5* mm, cobertura 20 mm	un	1,333	R\$ 0,14	R\$ 0,19
88238	Ajudante de armador com encargos complementares	h	0,011	R\$ 15,30	R\$ 0,16
88245	Armador com encargos complementares	h	0,064	R\$ 20,42	R\$ 1,31
92801	Corte e dobra de aço CA-50, diâmetro de 6,3 mm, utilizado em laje. Af_12/2015	kg	1,000	R\$ 5,62	R\$ 5,62
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 7,52</b>



**Composição:** Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 8,0 mm - montagem. Af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **92770** / Und. **kg**

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
337	Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	kg	0,025	R\$ 10,00	R\$ 0,25
39017	Espaçador / distanciador circular com entrada lateral, em plástico, para vergalhão *4,2 a 12,5* mm, cobertura 20 mm	un	0,728	R\$ 0,14	R\$ 0,10
88238	Ajudante de armador com encargos complementares	h	0,008	R\$ 15,30	R\$ 0,12
88245	Armador com encargos complementares	h	0,048	R\$ 20,42	R\$ 0,97
92802	Corte e dobra de aço CA-50, diâmetro de 8,0 mm, utilizado em laje. Af_12/2015	kg	1,000	R\$ 6,10	R\$ 6,10
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 7,54</b>

**Composição:** Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 10,0 mm - montagem. Af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **92771** / Und. **kg**

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
337	Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	kg	0,025	10,00	R\$ 0,25
39017	Espaçador / distanciador circular com entrada lateral, em plástico, para vergalhão *4,2 a 12,5* mm, cobertura 20 mm	un	0,357	0,14	R\$ 0,05
88238	Ajudante de armador com encargos complementares	h	0,006	15,30	R\$ 0,09
88245	Armador com encargos complementares	h	0,035	20,42	R\$ 0,71
92803	Corte e dobra de aço CA-50, diâmetro de 10,0 mm, utilizado em laje. Af_12/2015	kg	1,000	5,07	R\$ 5,07
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 6,17</b>

**Composição:** Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 12,5 mm - montagem. Af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **92772** / Und. **kg**

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
337	Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	kg	0,025	R\$ 10,00	R\$ 0,25
39017	Espaçador / distanciador circular com entrada lateral, em plástico, para vergalhão *4,2 a 12,5* mm, cobertura 20 mm	un	0,147	R\$ 0,14	R\$ 0,02
88238	Ajudante de armador com encargos complementares	h	0,004	R\$ 15,30	R\$ 0,06
88245	Armador com encargos complementares	h	0,025	R\$ 20,42	R\$ 0,50
92804	Corte e dobra de aço CA-50, diâmetro de 12,5 mm, utilizado em laje. Af_12/2015	kg	1,000	R\$ 4,75	R\$ 4,75
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 5,59</b>

**Composição:** Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 16,0 mm - montagem. Af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **92773** / Und. **kg**

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
337	Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	kg	0,025	R\$ 10,00	R\$ 0,25
88238	Ajudante de armador com encargos complementares	h	0,003	R\$ 15,30	R\$ 0,04
88245	Armador com encargos complementares	h	0,016	R\$ 20,42	R\$ 0,32
92805	Corte e dobra de aço CA-50, diâmetro de 16,0 mm, utilizado em laje. Af_12/2015	kg	1,000	R\$ 4,69	R\$ 4,69
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 5,30</b>

**Composição:** Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 20,0 mm - montagem. Af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código 92774 / Und. kg

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
337	Arame recozido 18 bwg, 1,25 mm (0,01 kg/m)	kg	0,025	R\$ 10,00	R\$ 0,25
88238	Ajudante de armador com encargos complementares	h	0,002	R\$ 15,30	R\$ 0,02
88245	Armador com encargos complementares	h	0,009	R\$ 20,42	R\$ 0,19
92806	Corte e dobra de aço CA-50, diâmetro de 20,0 mm, utilizado em laje. Af_12/2015	kg	1,000	R\$ 4,49	R\$ 4,49
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 4,95</b>

**Composição:** Ancoragem ativa para lajes para cordoalhas engraxadas D = 12,7 mm com placa de ancoragem, cunha tripartida e protensão

**Base de Dados:** SICRO / Código SER03 (4507783 Adap.) / Und. un

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
E9720	Conjunto bomba e macaco hidráulico para protensão com capacidade de 250 kN	h	0,08	R\$ 36,75	R\$ 2,95
E9066	Grupo gerador - 13/14 kVA	h	0,08	R\$ 9,76	R\$ 0,78
88245/SINAPI	Armador com encargos complementares	h	0,080	R\$ 20,42	R\$ 1,64
88316/SINAPI	Servente com encargos complementares	h	0,08	R\$ 14,60	R\$ 1,17
M2431	Ancoragem ativa para cordoalha engraxada - D = 12,7 mm	un	1,00	R\$ 85,43	R\$ 85,43
M2424	Forma plástica para nicho de protensão de cordoalha - D = 12,7 mm	un	1,00	R\$ 0,67	R\$ 0,67
M1205	Prego de ferro	kg	0,03	R\$ 7,06	R\$ 0,21
5914655	Carga, manobra e descarga de materiais diversos em caminhão carroceria de 15 t - carga de descarga manuais	t	0,001	R\$ 21,52	R\$ 0,03
5914479	Transporte com caminhão carroceria de 15 t - rodovia pavimentada	txkm	0,001	R\$ 0,42	R\$ 0,00
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 92,88</b>

**Composição:** Ancoragem passiva aderente para lajes com 1 cordoalha D = 12,7 mm - fornecimento e instalação

**Base de Dados:** SICRO / Código **SER04** (4507806 Adap.) / Und. **un** **Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
88245/SINAPI	Armador com encargos complementares	h	0,047	R\$ 20,42	R\$ 0,95
88316/SINAPI	Servente com encargos complementares	h	0,047	R\$ 14,60	R\$ 0,68
M2454	Ancoragem passiva aderente para lajes 1 cordoalha - D = 12,7 mm	un	1,000	R\$ 31,07	R\$ 31,07
M0075	Arame recozido 18 BWG	kg	0,010	R\$ 4,26	R\$ 0,04
M2422	Mangueira cristal trançado ar/água com capacidade de 250 lb - D = 1/2"	m	0,500	R\$ 2,85	R\$ 1,43
M1022	Massa de vidraceiro	kg	0,018	R\$ 1,96	R\$ 0,03
M3353	Purgador plástico	un	1,000	R\$ 1,10	R\$ 1,10
5914655	Carga, manobra e descarga de materiais diversos em caminhão carroceria de 15 t - carga de descarga manuais	t	0,002	R\$ 21,52	R\$ 0,04
5914479	Transporte com caminhão carroceria de 15 t - rodovia pavimentada	txkm	0,002	R\$ 0,42	R\$ 0,00
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 35,35</b>

**Composição:** Cordoalha engraxada CP 190 RB D = 12,7 mm - fornecimento, preparo e colocação

**Base de Dados:** SICRO / Código **SER05** (4507958 Adap.) / Und. **kg** **Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
E9521	Grupo gerador - 2,5/3 kVA	h	0,001	R\$ 3,02	R\$ 0,00
E9717	Máquina policorte - 2,2 kW	h	0,001	R\$ 0,07	R\$ 0,00
88245/SINAPI	Armador com encargos complementares	h	0,030	R\$ 20,42	R\$ 0,61
88316/SINAPI	Servente com encargos complementares	h	0,031	R\$ 14,60	R\$ 0,46
M2426	Cordoalha engraxada CP 190 RB - D = 12,7 mm	kg	1,050	R\$ 10,19	R\$ 10,70
M0076	Disco de corte para policorte - D = 30 cm	un	0,001	R\$ 12,40	R\$ 0,01
3816138	Gaiola metálica em cantoneira para contenção de cordoalha	kg	0,001	R\$ 37,34	R\$ 0,03
5915015	Carga, manobra e descarga de materiais diversos em caminhão carroceria com Guindauto 45 t.m	t	0,001	R\$ 13,24	R\$ 0,01
5914479	Transporte com caminhão carroceria de 15 t - rodovia pavimentada	txkm	0,001	R\$ 0,42	R\$ 0,00
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 11,87</b>

**Composição:** Concretagem de vigas e lajes,  $f_{ck}=35$  MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m<sup>2</sup> - lançamento, adensamento e acabamento. Af\_12/2015

**Base de Dados:** SINAPI / Código **SER02** (92726 Adap.) / Und. m<sup>3</sup>

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	H	0,085	R\$ 20,37	R\$ 1,73
88309	Pedreiro com encargos complementares	H	0,512	R\$ 20,57	R\$ 10,53
88316	Servente com encargos complementares	H	0,586	R\$ 14,60	R\$ 8,56
90586	Vibrador de imersão, diâmetro de ponteira 45mm, motor elétrico trifásico potência de 2 CV - CHP diurno. Af_06/2015	CHP	0,044	R\$ 1,26	R\$ 0,06
90587	Vibrador de imersão, diâmetro de ponteira 45mm, motor elétrico trifásico potência de 2 CV - CHI diurno. Af_06/2015	CHI	0,127	R\$ 0,31	R\$ 0,04
11145	Concreto usinado bombeável, classe de resistência C35, com brita 0 e 1, slump = 100 +/- 20 mm, inclui serviço de bombeamento (NBR 8953)	m <sup>3</sup>	1,103	R\$ 316,88	R\$ 349,52
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 370,43</b>

**Composição:** Esferas de polipropileno com diâmetro de 22,5 cm - fornecimento e posicionamento

**Base de Dados:** COTAÇÃO / Código **SER07** / Und. m<sup>2</sup>

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
INS06	Esferas de polipropileno com diâmetro de 22,5 cm	und	16,000	R\$ 1,95	R\$ 31,27
88316	Servente com encargos complementares	h	0,170	R\$ 14,60	R\$ 2,48
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 33,75</b>

**Composição:** Esferas de polipropileno com diâmetro de 27 cm - fornecimento e posicionamento

**Base de Dados:** COTAÇÃO / Código **SER10** / Und. m<sup>2</sup>

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
INS07	Esferas de polipropileno com diâmetro de 27 cm	und	11,110	R\$ 3,52	R\$ 39,11
88316	Servente com encargos complementares	h	0,170	R\$ 14,60	R\$ 2,48
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 41,59</b>

**Composição:** Esferas de polipropileno com diâmetro de 31,5 cm - fornecimento e posicionamento

**Base de Dados:** COTAÇÃO / Código **SER12** / Und. m<sup>2</sup>

**Data Ref.:** out./2019

Detalhamento					
Código	Descrição	UND	Coef.	Preço Unit.	Custo Total
INS08	Esferas de polipropileno com diâmetro de 31,5 cm	und	8,160	R\$ 4,72	R\$ 38,53
88316	Servente com encargos complementares	h	0,170	R\$ 14,60	R\$ 2,48
<b>Custo Global da Composição:</b>					<b>R\$ 41,01</b>

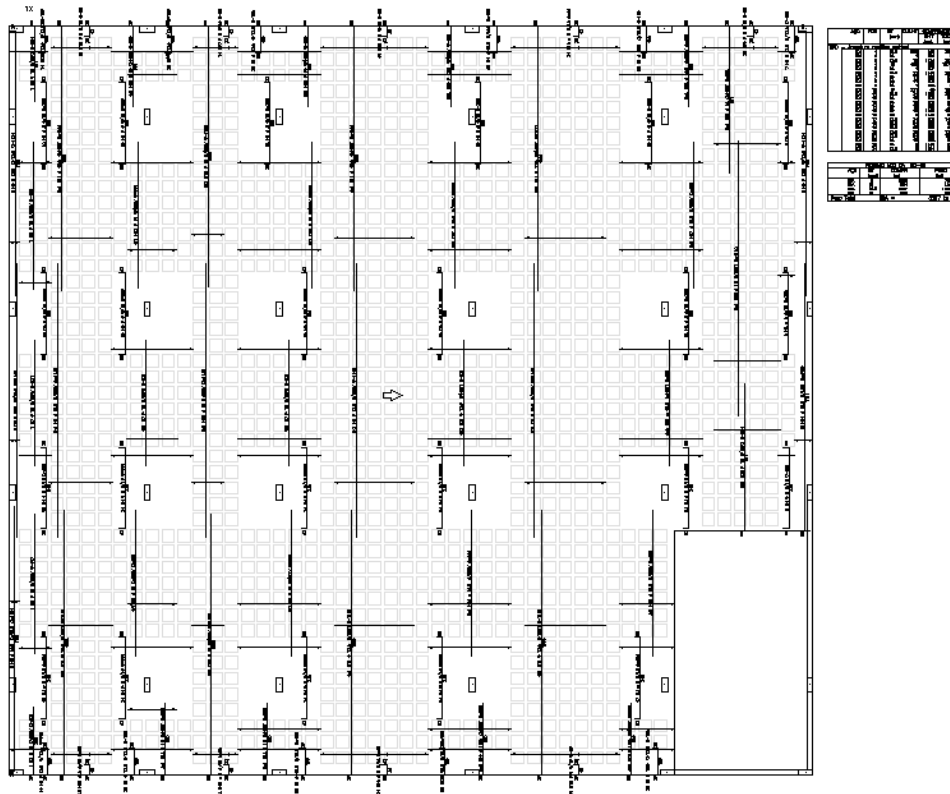






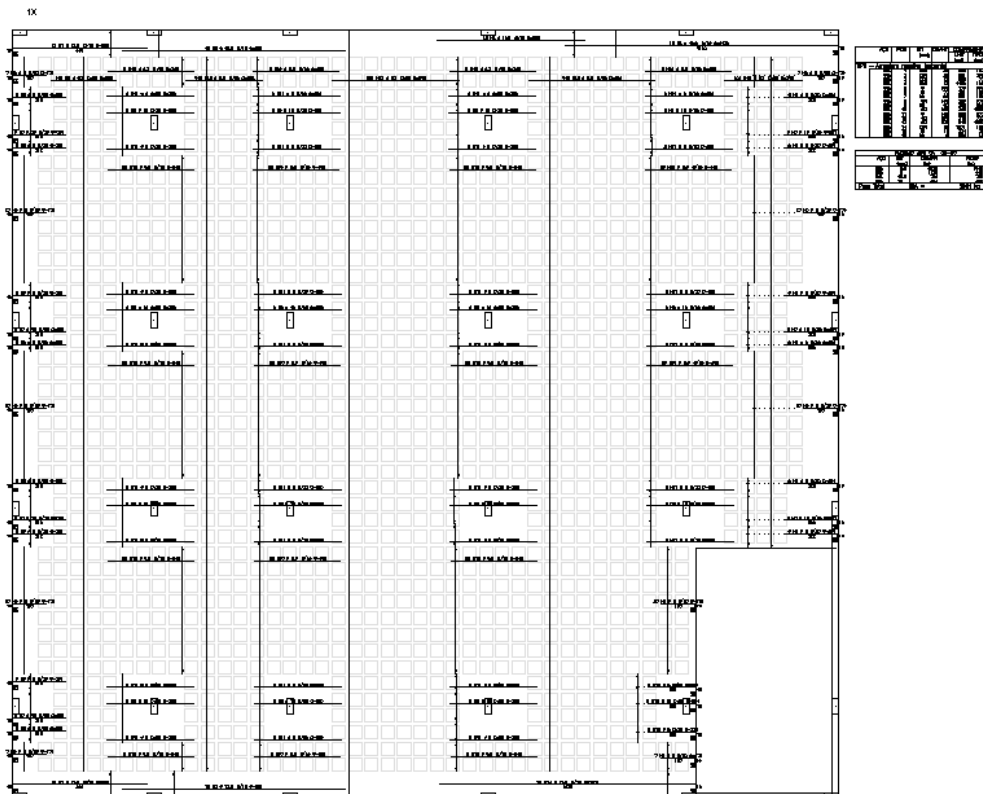
### PROJETO A1 – FL. 4/4

TERREO – Armadura positiva vertical



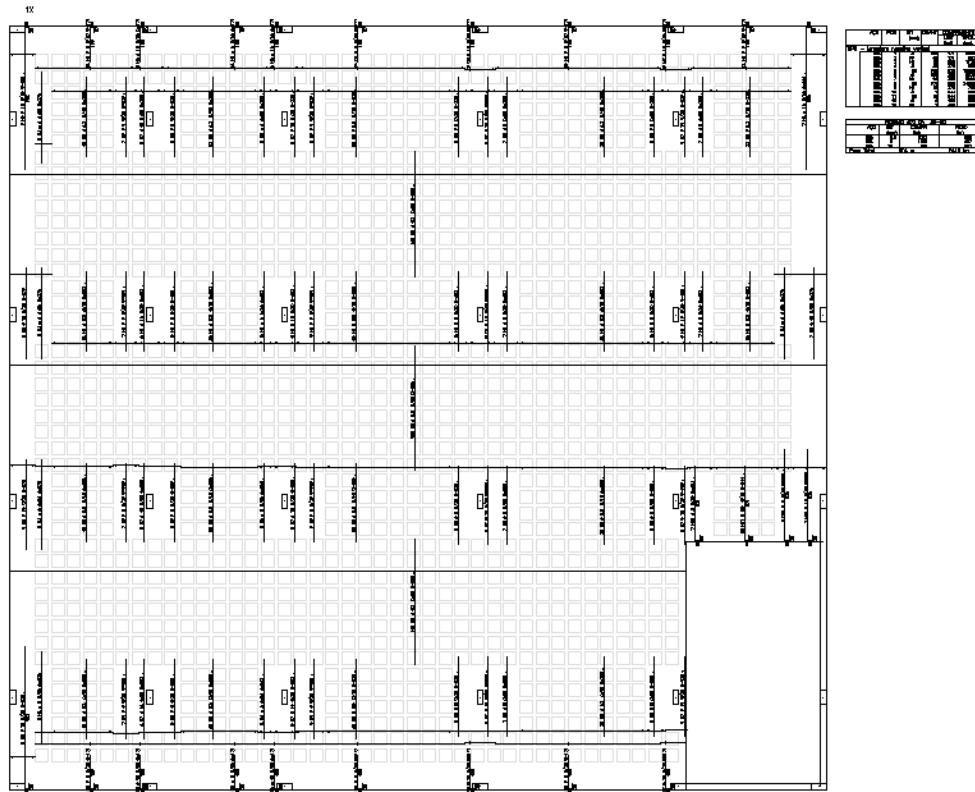
### PROJETO A2 – FL. 1/5

TERREO – Armadura negativa horizontal



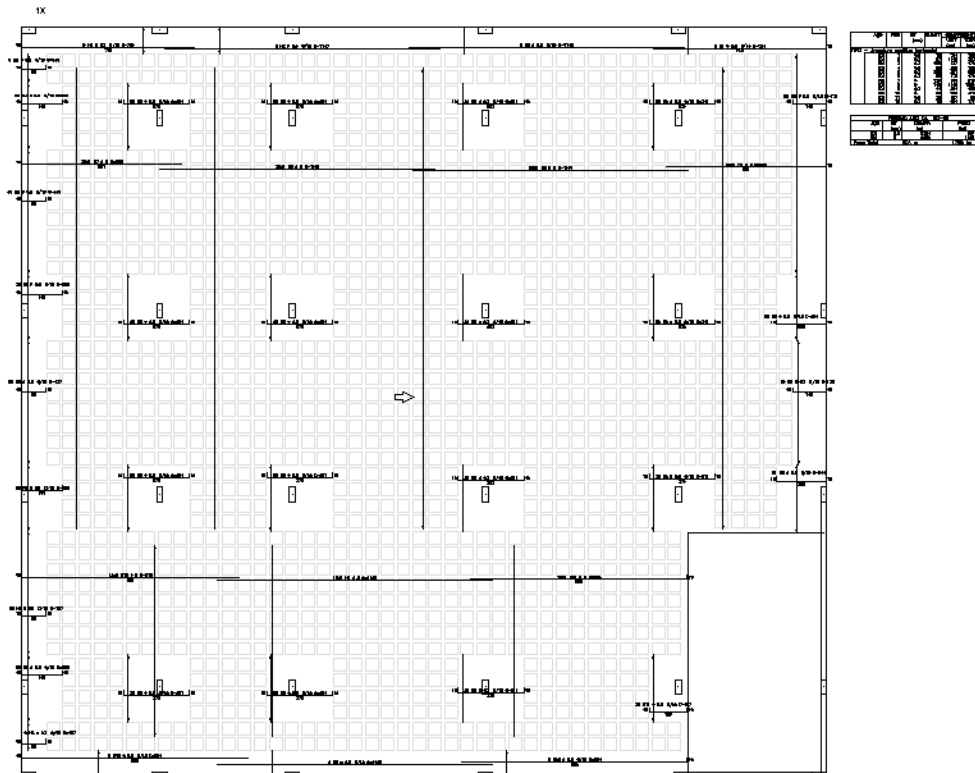
### PROJETO A2 – FL. 2/5

TÉRREO – Armadura negativa vertical



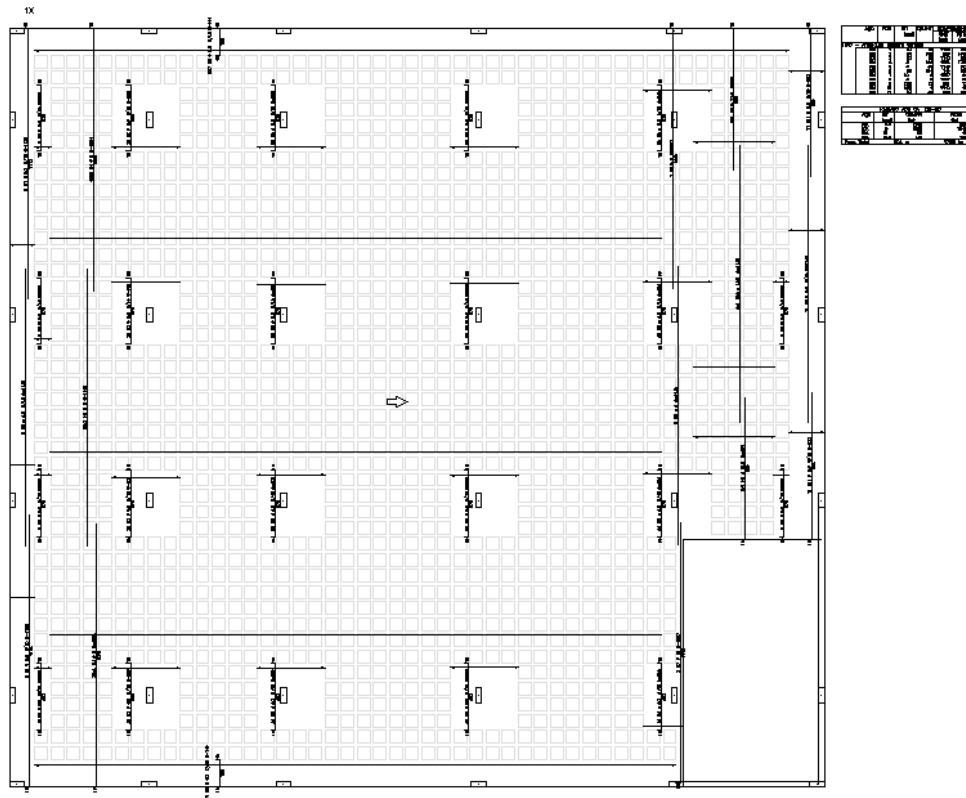
### PROJETO A2 – FL. 3/5

TÉRREO – Armadura positiva horizontal



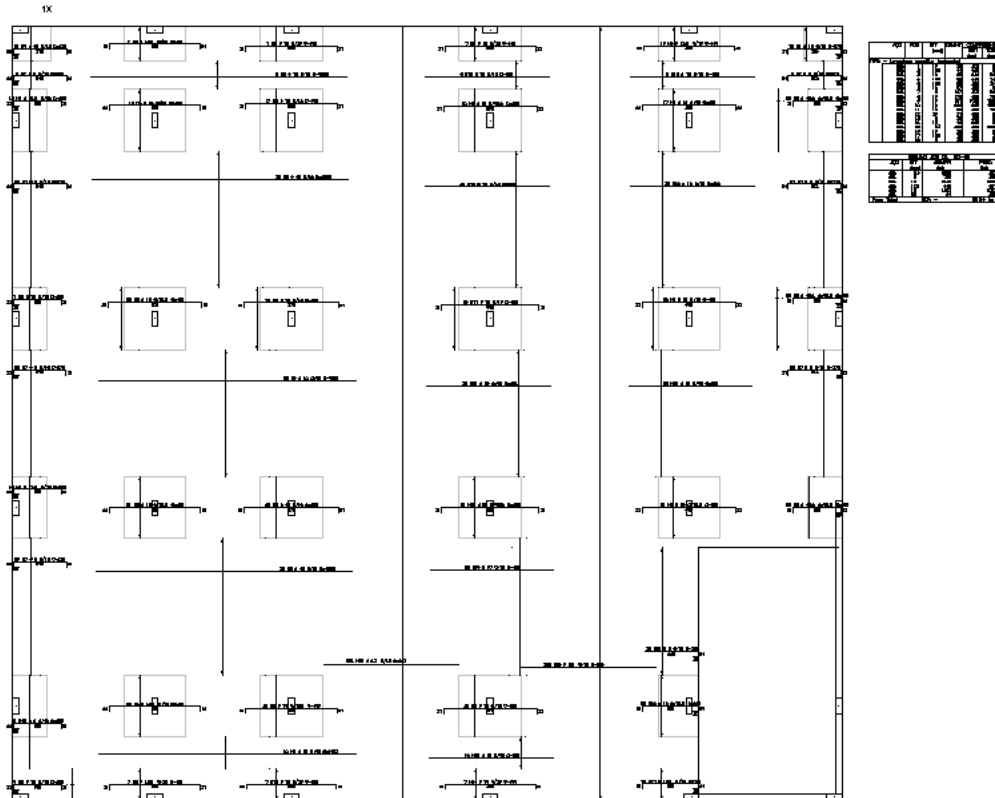
### PROJETO A2 – FL. 4/5

TÉRREO – Armadura positiva vertical



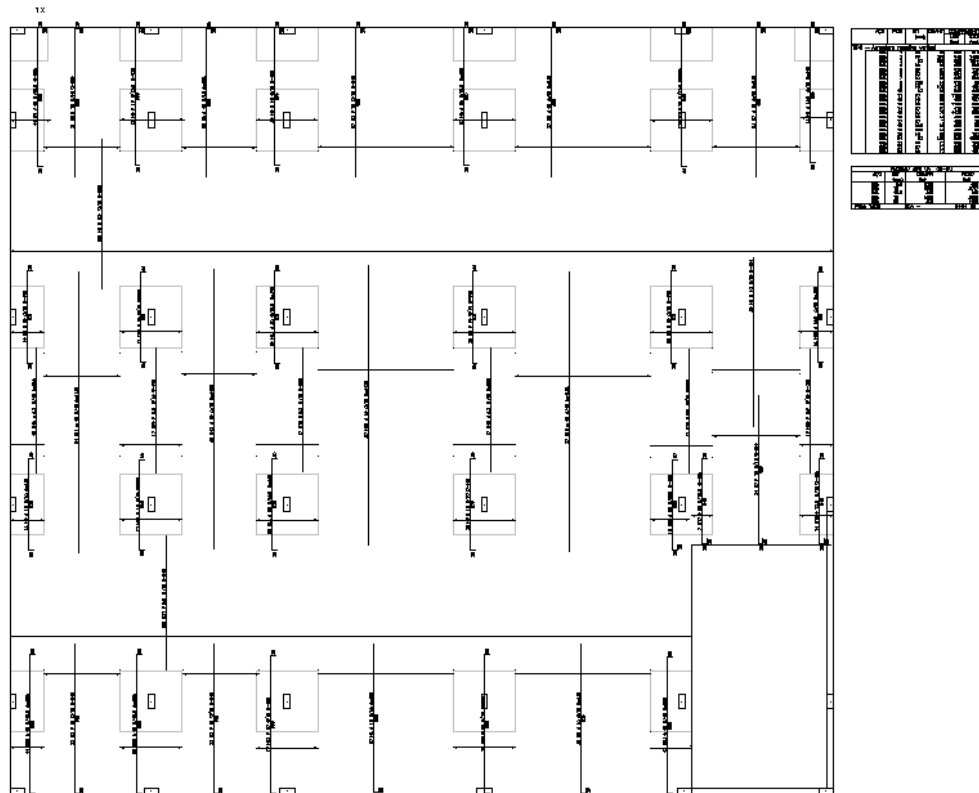
### PROJETO A3 – FL. 1/4

TÉRREO – Armadura negativa horizontal



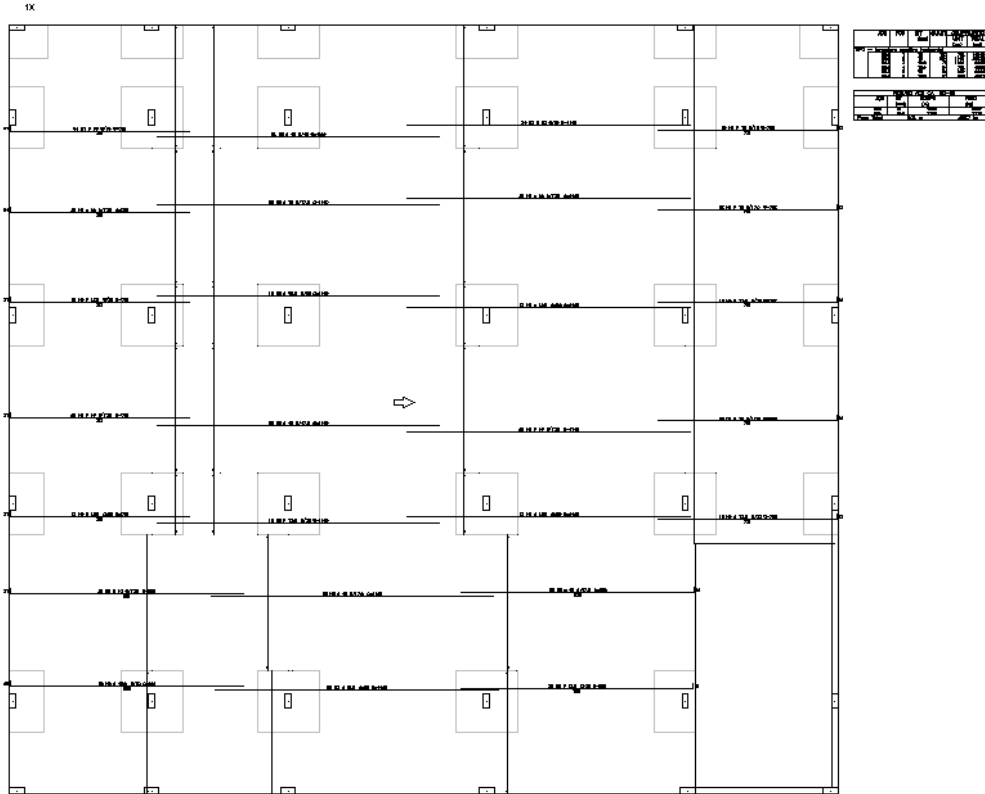
### PROJETO A3 – FL. 2/4

TÉRREO – Armadura negativa vertical



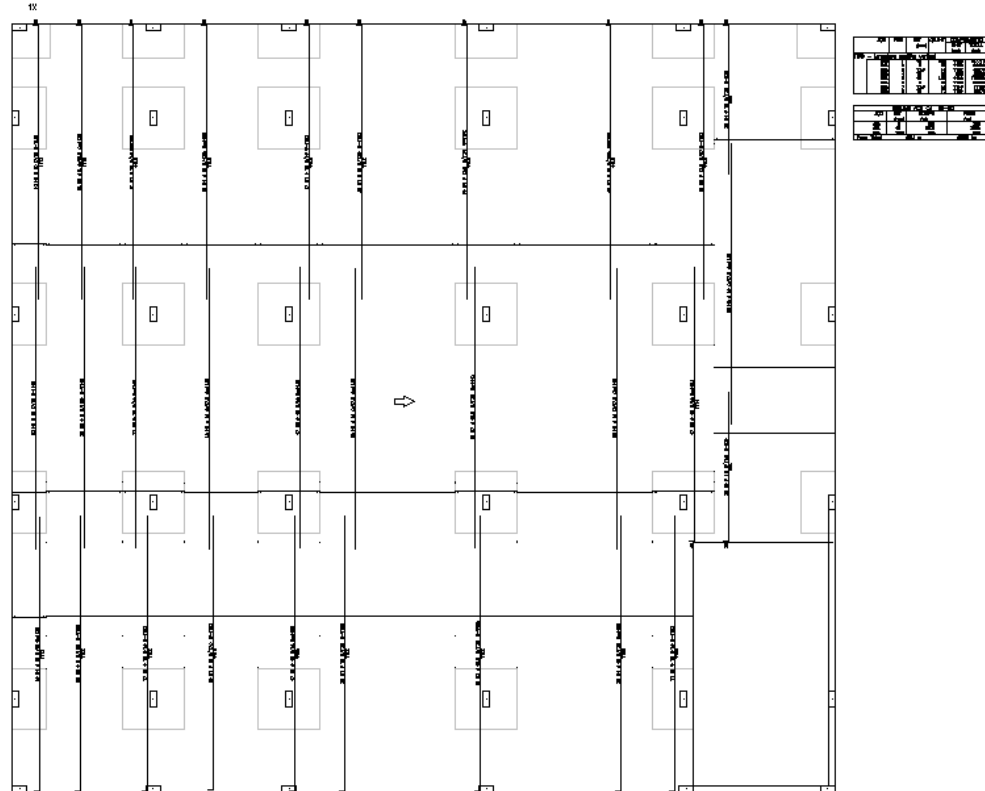
### PROJETO A3 – FL. 3/4

TÉRREO – Armadura positiva horizontal



### PROJETO A3 – FL. 4/4

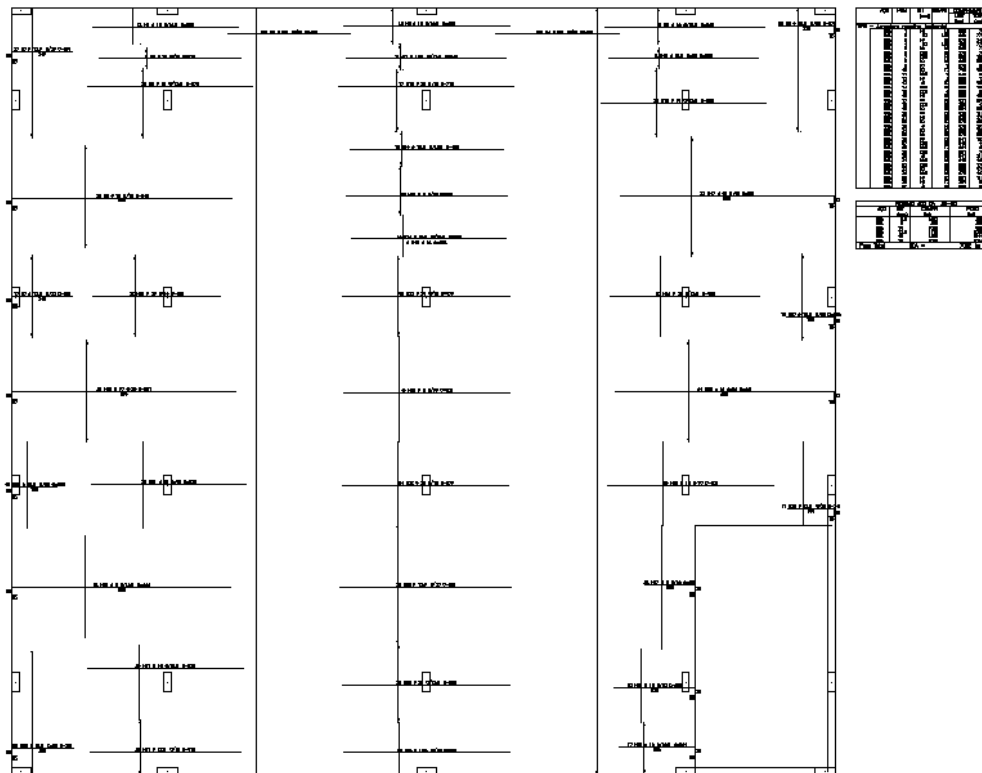
TÉRREO – Armadura positiva vertical



### PROJETO B1 – FL. 1/4

TÉRREO – Armadura negativa horizontal

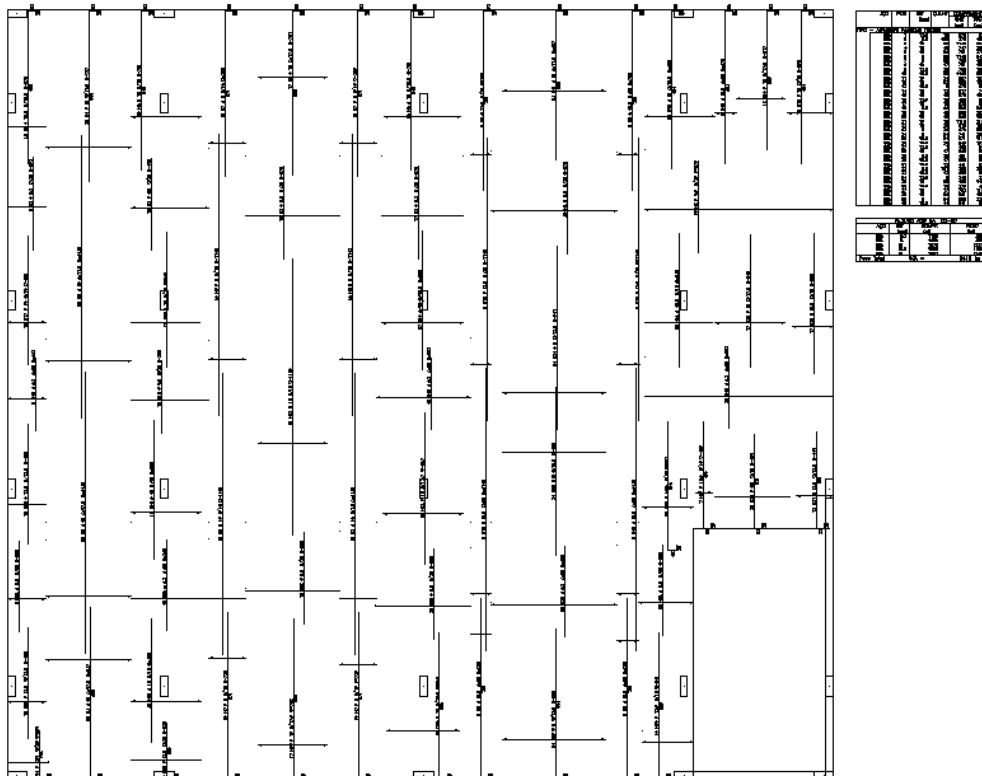
1X



### PROJETO B1 – FL. 2/4

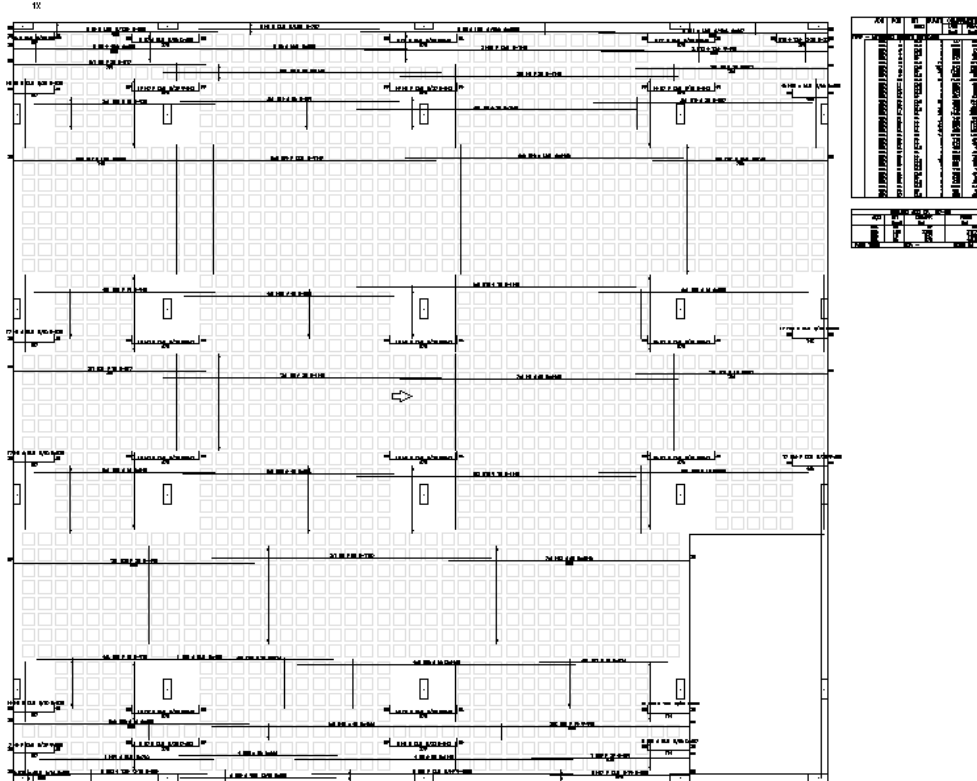
TÉRREO – Armadura negativa vertical

1X



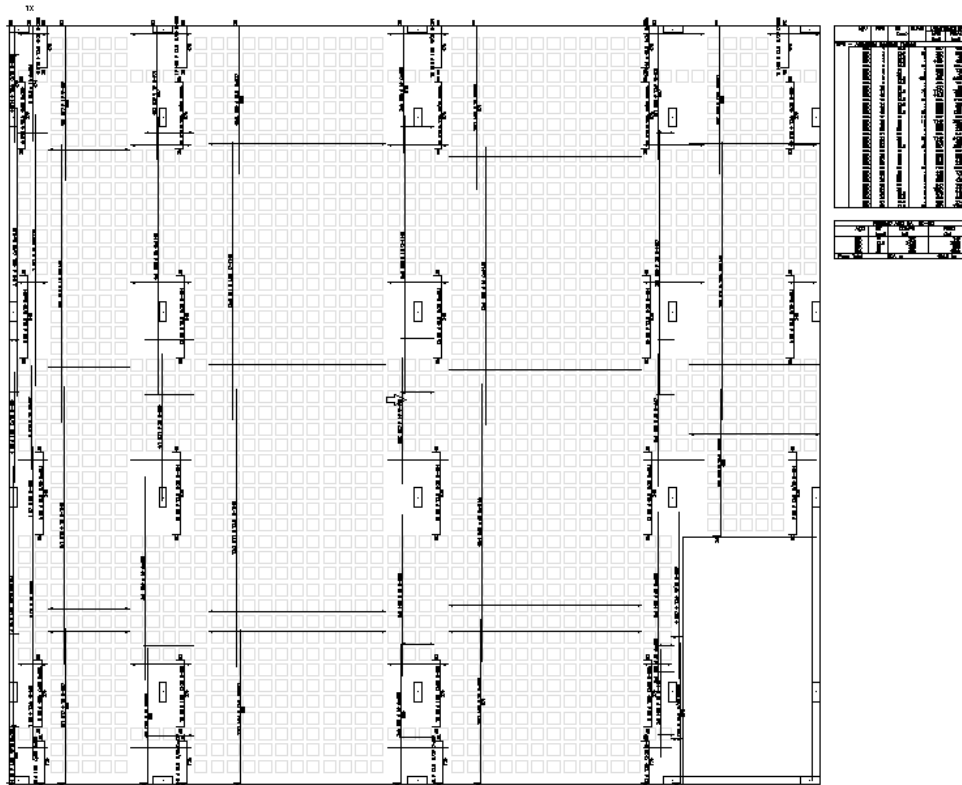
### PROJETO B1 – FL. 3/4

TÉRREO – Armadura positiva horizontal



### PROJETO B1 – FL. 4/4

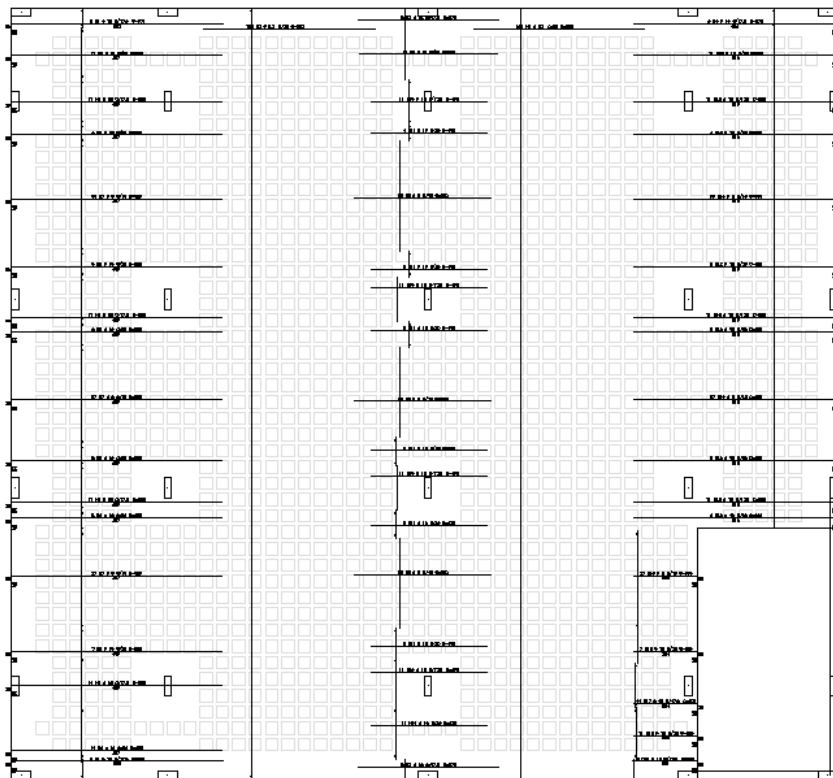
TÉRREO – Armadura positiva vertical



### PROJETO B2 – FL. 1/5

TÉRREO – Armadura negativa horizontal

1X

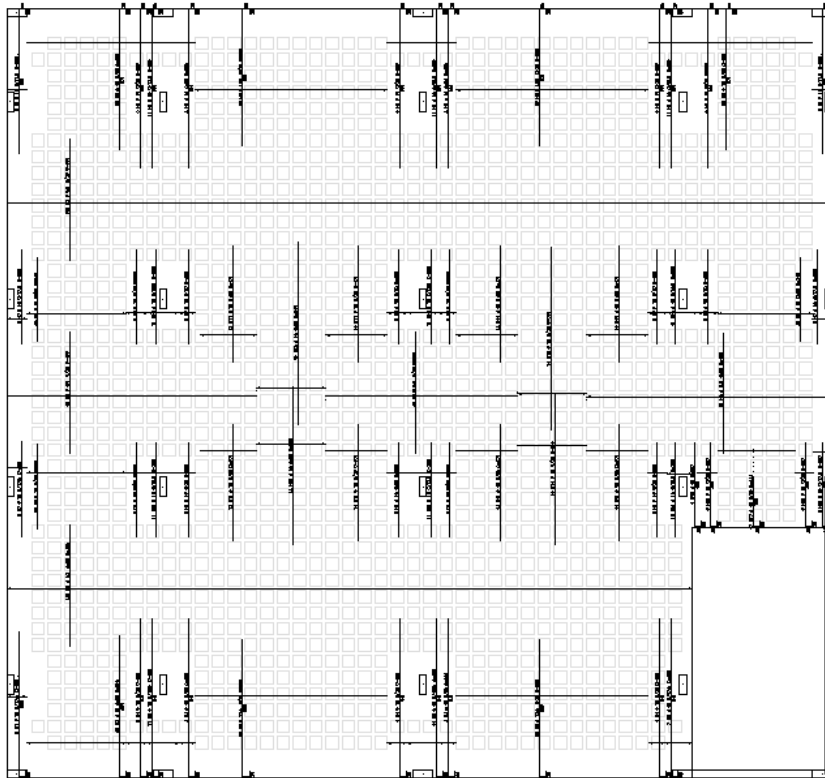


PROJETO	B2
FOLHA	1/5
ESCALA	1:1
DATA	10/10/2011
PROJ. CIVIL	ARQUITETO
PROJ. ESTRUTURAL	ENGENHEIRO
PROJ. MECÂNICA	ENGENHEIRO
PROJ. ELÉTRICA	ENGENHEIRO
PROJ. HIDRÁULICA	ENGENHEIRO
PROJ. SANEAMENTO	ENGENHEIRO
PROJ. PAVIMENTAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. VENTILAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. AQUECIMENTO	ENGENHEIRO
PROJ. ILUMINAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. MOBILIÁRIO	ENGENHEIRO
PROJ. SINALIZAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. SEGURANÇA	ENGENHEIRO
PROJ. ACÚSTICA	ENGENHEIRO
PROJ. VEGETAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. OUTROS	ENGENHEIRO

### PROJETO B2 – FL. 2/5

TÉRREO – Armadura negativa vertical

1X

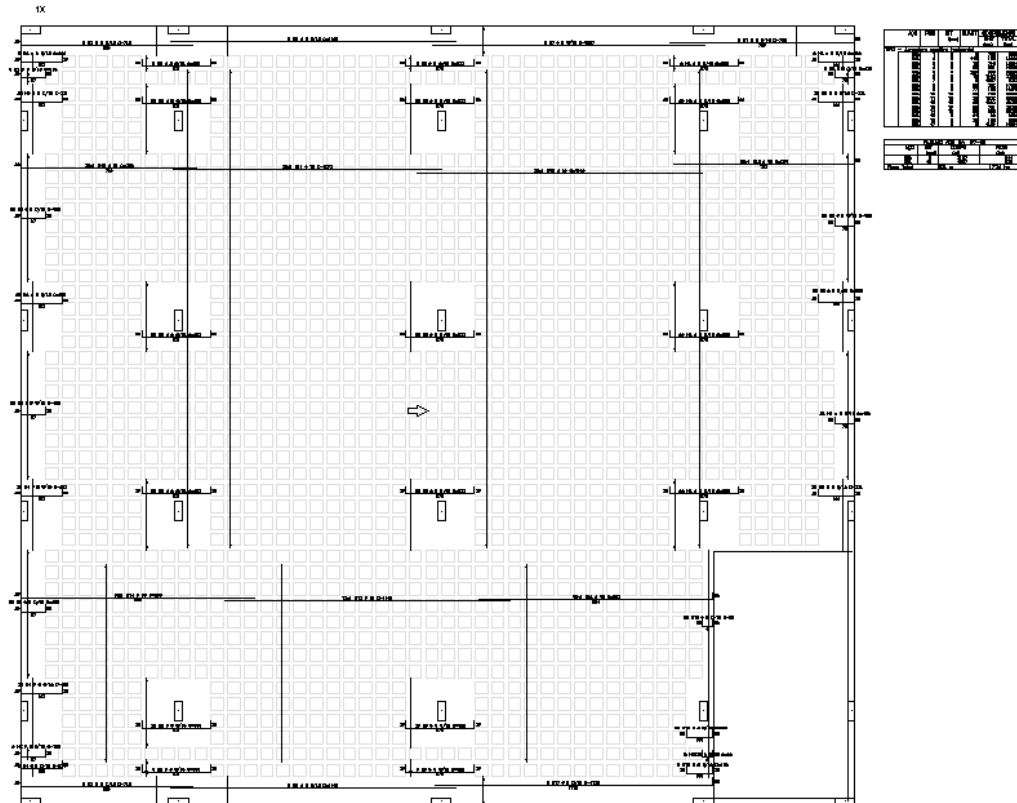


PROJETO	B2
FOLHA	2/5
ESCALA	1:1
DATA	10/10/2011
PROJ. CIVIL	ARQUITETO
PROJ. ESTRUTURAL	ENGENHEIRO
PROJ. MECÂNICA	ENGENHEIRO
PROJ. ELÉTRICA	ENGENHEIRO
PROJ. HIDRÁULICA	ENGENHEIRO
PROJ. SANEAMENTO	ENGENHEIRO
PROJ. PAVIMENTAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. VENTILAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. AQUECIMENTO	ENGENHEIRO
PROJ. ILUMINAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. MOBILIÁRIO	ENGENHEIRO
PROJ. SINALIZAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. SEGURANÇA	ENGENHEIRO
PROJ. ACÚSTICA	ENGENHEIRO
PROJ. VEGETAÇÃO	ENGENHEIRO
PROJ. OUTROS	ENGENHEIRO



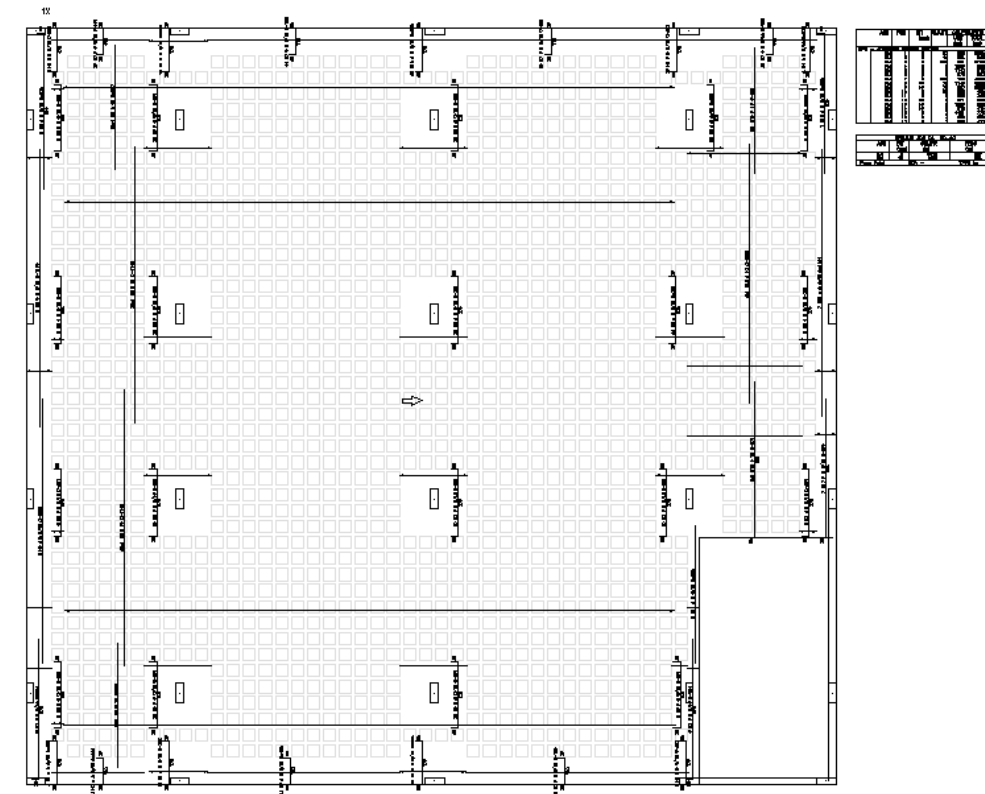
**PROJETO B2 – FL. 3/5**

TÉRREO – Armadura positiva horizontal



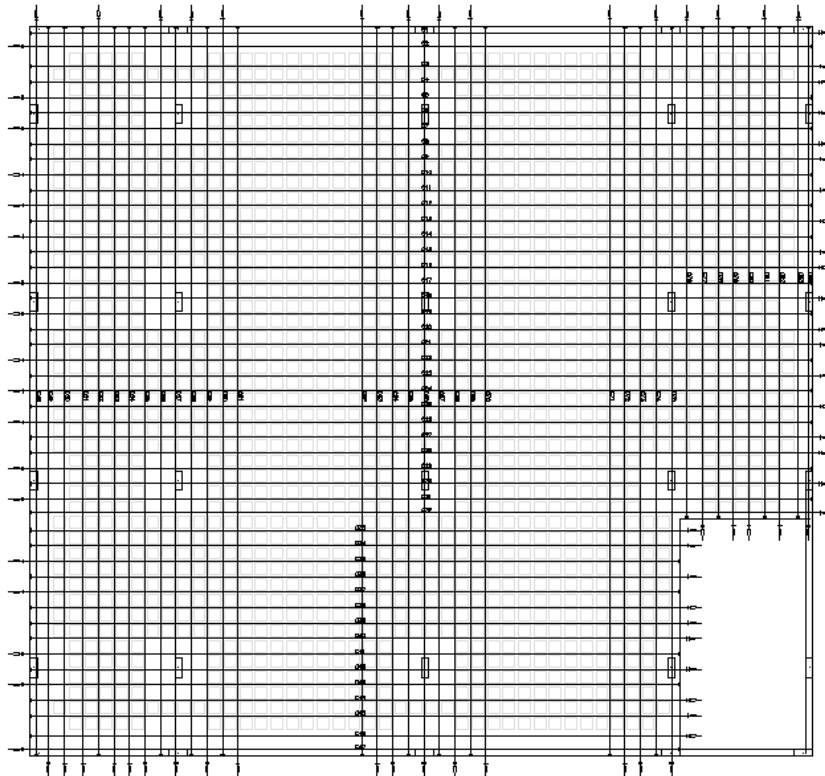
**PROJETO B2 – FL. 4/5**

TÉRREO – Armadura positiva vertical



**PROJETO B2 – FL. 5/5**

ARMADURA DE PROTENSÃO

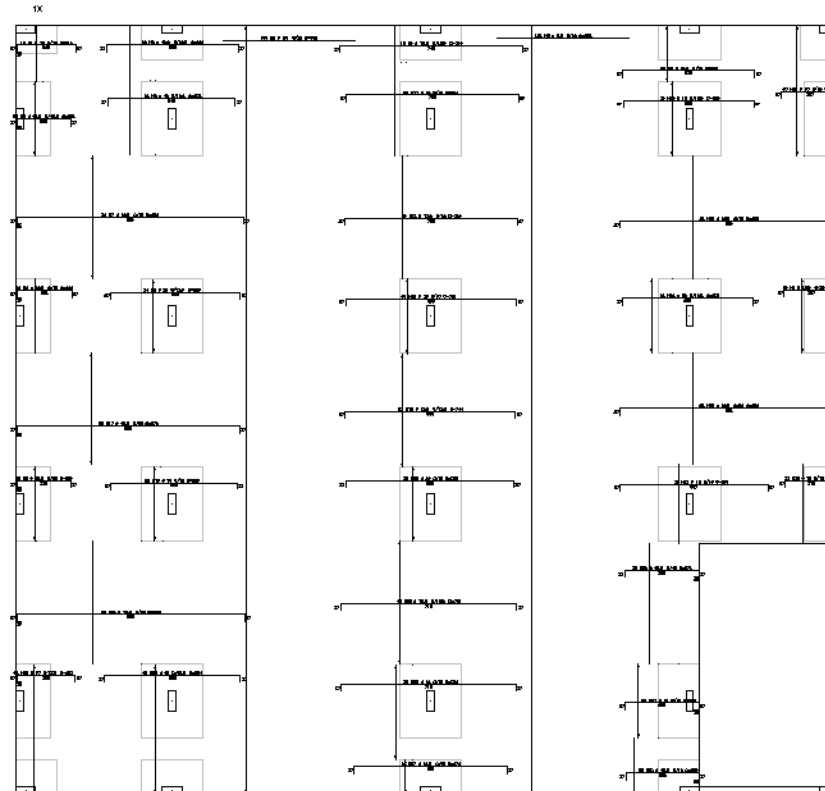


PROTEÇÃO 420 EP180 RE 127 - 137					
ITEM	QTD	UNID	VALOR	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO
1	1	m	1,11	1,11	1,11
2	1	m	1,11	1,11	1,11
3	1	m	1,11	1,11	1,11
4	1	m	1,11	1,11	1,11
5	1	m	1,11	1,11	1,11
6	1	m	1,11	1,11	1,11
7	1	m	1,11	1,11	1,11
8	1	m	1,11	1,11	1,11
9	1	m	1,11	1,11	1,11
10	1	m	1,11	1,11	1,11
11	1	m	1,11	1,11	1,11
12	1	m	1,11	1,11	1,11
13	1	m	1,11	1,11	1,11
14	1	m	1,11	1,11	1,11
15	1	m	1,11	1,11	1,11
16	1	m	1,11	1,11	1,11
17	1	m	1,11	1,11	1,11
18	1	m	1,11	1,11	1,11
19	1	m	1,11	1,11	1,11
20	1	m	1,11	1,11	1,11
21	1	m	1,11	1,11	1,11
22	1	m	1,11	1,11	1,11
23	1	m	1,11	1,11	1,11
24	1	m	1,11	1,11	1,11
25	1	m	1,11	1,11	1,11
26	1	m	1,11	1,11	1,11
27	1	m	1,11	1,11	1,11
28	1	m	1,11	1,11	1,11
29	1	m	1,11	1,11	1,11
30	1	m	1,11	1,11	1,11
31	1	m	1,11	1,11	1,11
32	1	m	1,11	1,11	1,11
33	1	m	1,11	1,11	1,11
34	1	m	1,11	1,11	1,11
35	1	m	1,11	1,11	1,11
36	1	m	1,11	1,11	1,11
37	1	m	1,11	1,11	1,11
38	1	m	1,11	1,11	1,11
39	1	m	1,11	1,11	1,11
40	1	m	1,11	1,11	1,11
41	1	m	1,11	1,11	1,11
42	1	m	1,11	1,11	1,11
43	1	m	1,11	1,11	1,11
44	1	m	1,11	1,11	1,11
45	1	m	1,11	1,11	1,11
46	1	m	1,11	1,11	1,11
47	1	m	1,11	1,11	1,11
48	1	m	1,11	1,11	1,11
49	1	m	1,11	1,11	1,11
50	1	m	1,11	1,11	1,11

RESUMO DE PREÇOS		
ITEM	QTD	VALOR
1	1	1,11
2	1	1,11
3	1	1,11
4	1	1,11
5	1	1,11
6	1	1,11
7	1	1,11
8	1	1,11
9	1	1,11
10	1	1,11
11	1	1,11
12	1	1,11
13	1	1,11
14	1	1,11
15	1	1,11
16	1	1,11
17	1	1,11
18	1	1,11
19	1	1,11
20	1	1,11
21	1	1,11
22	1	1,11
23	1	1,11
24	1	1,11
25	1	1,11
26	1	1,11
27	1	1,11
28	1	1,11
29	1	1,11
30	1	1,11
31	1	1,11
32	1	1,11
33	1	1,11
34	1	1,11
35	1	1,11
36	1	1,11
37	1	1,11
38	1	1,11
39	1	1,11
40	1	1,11
41	1	1,11
42	1	1,11
43	1	1,11
44	1	1,11
45	1	1,11
46	1	1,11
47	1	1,11
48	1	1,11
49	1	1,11
50	1	1,11

**PROJETO B3 – FL. 1/4**

TÉRREO – Armadura negativa horizontal

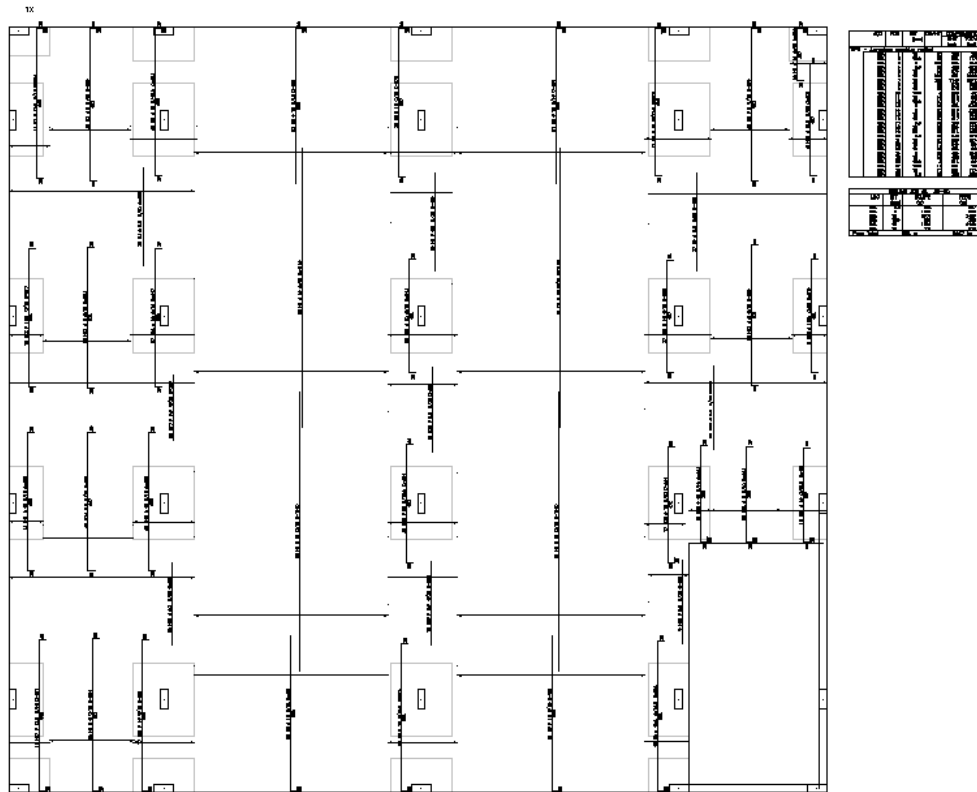


PROTEÇÃO 420 EP180 RE 127 - 137					
ITEM	QTD	UNID	VALOR	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO
1	1	m	1,11	1,11	1,11
2	1	m	1,11	1,11	1,11
3	1	m	1,11	1,11	1,11
4	1	m	1,11	1,11	1,11
5	1	m	1,11	1,11	1,11
6	1	m	1,11	1,11	1,11
7	1	m	1,11	1,11	1,11
8	1	m	1,11	1,11	1,11
9	1	m	1,11	1,11	1,11
10	1	m	1,11	1,11	1,11
11	1	m	1,11	1,11	1,11
12	1	m	1,11	1,11	1,11
13	1	m	1,11	1,11	1,11
14	1	m	1,11	1,11	1,11
15	1	m	1,11	1,11	1,11
16	1	m	1,11	1,11	1,11
17	1	m	1,11	1,11	1,11
18	1	m	1,11	1,11	1,11
19	1	m	1,11	1,11	1,11
20	1	m	1,11	1,11	1,11
21	1	m	1,11	1,11	1,11
22	1	m	1,11	1,11	1,11
23	1	m	1,11	1,11	1,11
24	1	m	1,11	1,11	1,11
25	1	m	1,11	1,11	1,11
26	1	m	1,11	1,11	1,11
27	1	m	1,11	1,11	1,11
28	1	m	1,11	1,11	1,11
29	1	m	1,11	1,11	1,11
30	1	m	1,11	1,11	1,11
31	1	m	1,11	1,11	1,11
32	1	m	1,11	1,11	1,11
33	1	m	1,11	1,11	1,11
34	1	m	1,11	1,11	1,11
35	1	m	1,11	1,11	1,11
36	1	m	1,11	1,11	1,11
37	1	m	1,11	1,11	1,11
38	1	m	1,11	1,11	1,11
39	1	m	1,11	1,11	1,11
40	1	m	1,11	1,11	1,11
41	1	m	1,11	1,11	1,11
42	1	m	1,11	1,11	1,11
43	1	m	1,11	1,11	1,11
44	1	m	1,11	1,11	1,11
45	1	m	1,11	1,11	1,11
46	1	m	1,11	1,11	1,11
47	1	m	1,11	1,11	1,11
48	1	m	1,11	1,11	1,11
49	1	m	1,11	1,11	1,11
50	1	m	1,11	1,11	1,11

RESUMO DE PREÇOS		
ITEM	QTD	VALOR
1	1	1,11
2	1	1,11
3	1	1,11
4	1	1,11
5	1	1,11
6	1	1,11
7	1	1,11
8	1	1,11
9	1	1,11
10	1	1,11
11	1	1,11
12	1	1,11
13	1	1,11
14	1	1,11
15	1	1,11
16	1	1,11
17	1	1,11
18	1	1,11
19	1	1,11
20	1	1,11
21	1	1,11
22	1	1,11
23	1	1,11
24	1	1,11
25	1	1,11
26	1	1,11
27	1	1,11
28	1	1,11
29	1	1,11
30	1	1,11
31	1	1,11
32	1	1,11
33	1	1,11
34	1	1,11
35	1	1,11
36	1	1,11
37	1	1,11
38	1	1,11
39	1	1,11
40	1	1,11
41	1	1,11
42	1	1,11
43	1	1,11
44	1	1,11
45	1	1,11
46	1	1,11
47	1	1,11
48	1	1,11
49	1	1,11
50	1	1,11

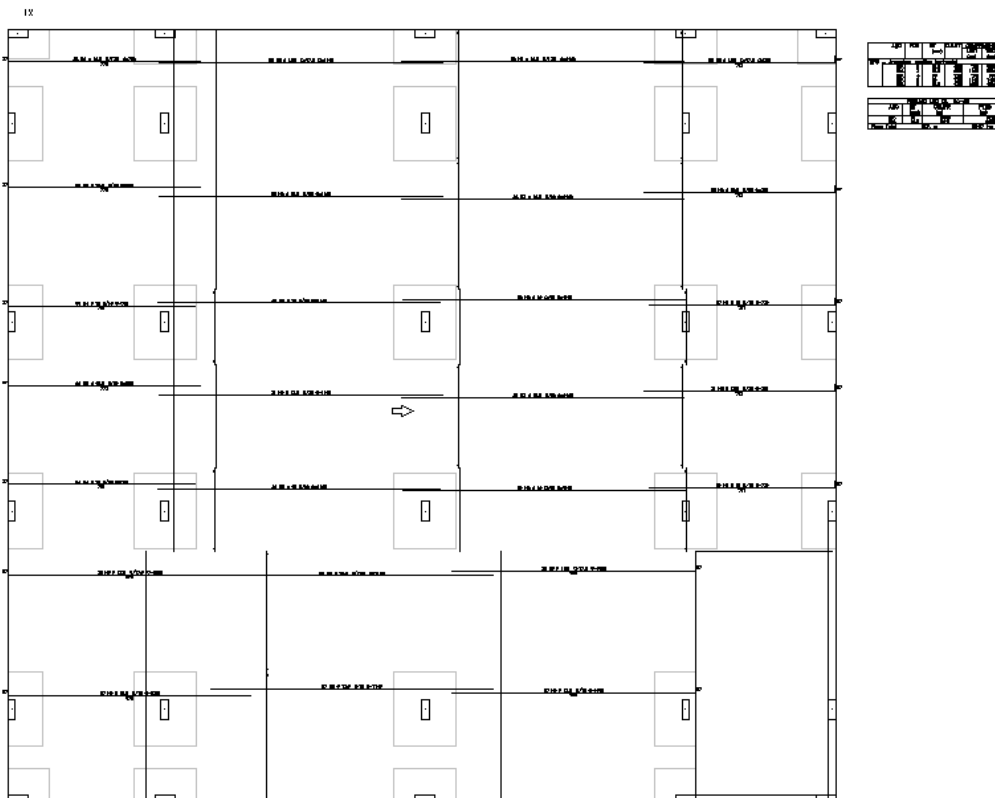
**PROJETO B3 – FL. 2/4**

TÉRREO – Armadura negativa vertical



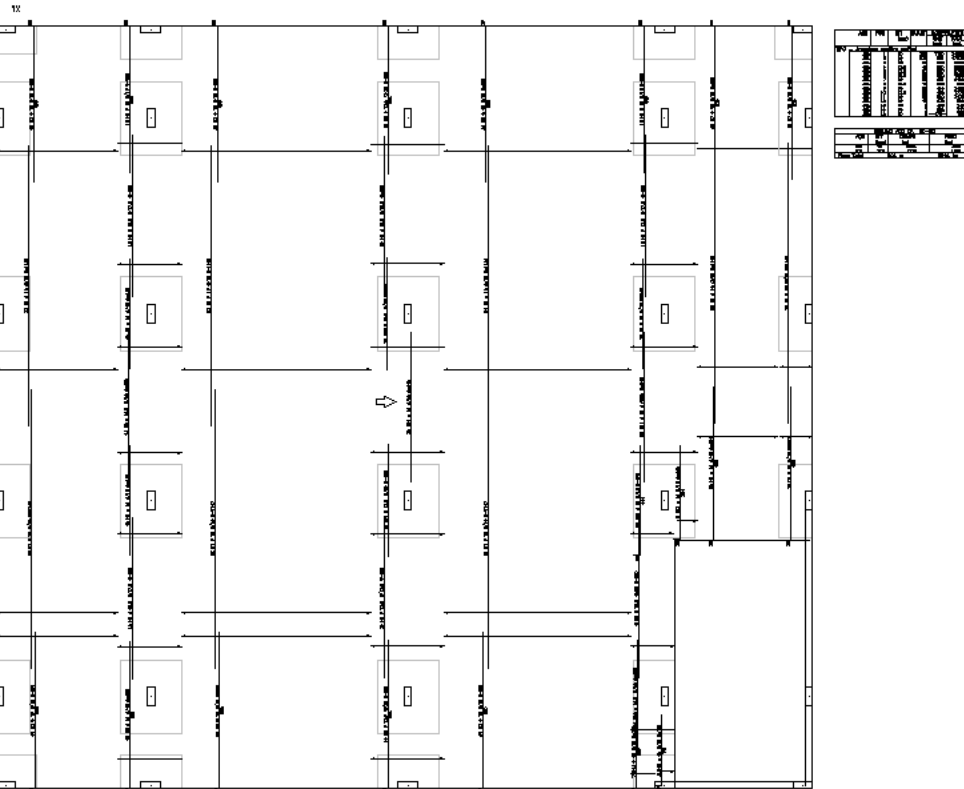
**PROJETO B3 – FL. 3/4**

TÉRREO – Armadura positiva horizontal



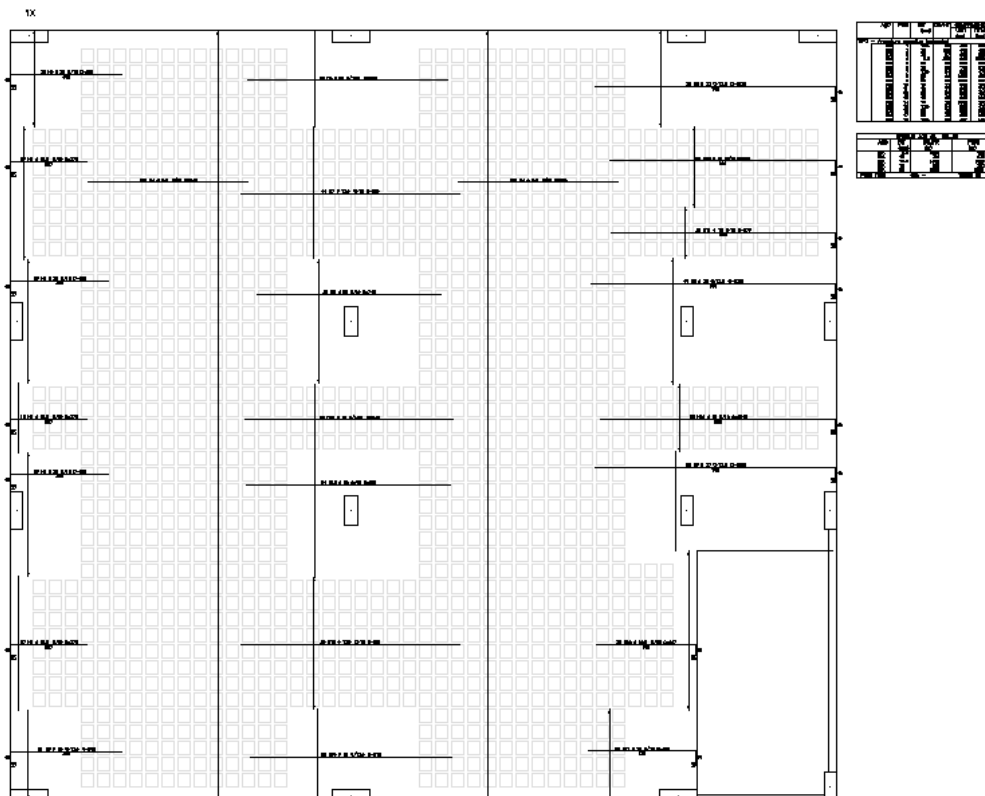
### PROJETO B3 – FL. 4/4

TÉRREO – Armadura positiva vertical



### PROJETO C1 – FL. 1/4

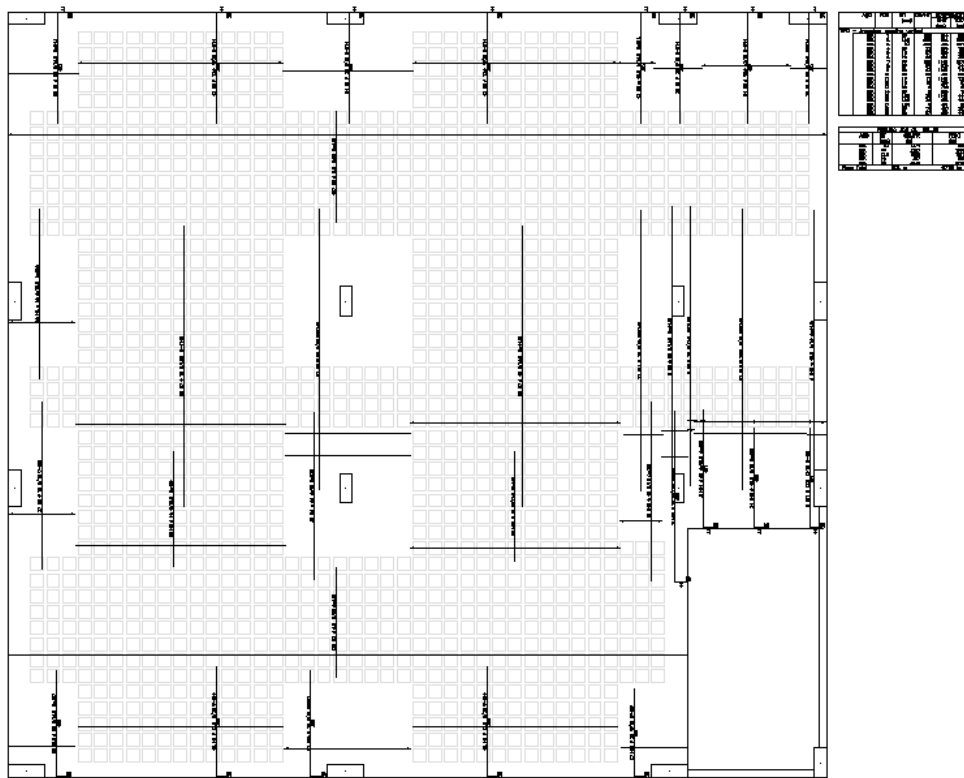
TÉRREO – Armadura negativa horizontal



**PROJETO C1 – FL. 2/4**

TÉRREO – Armadura negativa vertical

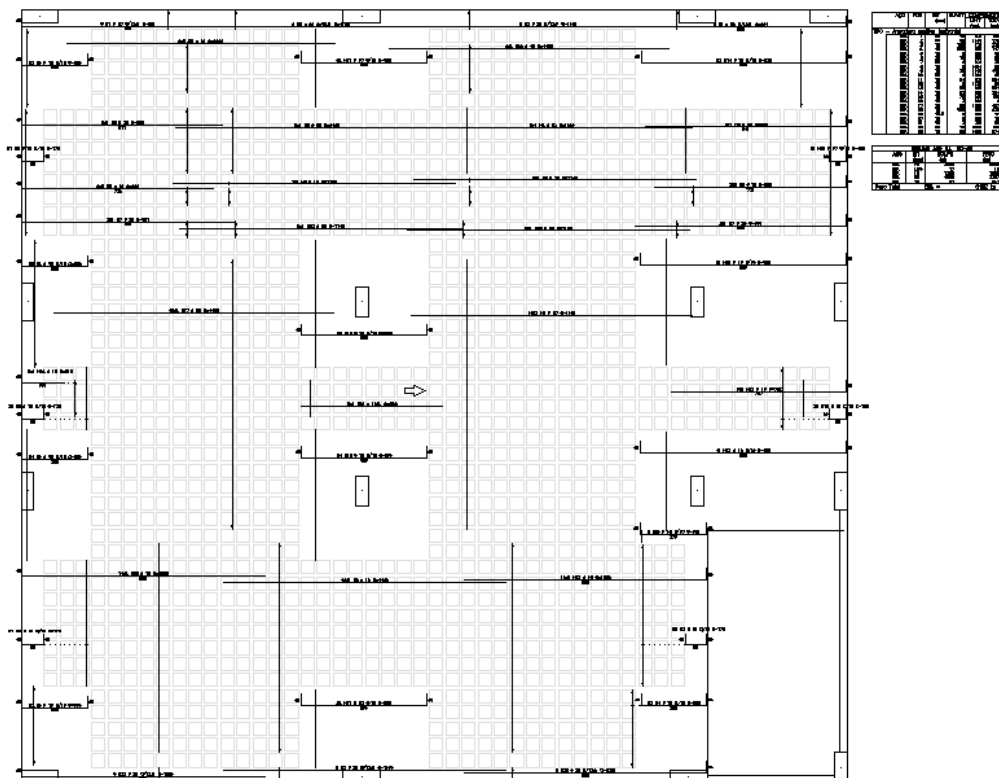
IX



**PROJETO C1 – FL. 3/4**

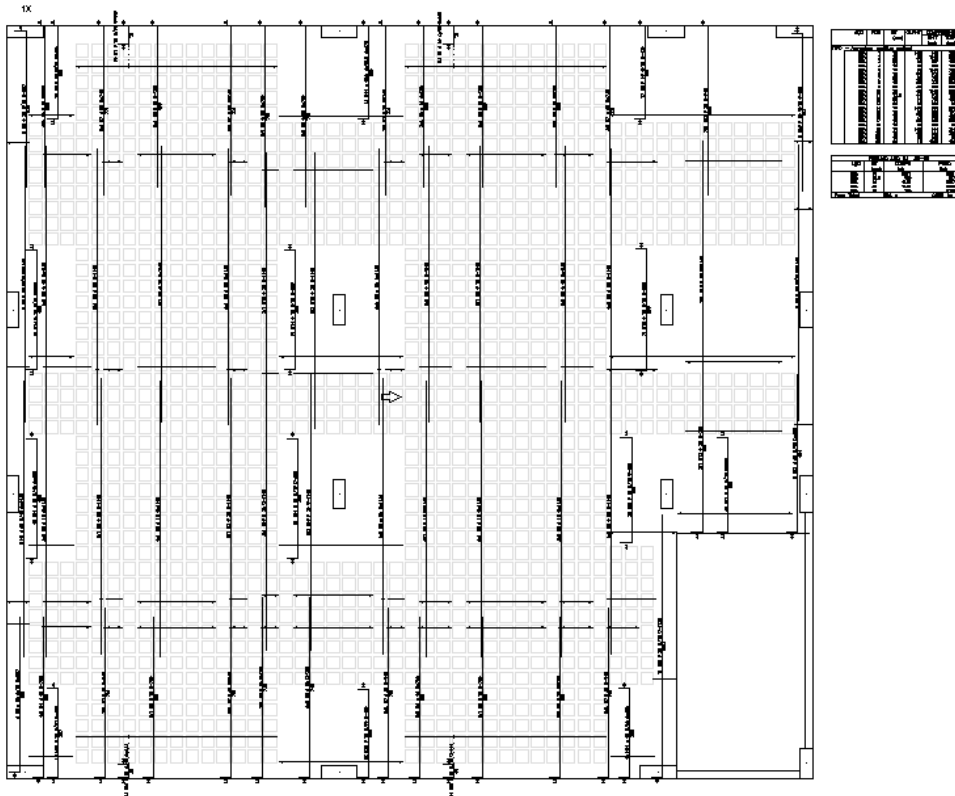
TÉRREO – Armadura positiva horizontal

IX



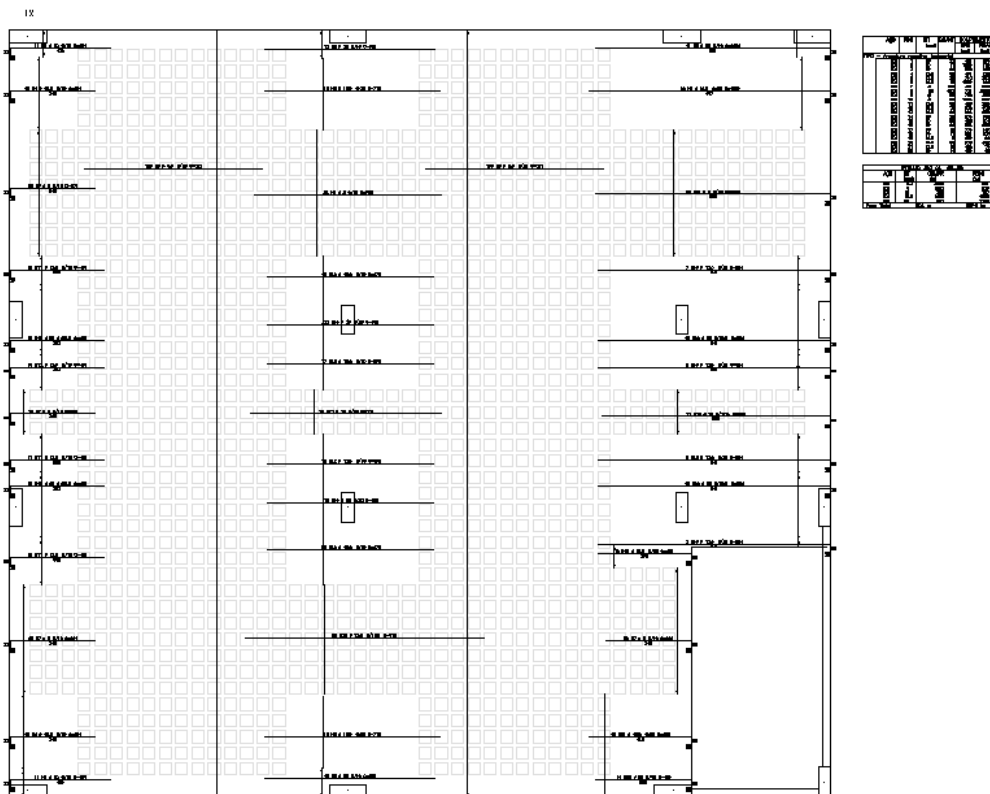
**PROJETO C1 – FL. 4/4**

TÉRREO – Armadura positiva vertical



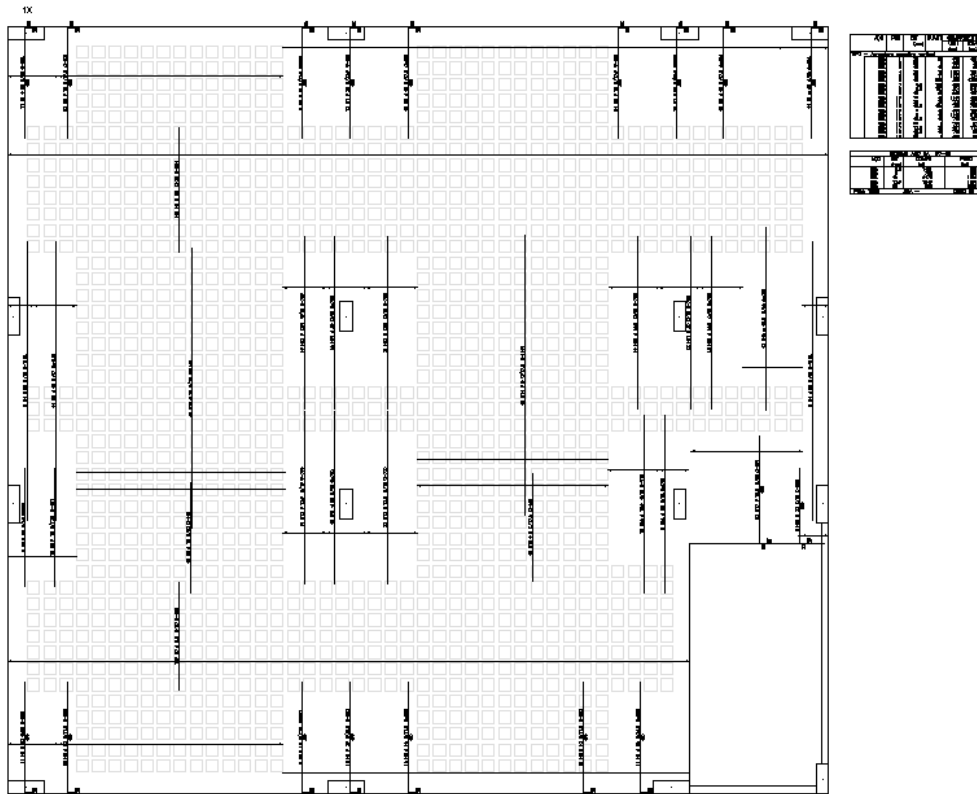
**PROJETO C2 – FL. 1/5**

TÉRREO – Armadura negativa horizontal



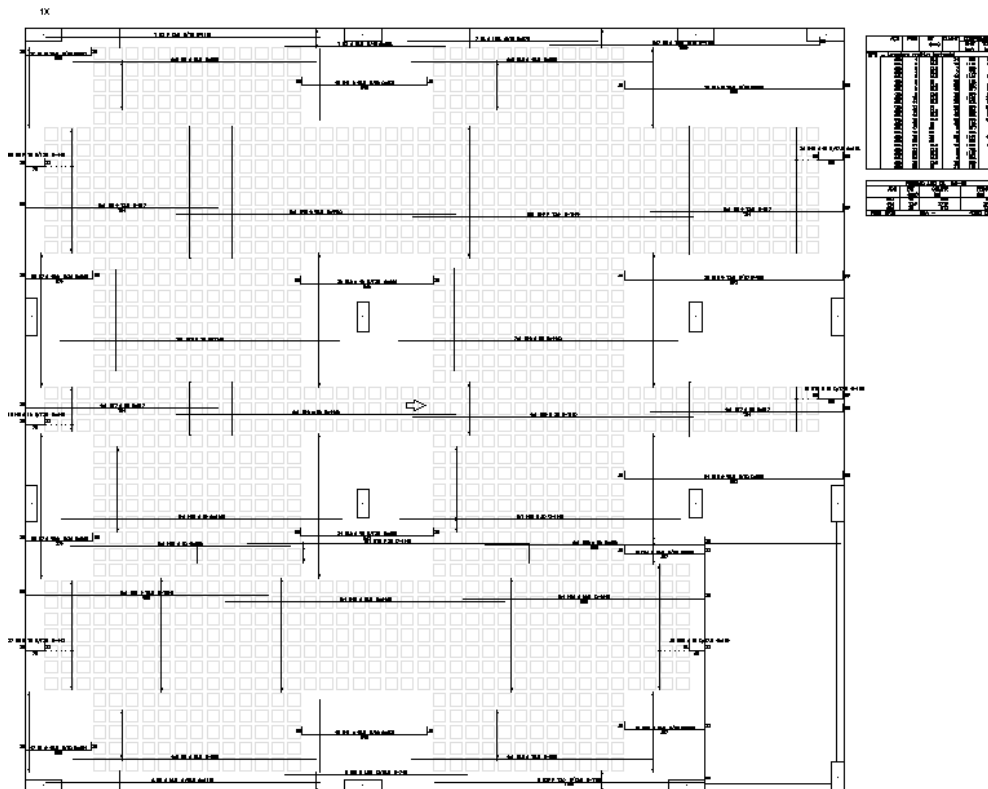
### PROJETO C2 – FL. 2/5

TÉRREO – Armadura negativa vertical



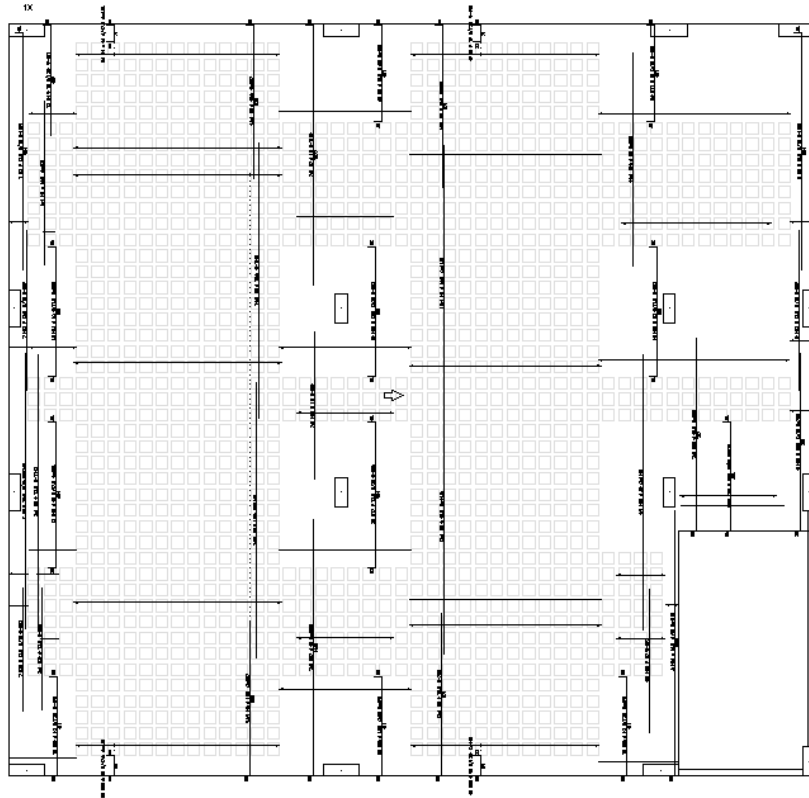
### PROJETO C2 – FL. 3/5

TÉRREO – Armadura positiva horizontal



**PROJETO C2 – FL. 4/5**

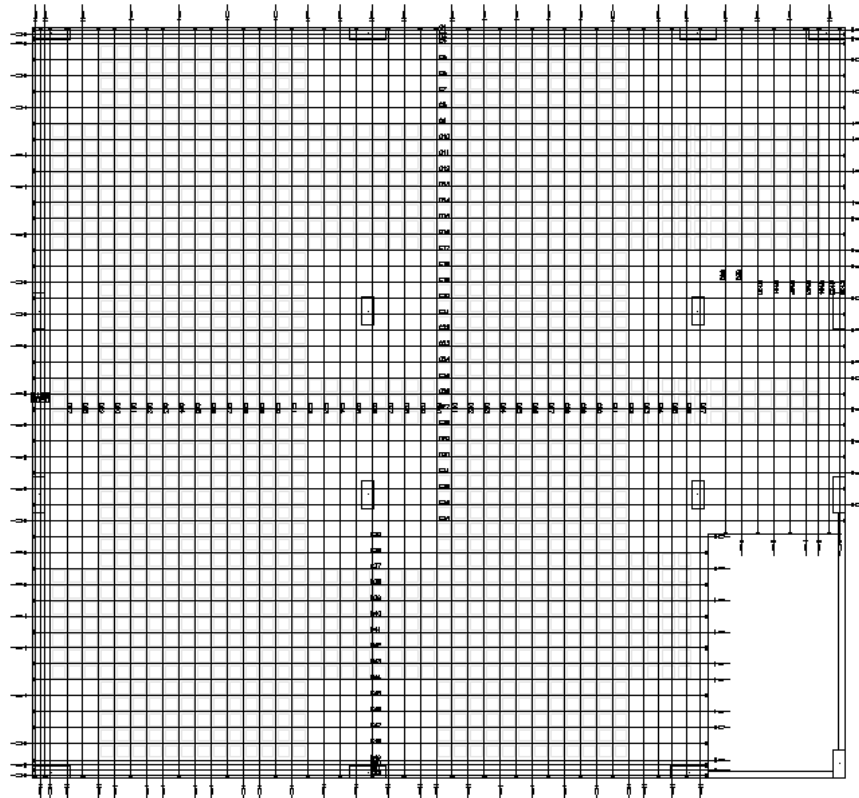
TÉRREO – Armadura positiva vertical



Item	Descrição	Quantidade	Unidade
1	Armadura positiva vertical	1000	m
2	Armadura negativa	1200	m
3	Armadura de contorno	800	m
4	Armadura de distribuição	500	m
5	Armadura de reforço	300	m
6	Armadura de ligação	200	m
7	Armadura de ancoragem	100	m
8	Armadura de fixação	50	m
9	Armadura de proteção	20	m
10	Armadura de limpeza	10	m
11	Armadura de acabamento	5	m
12	Armadura de manutenção	2	m
13	Armadura de segurança	1	m
14	Armadura de emergência	0.5	m
15	Armadura de reserva	0.2	m
16	Armadura de contingência	0.1	m
17	Armadura de reserva técnica	0.05	m
18	Armadura de reserva legal	0.02	m
19	Armadura de reserva moral	0.01	m
20	Armadura de reserva financeira	0.005	m
21	Armadura de reserva patrimonial	0.002	m
22	Armadura de reserva de liquidez	0.001	m
23	Armadura de reserva de solvência	0.0005	m
24	Armadura de reserva de continuidade	0.0002	m
25	Armadura de reserva de existência	0.0001	m
26	Armadura de reserva de identidade	0.00005	m
27	Armadura de reserva de autonomia	0.00002	m
28	Armadura de reserva de responsabilidade	0.00001	m
29	Armadura de reserva de prestação de contas	0.000005	m
30	Armadura de reserva de transparência	0.000002	m
31	Armadura de reserva de integridade	0.000001	m
32	Armadura de reserva de honra	0.0000005	m
33	Armadura de reserva de dignidade	0.0000002	m
34	Armadura de reserva de respeito	0.0000001	m
35	Armadura de reserva de justiça	0.00000005	m
36	Armadura de reserva de equidade	0.00000002	m
37	Armadura de reserva de boa-fé	0.00000001	m
38	Armadura de reserva de probidade	0.000000005	m
39	Armadura de reserva de moralidade	0.000000002	m
40	Armadura de reserva de eficiência	0.000000001	m
41	Armadura de reserva de eficácia	0.0000000005	m
42	Armadura de reserva de efetividade	0.0000000002	m
43	Armadura de reserva de produtividade	0.0000000001	m
44	Armadura de reserva de competitividade	0.00000000005	m
45	Armadura de reserva de inovação	0.00000000002	m
46	Armadura de reserva de desenvolvimento	0.00000000001	m
47	Armadura de reserva de sustentabilidade	0.000000000005	m
48	Armadura de reserva de responsabilidade social	0.000000000002	m
49	Armadura de reserva de cidadania	0.000000000001	m
50	Armadura de reserva de participação	0.0000000000005	m
51	Armadura de reserva de inclusão	0.0000000000002	m
52	Armadura de reserva de diversidade	0.0000000000001	m
53	Armadura de reserva de respeito à diversidade	0.00000000000005	m
54	Armadura de reserva de valorização da diversidade	0.00000000000002	m
55	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.00000000000001	m
56	Armadura de reserva de defesa da diversidade	0.000000000000005	m
57	Armadura de reserva de garantia da diversidade	0.000000000000002	m
58	Armadura de reserva de proteção da diversidade	0.000000000000001	m
59	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.0000000000000005	m
60	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.0000000000000002	m
61	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.0000000000000001	m
62	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.00000000000000005	m
63	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.00000000000000002	m
64	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.00000000000000001	m
65	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.000000000000000005	m
66	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.000000000000000002	m
67	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.000000000000000001	m
68	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.0000000000000000005	m
69	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.0000000000000000002	m
70	Armadura de reserva de promoção da diversidade	0.0000000000000000001	m

**PROJETO C2 – FL. 5/5**

ARMADURA DE PROTENSÃO



Protensão: Aço CP190 RB 12,7 - 12,7									
Item	Descrição	Quantidade	Unidade	Valor Unit.	Valor Total	Valor Unit.	Valor Total	Valor Unit.	Valor Total
1	Protensão	1000	m	12,7	12700,00	12,7	12700,00	12,7	12700,00
2	Protensão	1200	m	12,7	15240,00	12,7	15240,00	12,7	15240,00
3	Protensão	800	m	12,7	10160,00	12,7	10160,00	12,7	10160,00
4	Protensão	500	m	12,7	6350,00	12,7	6350,00	12,7	6350,00
5	Protensão	300	m	12,7	3810,00	12,7	3810,00	12,7	3810,00
6	Protensão	200	m	12,7	2540,00	12,7	2540,00	12,7	2540,00
7	Protensão	100	m	12,7	1270,00	12,7	1270,00	12,7	1270,00
8	Protensão	50	m	12,7	635,00	12,7	635,00	12,7	635,00
9	Protensão	20	m	12,7	254,00	12,7	254,00	12,7	254,00
10	Protensão	10	m	12,7	127,00	12,7	127,00	12,7	127,00
11	Protensão	5	m	12,7	63,50	12,7	63,50	12,7	63,50
12	Protensão	2	m	12,7	25,40	12,7	25,40	12,7	25,40
13	Protensão	1	m	12,7	12,70	12,7	12,70	12,7	12,70
14	Protensão	0,5	m	12,7	6,35	12,7	6,35	12,7	6,35
15	Protensão	0,2	m	12,7	2,54	12,7	2,54	12,7	2,54
16	Protensão	0,1	m	12,7	1,27	12,7	1,27	12,7	1,27
17	Protensão	0,05	m	12,7	0,635	12,7	0,635	12,7	0,635
18	Protensão	0,02	m	12,7	0,254	12,7	0,254	12,7	0,254
19	Protensão	0,01	m	12,7	0,127	12,7	0,127	12,7	0,127
20	Protensão	0,005	m	12,7	0,0635	12,7	0,0635	12,7	0,0635
21	Protensão	0,002	m	12,7	0,0254	12,7	0,0254	12,7	0,0254
22	Protensão	0,001	m	12,7	0,0127	12,7	0,0127	12,7	0,0127
23	Protensão	0,0005	m	12,7	0,00635	12,7	0,00635	12,7	0,00635
24	Protensão	0,0002	m	12,7	0,00254	12,7	0,00254	12,7	0,00254
25	Protensão	0,0001	m	12,7	0,00127	12,7	0,00127	12,7	0,00127
26	Protensão	0,00005	m	12,7	0,000635	12,7	0,000635	12,7	0,000635
27	Protensão	0,00002	m	12,7	0,000254	12,7	0,000254	12,7	0,000254
28	Protensão	0,00001	m	12,7	0,000127	12,7	0,000127	12,7	0,000127
29	Protensão	0,000005	m	12,7	0,0000635	12,7	0,0000635	12,7	0,0000635
30	Protensão	0,000002	m	12,7	0,0000254	12,7	0,0000254	12,7	0,0000254
31	Protensão	0,000001	m	12,7	0,0000127	12,7	0,0000127	12,7	0,0000127
32	Protensão	0,0000005	m	12,7	0,00000635	12,7	0,00000635	12,7	0,00000635
33	Protensão	0,0000002	m	12,7	0,00000254	12,7	0,00000254	12,7	0,00000254
34	Protensão	0,0000001	m	12,7	0,00000127	12,7	0,00000127	12,7	0,00000127
35	Protensão	0,00000005	m	12,7	0,000000635	12,7	0,000000635	12,7	0,000000635
36	Protensão	0,00000002	m	12,7	0,000000254	12,7	0,000000254	12,7	0,000000254
37	Protensão	0,00000001	m	12,7	0,000000127	12,7	0,000000127	12,7	0,000000127
38	Protensão	0,000000005	m	12,7	0,0000000635	12,7	0,0000000635	12,7	0,0000000635
39	Protensão	0,000000002	m	12,7	0,0000000254	12,7	0,0000000254	12,7	0,0000000254
40	Protensão	0,000000001	m	12,7	0,0000000127	12,7	0,0000000127	12,7	0,0000000127
41	Protensão	0,0000000005	m	12,7	0,00000000635	12,7	0,00000000635	12,7	0,00000000635
42	Protensão	0,0000000002	m	12,7	0,00000000254	12,7	0,00000000254	12,7	0,00000000254
43	Protensão	0,0000000001	m	12,7	0,00000000127	12,7	0,00000000127	12,7	0,00000000127
44	Protensão	0,00000000005	m	12,7	0,000000000635	12,7	0,000000000635	12,7	0,000000000635
45	Protensão	0,00000000002	m	12,7	0,000000000254	12,7	0,000000000254	12,7	0,000000000254
46	Protensão	0,00000000001	m	12,7	0,000000000127	12,7	0,000000000127	12,7	0,000000000127
47	Protensão	0,000000000005	m	12,7	0,0000000000635	12,7	0,0000000000635	12,7	0,0000000000635
48	Protensão	0,000000000002	m	12,7	0,0000000000254	12,7	0,0000000000254	12,7	0,0000000000254
49	Protensão	0,000000000001	m	12,7	0,0000000000127	12,7	0,0000000000127	12,7	0,0000000000127
50	Protensão	0,0000000000005	m	12,7	0,00000000000635	12,7	0,00000000000635	12,7	0,00000000000635
51	Protensão	0,0000000000002	m	12,7	0,00000000000254	12,7	0,00000000000254	12,7	0,00000000000254
52	Protensão	0,0000000000001	m	12,7	0,00000000000127	12,7	0,00000000000127	12,7	0,00000000000127
53	Protensão	0,00000000000005	m	12,7	0,000000000000635	12,7	0,000000000000635	12,7	0,000000000000635
54	Protensão	0,00000000000002	m	12,7	0,000000000000254	12,7	0,000000000000254	12,7	0,000000000000254
55	Protensão	0,00000000000001	m	12,7	0,000000000000127	12,7	0,000000000000127	12,7	0,000000000000127
56	Protensão	0,000000000000005	m	12,7	0,0000000000000635	12,7	0,0000000000000635	12,7	0,0000000000000635
57	Protensão	0,000000000000002	m	12,7	0,0000000000000254	12,7	0,0000000000000254	12,7	0,0000000000000254
58	Protensão	0,000000000000001	m	12,7	0,0000000000000127	12,7	0,0000000000000127	12,7	0,0000000000000127
59	Protensão	0,0000000000000005	m	12,7	0,00000000000000635	12,7	0,00000000000000635	12,7	0,00000000000000635
60	Protensão	0,0000000000000002	m	12,7	0,00000000000000254	12,7	0,00000000000000254	12,7	0,00000000000000254
61	Protensão	0,0000000000000001	m	12,7	0,00000000000000127	12,7	0,00000000000000127	12,7	0,00000000000000127
62	Protensão	0,00000000000000005	m	12,7	0,000000000000000635	12,7	0,000000000000000635	12,7	0,000000000000000635
63	Protensão	0,00000000000000002	m	12,7	0,000000000000000254	12,7	0,000000000000000254	12,7	0,000000000000000254
64	Protensão	0,00000000000000001	m	12,7	0,000000000000000127	12,7	0,000000000000000127	12,7	0,000000000000000127
65	Protensão	0,000000000000000005							

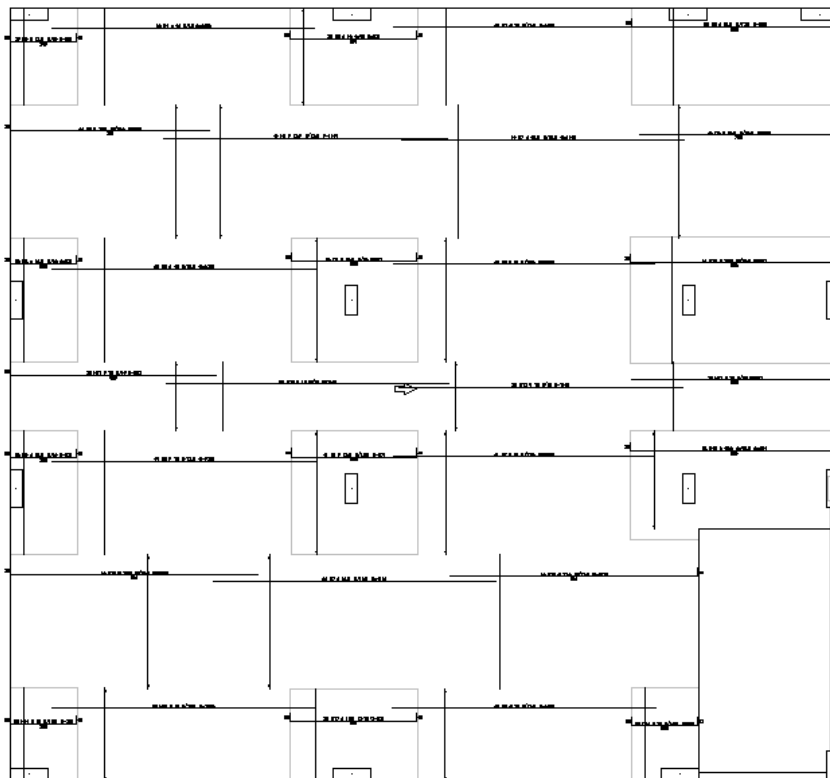




### PROJETO C3 – FL. 3/4

TÉRREO – Armadura positiva horizontal

TX

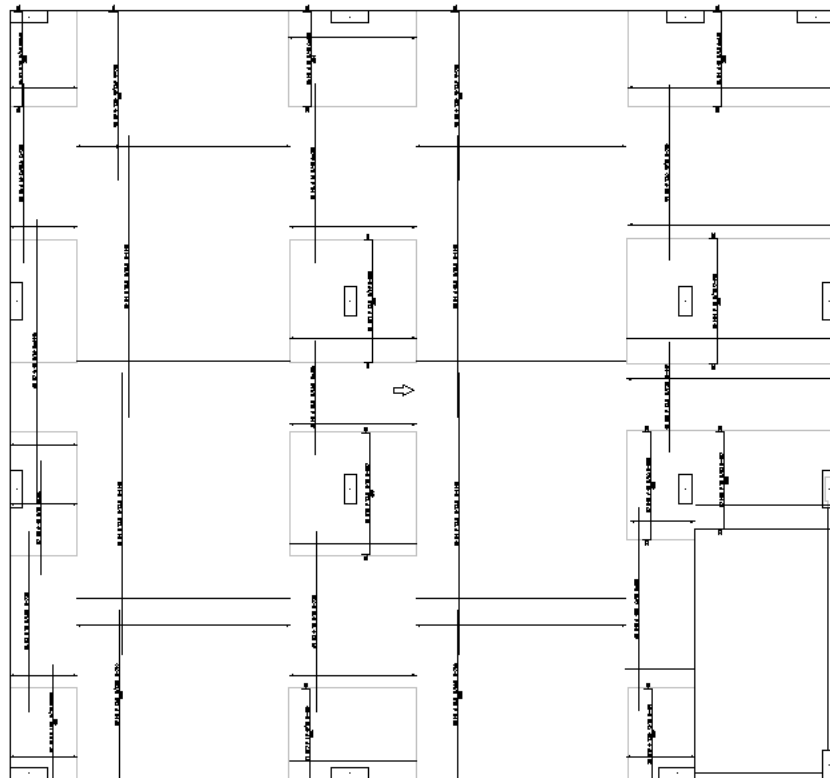


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

### PROJETO C3 – FL. 4/4

TÉRREO – Armadura positiva vertical

TX

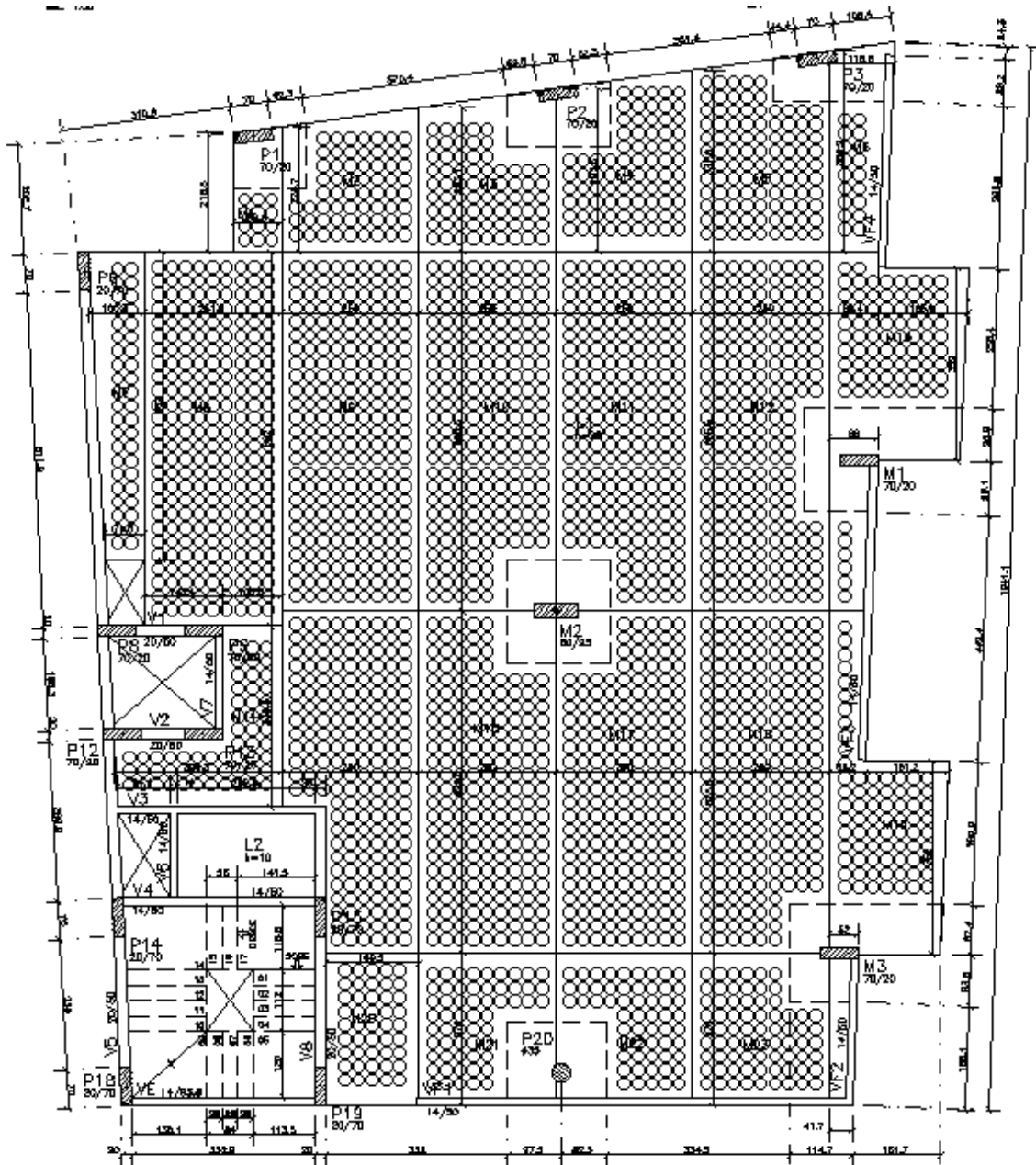


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

## ANEXO C

Neste anexo são apresentados detalhes do projeto real em laje *BubbleDeck* cedido gentilmente pelo escritório de cálculo MD Engenheiros Associados.

### PLANTA DE FORMA





DETALHE DE ARMADURA COMPLEMENTAR

