



## Dimensionamento de lajes aligeiradas betonadas "in situ"

JOEL MARTINS RIBEIRO

Outubro de 2015

# DIMENSIONAMENTO DE LAJES ALIGEIRADAS

## BETONADAS *IN SITU*

### Relatório de Estágio

Mestrado em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas

Joel Martins Ribeiro, n.º mecanográfico: 1100241

- Orientador: Eng.º Paulo Guedes
- Supervisor: Eng.º Carlos Ribeiro

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em

Engenharia Civil — Ramo de Estruturas



# ÍNDICE GERAL

Índice Geral .....	i
Resumo .....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos.....	vii
Índice de Texto .....	ix
Índice de Figuras.....	xvii
Índice de Tabelas .....	xxv
1 Introdução .....	1
2 A empresa e o sector da construção.....	5
3 Soluções de lajes integrantes na análise comparativa .....	11
4 Aplicação do Eurocódigo 2 no dimensionamento de lajes .....	19
5 Caso de estudo I.....	47
6 Caso de estudo II.....	87
7 Caso de estudo III.....	117

*ÍNDICE GERAL*

8	Conclusões .....	139
	Bibliografia .....	143
	Anexos .....	145

## RESUMO

A conjuntura económica da construção não se encontra numa fase de prosperidade, existindo a necessidade de criar soluções construtivas que permitam a redução de custos dos materiais a nível de obra.

As lajes de betão armado, devido à sua grande área de implantação, possuem uma parcela importante no orçamento final de qualquer obra de edifícios correntes. Sabendo das possibilidades de aligeiramento de lajes, torna-se necessária a realização de um estudo pormenorizado e comparativo entre soluções de aligeiramento.

O desenvolvimento deste relatório reflete todo o trabalho efetuado durante a realização de um estágio curricular desenvolvido na empresa FercaNorte – Estruturas, Lajes e Cofragens, Lda. e foca-se num dimensionamento e estudo comparativo de soluções de lajes fungiformes aligeiradas, aplicadas a dois casos de estudo e também num dimensionamento e estudo comparativo de soluções de lajes aligeiradas unidireccionais mas apenas aplicadas a um caso de estudo.

No primeiro caso de estudo, laje fungiforme com um vão de 6 metros nas duas direções, são dimensionadas e comparadas quatro soluções: laje fungiforme maciça; laje fungiforme aligeirada com blocos elipsoides perdidos dispostos de forma ortogonal e envolvidos totalmente por betão; laje fungiforme aligeirada com blocos elipsoides perdidos dispostos em formato de favo de mel e envolvidos totalmente por betão; e laje fungiforme nervurada com moldes recuperáveis.

## *ABSTRACT*

No segundo caso de estudo, laje fungiforme com um vão de 7,04 metros nas duas direções, são dimensionadas e comparadas cinco soluções: laje fungiforme maciça, laje fungiforme aligeirada com blocos cúbicos perdidos dispostos de forma ortogonal e envolvidos totalmente por betão; laje fungiforme aligeirada, com blocos elipsoides perdidos dispostos de forma ortogonal e envolvidos totalmente por betão; laje fungiforme aligeirada com blocos elipsoides perdidos dispostos em formato de favo de mel e envolvidos totalmente por betão; e laje fungiforme nervurada com moldes recuperáveis.

No terceiro caso de estudo, laje unidirecional com um vão de 8 metros apoiada em vigas com vão de 5 metros, são dimensionadas e comparadas três soluções: laje maciça; laje aligeirada com perfis tubulares com secção transversal reta oval; e laje nervurada com moldes recuperáveis.

No final é apresentada uma estimativa orçamental para cada solução analisada nos três casos de estudo abordados.

**Palavras-chave:** Lajes fungiformes aligeiradas, Lajes unidirecionais aligeiradas.

## ABSTRACT

The economic environment of the building is not in a phase of prosperity, there is a need to create constructive solutions to the reduction of material costs in terms of work.

The slabs of reinforced concrete, because of its large deployment area have an important part in the final budget of any work of current buildings. Knowing the possibilities of removing concrete in slabs, it is necessary to carry out a detailed and comparative study between the possible solutions.

The development of this report reflects all the work done during the course of a traineeship developed in “FercaNorte – Estruturas, Lajes e Cofragens, Lda.” and focuses on a design and comparative study of voided flat slabs solutions, applied to two cases of study and also a dimensioning and comparative study of one-way hollow slab solutions but only applied to a case study.

In the first case study, flat slab with a span equal in both directions of six meters, are sized and compared four solutions: Solid flat slab; voided flat slab with lost ellipsoids blocks arranged in orthogonal way and fully involved in concrete; voided flat slab with lost ellipsoids blocks arranged in a honeycomb shape and fully involved in concrete; and waffle slab with recoverable molds.

## *ABSTRACT*

In the second case study, flat slab with a span equal in both directions of 7.04 meters, are sized and compared five solutions: Solid flat slab, voided flat slab with lost cubic blocks arranged in orthogonal way and fully involved in concrete; voided flat slab, with lost ellipsoids blocks arranged in orthogonal way and fully involved in concrete; voided flat slab with lost ellipsoids blocks arranged in a honeycomb shape and fully involved in concrete; and waffle slab with recoverable molds.

In the third case study, one-way slab with a span of 8 meters supported with beams ranging from 5 meters, are sized and compared three solutions: slab; one-way hollow slab with straight oval cross-section; and one-way ribbed slab with recoverable molds.

A budget estimate for each solution analyzed all three are addressed at the end of study is presented.

**Keywords:** Voided flat slabs, one-way hollow slab.

## AGRADECIMENTOS

Este relatório de estágio representa o culminar do meu percurso académico, que não seria memorável se não fossem as pessoas que me rodearam ao longo do mesmo e o tornou bastante especial. Foram sem dúvida cinco anos fantásticos.

Por isso, queria agradecer aos meus pais, pelo apoio incansável e a ajuda que sempre me disponibilizaram, sendo crucial, tanto à conclusão da licenciatura como à conclusão do mestrado.

Ao meu irmão, pelo acompanhamento, ajuda, amizade e disponibilidade que sempre dispôs. Foram curtos aqueles três primeiros anos, mas foram de sempre os que nunca me irei esquecer.

À minha namorada, Rita Cerqueira, pelo companheirismo, dedicação e toda a paciência que teve ao longo deste meu percurso académico, mas principalmente ao longo deste estágio.

Por fim, queria também agradecer ao Engenheiro Paulo Guedes por todo o apoio prestado ao longo da realização do estágio e respetivo relatório. Pelos mesmos motivos, e pelo acolhimento na empresa, queria também agradecer ao Engenheiro Carlos Ribeiro por tornar o estágio possível.



# ÍNDICE DE TEXTO

Índice Geral .....	i
Resumo .....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos.....	vii
Índice de Texto.....	ix
Índice de Figuras.....	xvii
Índice de Tabelas .....	xxv
1 Introdução .....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Definição de lajes aligeiradas e principais vantagens.....	2
1.3 Objetivos e Organização da Dissertação .....	3
2 A empresa e o setor da construção.....	5
2.1 Apresentação da empresa .....	5
2.2 Evolução das soluções de aligeiramento.....	7

3	Soluções de lajes integrantes na análise comparativa .....	11
3.1	Soluções preconizadas pela FercaNorte.....	11
3.1.1	Moldes Ferca .....	11
3.1.2	Lajes aligeiradas com blocos Nautilus .....	12
3.2	Soluções a desenvolver no âmbito do estágio .....	13
3.2.1	Lajes aligeiradas com blocos Sphereplus – Ortogonal .....	13
3.2.2	Lajes aligeiradas com blocos Sphereplus – Favo de mel.....	15
3.2.3	Lajes tubulares unidireccionais .....	16
4	Aplicação do Eurocódigo 2 no dimensionamento de lajes .....	19
4.1	Estados limites últimos.....	19
4.1.1	Estado limite último – Rotura por flexão.....	19
4.1.1.1	Cálculo da armadura de flexão .....	19
4.1.1.2	Disposições construtivas para armaduras de flexão .....	22
4.1.2	Estado limite último – Rotura por esforço transversal .....	24
4.1.2.1	Cálculo da armadura de esforço transversal.....	25
4.1.2.2	Disposições construtivas para armaduras de esforço transversal .....	28
4.1.3	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	30
4.1.3.1	Cálculo da armadura de punçoamento.....	31
4.1.3.2	Disposições construtivas para armaduras de punçoamento .....	34
4.2	Estados limites de utilização.....	36

4.2.1	Estado limite de utilização – Controlo da fendilhação.....	36
4.2.1.1	Cálculo de armaduras mínimas.....	36
4.2.1.2	Controlo da fendilhação sem cálculo direto.....	38
4.2.2	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	39
4.2.2.1	Casos em que o cálculo poderá ser dispensado.....	39
4.2.2.2	Verificação das flechas por meio de cálculo.....	43
4.2.2.2.1	Método dos coeficientes globais .....	44
4.2.2.2.2	Método simplificado .....	46
5	Caso de estudo I.....	47
5.1	Modelação de uma laje fungiforme maciça.....	50
5.1.1	Caracterização da secção transversal reta .....	50
5.1.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	50
5.1.3	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	53
5.1.4	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	54
5.2	Modelação de uma laje fungiforme Sphereplus – ortogonal.....	56
5.2.1	Caracterização da secção transversal reta .....	56
5.2.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	62
5.2.3	Estado limite último – Rotura por esforço transversal .....	64
5.2.4	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	67
5.2.5	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	69

5.3	Modelação de uma laje fungiforme Sphereplus – favo de mel.....	71
5.3.1	Caracterização da secção transversal reta .....	71
5.3.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	74
5.3.3	Estado limite último – Rotura por esforço transversal .....	76
5.3.4	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	78
5.3.5	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	79
5.4	Modelação de uma laje fungiforme Ferca.....	80
5.4.1	Caracterização da secção transversal reta .....	80
5.4.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	82
5.4.3	Estado limite último – Rotura por esforço transversal .....	83
5.4.4	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	84
5.4.5	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	85
5.5	Medições e análise de custos.....	85
6	Caso de estudo II.....	87
6.1	Modelação de uma laje fungiforme maciça.....	88
6.1.1	Caracterização da secção transversal reta .....	88
6.1.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	89
6.1.3	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	90
6.1.4	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	90
6.2	Modelação de uma laje fungiforme Nautilus .....	91

6.2.1	Caracterização da secção transversal reta .....	92
6.2.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	92
6.2.3	Estado limite último – Rotura por esforço transverso .....	93
6.2.4	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	95
6.2.5	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	96
6.3	Modelação de uma laje fungiforme Sphereplus – ortogonal.....	97
6.3.1	Caracterização da secção transversal reta .....	98
6.3.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	98
6.3.3	Estado limite último – Rotura por esforço transverso .....	99
6.3.4	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	101
6.3.5	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	102
6.4	Modelação de uma laje fungiforme Sphereplus – favo de mel.....	103
6.4.1	Caracterização da secção transversal reta .....	104
6.4.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	104
6.4.3	Estado limite último – Rotura por esforço transverso .....	105
6.4.4	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	107
6.4.5	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	108
6.5	Modelação de uma laje fungiforme Ferca.....	109
6.5.1	Caracterização da secção transversal reta .....	110
6.5.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	110

6.5.3	Estado limite último – Rotura por esforço transverso .....	111
6.5.4	Estado limite último – Rotura por punçoamento .....	112
6.5.5	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	113
6.6	Medições e análise de custos.....	114
7	Caso de estudo III.....	117
7.1	Modelação de uma laje unidirecional maciça .....	121
7.1.1	Caracterização da secção transversal reta .....	121
7.1.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	121
7.1.3	Estado limite último – Rotura por esforço transverso .....	123
7.1.4	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	124
7.2	Modelação de uma laje unidirecional tubular.....	126
7.2.1	Caracterização da secção transversal reta .....	126
7.2.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	128
7.2.3	Estado limite último – Rotura por esforço transverso .....	129
7.2.4	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	131
7.3	Modelação de uma laje unidirecional Ferca .....	132
7.3.1	Caracterização da secção transversal reta .....	133
7.3.2	Estado limite último – Rotura por flexão.....	133
7.3.3	Estado limite último – Rotura por esforço transverso .....	135
7.3.4	Estado limite de utilização – Controlo da deformação.....	136

7.4	Medições e análise de custos.....	137
8	Conclusões.....	139
	Bibliografia.....	143
	Anexos.....	145
	Anexo I: Catálogo FercaNorte.....	147
	Anexo II: Caso de estudo I – Mapa de quantidades.....	151
	Anexo III: Caso de estudo II – Mapa de quantidades.....	155
	Anexo IV: Caso de estudo III – Mapa de quantidades.....	159



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Portfólio FercaNorte [4] .....	6
Figura 2.2 - Portfólio FercaNorte [4] .....	7
Figura 2.3 – Solução de aligeiramento - Sistema Bubbledeck. ....	8
Figura 2.4 – Solução de aligeiramento - Sistema U-Boot [5] .....	8
Figura 2.5 – Solução de aligeiramento - Sistema AirDeck [6].....	9
Figura 2.6 – Solução de aligeiramento - Sistema Cobiax .....	9
Figura 3.1 – Moldes Ferca - Laje nervurada bidirecional betonada <i>in situ</i> [3] .....	12
Figura 3.2 – Moldes Ferca - Laje nervurada unidirecional betonada <i>in situ</i> [3].....	12
Figura 3.3 – Soluções de aligeiramento Ferca - Sistema Nautilus [3] .....	13
Figura 3.4 – Solução de aligeiramento - Sphereplus – Corte tipo.....	14
Figura 3.5 – Solução de aligeiramento – Sphereplus - Disposição ortogonal.....	15
Figura 3.6 – Solução de aligeiramento – Sphereplus - Disposição Favo de mel .....	16
Figura 3.7 – Solução de aligeiramento - Laje tubular unidirecional – Corte tipo .....	17

Figura 3.8 – -Solução de aligeiramento – Laje tubular unidirecional - Disposição em planta	17
Figura 4.1 - Distribuição retangular de tensões [1] .....	20
Figura 4.2 - Diagrama de tensões-extensões, idealizado e de cálculo, do aço das armaduras para betão armado (tracionado ou comprimido) [1] .....	22
Figura 4.3 - Modelo de treliça e notações para elementos com armaduras de esforço transversal [1] .....	27
Figura 4.4 - Valores aproximados de $\beta$ [1].....	31
Figura 4.5 - Perímetro de controlo para pilares interiores [1].....	34
Figura 4.6 – Disposições construtivas para armaduras de punçoamento [1] .....	35
Figura 4.7 - Método para a determinação do coeficiente de fluência, $\varphi_{\infty,t0}$ para betão em condições ambientais normais [1] .....	45
Figura 5.1 – Caso de estudo I – Planta estrutural .....	47
Figura 5.2 – Caso de estudo I - Localização dos esforços a analisar .....	48
Figura 5.3 - Caso de estudo I - Esquema de montagem de armaduras na face superior - Direção X = Y.....	49
Figura 5.4 - Caso de estudo I - Esquema de montagem de armaduras na face inferior - Direção X = Y.....	49
Figura 5.5 – Caso de estudo I – Laje fungiforme maciça – Mapa de momentos fletores $M_{xx}$ negativos.....	51

Figura 5.6 – Caso de estudo I – Laje fungiforme maciça – Mapa de momentos fletores $M_{xx}$ positivos .....	51
Figura 5.7 – Caso de estudo I – Laje fungiforme maciça – Análise dos esforços de corte na zona dos pilares.....	53
Figura 5.8 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Implantação dos blocos de aligeiramento.....	56
Figura 5.9 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Secção equivalente (Robot).....	59
Figura 5.10 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Modelação da laje sem zonas maciças .....	60
Figura 5.11 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Definição da solução de laje com recurso à folha de cálculo automático elaborada.....	61
Figura 5.12 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Quantificação das áreas de armaduras de flexão com recurso à folha de cálculo automático elaborada.....	63
Figura 5.13 - Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Cálculo das características resistentes relativas ao esforço transversal com recurso à folha de cálculo automático elaborada.....	64
Figura 5.14 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Mapa dos esforços de corte .....	65

Figura 5.15 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Disposição da armadura de esforço transverso.....	66
Figura 5.16 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Quantificação das áreas de armaduras de punçoamento com recurso à folha de cálculo automático elaborada .....	68
Figura 5.17 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Controlo da deformação pelo cálculo das flechas a longo prazo com recurso à folha de cálculo elaborada .....	70
Figura 5.18 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Implantação dos blocos de aligeiramento.....	71
Figura 5.19 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Modelação no Robot com recurso a vigas .....	72
Figura 5.20 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Modelação no Robot com recurso a vigas .....	72
Figura 5.21 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Modelação no Robot com recurso a um painel de laje .....	73
Figura 5.22 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Modelação no Robot com recurso a um painel de laje .....	73
Figura 5.23 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Comparação entre modelações estruturais – Vigas VS Painel.....	74

Figura 5.24 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Disposição da armadura de esforço transverso.....	77
Figura 5.25 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Implantação dos moldes Ferca....	80
Figura 5.26 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Modelação Robot para verificação da deformação elástica.....	81
Figura 5.27 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Secção equivalente (Robot) .....	81
Figura 5.28 – Caso de estudo I – Preço de laje/m <sup>2</sup> em função do custo unitário do bloco.....	86
Figura 6.1 – Caso de estudo II – Planta estrutural.....	87
Figura 6.2 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Implantação dos blocos de aligeiramento .....	91
Figura 6.3 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Secção equivalente (Robot) ....	92
Figura 6.4 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Disposição da armadura de esforço transverso .....	94
Figura 6.5 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Implantação dos blocos de aligeiramento.....	97
Figura 6.6 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Secção equivalente (Robot).....	98
Figura 6.7 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Disposição da armadura de esforço transverso.....	100

Figura 6.8 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Implantação dos blocos de aligeiramento.....	103
Figura 6.9 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Secção equivalente (Robot).....	104
Figura 6.10 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Disposição da armadura de esforço transverso.....	106
Figura 6.11 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Implantação dos moldes Ferca..	109
Figura 6.12 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Secção equivalente (Robot) .....	110
Figura 6.13 – Caso de estudo II – Preço de laje/m <sup>2</sup> em função do custo unitário do bloco ..	115
Figura 7.1 – Caso de estudo III – Planta estrutural .....	117
Figura 7.2 – Caso de estudo III - Localização dos momentos fletores a analisar na laje.....	118
Figura 7.3 – Caso de estudo III - Localização dos esforços de corte a analisar na laje.....	118
Figura 7.4 – Caso de estudo III - Localização dos momentos fletores a analisar na viga.....	119
Figura 7.5 – Caso de estudo III - Localização dos esforços de corte a analisar na viga.....	119
Figura 7.6 - Caso de estudo III - Esquema de montagem de armaduras – Laje.....	120
Figura 7.7 - Caso de estudo III - Esquema de montagem de armaduras – Banda .....	120
Figura 7.8 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Implantação dos blocos de aligeiramento .....	126

Figura 7.9 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Caracterização da secção transversal reta.....127

Figura 7.10 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Modelação da laje no Robot .....127

Figura 7.11 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Implantação dos moldes Ferca .....132

Figura 7.12 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Caracterização da secção transversal reta – Secção equivalente (Robot).....133

Figura 7.13 – Caso de estudo III – Preço de laje/m<sup>2</sup> em função do custo unitário do bloco.138



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.2 – Gama de perfis tubulares.....	17
Tabela 4.1 - Coeficiente $k$ , que tem em conta o sistema estrutural [7].....	41
Tabela 4.2 - Valores da relação $l/d$ [7].....	42
Tabela 4.3 – Fator de correção $\eta$ [8].....	46
Tabela 5.1 – Caso de estudo I – Laje fungiforme e maciça – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão .....	52
Tabela 5.2 – Caso de estudo I – Laje fungiforme maciça – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar) .....	54
Tabela 5.3 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Estimativa das deformações elásticas da laje fungiforme Sphereplus com base nas deformações da laje fungiforme maciça.....	58
Tabela 5.4 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Comparação entre deformações teóricas com as obtidas através do programa Robot. ....	60
Tabela 5.5 - Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão.....	62

Tabela 5.6 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso.....	66
Tabela 5.7 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar) .....	69
Tabela 5.8 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão .....	75
Tabela 5.9 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso.....	77
Tabela 5.10 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar) .....	78
Tabela 5.11 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão .....	82
Tabela 5.12 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso.....	83
Tabela 5.13 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar) .....	84
Tabela 6.1 – Caso de estudo II – Laje fungiforme e maciça – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão .....	89

Tabela 6.2 – Caso de estudo II – Laje fungiforme maciça – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar) .....	90
Tabela 6.3 - Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão .....	93
Tabela 6.4 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transversal .....	94
Tabela 6.5 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar) .....	95
Tabela 6.6 - Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão.....	99
Tabela 6.7 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transversal.....	100
Tabela 6.8 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar) .....	101
Tabela 6.9 - Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão .....	105
Tabela 6.10 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transversal .....	106

Tabela 6.11 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar) .....	107
Tabela 6.12 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão .....	111
Tabela 6.13 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso .....	112
Tabela 6.14 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar) .....	113
Tabela 7.1 – Caso de estudo III – Laje unidirecional maciça – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da laje .....	122
Tabela 7.2 – Caso de estudo III – Laje unidirecional maciça – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da banda .....	122
Tabela 7.3 – Caso de estudo III – Laje unidirecional maciça – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da laje .....	124
Tabela 7.4 – Caso de estudo III – Laje unidirecional maciça – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da banda .....	124
Tabela 7.5 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da laje .....	128

Tabela 7.6 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da banda.....	129
Tabela 7.7 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da laje.....	130
Tabela 7.8 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da laje.....	130
Tabela 7.9 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da laje.....	134
Tabela 7.10 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da banda.....	134
Tabela 7.11 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da laje.....	135
Tabela 7.12 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da laje.....	136



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No término do ciclo de estudos do Mestrado em Engenharia Civil, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, foi desenvolvido um estágio curricular com duração aproximada de 6 meses, que culmina com o presente relatório cujo objetivo é expor todo o trabalho efetuado durante a realização do mesmo.

A empresa acolhedora do estágio curricular, FercaNorte - Estruturas, Lajes e Cofragens, Lda., apresenta interesse no desenvolvimento de uma solução de lajes fungiformes aligeiradas, de forma a conseguir fazer face às empresas concorrentes no mercado em que a própria mantém o seu maior volume de obras.

Apresentado um conjunto de soluções construtivas para lajes fungiformes, como por exemplo, os moldes Ferca, que são moldes recuperáveis utilizados na construção de lajes fungiformes nervuradas, a FercaNorte também dispõe de uma solução construtiva de lajes fungiformes aligeiradas com blocos perdidos, envolvidos totalmente por betão, semelhante às soluções que serão desenvolvidas.

No final, serão comparadas, conforme os casos de estudo analisados, as soluções preconizadas pela FercaNorte com as soluções que poderão integrar a gama de produtos da empresa.

O estágio desenvolvido teve como supervisor o Engenheiro Carlos Ribeiro, por parte da empresa FercaNorte, e como orientador o Engenheiro Paulo Guedes, por parte do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

## 1.2 DEFINIÇÃO DE LAJES ALIGEIRADAS E PRINCIPAIS VANTAGENS

As lajes aligeiradas em estudo são lajes betonadas *in situ* contendo no seu interior blocos de aligeiramento de forma a constituir vazios nas mesmas. Os blocos encontram-se totalmente embebidos, permitindo uma distribuição de armaduras de flexão semelhante às lajes maciças com a particularidade de existir uma armadura vertical, colocada entre blocos, melhorando a resistência do conjunto.

Uma das maiores vantagens deste tipo de solução é a redução do volume de betão utilizado em obra, proporcionando uma redução significativa em termos de custos, assim como a evidente redução de peso próprio da laje e conseqüentemente a redução de esforço axial dos pilares que a suportam. Comparativamente ao sistema de lajes nervuradas betonadas *in situ*, este tipo de sistema permite a redução da altura total da peça e um rendimento superior na colocação de armaduras nos painéis de laje.

Em relação ao impacto ambiental associado à produção e transporte destes blocos, estes conseguem reduzi-lo quando comparado com a fabricação do betão. A possibilidade de estes blocos serem produzidos em metades e montados posteriormente em obra reduz, significativamente, todo o volume de transporte de material.

### 1.3 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Inicialmente este relatório começa por descrever, de forma sucinta, a empresa e os trabalhos realizados neste âmbito do desenvolvimento de soluções de laje economicamente viáveis, preenchendo assim o capítulo 2, assim como as soluções que já fazem parte do seu catálogo e respetivos projetos futuros, como as lajes que serão desenvolvidas ao longo do relatório, terminando o capítulo 3.

O dimensionamento deste tipo de soluções, descritos no capítulo 4, deverá respeitar todos os critérios propostos pelo Eurocódigo 2 – NP EN1992-1-1. Projeto de Estruturas de Betão (Eurocódigo 2) [1]. De acordo com o Eurocódigo 2 deverão ser verificados todos os estados limite respetivos ao dimensionamento de lajes, fazendo verificação aos três estados limite últimos, rotura por flexão, rotura por esforço transversal e por ocorrência de punçoamento, assim como também deverão ser verificados os estados limite de utilização nos quais se limita as tensões das peças e é efetuado um controlo da fendilhação e da deformação.

De forma a viabilizar o estudo, serão abordados três casos de estudo, capítulo 5, 6 e 7, e desenvolvida, para cada uma das soluções integrantes dos casos de estudo, uma modelação tridimensional com recurso ao programa de cálculo automático Robot Structural Analysis da Autodesk (Robot) [2].

No final, será elaborada uma estimativa orçamental para cada solução construtiva aplicada aos diferentes casos de estudo e comparadas entre si, permitindo concluir acerca da viabilidade económica das soluções dimensionadas, dando origem aos capítulos 8 e 9, onde se encontra a discussão de resultados e respetiva conclusão do relatório.



## 2 A EMPRESA E O SETOR DA CONSTRUÇÃO

### 2.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

“A FercaNorte - Estruturas, Lajes e Cofragens, Lda. é uma empresa de Engenharia que tem dedicado todos os seus esforços baseando-se em conceitos estruturais que permitem a realização de soluções de lajes, recorrendo a técnicas e produtos, de modo a satisfazer os pressupostos de qualidade e funcionalidades estruturais e arquitetónicas, com custos finais vantajosos e competitivos relativamente a outras soluções estruturais.

Nesse sentido, o início da sua atividade foi desde logo focado na introdução de soluções de lajes fungiformes, sem vigas, que permitiram a combinação dos fatores essenciais e decisivos para a aceitação por parte de projetistas, arquitetos, empreiteiros e donos de obra das soluções preconizadas.

Essas soluções foram concretizadas inicialmente com recurso a blocos de aligeiramento leve, fungiblocos, passando de seguida para o aligeiramento com moldes plásticos recuperáveis, atingindo dessa forma os requisitos de simplicidade e rapidez de execução de cofragens e colocação de armaduras, em malhas estruturais que permitiram a utilização de espaços polivalentes para estacionamento, zonas comerciais e habitacionais.

Complementarmente, a introdução e promoção do pré-esforço em edifícios, desde 1982, constituindo soluções em betão armado pré-esforçado, associado às mais diversas soluções

estruturais de lajes, veio alargar o seu campo de atuação e intervenção, permitindo assim a satisfação de programas arquitetónicos com exigências estruturais ainda mais elevadas, e garantindo, paralelamente, a boa funcionalidade dessas estruturas de acordo com as exigências regulamentares.” [3]

De seguida apresenta-se o portfólio das obras, bastante conhecidas pela população em geral, em que a empresa prestou os seus serviços a nível de pré-esforço ou em soluções construtivas para painéis de laje.

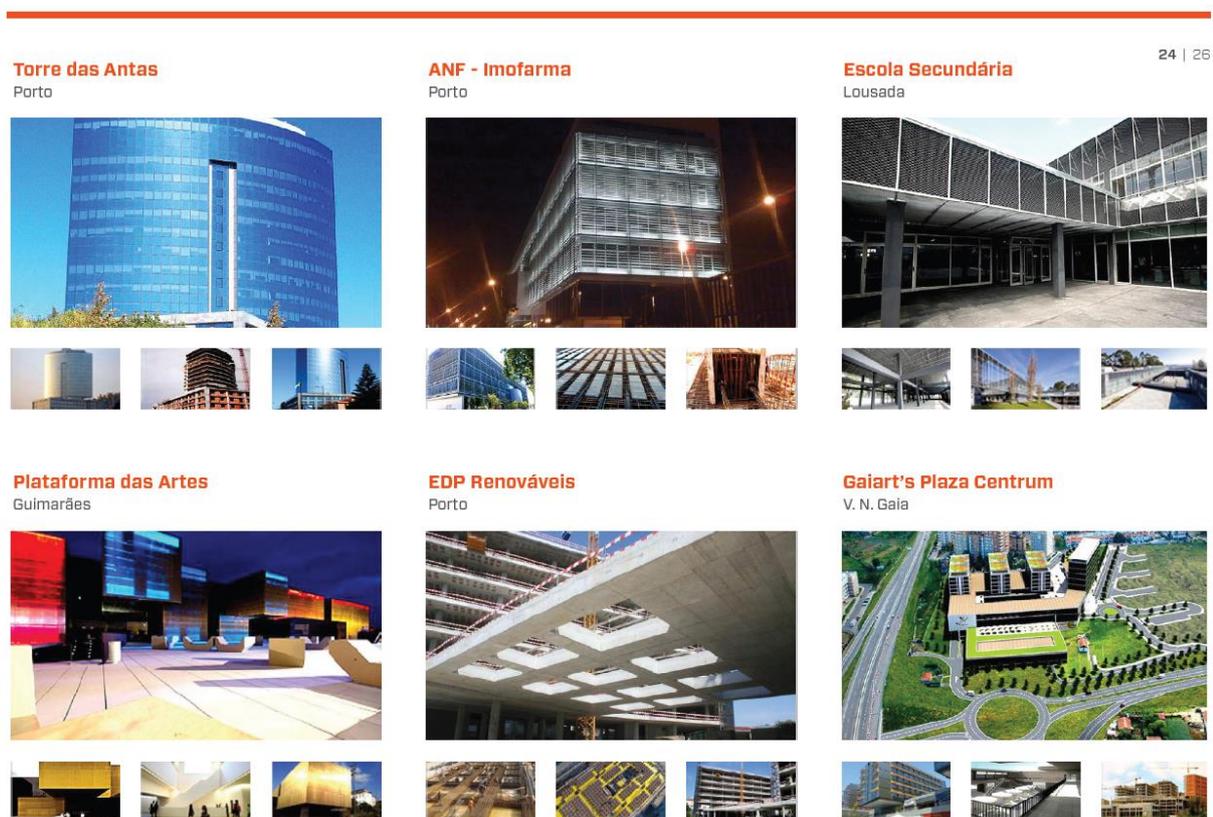


Figura 2.1 - Portfólio FercaNorte [4]

**Europa - Ar Lindo**

Celeirós, Braga

**Moradia Sr. Nuno Afonso**

Monção

**Biblioteca Agostinho Neto**

Luanda | Angola

**C.C. Dolce Vita**

Porto

**Escola Tec. Agro-Alimentar**

Malange | Angola

**IURD**

Luanda | Angola



Figura 2.2 - Portfólio FercaNorte [4]

## 2.2 EVOLUÇÃO DAS SOLUÇÕES DE ALIGEIRAMENTO

A primeira solução de laje com os aligeiramentos totalmente embebidos por betão surgiu em 1950. Armada em apenas uma direção e apoiada em vigas, continha no seu interior tubos cilíndricos que se estendiam perpendicularmente aos apoios da laje.

Em meados de 1990 surgiu o sistema BubbleDeck, criado por Jorgen Breuning, caracterizando-se pela introdução de elementos vazios no interior de uma laje fungiforme. Os elementos de aligeiramento possuíam uma forma esférica, sendo dispostos ortogonalmente, em painéis pré-fabricados englobando já a armadura de flexão colocada na face inferior, e posteriormente transportados para a obra. Após a sua colocação sobre os pilares da estrutura, era efetuada

uma segunda betonagem, envolvendo totalmente os aligeiramentos. Este sistema encontra-se ilustrado na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Solução de aligeiramento - Sistema Bubbledeck.

Em 2001, foi apresentada ao mercado uma solução, projetada e patenteada pelo engenheiro Italiano, Roberto Il Grande, denominada por sistema U-Boot. Com o objetivo do sistema BubbleDeck, mas com blocos de aligeiramento cúbicos e exclusivamente montado em obra, permitiam a redução de custos de transporte, pois a fabricação de blocos era efetuada em metades, e a redução na formação de dióxido de carbono na produção dos blocos. Na Figura 2.4, encontra-se ilustrado o sistema U-Boot.



Figura 2.4 – Solução de aligeiramento - Sistema U-Boot [5]

Em 2003, foi patenteado o sistema AirDeck, sistema igual ao BubbleDeck, diferindo apenas no formato geométrico dos blocos, tendo estes uma forma cúbica. Na Figura 2.5, está ilustrado o sistema AirDeck.



Figura 2.5 – Solução de aligeiramento - Sistema AirDeck [6]

Em 2004, na Suíça, surgiu o sistema Cobiax, com metodologia igual ao sistema U-Boot, mas com os blocos de aligeiramento em formato elipsoide, possuindo exatamente as mesmas vantagens. Em Portugal este sistema é representado pela empresa Ferca, empresa que também disponibiliza os mesmos produtos que a FercaNorte e no mercado internacional são concorrentes diretos. Na Figura 2.6, encontra-se ilustrado o sistema Cobiax.

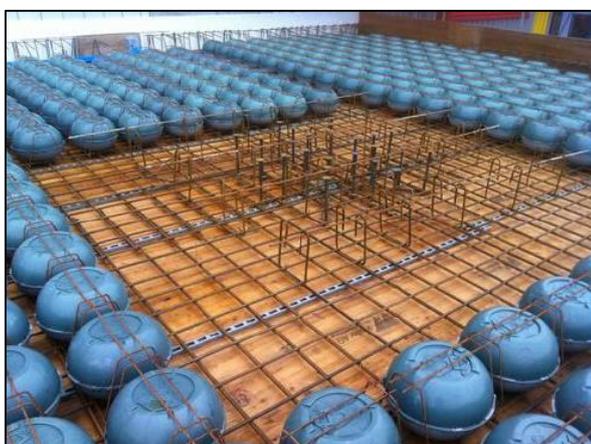


Figura 2.6 – Solução de aligeiramento - Sistema Cobiax



## **3 SOLUÇÕES DE LAJES INTEGRANTES NA ANÁLISE COMPARATIVA**

### **3.1 SOLUÇÕES PRECONIZADAS PELA FERCA NORTE**

#### **3.1.1 Moldes Ferca**

“O sistema de Moldes Ferca, permitindo a execução de lajes fungiformes nervuradas, é uma referência no que concerne à execução de lajes. Criando malhas de nervuras bidirecionais ou unidirecionais, são extremamente eficazes na redução de custos de execução de lajes, não só pela diminuição de consumos de betão e aço mas também pela rotatividade do sistema, que permite reduzir os custos de material e mão-de-obra associados à cofragem.” [3]

No anexo I, encontra-se o catálogo da FercaNorte onde estão apresentadas as características geométricas dos moldes disponibilizados pela empresa e também um conjunto de soluções para aplicação dos moldes em lajes fungiformes e lajes unidirecionais apoiadas em vigas.



Figura 3.1 – Moldes Ferca - Laje nervurada bidirecional betonada *in situ* [3]



Figura 3.2 – Moldes Ferca - Laje nervurada unidirecional betonada *in situ* [3]

### 3.1.2 Lajes aligeiradas com blocos Nautilus

Com o mesmo princípio do sistema U-Boot, diferindo ligeiramente na geometria dos moldes, o sistema Nautilus apresenta uma gama de moldes com alturas conjugadas que variam desde os 16 cm até aos 48 cm.

“O sistema Nautilus consiste numa cofragem modular perdida, em polipropileno reciclado (PP), estudada para obtenção de elevado aligeiramento de lajes.

A aplicação de blocos Nautilus origina uma laje com lâmina inferior e superior interligadas por uma malha ortogonal de nervuras, configurando uma secção com forma em "I".

Graças à elevada inércia da laje assim constituída (aproximadamente 80% da inércia de uma laje maciça de espessura equivalente) esta opção permite a obtenção de soluções de lajes economicamente vantajosas.

O sistema Nautilus, é prático, fácil, e de rápida colocação em obra. Apresenta uma estabilidade própria que permite a execução de todas as tarefas de colocação das armaduras e das betonagens sem dificuldades ou instabilidades.”[3]



Figura 3.3 – Soluções de aligeiramento Ferca - Sistema Nautilus [3]

## 3.2 SOLUÇÕES A DESENVOLVER NO ÂMBITO DO ESTÁGIO

### 3.2.1 Lajes aligeiradas com blocos Sphereplus – Ortogonal

Muito semelhante ao sistema Cobiax, exceto pelo seu sistema de montagem, a laje fungiforme aligeirada com bloco Sphereplus disponibiliza um conjunto de soluções construtivas com uma gama de valores, em relação à altura do bloco, bastante ampla. A altura mais reduzida tem apenas 10 cm de altura, o que torna a utilização deste tipo de laje vantajosa para vãos e espessuras de laje mais reduzidos. Estas dimensões poderão ser consultadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Gama de Blocos Sphereplus

Bloco Sphereplus ( $B_n = 350 \text{ mm}$ )	
$H_n$ (mm)	Volume (L)
100	9,03
120	10,96
140	12,88
160	14,80
180	16,73
200	18,65
220	20,58

Ao contrário do sistema de lajes nervuradas, com a mesma espessura total de uma solução de laje maciça para um determinado caso de estudo, é possível obter uma relação entre peso próprio da laje e momento de inércia muito aproximada à relação da solução de laje maciça.

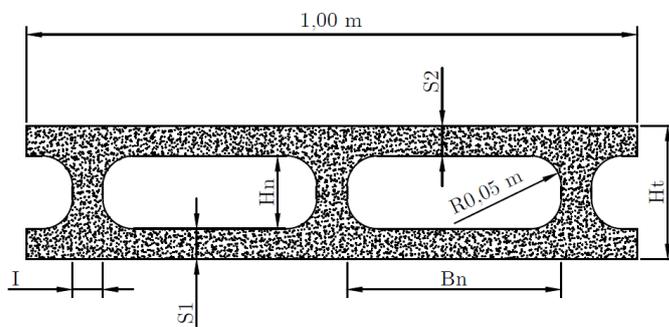


Figura 3.4 – Solução de aligeiramento - Sphereplus – Corte tipo

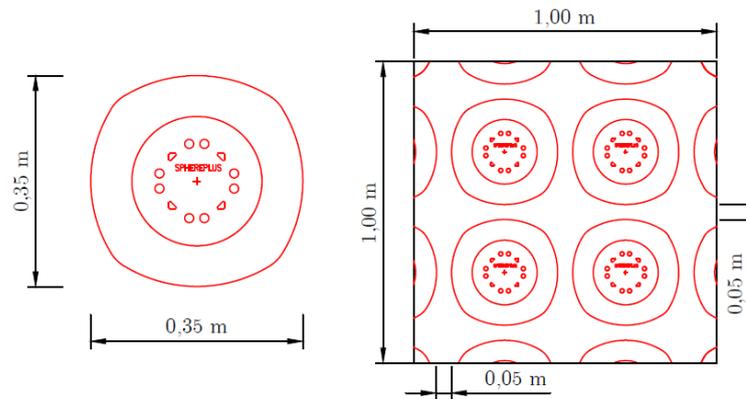


Figura 3.5 – Solução de aligeiramento – Sphereplus - Disposição ortogonal

Dispondo os blocos de forma ortogonal, por metro quadrado de laje, é possível colocar 6,25 blocos, criando um volume de vazios bastante aceitável do ponto de vista económico. Por exemplo, para uma solução de laje aligeirada, com este tipo de blocos, com 20 cm de espessura, utilizando blocos com altura de 10 cm, obtém-se, desprezando as zonas maciças junto aos pilares, uma redução de volume de betão de aproximadamente 30% em relação à solução de laje maciça.

### 3.2.2 Lajes aligeiradas com blocos Sphereplus – Favo de mel

Exatamente com o mesmo tipo de bloco da laje do ponto anterior, mas com os blocos distribuídos em formato favo de mel, esta solução consegue albergar mais blocos por metro quadrado de laje, podendo ser ainda uma solução mais vantajosa do que a anterior, pois o volume de betão é inferior e a sua inércia é exatamente igual.

Dispondo os blocos de forma favo de mel, de acordo com a figura seguinte, por metro quadrado de laje é possível colocar 7,22 blocos.

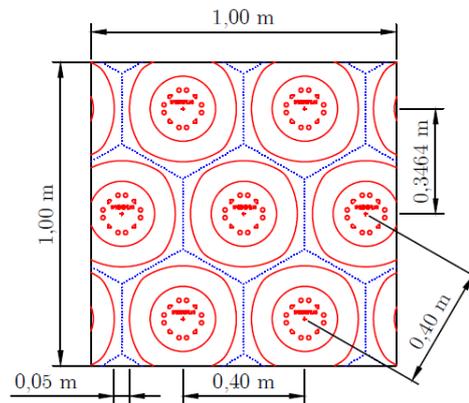


Figura 3.6 – Solução de aligeiramento – Sphereplus - Disposição Favo de mel

Por exemplo, para uma solução de laje aligeirada, com este tipo de blocos, com 20 cm de espessura, utilizando blocos com altura de 10 cm, obtém-se, desprezando as zonas maciças junto aos pilares, uma redução de volume de betão de aproximadamente 33% em relação à solução de laje maciça, ou seja, ainda se consegue reduzir 3 pontos percentuais em relação à disposição ortogonal.

### 3.2.3 Lajes tubulares unidireccionais

Com o objetivo de criar vazios em lajes maciças unidireccionais, apoiadas em vigas, os perfis cilíndricos ou elípticos, em plástico, permitem reduzir bastante o peso próprio da laje e manter uma inércia elevada da peça devido à presença de uma lâmina de betão inferior e superior.

Os perfis tubulares possuem cerca de 1,10 m de comprimento sendo interrompidos por nervuras transversais espaçadas de 1,20 m em 1,20 m.

Esta solução permitirá uma alternativa às lajes maciças e às lajes nervuradas unidireccionais, cujos moldes poderão ser fornecidos pela FercaNorte. A gama de tubos que serão disponibilizados terão alturas variáveis de acordo os valores apresentados na Tabela 3.2.

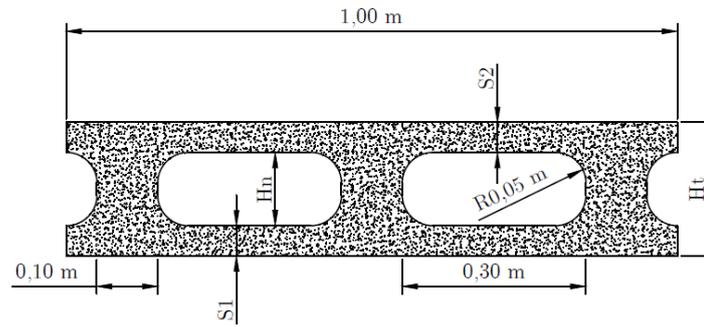


Figura 3.7 – Solução de aligeiramento - Laje tubular unidirecional – Corte tipo

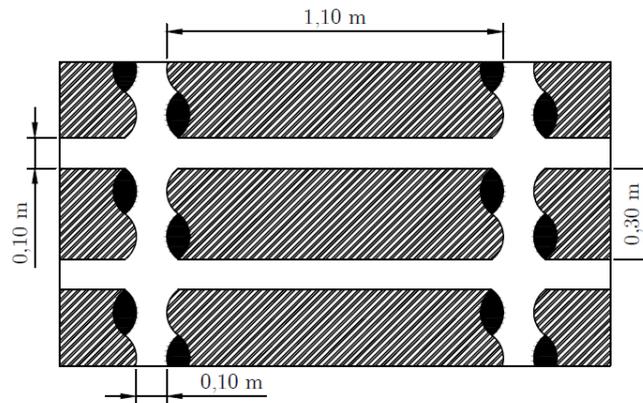


Figura 3.8 – Solução de aligeiramento – Laje tubular unidirecional - Disposição em planta

Tabela 3.1 – Gama de perfis tubulares

Tubular	
(Bn = 300 mm)	
Hn (mm)	Volume (L)
100	30,64
120	37,24
140	43,84
160	50,44
180	57,04
200	63,64
220	70,24



## **4 APLICAÇÃO DO EUROCÓDIGO 2 NO DIMENSIONAMENTO DE LAJES**

O capítulo 4, aplicação do Eurocódigo 2 no dimensionamento de lajes, foi adaptado da Norma Portuguesa, NP EN 1992-1-1 2010, Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (Eurocódigo 2), sendo transcrito para este capítulo excertos de parágrafos, fórmulas e figuras relevantes para o desenvolvimento do relatório.

### **4.1. ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS**

#### **4.1.1 Estado limite último – Rotura por flexão**

##### **4.1.1.1 Cálculo da armadura de flexão**

Para calcular a área de armadura de flexão presente nas secções transversais de peças de betão armado poderá ser considerada uma distribuição retangular de tensões ao nível da secção transversal reta, de acordo com a Figura 4.1.

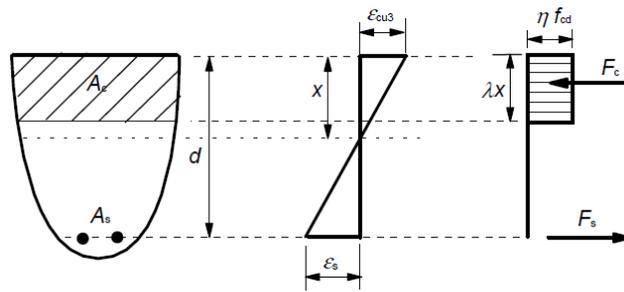


Figura 4.1 - Distribuição retangular de tensões [1]

Em que:

$A_c$  Área da secção transversal do betão;

$A_s$  Área da secção da armadura tracionada;

$d$  Altura útil da secção transversal reta;

$F_c$  Força total resultante da área de betão comprimido;

$F_s$  Força total resultante da área de aço tracionada;

$x$  Profundidade do eixo neutro medida a partir da fibra extrema mais comprimida;

$f_{cd}$  Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão;

$\epsilon_{cu}$  Extensão última do betão à compressão;

$\epsilon_s$  Extensão do aço à tração;

$\eta$  Coeficiente que define a resistência efetiva do betão:

$$\eta = 1,0 \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa};$$

$$\eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200 \text{ para } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa};$$

Nota: Se a largura da zona comprimida diminuir na direção da fibra extrema mais comprimida, o valor de  $\eta$  deverá ser reduzido de 10%.

$\lambda$  Coeficiente que define a altura útil da zona comprimida:

$$\lambda = 0,8 \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa};$$

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400 \text{ para } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}.$$

De acordo com a Figura 4.1, é possível então escrever um conjunto que permita calcular a profundidade do eixo neutro em relação ao topo da secção transversal reta.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_c = A_c \lambda x f_{cd} \eta \\ F_s = A_s f_{yd} \\ F_c = F_s \\ M_{Ed} = F_s (d - \lambda/2 x) \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Em que:

$M_{Ed}$  Valor de cálculo do momento fletor atuante;

$f_{yd}$  Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras de betão armado.

Após a determinação da área de armadura necessária para que a peça resista a um determinado momento fletor atuante é necessário verificar se esta se encontra no seu patamar de cedência.

A extensão do aço deverá ser superior à extensão que coloca o mesmo no seu patamar de cedência,  $\frac{f_{yd}}{E_s}$ , e inferior ao valor de cálculo da extensão do aço da armadura para betão armado,

$\varepsilon_{ud}$ .

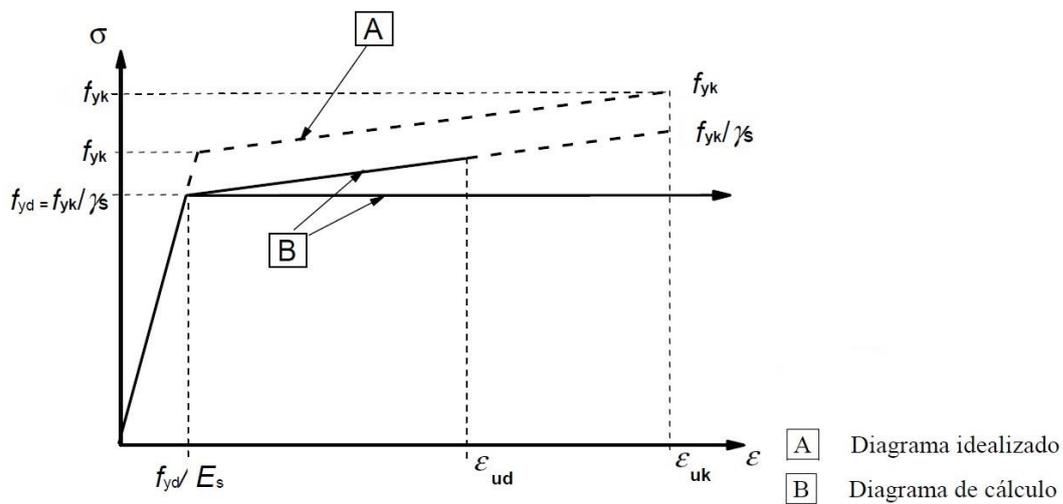


Figura 4.2 - Diagrama de tensões-extensões, idealizado e de cálculo, do aço das armaduras para betão armado (tracionado ou comprimido) [1]

Aplicando a seguinte expressão é possível determinar qual o valor da extensão a que o aço se encontra.

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} \Leftrightarrow \varepsilon_s = \frac{(d - x) \varepsilon_{cu}}{x} \quad (4.2)$$

#### 4.1.1.2 Disposições construtivas para armaduras de flexão

Será necessário também verificar se a solução de armadura adotada respeita a área de armadura mínima que deve estar presente na peça e se é inferior à área de armadura máxima que é permitida na secção transversal reta. De acordo com o ponto 9.2.1.1 do EC2, é possível calcular os limites, máximo e mínimo, de áreas de armaduras pelas seguintes expressões.

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \geq 0,0013 b_t d \quad (4.3)$$

$$A_{s,máx} = 0,04 A_c \quad (4.4)$$

Em que:

$A_{s,min}$  Área mínima das armaduras para betão armado na zona tracionada;

$A_{s,máx}$  Área máxima das armaduras para betão armado na zona tracionada;

$b_t$  Representa a largura média da zona tracionada; no caso de uma viga em T com os banzos comprimidos, deverá considerar-se apenas a largura da alma no cálculo do valor de  $b_t$ ;

$A_{s,min}$  Área mínima das armaduras para betão armado na zona tracionada;

No caso de lajes fungiformes, ponto 9.4 do EC2, nos pilares interiores, a não ser que se efetuem cálculos rigorosos para as condições de utilização, deverá adotar-se uma armadura superior com uma área de 50% da área total distribuída numa largura de cada lado do pilar igual a 12,5% da largura do painel de laje.

Deverá, também, adotar-se nos pilares interiores uma armadura superior a dois varões em cada direção ortogonal e esta armadura deverá atravessar o pilar.

Em relação ao espaçamento entre varões, deverá ser respeitado o ponto 9.3.1.1 (3) do EC2, que limita o espaçamento ao valor de  $s_{max,slabs}$ .

Valores recomendados de  $s_{max,slabs}$ :

- Para as armaduras principais, este valor é o menor entre  $\{3h; 400\text{ mm}\}$ , em que  $h$  representa a espessura total da laje;
- Para as armaduras de distribuição, este valor é o menor valor entre  $\{3,5h; 450\text{ mm}\}$ .

Em zonas com cargas concentradas ou nas zonas de momento máximo, as disposições são as seguintes:

- Para as armaduras principais, é o menor valor entre  $\{2h; 250 \text{ mm}\}$ .
- Para as armaduras de distribuição, é o menor valor entre  $\{3h; 400 \text{ mm}\}$ .

#### 4.1.2 Estado limite último – Rotura por esforço transversal

Para a verificação da resistência em relação ao esforço transversal, definem-se os seguintes valores:

- $V_{Rd,c}$  Valor de cálculo do esforço transversal resistente do elemento sem armadura de esforço transversal;
- $V_{Rd,s}$  Valor de cálculo do esforço transversal equilibrado pela armadura de esforço transversal na tensão de cedência;
- $V_{Rd,max}$  Valor de cálculo do esforço transversal resistente máximo do elemento, limitado pelo esmagamento das escoras comprimidas.

De acordo com o ponto 6.2.1 (4), do EC2, quando, com base na verificação do esforço transversal não for necessária nenhuma armadura de esforço transversal, deverá prever-se uma armadura mínima de esforço transversal de acordo com o ponto 9.2.2 do EC2. Esta armadura mínima de esforço transversal poderá ser omitida em elementos como lajes (maciças, nervuradas ou vazadas) em que é possível a redistribuição transversal das ações. A armadura mínima também poderá ser omitida em elementos de pequena importância (por exemplo, lintéis com vão inferior a 2 metros) que não contribuam de modo significativo para a resistência e estabilidade globais da estrutura.

No caso de lajes nervuradas ou vazadas será, na mesma, considerada uma armadura mínima para resistência do esforço transverso.

#### 4.1.2.1 Cálculo da armadura de esforço transverso

Recorrendo à seguinte expressão, é possível obter o valor de cálculo do esforço transverso resistente,  $V_{Rd,c}$ .

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_l \sigma_{cp}] b_w d \quad (4.5)$$

Com um mínimo de:

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_l \sigma_{cp}) b_w d \quad (4.6)$$

Em que:

$f_{ck}$  Em MPa;

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ com } d \text{ em mm};$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02 ;$$

$A_{sl}$  Área da armadura de tração prolongada de um comprimento  $\geq (l_{bd} + d)$  para além da secção considerada;

$b_w$  Menor largura da secção transversal na área tracionada [mm];

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 f_{cd}$$

$N_{Ed}$  Esforço normal na secção devido às ações aplicadas ou pré-esforço [em N] ( $N_{Ed} > 0$ ) para compressão. Em  $N_{Ed}$ , a influência das deformações impostas poderá ser ignorada;

$A_c$  Área da secção transversal de betão [mm<sup>2</sup>];

$V_{Rd,c}$  Em [N].

Nota: Os valores de  $C_{Rd,d}$ ,  $v_{min}$ , e  $K_l$  a utilizar num determinado país poderão ser indicados no Anexo Nacional do EC2. O valor recomendado de  $C_{Rd,d}$  é  $0,18/\gamma_C$ , o de  $v_{min}$  é obtido pela expressão seguinte e o de  $K_l$  é  $0,15$ .

$$V_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (4.7)$$

O cálculo de elementos com armadura de esforço transversal baseia-se num modelo de treliça, ver Figura 4.3. (Ponto 6.2.3, EC2).

Na Figura 4.3 são apresentadas as seguintes notações:

$\alpha$  Ângulo formado pela armadura de esforço transversal com o eixo da viga (medido positivo como representado na Figura 4.3);

$\theta$  Ângulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da viga;

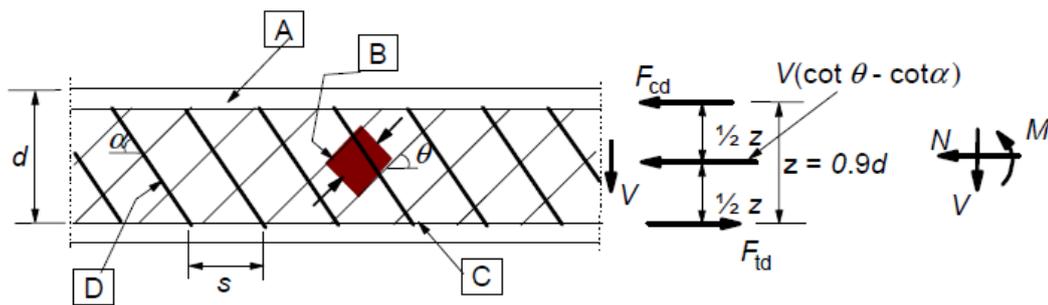
$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02 ;$$

$F_{td}$  Valor de cálculo da força de tração na armadura longitudinal;

$F_{cd}$  Valor de cálculo da força de compressão no betão na direção do eixo longitudinal do elemento;

$b_w$  Menor largura da secção entre os banzos tracionado e comprimido;

$z$  Braço do binário das forças interiores, para um elemento de altura constante, correspondente ao momento fletor no elemento considerado. Na verificação em relação ao esforço transversal numa secção de betão armado sem esforço normal, poderá geralmente utilizar-se o valor aproximado de  $z = 0,9 d$ .



**A** - banzo comprimido, **B** - escoras, **C** - banzo traccionado, **D** - armadura de esforço transverso

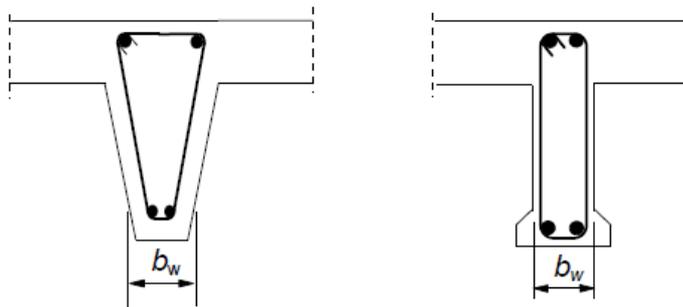


Figura 4.3 - Modelo de treliça e notações para elementos com armaduras de esforço

transverso [1]

De acordo com o ponto 6.2.3 (2) do EC2, o valor do ângulo  $\theta$  deverá ser limitado de acordo com a seguinte expressão.

$$1 \leq \cot(\theta) \leq 2,5 \quad (4.8)$$

No caso de elementos com armaduras de esforço transversal constituídas por estribos verticais, o valor de cálculo do esforço transversal resistente é o menor dos valores:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot(\theta) \quad (4.9)$$

E

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot(\theta) + \tan(\theta)) \quad (4.10)$$

Em que:

$A_{sw}$  Área da secção transversal das armaduras de esforço transverso;

$s$  Espaçamento dos estribos;

$f_{ywd}$  Valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso;

$v_1$  Coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado;

$\alpha_{cw}$  Coeficiente que tem em conta o estado de tensão do banzo comprimido.

Nota: O valor de  $v_1$  e de  $\alpha_{cw}$  a utilizar num determinado país poderá ser indicado no respetivo Anexo Nacional do EC2. O valor recomendado de  $\alpha_{cw}$  é 1 para estruturas não pré-esforçadas e  $v_1$  obtém-se através da seguinte expressão, sendo igual a  $v$ .

$$v = 0,6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right], f_{ck} \text{ em MPa} \quad (4.11)$$

#### 4.1.2.2 Disposições construtivas para armaduras de esforço transverso

De acordo com o ponto 9.2.2 do EC2, a armadura de esforço transverso deverá formar um ângulo  $\alpha$  entre 45° e 90° com o eixo longitudinal do elemento estrutural.

Deverá, também, ser calculada uma taxa de armaduras de esforço transverso, não podendo ser esta inferior a uma taxa de armaduras mínima.

$$\rho_w = A_{sw} / (s b_w \text{sen}(\alpha)) \geq \rho_{w,min} \quad (4.12)$$

E

$$\rho_{w,min} = (0,08 \sqrt{f_{ck}}) / f_{yk} \quad (4.13)$$

Em que:

$\rho_w$  Taxa de armaduras de esforço transverso;

$A_{sw}$  Área de armaduras de esforço transverso existente no comprimento  $s$ ;

$s$  Espaçamento das armaduras de esforço transverso, medido ao longo do eixo longitudinal do elemento;

$b_w$  Largura da alma do elemento;

$\alpha$  Ângulo formado pelas armaduras de esforço transverso e o eixo longitudinal.

$\rho_{w,min}$  Taxa de armaduras de esforço transverso mínima.

Em relação ao espaçamento da solução de armaduras de esforço transverso, de acordo com o ponto 9.2.2 (6) e (8), o espaçamento longitudinal máximo entre armaduras de esforço transverso não deverá ser superior a  $s_{l,max}$  e o espaçamento transversal entre ramos de estribos não poderá ser superior a  $s_{t,max}$ .

$$s_{l,max} = 0,75 d (1 + \cot(\alpha)) \quad (4.14)$$

$$s_{t,max} = 0,75 d \leq 600 \text{ mm} \quad (4.15)$$

### 4.1.3 Estado limite último – Rotura por punçoamento

O método de cálculo baseia-se em verificações efetuadas na face do pilar e no primeiro perímetro de controlo  $u_1$ . Se for necessária armadura de punçoamento, deverá determinar-se um outro contorno  $u_{out,ef}$  a partir do qual a armadura de punçoamento já não seja necessária. Definem-se os seguintes valores de cálculo da tensão de punçoamento (MPa) ao longo das secções de controlo:

$v_{Rd,c}$  Valor de cálculo da resistência ao punçoamento de uma laje sem armadura de punçoamento, ao longo da secção de controlo considerada;

$v_{Rd,cs}$  Valor de cálculo da resistência ao punçoamento de uma laje com armadura de punçoamento, ao longo da secção de controlo considerada;

$v_{Rd,max}$  Valor de cálculo da resistência máxima ao punçoamento, ao longo da secção de controlo considerada.

Deverão efetuar-se as seguintes verificações:

- No perímetro do pilar, ou no perímetro da área carregada, não deverá ser excedido o valor máximo da tensão de punçoamento:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,max} \quad (4.16)$$

- Não é necessária armadura de punçoamento se:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c} \quad (4.17)$$

No caso de a condição anterior não se verificar para a secção de controlo considerada, deverá adotar-se uma armadura de punçoamento.

#### 4.1.3.1 Cálculo da armadura de punçoamento

A tensão de punçoamento em determinada zona da laje poderá ser obtida de acordo com a seguinte expressão:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i d} \quad (4.18)$$

Em que:

$d$  Altura útil média da laje, que poderá ser considerada igual a  $(d_y + d_z)/2$ ;

$u_i$  Perímetro do perímetro de controlo considerado;

Relativamente ao parâmetro  $\beta$ , e de acordo com o ponto 6.4.3 (6) do EC2, no caso de estruturas em que a estabilidade lateral não depende do funcionamento de pórticos formados por lajes e pilares, em que os vãos dos tramos adjacentes não diferem mais de 25%, poderão utilizar-se valores aproximados de  $\beta$ , de acordo com a Figura 4.4.

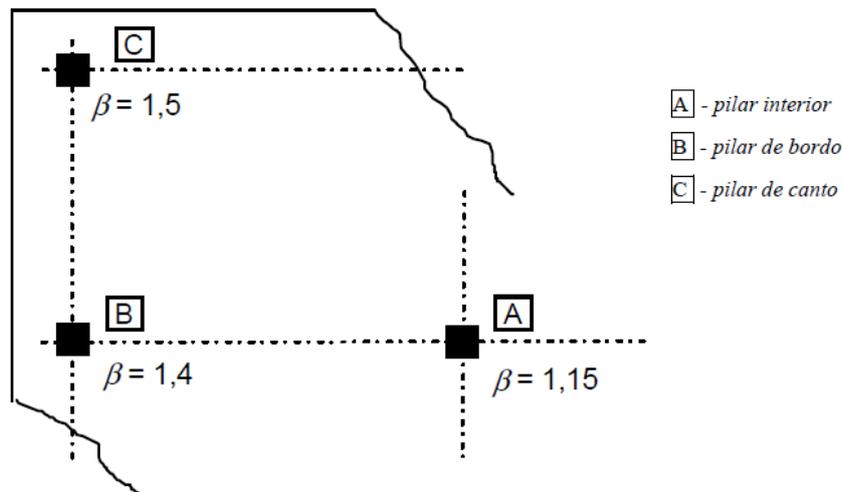


Figura 4.4 - Valores aproximados de  $\beta$  [1]

Definindo a tensão de punçoamento em função do perímetro de controlo considerado, deverá calcular-se qual a resistência ao punçoamento da laje sem armadura de punçoamento, através da seguinte expressão:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_l \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_l \sigma_{cp}) \quad (4.19)$$

Em que:

$f_{ck}$  Em MPa;

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ com } d \text{ em mm};$$

$$\rho_l = \sqrt{p_{ly} \cdot p_{lz}} \leq 0,02 ;$$

$$\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2$$

$A_c$  Área da secção transversal de betão [mm<sup>2</sup>];

A resistência ao punçoamento de lajes com armadura de punçoamento é condicionada pela expressão anterior, pois a resistência ao punçoamento de lajes com armadura será a soma de uma percentagem da resistência proveniente do betão com a resistência proveniente da armadura de punçoamento em tensão de cedência. Ver expressão seguinte:

$$v_{Rd,cs} = 0,75 v_{Rd,c} + 1,5 \left( \frac{A_{sw}}{s_r} \right) d f_{ywd,ef} (1/(u_1 d)) \text{ sen } \alpha \quad (4.20)$$

Em que:

$A_{sw}$  Área de um perímetro de armaduras de punçoamento em torno do pilar [mm<sup>2</sup>]

$s_r$  Espaçamento radial dos perímetros de armaduras de punçoamento;

$f_{ywd,ef}$  Valor de cálculo da tensão efetiva de cedência das armaduras de punçoamento, obtida

por:  $f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 d$  [MPa];

$d$  Média das alturas úteis nas direções ortogonais [mm];

$\alpha$  Ângulo entre as armaduras de punçoamento e o plano da laje;

Na vizinhança do pilar, a resistência ao punçoamento é limitada a um máximo de:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max} \quad (4.21)$$

E

$$v_{Rd,max} = 0,5 v f_{cd} \quad (4.22)$$

Em que:

$u_0$  Para um pilar interior  $u_0 =$  Perímetro de controlo do pilar [mm]

Para um pilar de bordo  $u_0 = c_2 + 3d \leq c_2 + 2c_1$  [mm]

Para um pilar de canto  $u_0 = 3d \leq c_2 + c_1$

Em que:

$c_1$  Face do pilar perpendicular ao bordo da laje;

$c_2$  Face do pilar paralela ao bordo da laje.

Nota: Os valores de  $\beta$  poderão ser obtidos através da Figura 4.4 e o parâmetro  $v$  é calculado através da mesma expressão utilizada no cálculo da resistência de um elemento ao esforço transversal.

O perímetro para o qual não é necessária armadura de punçoamento,  $u_{out,ef}$ , deverá ser calculado através da seguinte expressão:

$$u_{out,ef} = \beta \frac{V_{Ed}}{v_{Rd,c}} d \quad (4.23)$$

#### 4.1.3.2 Disposições construtivas para armaduras de punçoamento

De acordo com o ponto 9.4.3 do EC2, quando são necessárias armaduras de punçoamento, estas deverão ser colocadas entre a área carregada ou pilar de apoio e  $kd$  no interior do perímetro de controlo a partir do qual a armadura de punçoamento deixa de ser necessária. Deverão ser constituídas, pelo menos, por dois perímetros de estribos, ver Figura 4.5 e Figura 4.6, de espaçamento não superior a  $0,75 d$ .

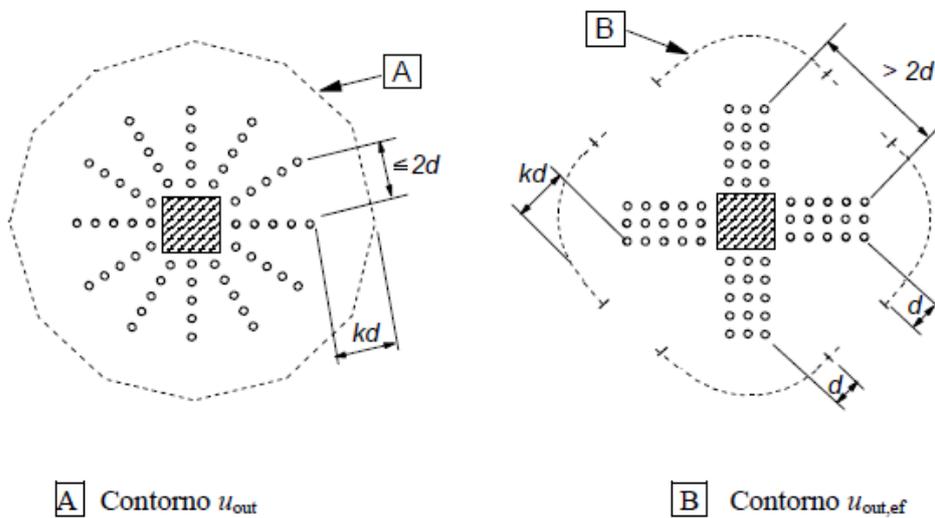


Figura 4.5 - Perímetro de controlo para pilares interiores [1]

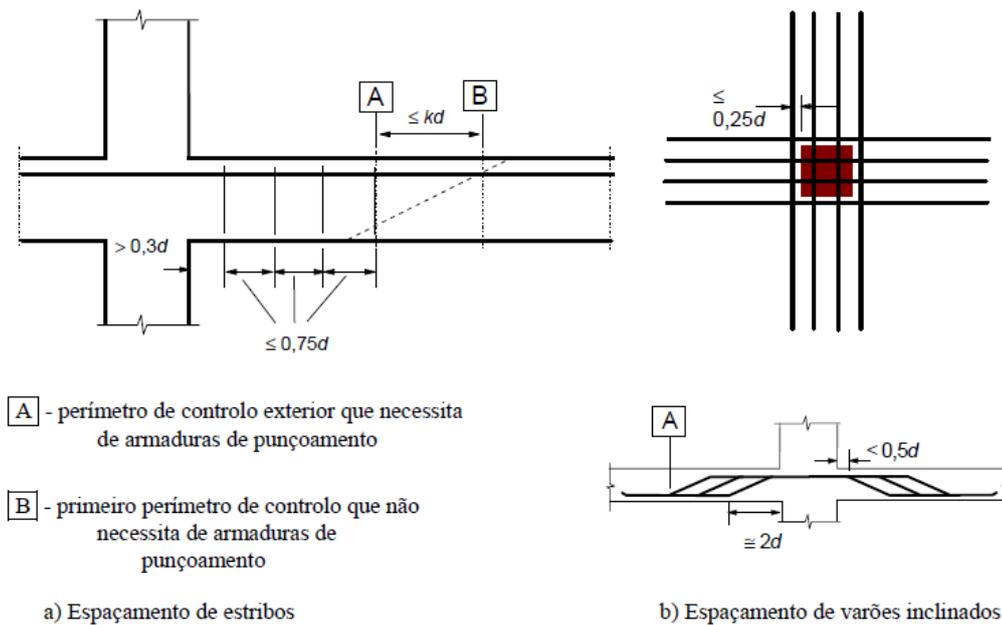


Figura 4.6 – Disposições construtivas para armaduras de punçoamento [1]

Nota: O valor de  $k$  recomendado é de 1,5.

Quando é necessária armadura de punçoamento, a área de um ramo de um estribo ou equivalente,  $A_{sw,min}$ , é obtida pela seguinte expressão:

$$A_{sw,min} \cdot (1,5 \operatorname{sen}(\alpha) + \operatorname{cos}(\alpha)) / (s_r s_t) \geq 0,08 \sqrt{\frac{f_{ck}}{f_{yk}}} \quad (4.24)$$

Em que:

$\alpha$  Ângulo entre a armadura de punçoamento e a armadura principal (ou seja, para estribos verticais  $\alpha = 90^\circ$ ;

$s_r$  Espaçamento dos estribos na direção radial;

$s_t$  Espaçamento dos estribos na direção tangencial;

$f_{ck}$  Em [MPa].

## 4.2 ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

### 4.2.1 Estado limite de utilização – Controlo da fendilhação

#### 4.2.1.1 Cálculo de armaduras mínimas

De acordo com o ponto 7.3.2 (1) do EC2, se for requerido o controlo da fendilhação, será necessária uma quantidade mínima de armaduras aderentes para limitar a fendilhação nas zonas em que se prevejam tensões de tração. Esta armadura mínima poderá ser quantificada de acordo com a expressão 4.25.

$$A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct} \quad (4.25)$$

Em que:

$A_{s,min}$  Área mínima das armaduras para betão armado na zona tracionada;

$A_{ct}$  Área de betão tracionado. A zona de betão tracionado é aquela em que, pelo cálculo da secção, se demonstra que está em tração imediatamente antes da formação da primeira fenda;

$f_{ct,eff}$  Valor médio da resistência do betão à tração à data em que se prevê que se possam formar as primeiras fendas:

$f_{ct,eff} = f_{ctm}$  ou um valor inferior,  $f_{ctm}(t)$ , se se prever uma fendilhação antes dos 28 dias;

$k$  Coeficiente que considera o efeito das tensões não uniformes autoequilibradas de que resulta uma redução dos esforços de coação:

= 1,00 para almas com  $h \leq 300$  mm ou para banzos com larguras inferiores a 300 mm;

= 0,65 para almas com  $h \geq 800$  mm ou para banzos com larguras superiores a 800 mm;

$k_c$  Coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção, imediatamente antes da fendilhação e da variação do braço do binário:

Para tração simples  $k_c = 1,0$ ;

Para flexão ou flexão com esforços normais:

- para secções retangulares e para almas de secções em caixão e secções em T:

$$k_c = 0,4 * \left[ 1 - \frac{\sigma_c}{k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}} \right] \leq 1,0$$

- para banzos de secções em caixão e de secções em T:

$$k_c = 0,9 * \frac{F_{cr}}{A_{ct} f_{ct,eff}} \geq 0,5$$

Em que:

$\sigma_c$  Tensão média do betão existente na parte da secção considerada:

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{b h}$$

$N_{Ed}$  Esforço normal no estado limite de utilização atuando na parte da secção considerada (positivo para um esforço de compressão).  $N_{Ed}$  deverá ser determinado considerando os valores característicos do pré-esforço e dos esforços normais para a combinação de ações apropriada;

$h^*$   $h^* = h$  para  $h < 1,0$  m;

$h^* = 1,0$  m para  $h \geq 1,0$  m;

$k_1$  Coeficiente que considera os efeitos dos esforços normais na distribuição de tensões:

$k_1 = 1,5$  se  $N_{Ed}$  for um esforço de compressão;

$k_1 = (2h^*)/3h$  se  $N_{Ed}$  for um esforço de tração;

$F_{cr}$  Valor absoluto da força de tração no banzo imediatamente antes da fendilhação devida ao momento de fendilhação calculado com  $f_{ct,eff}$ .

#### 4.2.1.2 Controlo da fendilhação sem cálculo direto

No estudo comparativo demonstrado ao longo deste relatório não serão definidas soluções de armadura, simplesmente serão comparadas áreas de armadura necessárias. De acordo com o EC2, ponto 7.3.3, quando se adota a armadura mínima especificada em 7.3.2 do mesmo documento, é pouco provável que as larguras de fendas sejam excessivas se as soluções adotadas respeitarem valores de diâmetros máximos e espaçamentos preconizados no ponto 7.3.3 do EC2.

Admitindo  $f_{ct,eff} = f_{ctk,0,95}$ , tem-se:

$$A_{s,min} = 0,4 \frac{b h}{2} \frac{f_{ctk,0,95}}{f_{yk}} = 0,2 b h \frac{1,3 f_{ctm}}{f_{yk}} \approx 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b d \quad (4.26)$$

Expressão esta que pode ser comparada com a preconizada pelo EC2 para a armadura mínima em lajes ou vigas, ver o ponto 9.2.1.1 do EC2.

Uma vez que todas as armaduras necessárias de flexão calculadas já respeitam o parâmetro da armadura mínima, a fendilhação à partida está controlada.

Não invalida que após definição das armaduras de flexão não se efetue o cálculo exato da largura de fendas, de forma a verificar que estas não excedam os limites regulamentados pelo EC2.

#### **4.2.2 Estado limite de utilização – Controlo da deformação**

De acordo com o ponto 7.4.1 do EC2, o aspeto e as condições de utilização podem ser alterados quando a flecha calculada de uma viga, laje ou consola sujeitas a ações quase permanentes for superior a  $vão/250$ . A flecha é calculada em relação aos apoios. Poderá prever-se uma contra flecha para compensar parcial ou totalmente as deformações, mas, em geral, qualquer contra flecha não deverá ser superior a  $vão/250$ .

As flechas suscetíveis de danificar elementos adjacentes à estrutura deverão ser limitadas. Para as flechas que ocorram depois da construção, o limite  $vão/500$  é normalmente adequado para as ações quase-permanentes. Poderão ser adotados outros limites em função da sensibilidade dos elementos adjacentes. Este critério não será adotado para o dimensionamento de todas as lajes nos diferentes casos de estudo.

##### **4.2.2.1 Casos em que o cálculo poderá ser dispensado**

Em geral, de acordo com o ponto 7.4.2 do EC2, não é necessário um cálculo explícito das flechas, uma vez que nos casos correntes são suficientes regras simples, tais como a limitação da relação  $vão/altura$ , para evitar, em situações normais, problemas de flecha. Verificações

mais rigorosas são necessárias para os elementos que não respeitem esses limites ou nos casos em que sejam convenientes outros limites que não os considerados nos métodos simplificados.

Desde que as vigas ou as lajes de betão armado de edifícios sejam dimensionadas de forma a satisfazerem os limites vão/altura especificados neste ponto do presente relatório, poderá admitir-se que a respetiva flecha não irá exceder os limites estabelecidos em 4.2.2. O valor limite da relação vão/altura poderá ser obtido pelas seguintes expressões, multiplicando o valor assim obtido por coeficientes de correção para ter em conta o tipo das armaduras utilizadas assim como outras variáveis. Na formulação destas expressões não foi tida em conta qualquer contra flecha.

$$\frac{l}{d} = k \left[ 11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{\frac{3}{2}} \right], \text{ se } \rho \leq \rho_0 \quad (4.27)$$

$$\frac{l}{d} = k \left[ 11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12}\sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right], \text{ se } \rho > \rho_0 \quad (4.28)$$

Em que:

- $l/d$  Valor limite da relação vão/altura;
- $k$  Coeficiente que tem em conta os diferentes sistemas estruturais;
- $\rho_0$  Taxa de armaduras de referência =  $10^{-3}\sqrt{f_{ck}}$ ;
- $\rho$  Taxa de armaduras de tração necessária a meio vão (ou no apoio no caso de consolas) para equilibrar o momento devido às ações de cálculo;
- $\rho'$  Taxa de armaduras de compressão necessárias a meio vão (ou no apoio no caso de consolas) para equilibrar o momento devido às ações de cálculo;

$f_{ck}$  Em [MPa].

Tabela 4.1 - Coeficiente  $k$ , que tem em conta o sistema estrutural [7]

Sistema Estrutural	$k$
Consola	0,4
Viga simplesmente apoiada Laje simplesmente apoiada armada numa ou em duas direções	1,0
Laje sem vigas apoiada sobre pilares (laje fungiforme), sendo $l$ o vão maior	1,2
Vão extremo de uma viga continua ou de uma laje continua armada numa só direção ou de uma laje armada em duas direções continua ao longo do lado maior	1,3
Vão interior de uma viga ou de uma laje armada numa ou em duas direções	1,5

A tabela seguinte, Tabela 4.2, apresenta os valores de  $l/d$  calculados a partir das expressões anteriores, para diferentes sistemas estruturais e diferentes classes de betão, para elementos de betão ligeiramente esforçado, com taxa de armadura de 0,5 %, que será o caso corrente das lajes, e para elementos de betão altamente esforçados, taxa de armadura de 1,5 %, como é o caso da generalidade das vigas.

Tabela 4.2 - Valores da relação  $l/d$  [7]

$k$	$f_{ck}$								$f_{ck}$							
	16	20	25	30	35	40	45	50	16	20	25	30	35	40	45	50
	Lajes								Vigas							
0,4	6	7	7	8	9	10	12	13	5	5	5	6	6	6	6	6
1,0	16	17	19	21	23	26	29	32	13	13	14	14	15	15	16	16
1,2	19	20	22	25	28	31	35	38	15	16	16	17	17	18	19	19
1,3	21	22	24	27	30	33	37	42	16	17	18	18	19	20	20	21
1,5	24	26	28	31	34	39	43	48	19	20	20	21	22	23	23	24

As expressões anteriores resultaram de um estudo paramétrico realizado a uma série de vigas e lajes e são aplicáveis para o caso de uma secção retangular, com aço na secção de meio vão (ou na secção de apoio, no caso de uma consola) sujeito a uma tensão de 310 MPa, que corresponde à utilização de um aço com  $f_{yk} = 500$  MPa, e para vãos até 7 m. Para outras situações, aquelas expressões deverão ser afetadas dos seguintes fatores corretivos:

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f \tag{4.29}$$

Em que:

$k_t$  Relação entre a largura do banzo e a largura da alma para secções em “T”

$$k_t = 0,8 \text{ para } b/b_w > 3;$$

$k_t = 1,0$  para  $b/b_w \leq 3$ ;

$k_\sigma$  O valor de referência de  $l/d$  foi obtido para  $\sigma_s = 310$  MPa, que corresponde aproximadamente a um aço S500. Para outros tipos de aço, ou aços sujeitos a outras tensões, deve adotar-se:

$$k_\sigma = \left( \frac{500}{f_{yk}} \right) \left( \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \right)$$

Em que:

$A_{s,req}$  Área da secção de armaduras existente na secção;

$A_{s,prov}$  Área da secção de armaduras necessária na secção no estado limite último;

Nota:  $A_{s,req} \approx A_{s,prov}$

$k_l$  No caso de vigas e lajes, com exceção das lajes fungiformes, com vãos superiores a 7 m, que suportam divisórias que possam ser danificadas por flechas excessivas, os valores de  $l/d$  devem ser multiplicados por  $7/l_{eff}$ .

$k_f$  No caso de lajes fungiformes, com vãos superiores a 8,5 m, que suportam divisórias que possam ser danificadas por flechas excessivas, os valores de  $l/d$ , devem ser multiplicados por  $8,5/l_{eff}$ .

#### 4.2.2.2 Verificação das flechas por meio de cálculo

Os casos de estudo abordados neste relatório serão todos modelados com recurso ao programa de cálculo automático Robot Structural Analysis, permitindo retirar automaticamente os

valores da flecha instantânea em todos os pontos da laje com recurso ao método dos elementos finitos, evitando assim o cálculo manual das flechas instantâneas nos pontos de análise da laje.

#### 4.2.2.2.1 Método dos coeficientes globais

“O cálculo da flecha elástica seria suficiente se o betão armado fosse um material homogêneo, com um comportamento que não sofresse alterações significativas ao longo do tempo. Fenómenos como a retração, a fluência, as variações da temperatura, entre outros, causam fissuras que diminuem a capacidade de resposta em serviço. É por isso necessário, para estimar a flecha provável a longo prazo, corrigir o valor da flecha elástica com coeficientes globais que tenham em conta estes fenómenos. Estes coeficientes globais de correção são obtidos através de um método mais elaborado (Método Bi-linear), admitindo certas simplificações (Figueiras, 1997). Assim, para cargas de longa duração, a flecha total  $a_t$  é dada pela expressão seguinte:

$$a_t = a_c k_t \eta \quad (4.30)$$

Em que:

$a_c$  Flecha elástica;

$k_t$  Coeficiente global de correção para as flechas sob cargas de longa duração, dependente da percentagem de armadura tracionada ( $\rho$  e  $\alpha_e \cdot \rho$ ), do coeficiente de fluência e do nível de solitação dado pela relação  $M_{rD}/M_D$ ;

Mediante os valores da relação de  $d/h$  e do coeficiente de fluência considerado, obtêm-se os valores deste parâmetro com recurso a ábacos retirados de Walther, et al., 1990.

$\eta$  Coeficiente de correção tendo em conta a influência da armadura de compressão.” [7]

A determinação do coeficiente de fluência é efetuada de acordo com o ponto 3.1.4 do EC2, resumindo-se à figura a seguir ilustrada.

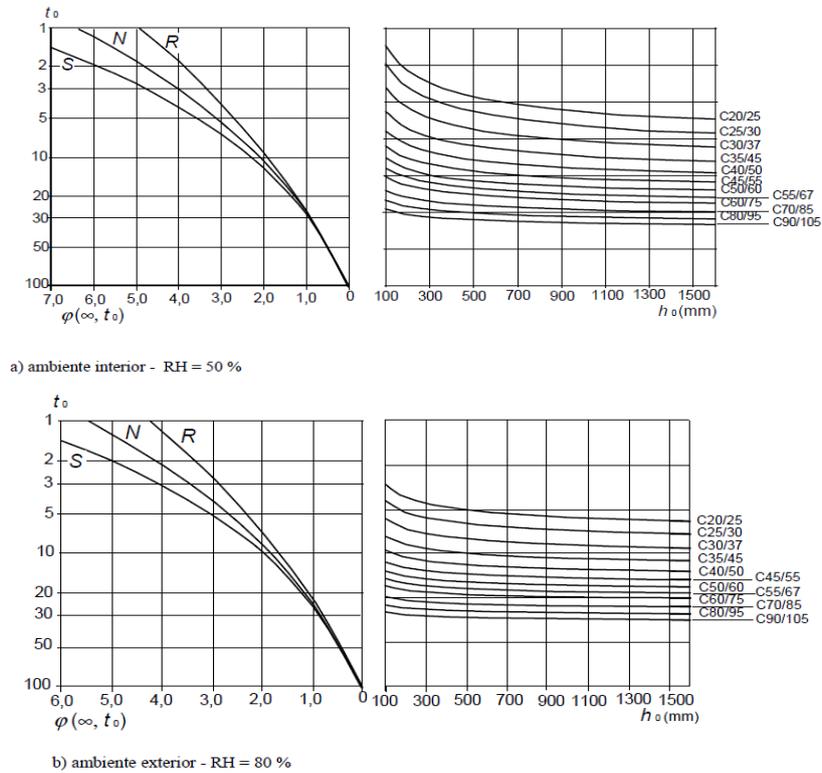


Figura 4.7 - Método para a determinação do coeficiente de fluência,  $\varphi(\infty, t_0)$  para betão em condições ambientais normais [1]

Em que:

$\varphi(\infty, t_0)$  Valor final do coeficiente de fluência;

$t_0$  Idade do betão na data do carregamento, em dias;

$h_0$  Espessura equivalente =  $2 A_c / u$ , em que  $A_c$  é a área da secção transversal do betão e  $u$  é o perímetro da parte exposta à secagem;

$S, N, R$  Classe do cimento de acordo como ponto 3.1.2 (6) do EC2.

4.2.2.2 Método simplificado

A avaliação das flechas a longo prazo poderá também ser efetuada pelo método simplificado proposto pelo CEB-FIP Model Code 1990, com recurso às seguintes expressões:

$$a_t = (1 + \phi) a_c \text{ para } M_D < M_{rD} \quad (4.31)$$

$$a_t = \left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20 \rho_{cm}) a_c \text{ para } M_d \geq M_{rD} \quad (4.32)$$

O valor de  $\eta$  poderá ser retirado em função da taxa de armadura média na peça, com recurso à seguinte tabela:

Tabela 4.3 – Fator de correção  $\eta$  [8]

$\rho_m$	0,15	0,20	0,30	0,50	0,75	1,00	1,50
$\eta$	10,0	8,0	6,0	4,0	3,0	2,5	2,0

De acordo com o ponto 4.6.3.3 do livro “Dimensionnement Des Structures En Béton” editado pelo “Traité de Génie Civil de l’Ecole Polytechnique Federal de Lausanne” [9] é possível concluir que o método simplificado para obtenção de flechas a longo prazo, descrito anteriormente, conduz a resultados bastante aceitáveis, porém são um pouco mais conservativos quando comparados com outras metodologias de cálculo.

## 5 CASO DE ESTUDO I

A estrutura a ser modelada será constituída por painéis de laje com  $6 \times 6 \text{ m}^2$ , tendo no total 16 painéis, como ilustrado na Figura 5.1. Os pilares, onde apoiam os painéis, terão  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  e um comprimento total de 3 metros. De forma a modelar um piso intermédio de uma estrutura que se repete ao longo de vários pisos, considerou-se que os pilares dariam suporte aos painéis a 1,5 metros de altura eram apoiados nas duas extremidades livres por apoios que apenas impediam os seus deslocamentos nos dois planos, horizontal e vertical.

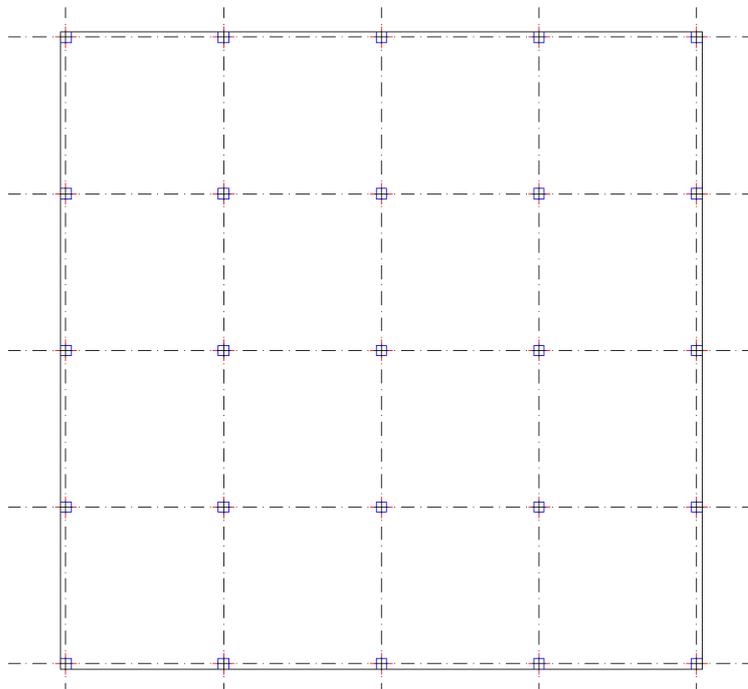


Figura 5.1 – Caso de estudo I – Planta estrutural

As cargas a aplicar na estrutura consideradas além do peso próprio da laje, como as restantes cargas permanentes e sobrecarga, têm ambas o valor de  $3 \text{ kN/m}^2$ .

Considerou-se que o betão a utilizar pertenceria à classe C25/30 e o aço à classe S400, adotando-se um recobrimento para todos os elementos estruturais de 4 centímetros.

A análise comparativa entre as soluções de lajes modeladas terá como base a comparação de esforços em pontos específicos da planta estrutural. Analisar-se-á os momentos fletores médios por banda, tendo esta igual dimensão ao vão dos painéis, e esforços de corte junto a três pilares (P1, P2 e P3), sempre de acordo com o ilustrado na Figura 5.2.

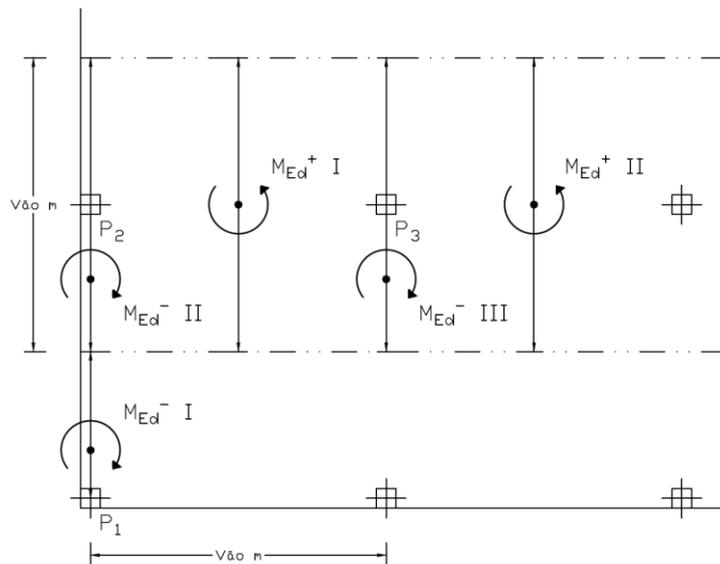


Figura 5.2 – Caso de estudo I - Localização dos esforços a analisar

Aplicar-se-á um esquema de armaduras de acordo com o ponto 9.4 do EC2, ver Figura 5.3 e Figura 5.4. O esquema de armaduras apresentado representa as armaduras a aplicar no painel de laje mais condicionante em toda a estrutura.

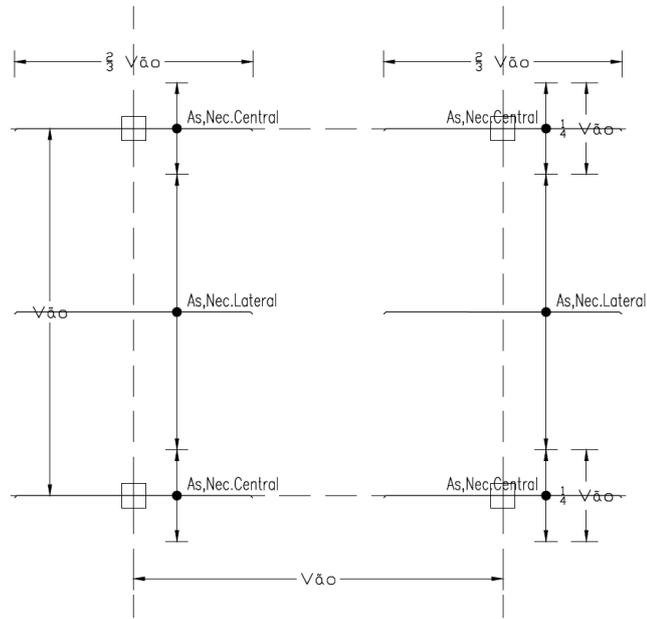


Figura 5.3 - Caso de estudo I - Esquema de montagem de armaduras na face superior -

Direção X = Y

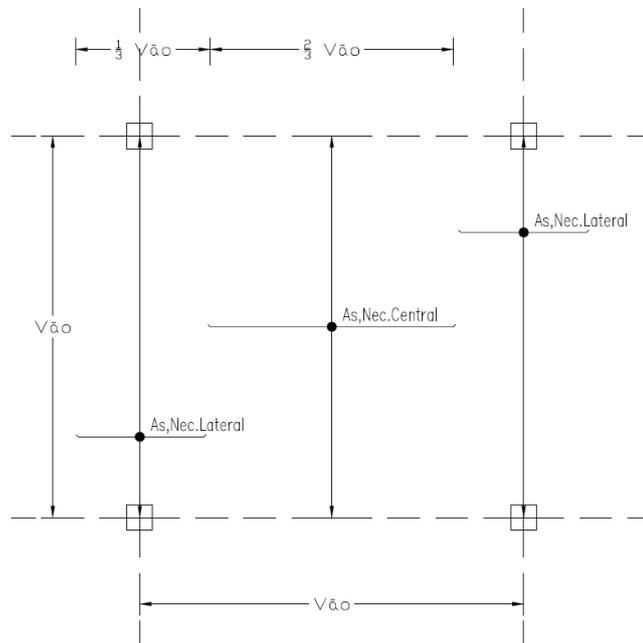


Figura 5.4 - Caso de estudo I - Esquema de montagem de armaduras na face inferior -

Direção X = Y

## 5.1 MODELAÇÃO DE UMA LAJE FUNGIFORME MACIÇA

### 5.1.1 Caracterização da secção transversal reta

A altura da laje a adotar será aquela que satisfaça, utilizando o menor volume de betão possível, todos os critérios de dimensionamento abordados no capítulo 4.

A definição da altura de uma laje fungiforme normalmente é condicionada pelo estado limite de utilização relativo ao controlo da deformação. De forma a tentar satisfazer desde o início este limite mais condicionante, através do método simplificado de cálculo da flecha a longo prazo, admitindo uma taxa de armaduras de 0.5% e desprezando qualquer efeito das armaduras de compressão, estimou-se que a espessura ideal para a peça, de acordo com os materiais definidos, seria de 26 cm. O valor da flecha instantânea foi obtido através da modelação da estrutura no programa de cálculo automático.

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 * \eta * a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,26}{0,22}\right)^3 * 4 * 0,035 \leq 0,024 \Leftrightarrow 0,023 < 0,024 \quad (5.1)$$

Nota: Esta análise prévia não dispensa a verificação posterior do estado limite de utilização relativo às deformações a longo prazo, pois a taxa de armadura média poderá não ser a estimada.

### 5.1.2 Estado limite último – Rotura por flexão

Para a combinação do estado limite último tendo como ação variável base a sobrecarga, a determinação do momento fletor para o qual será dimensionada uma armadura de flexão é efetuada com base numa média aritmética dos momentos flectores no centro de cada elemento finito distribuídos ao longo da banda em análise.

A simetria da estrutura permite que seja simplesmente analisada uma direção da estrutura, simplificando todo o processo de dimensionamento de armaduras.

Na Figura 5.5 é possível visualizar quais os momentos fletores que foram considerados para a determinação dos momentos fletores,  $M_{EdII}^-$  e  $M_{EdIII}^-$ , para os quais posteriormente é quantificada uma área de armadura de flexão e distribuída de acordo com a Figura 5.3.

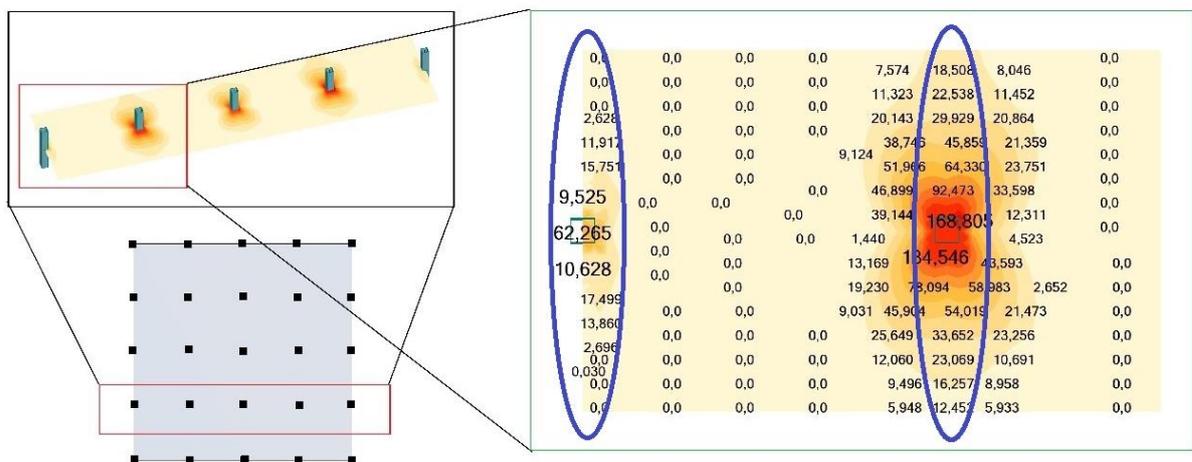


Figura 5.5 – Caso de estudo I – Laje fungiforme maciça – Mapa de momentos fletores  $M_{xx}$  negativos

A mesma análise foi efetuada para os momentos fletores positivos, obtendo-se o seguinte mapa de cores respetivo aos momentos fletores positivos:

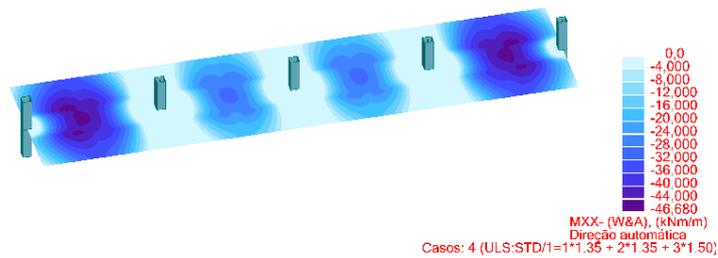


Figura 5.6 – Caso de estudo I – Laje fungiforme maciça – Mapa de momentos fletores  $M_{xx}$  positivos

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.1.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 5.1 – Caso de estudo I – Laje fungiforme e maciça – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>							
Laje		Maciça c/ 26 cm					
		A <sub>s,min</sub> : 3,72 cm <sup>2</sup> /m					
Flexão/Banda	Face Superior	Local	M <sub>Ed</sub> Médio (kN.m/m)	A <sub>s,nec</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	A <sub>t</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>s,central</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	A <sub>s,lateral</sub> (cm <sup>2</sup> /m)
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> I	9,28	1,23	7,38	3,72	3,72
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> II	18,04	2,41	14,46	4,82	3,72
	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> III	68,45	9,70	58,20	19,40	6,47	
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> I	44,84	6,19	37,14	6,19	3,72
		M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> II	25,92	3,50	21,00	3,72	3,72

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 5.5 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{EdIII}^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{EdI}^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4.

### 5.1.3 Estado limite último – Rotura por punçoamento

Para a combinação do estado limite último tendo como ação variável base a sobrecarga, a análise dos esforços de corte junto aos pilares poderá ser efetuada com base nos mapas de cores obtidos com recurso ao programa de cálculo automático ou analisando o esforço axial dos pilares que apoiam a laje, como ilustrado na figura seguinte. Como a modelação da estrutura é só de um piso, o esforço axial dos pilares corresponde ao esforço de corte máximo da laje.

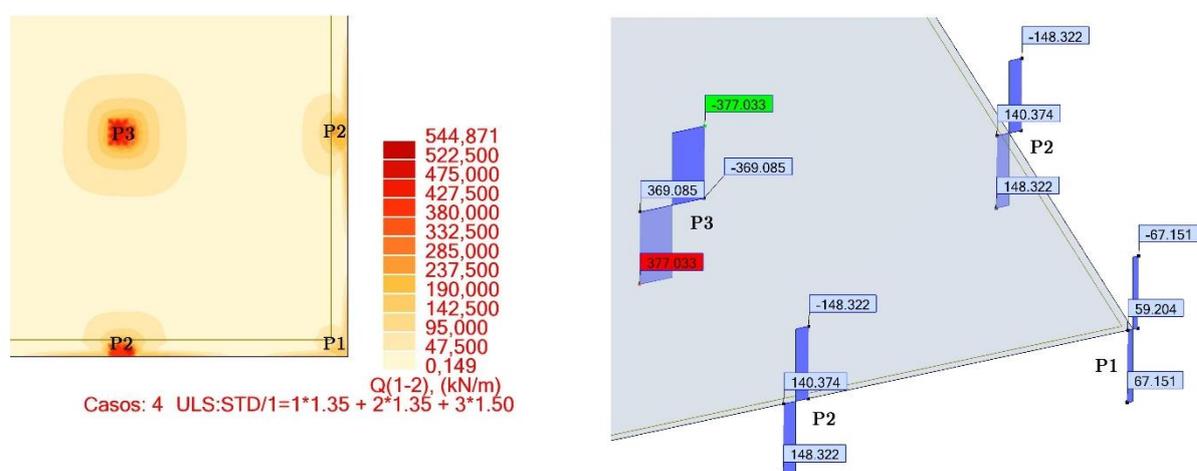


Figura 5.7 – Caso de estudo I – Laje fungiforme maciça – Análise dos esforços de corte na zona dos pilares

A unidade dos valores obtidos através do mapa de cores é kN/m e para poder comparar com o valor do esforço axial do pilar é necessário multiplicar o valor do esforço transverso pela extensão em que este se encontra e verificar que é igual ao valor esforço axial do pilar na ligação pilar-laje.

Os valores de corte analisados para efetuar a verificação da não ocorrência de rotura por punçoamento foram os valores máximos dos esforços axiais dos pilares, englobando também o peso próprio dos mesmos. Esta análise não transmite a realidade do esforço de corte, porém

como o acréscimo de esforço transmitido por esta consideração é bastante reduzido, além de não comprometerem a segurança da estrutura, não alteram as principais conclusões a reter deste relatório.

A quantificação da área de armadura de punçoamento será efetuada de acordo com o ponto 4.1.3 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.1.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de punçoamento necessárias a aplicar no painel de laje, em função do esforço de corte atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2. Também é apresentado qual o raio de aplicação da armadura medido a partir do centro do pilar.

Tabela 5.2 – Caso de estudo I – Laje fungiforme maciça – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras ( $c$ / centro no pilar)

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>					
Laje		Maciça $c/$ 26 cm			
Punçoamento	Local	$N_{Ed}$ Pilar (kN)	$(A_{sw}/s)$ (cm <sup>2</sup> /m)	$R$ out (m)	
	Pilar	Canto P1:	134,30	8,34	1,22
		Bordo P2:	296,64	19,2	1,15
		Interior P3:	754,07	39,29	0,96

#### 5.1.4 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise se encontra num caso em que está dispensado o controlo da deformação. Para isso de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da

relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 22 * 1 * 1,25 * 1 * 1 = 27,5 \quad (5.2)$$

$$27,5 \geq \frac{6}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,218 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,22 m, está dispensada do controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo. Porém, e com o objetivo de estimar qual a deformação que a longo prazo a peça estaria sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, e com uma taxa de armadura de tração média de 0,48% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,26}{0,22}\right)^3 * 4,2 * 3,462 \leq \frac{6}{250} \Leftrightarrow \quad (5.3)$$

$$\Leftrightarrow 23,92 \text{ mm} < 24,00 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2, confirmando a dispensa de verificação de acordo com a expressão 5.2.

## 5.2 MODELAÇÃO DE UMA LAJE FUNGIFORME SPHEREPLUS – ORTOGONAL

Com uma disposição dos blocos igual à da figura seguinte, as zonas maciças junto aos pilares interiores formam secções quadradas com dimensões de  $2,80 \times 2,80 \text{ m}^2$ , tendo as restantes zonas dimensões proporcionais a estas.

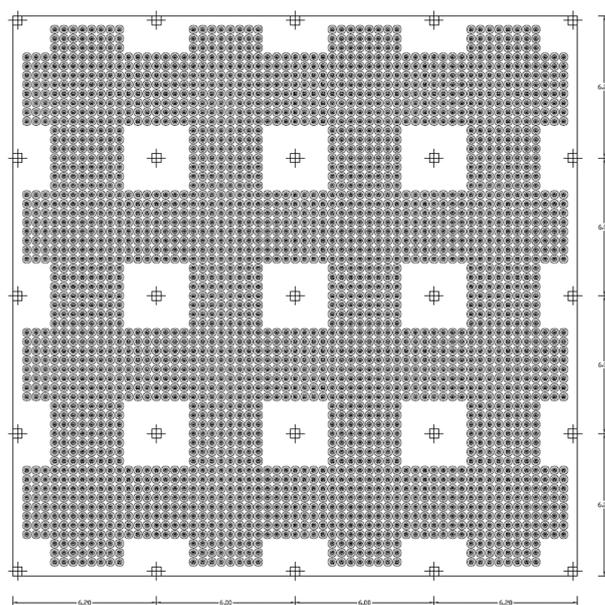


Figura 5.8 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Implantação dos blocos de aligeiramento

### 5.2.1 Caracterização da secção transversal reta

Em função das deformações instantâneas obtidas na modelação da laje fungiforme maciça, é possível, através de uma relação entre peso próprio da laje e momento de inércia da mesma, escolher qual será a solução otimizada (menor volume de betão) da laje fungiforme Sphereplus que satisfaça a deformação elástica máxima pretendida inicialmente (igual ou inferior à da laje fungiforme maciça) e conseqüentemente que cumpra, à partida, o limite máximo regulamentar da deformação a longo prazo.

Para escolher uma solução de laje com aligeiramentos, analisou-se detalhadamente a deformação da laje maciça associada a cada carga aplicada obtendo-se os seguintes valores:

- Deformação associada ao peso próprio: 1,976 mm
- Deformação associada às restantes cargas permanentes: 0,929 mm
- Deformação associada às restantes cargas permanentes: 0,929 x 0,6 mm

Sabendo que, para a mesma espessura total de laje, a deformação varia unicamente com os parâmetros já referidos, é possível determinar qual a deformação associada a cada uma das hipóteses de solução de laje com aligeiramentos, de acordo com a seguinte expressão:

$$a_c = k * \frac{5}{384} * \frac{P * Lx^2 * Ly^2}{E * \frac{Ix}{(1 - \nu)^2}} \quad (5.4)$$

Como o modelo é tridimensional, a aproximação da deformação só estará correta se a altura total das lajes coincidir, caso sejam diferentes esta aproximação estará errada, pois o valor de k é variável em função da altura da laje, do vão das peças, da localização em planta da deformação em análise e também da rigidez da ligação pilar-laje.

A conjugação das várias hipóteses de altura de lâminas de betão com as várias alturas de bloco que satisfaz, de forma mais económica, a altura total da laje fungiforme maciça, é uma laje cujas lâminas de betão, inferior e superior, possuem 5 cm de espessura e um bloco de aligeiramento com 16 cm.

A deformação esperada para a laje fungiforme Sphereplus relativa ao peso próprio é obtida pela seguinte expressão:

$$a_{cMaciça} = K * \frac{5}{384} * \frac{V_{Maciça} * 25 * Lx^2 * Ly^2}{E * \frac{Ix_{Maciça}}{(1 - \nu)^2}} \Leftrightarrow \quad (5.5)$$

$$\Leftrightarrow K = \frac{a_{c\text{Maciça}}}{\frac{5}{384} * \frac{V_{\text{Maciça}} * 25 * Lx^2 * Ly^2}{E * \frac{Ix_{\text{Maciça}}}{(1-\nu)^2}}}$$

Sabendo que a constante K mantém-se igual para as duas lajes, tem-se:

$$a_{c\text{Sphere}} = \frac{f_{\text{Maciça}}}{\frac{5}{384} * \frac{V_{\text{Maciça}} * 25 * Lx^2 * Ly^2}{E * \frac{Ix_{\text{Maciça}}}{(1-\nu)^2}}} * \frac{5}{384} * \frac{V_{\text{Nautilus}} * 25 * Lx^2 * Ly^2}{E * \frac{Ix_{\text{Sphere}}}{(1-\nu)^2}} \Leftrightarrow \tag{5.6}$$

$$a_{c\text{Sphere}} = a_{c\text{Maciça}} * \frac{\frac{V_{\text{Sphere}}}{V_{\text{Maciça}}}}{\frac{Ix_{\text{Sphere}}}{Ix_{\text{Maciça}}}}$$

Em relação às deformações associadas às restantes cargas permanentes e à sobrecarga, como estas ações não variam, tem-se:

$$f_{\text{Sphere}} = f_{\text{Maciça}} * \frac{Ix_{\text{Maciça}}}{Ix_{\text{Sphere}}} \tag{5.7}$$

A seguir apresentam-se os valores resultantes da estimativa da deformação da laje fungiforme Sphereplus, não incluindo qualquer tipo de maciços junto aos pilares.

Tabela 5.3 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Estimativa das deformações elásticas da laje fungiforme Sphereplus com base nas deformações da laje fungiforme maciça

Bn (cm)	Ht (cm)	Hn (cm)	S1 (cm)	S2 (cm)	I (cm)	Volume (cm3)	Ix/m (cm4)	Flecha Teórica (cm)			
								PP	RCP	0,6 x SOB	TOTAL
35	22	16	5	5	5	167476	119189	1,564	1,142	0,685	3,391

Com recurso ao programa de cálculo automático Robot, é possível modelar uma solução de laje com vazios no seu interior, porém apresenta algumas limitações ao nível da caracterização da

secção transversal reta, sendo só possível modelar secções sem qualquer tipo de raio de curvatura na ligação da alma com o banzo. A seguir apresenta-se uma secção equivalente que será modelada no programa.

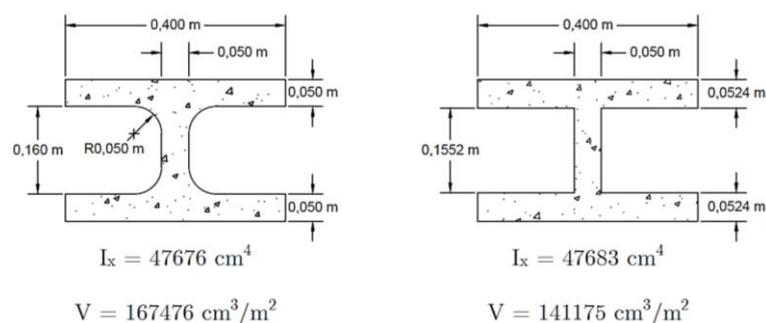
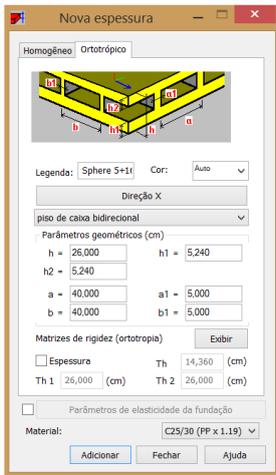
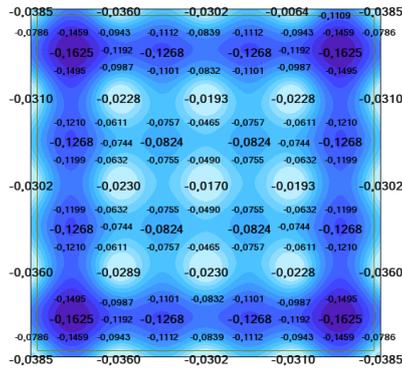


Figura 5.9 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Secção equivalente (Robot)

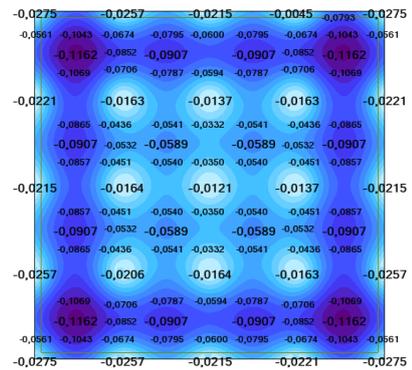
Após a definição de uma secção equivalente, é possível efetuar a modelação da laje no programa, tendo atenção à correção do peso próprio, criando um material com as características do betão C25/30 mas  $167476/141175 = 1,19$  vezes mais pesado (relação entre volumes). Na figura seguinte apresenta-se a modelação efetuada e as respetivas deformações elásticas associadas às cargas aplicadas na laje.



Modelação da secção equivalente



Deformação associada ao peso próprio



Deformação associada às RCP e SOB

Figura 5.10 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Modelação da laje sem zonas maciças

Comparando as deformações obtidas através do programa de cálculo automático com as deformações elásticas estimadas, conclui-se que os valores se aproximam de uma forma bastante satisfatória, ver Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Comparação entre deformações teóricas com as obtidas através do programa Robot.

Flecha Teórica (cm)				Flecha Robot (cm)			
PP	RCP	SOB	TOTAL	PP	RCP	0,6 x SOB	TOTAL
1,564	1,142	0,685	3,391	1,625	1,162	0,697	3,484

Para simplificar todo o processo de seleção de lajes fungiforme Sphereplus foi criada numa folha de cálculo, com recurso ao Microsoft Office Excel, uma rotina, que com base em todas as combinações possíveis de alturas das lâminas de betão e de bloco, apresenta a solução que verifica a deformação elástica imposta e tem menor consumo de betão, ver Figura 5.11.

**Novo Dimensionamento**

**1. Caracterização dos Materiais**

Betão:	C25/30	fck MPa:	25
Aço:	S400	fyk MPa:	400

**2. Maciça -> Sphereplus**

Espessura L. Maciça:	26	cm
Deformação PP:	1,98	mm
Deformação RCP:	0,93	mm
Deformação SOB x $\Psi$ :	0,56	mm
Deformação desejada:	3,60	mm

**Solução otimizada Sphereplus:**

Procurar
Anterior
Próxima

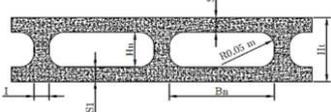
H. Lâmina Inf. (S1):	5,0	cm
Altura do Bloco (Hn):	16,0	cm
H. Lâmina Sup. (S2):	5,0	cm
Volume:	0,167	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>

Limpar
Definir ->

**FERCANORTE**  
ESTRUTURAS, LAJES E COFRAGENS, LDA.

MK4

Bloco Sphereplus



H. Lâmina Inf. (S1):	5,0	cm
Altura do Bloco (Hn):	16,0	cm
H. Lâmina Sup. (S2):	5,0	cm
H zona Maciça:	26,0	cm
Recobrimento:	4,0	cm

\* Possível definir manualmente

**3. Caracterização da STR**

Inércia (I <sub>x</sub> ):	119189	cm <sup>4</sup> /m
Volume:	141147	cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>

**Solução Equivalente (H<sub>tReal</sub> = H<sub>tEq</sub>):**

H. Lâminas:	5,24	cm
Nervura + Bloco:	5+35	cm
V <sub>STR REAL</sub> / V <sub>STR EQ.</sub>	1,19	

Figura 5.11 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Definição da solução de laje com recurso à folha de cálculo automático elaborada

Além da rotina criada, foram também programadas todas as verificações propostas pelo Eurocódigo 2, simplificando todo o processo de dimensionamento. Na Figura 5.11 é possível verificar que também é criada uma solução equivalente para a modelação num programa de cálculo automático que permita dimensionar este tipo de soluções.

Ao longo do capítulo 5 do presente relatório, a folha de cálculo continuará a ser apresentada e a servir de base para todo o cálculo efetuado.

## 5.2.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A alteração da secção não influencia o comportamento estrutural da estrutura, reduzindo apenas os valores dos esforços resultantes das cargas aplicadas. A distribuição de momentos fletores será idêntica, tanto na localização dos esforços máximos como na localização dos momentos nulos.

De acordo com análise de esforços efetuada pelo mesmo procedimento que no ponto 5.1.2 do presente relatório, a quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.2.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 5.5 - Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>							
Laje		Sphereplus 5+16+5			ht = 26 cm		
		$A_{s,min}$ : 3,72 cm <sup>2</sup> /m					
Flexão/Banda	Face Superior	Local	$M_{Ed}$ Médio (kN.m/m)	$A_{s,nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_t$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{s,central}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{s,lateral}$ (cm <sup>2</sup> /m)
		$M_{Ed}^-$ I	7,62	1,01	6,06	3,72	3,72
		$M_{Ed}^-$ II	15,16	2,02	12,12	4,04	3,72
	$M_{Ed}^-$ III	57,20	8,01	48,06	16,02	5,34	
	Face Inferior	$M_{Ed}^+$ I	36,11	4,93	29,58	4,93	3,72
$M_{Ed}^+$ II		20,32	2,72	16,32	3,72	3,72	

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 5.5 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos

painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{EdIII}^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{EdI}^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4.

A utilização da folha de cálculo na obtenção de áreas de armadura simplifica bastante todo o processo de dimensionamento, apresentando também todos os critérios de disposição de armaduras e limites de áreas de armadura mínima e máxima, ver Figura 5.12.

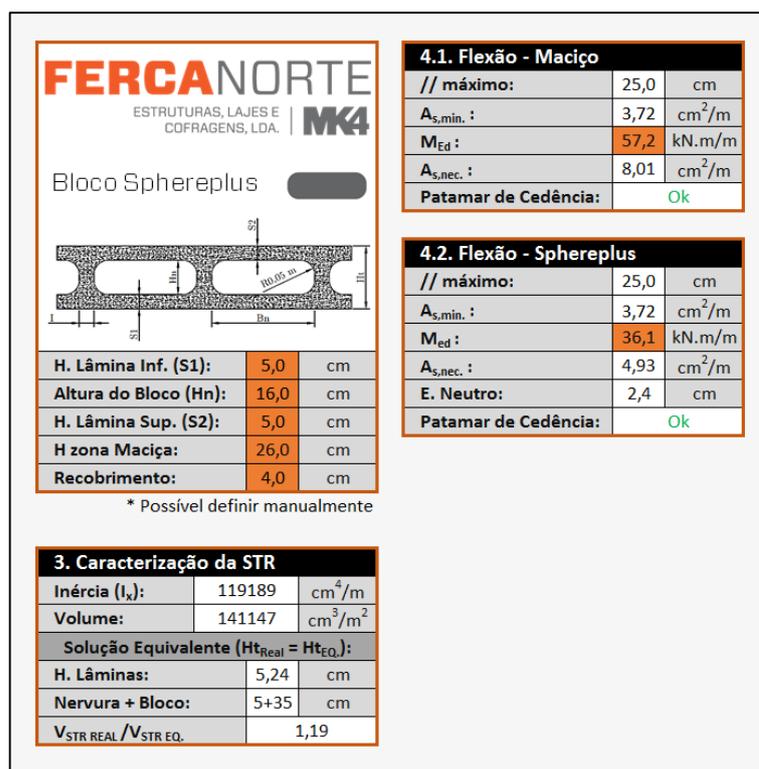


Figura 5.12 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Quantificação das áreas de armaduras de flexão com recurso à folha de cálculo automático elaborada

### 5.2.3 Estado limite último – Rotura por esforço transverso

A verificação da resistência ao esforço de corte na zona das lajes fungiformes Sphereplus condiciona, grande parte das vezes, a dimensão que deverá ter a zona maciça junto aos pilares. Devido à pequena largura da nervura entre blocos, o esforço transverso que provoca esmagamento é um valor muito baixo, obrigando a uma análise cuidadosa do mapa de cores do esforço transverso atuante, verificando que o esforço transverso máximo a que as nervuras resistem encontra-se na parte maciça da laje.

Antes de analisar o mapa de cores dos esforços de corte na laje, deverão ser calculados os esforços de corte resistentes da laje fungiforme Sphereplus.

Com recurso à folha de cálculo automática elaborada, de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, obtiveram-se os seguintes esforços resistentes da secção nervurada.

5. Esforço Transverso		
// máximo long.:	16,5	cm
// máximo transv.:	16,5	cm
$(A_{sw}/s)_{min}/Nervura$ :	0,5	cm <sup>2</sup> /m
$V_{Rd,c} (A_{s,min})$ :	23,7	kN/m
$V_{Rd,máx.}$ :	76,8	kN/m
$V_{Ed}$ (Limite do Maciço):		cm <sup>2</sup> /m
$(A_{sw}/s)/Nervura$ :	-	cm <sup>2</sup> /m

Figura 5.13 - Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Cálculo das características resistentes relativas ao esforço transverso com recurso à folha de cálculo automático elaborada

Analisando o mapa de cores do esforço de corte da laje modelada, fornecido pelo programa de cálculo automático, é possível identificar na planta os esforços resistentes da laje fungiforme

Sphereplus e certificar que não irá ocorrer esmagamento do betão nas nervuras existentes entre blocos.

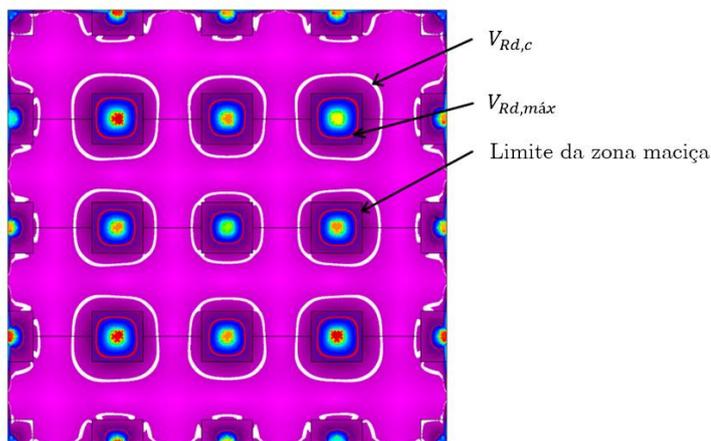


Figura 5.14 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Mapa dos esforços de corte

Determinando agora qual o esforço transversal no limite da zona maciça, é possível dimensionar uma armadura a aplicar na zona nervurada.

A quantificação da área de armadura de esforço transversal será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.2.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transversal necessárias a aplicar nas nervuras da laje, em função do esforço transversal atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 5.6 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>						
Laje		Sphereplus 5+16+5			ht = 26 cm	
					A <sub>s,min</sub> :	3,72 cm <sup>2</sup> /m
					(A <sub>sw</sub> /s) <sub>min</sub> :	1,25 cm <sup>2</sup> /m
					s <sub>1</sub> :	0,165 m
					s <sub>2</sub> :	0,165 m
Transverso	Local	V <sub>Rd,c</sub> (kN/m)	V <sub>Rd,máx</sub> (kN/m)	V <sub>Ed</sub> (kN/m)	(A <sub>sw</sub> /s) <sub>nec</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	A <sub>sw</sub> /s /nerv.
	Junto a P3	20,84	76,80	60,52	3,53	Φ8//0,13(3)

Torna-se necessário referir que a quantificação da armadura e definição de uma solução de montagem da mesma é condicionada pelo espaçamento máximo limitado pelo Eurocódigo 2. Na figura seguinte está ilustrado o esquema de montagem adotado para a solução de laje em análise, verificando todos os requisitos existentes.

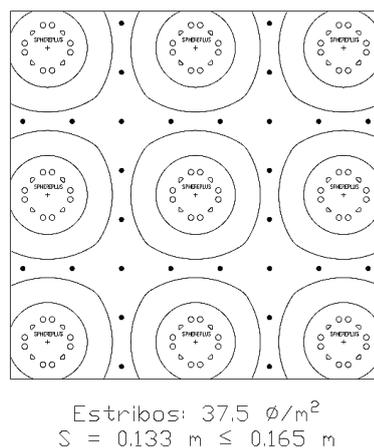


Figura 5.15 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Disposição da armadura de esforço transverso

Comparando a resistência ao esforço transversal de uma laje fungiforme maciça com uma laje fungiforme Sphereplus é possível concluir que o esforço de corte máximo resistente pela laje fungiforme maciça sem armadura de esforço transversal (com taxa de armadura igual à mínima regulamentada pelo EC2) é de 105,12 kN/m, sendo este valor cerca de 5 vezes maior que o esforço transversal resistente máximo sem armadura da laje fungiforme Sphereplus, Figura 5.13.

Porém, devido à possibilidade de colocação de armadura para resistência ao esforço transversal nas nervuras existentes entre os blocos de aligeiramento, é possível aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal da laje para cerca de 75% do valor do esforço transversal resistente máximo da laje fungiforme maciça.

Em relação ao sistema Cobiax, a resistência ao esforço transversal é significativamente maior, pois, nos catálogos disponibilizados, os fatores, propostos pela empresa Ferca, de redução de resistência ao corte variam entre 50% a 55%, pois a espessura da nervura existente entre blocos é inferior à considerada no dimensionamento da solução de laje fungiforme Sphereplus.

#### **5.2.4 Estado limite último – Rotura por punção**

De acordo com a análise de esforços efetuada pelo mesmo procedimento do ponto 5.1.3 do presente relatório, a quantificação da área de armadura de punção será efetuada de acordo com o ponto 4.1.3, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.2.1.

Na Figura 5.16 encontra-se ilustrada a parte da folha de cálculo relativa ao dimensionamento de armaduras de punção.

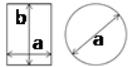
6. Armadura de Punçoamento		
	A dimensão "a" representa a dimensão perpendicular ao bordo	
Tipo de Pilar:	Rectangular	
Local Pilar Analisar:	Interior	
Tipo de Armadura:	Estribos	
Dimensão de "a":	40	cm
Dimensão de "b":	40	cm
Dist. Bordo - Face "a":	0	cm
Dist. Bordo - Face "b":	0	cm
$A_s \text{ Tração} = (A_{s,y} \times A_{s,z})^{0,5}$	16,02	cm <sup>2</sup> /m
$V_{Ed}$ :	657	kN
$V_{Ed} \leq v_{Rd,máx}$	Verifica	
Raio s/ Aligeiramento:	0,89	m
$(A_{sw}/s_r)$	30,90	cm <sup>2</sup> /m

Figura 5.16 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Quantificação das áreas de armaduras de punçoamento com recurso à folha de cálculo automática elaborada

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de punçoamento necessárias a aplicar no painel de laje, em função do esforço de corte atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2. Também é apresentado qual o raio de aplicação da armadura medido a partir do centro do pilar.

Tabela 5.7 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar)

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>					
Laje		Sphereplus 5+16+5 ht = 26 cm			
Punçoamento	Local	N <sub>Ed</sub> Pilar (kN)	(A <sub>sw</sub> /s) (cm <sup>2</sup> /m)	R out (m)	
	Pilar	Canto P1:	118,17	5,93	1,07
		Bordo P2:	258,70	15,23	1,07
		Interior P3:	656,59	30,90	0,89

Após a análise da Tabela 5.7, verificou-se que os raios onde se coloca a armadura, indicados como “R out”, conseguem-se inserir dentro das zonas maciças, concluindo assim, que as dimensões das zonas maciças são suficientes para absorver os esforços de corte que provocam rotura da laje por punçoamento.

### 5.2.5 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise se encontra num caso em que está dispensado o controlo da deformação. Para isso, de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 22 * 1 * 1,25 * 1 * 1 = 27,5 \quad (5.8)$$

$$27,5 \geq \frac{6}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,218 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,22 m, está dispensado o controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo. Porém, e com o objetivo de estimar qual a deformação que a longo prazo a peça estaria sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, e com uma taxa de armadura de tração média de 0,69% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,26}{0,22}\right)^3 * 3,2 * 3,484 \leq \frac{6}{250} \Leftrightarrow \tag{5.9}$$

$$\Leftrightarrow 18,40 \text{ mm} < 24,00 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2, confirmando a dispensa de verificação de acordo com a expressão 5.8.

Utilizando a folha de cálculo elaborada, tem-se o seguinte:

7. Controlo da deformação		
Vão maior:	6	m
Altura Acons. z :	25,8	cm
Disp. Verificação:	Sim	
Def. Máx. Elástica:	3,5	mm
A <sub>s,médio</sub> :	8,6	cm <sup>2</sup> /m
Deformação a t <sub>∞</sub> :	18,72	mm
Deformação t <sub>∞</sub> limite:	24,00	mm

\* Método simplificado (CEB-FIP)  
\* Armadura compressão ã considerada

Figura 5.17 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Controlo da deformação pelo cálculo das flechas a longo prazo com recurso à folha de cálculo elaborada

### 5.3 MODELAÇÃO DE UMA LAJE FUNGIFORME SPHEREPLUS – FAVO DE MEL

Com uma disposição dos blocos igual à da figura seguinte, as zonas maciças junto aos pilares interiores formam secções hexagonais com dimensões de aproximadamente 1,60 m de lado, tendo as restantes zonas dimensões proporcionais a esta.

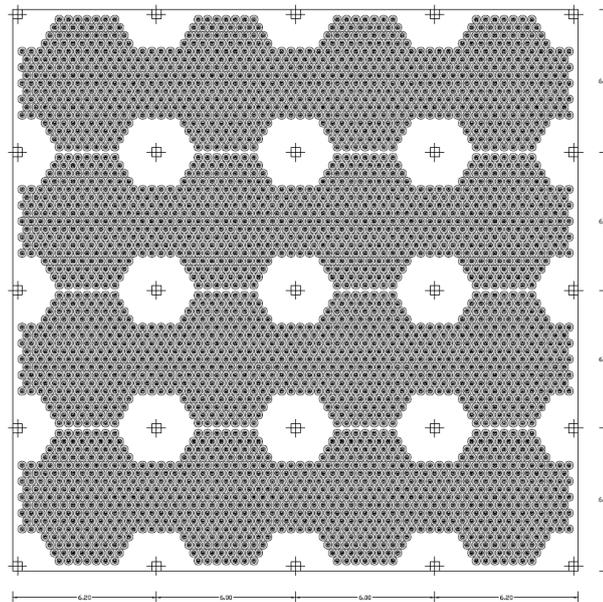


Figura 5.18 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus ( favo de mel) – Implantação dos blocos de aligeiramento

#### 5.3.1 Caracterização da secção transversal reta

A solução de laje a aplicar terá as mesmas dimensões, ao nível da secção transversal reta, que a laje fungiforme Sphereplus com disposição ortogonal, mas devido à redução significativa de peso e à não existência de um painel próprio com disposição em favo de mel no programa de cálculo automático, Robot, foi necessário verificar a fidedignidade da modelação que se iria utilizar para o caso de estudo comparando-a com uma modelação da laje formada por vigas equivalentes colocadas na posição das nervuras.

Para isso, modelou-se uma estrutura de laje com  $6 \times 6 \text{ m}^2$ , apoiada em quatro pilares de duas formas. A primeira, uma solução de vigas equivalentes, que correspondiam a uma nervura de laje, efetuou-se de acordo com a seguinte figura:

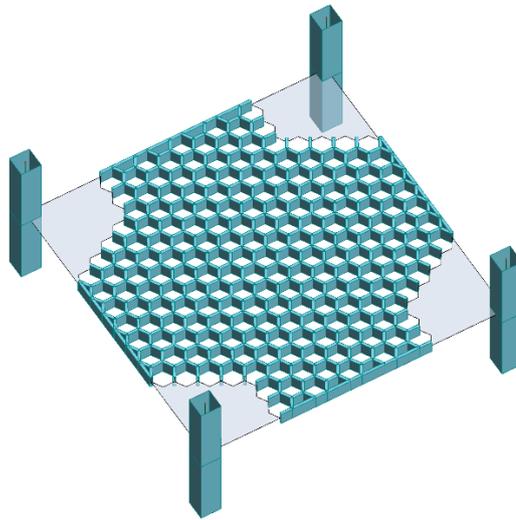


Figura 5.19 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Modelação no Robot com recurso a vigas

As nervuras têm as seguintes características de acordo com a figura seguinte:

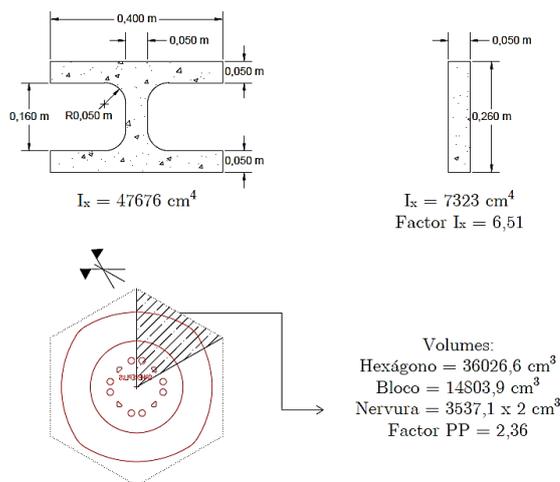


Figura 5.20 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Modelação no Robot com recurso a vigas

A segunda solução passa por criar um painel de laje maciça com inércia e peso iguais à laje fungiforme Sphereplus (favo de mel), resultando na seguinte modelação:

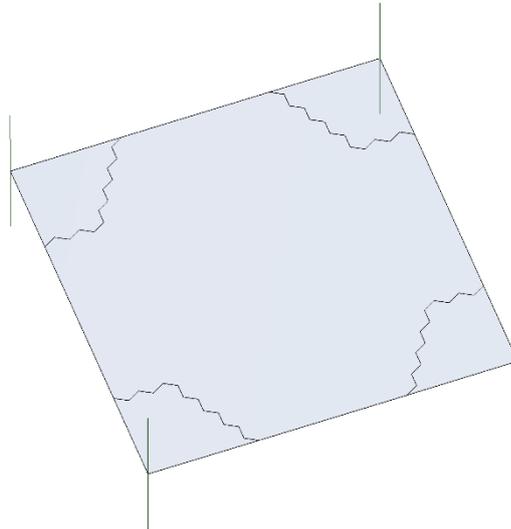


Figura 5.21 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Modelação no Robot com recurso a um painel de laje

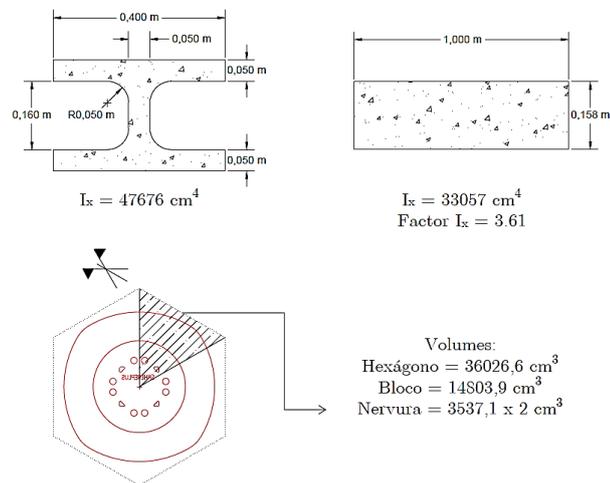
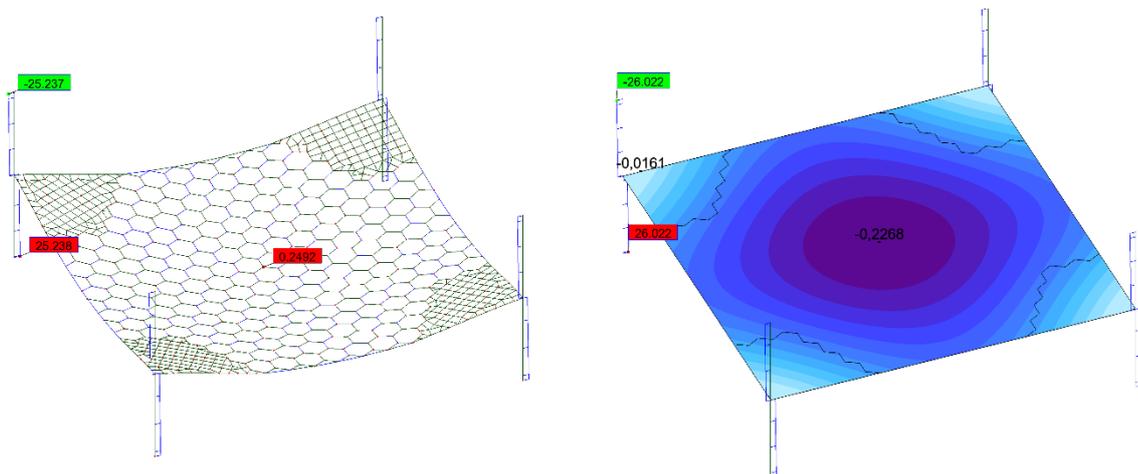


Figura 5.22 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Modelação no Robot com recurso a um painel de laje

Comparando as deformadas máximas obtidas, assim como o seu comportamento estrutural, ao nível da transmissão de forças para os pilares, é possível concluir que as modelações com um painel equivalente correspondem muito aproximadamente à modelação da laje com recurso a vigas equivalentes, podendo-se modelar o caso de estudo com um painel equivalente, simplificando toda a modelação. Torna-se importante referir que uma modelação da planta analisada no caso de estudo com recurso a vigas equivalentes torna-se um modelo bastante pesado e lento de trabalhar, tanto a nível da modelação como a nível de análise de resultados, daí a necessidade da modelação com painel equivalente.



a) Modelação da laje fungiforme sphereplus (favo de mel) com vigas      b) Modelação da laje fungiforme sphereplus (favo de mel) com painel equivalente

Figura 5.23 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Comparação entre modelações estruturais – Vigas VS Painel

### 5.3.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A análise dos momentos fletores é efetuada pelo mesmo método utilizado no ponto 5.1.2 e 5.2.2 do presente relatório, porém os momentos analisados na direção segundo o eixo do X e na direção segundo o eixo do Y são diferentes devido à assimetria providenciada pela utilização dos maciços hexagonais. Contudo, devido à proximidade entre os valores dos momentos fletores

obtidos, utilizou-se para o dimensionamento das armaduras de flexão os momentos mais gravosos e assumiu-se uma distribuição de armadura igual nas duas direções.

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.3.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 5.8 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>							
Laje		Sphereplus 5+16+5 Favo ht = 26 cm					
		A <sub>s,min</sub> : 3,72 cm <sup>2</sup> /m					
Flexão/Banda	Local	M <sub>Ed</sub> Médio	A <sub>s,nec</sub>	A <sub>t</sub>	A <sub>s,central</sub>	A <sub>s,lateral</sub>	
		(kN.m/m)	(cm <sup>2</sup> /m)	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> /m)	(cm <sup>2</sup> /m)	
	Face Superior	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> I	6,86	0,90	5,40	3,72	3,72
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> II	10,96	1,45	8,70	3,72	3,72
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> III	53,55	7,46	44,76	14,92	4,97
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> I	34,05	4,64	27,84	4,64	3,72
M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> II		19,55	2,62	15,72	3,72	3,72	

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 5.5 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{EdIII}^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{EdI}^+$ , assinalado a azul na tabela

anterior. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4.

### 5.3.3 Estado limite último – Rotura por esforço transversal

A verificação da resistência da laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) ao esforço transversal é efetuada com o mesmo princípio da laje fungiforme Sphereplus (ortogonal). De uma forma conservativa, a maior quantidade de nervuras por  $m^2$  da solução em favo de mel não justifica o aumento da resistência da laje ao esforço transversal. A particularidade deste tipo de solução existe apenas na definição do espaçamento entre armaduras de esforço transversal, tendo este que ser analisado detalhadamente.

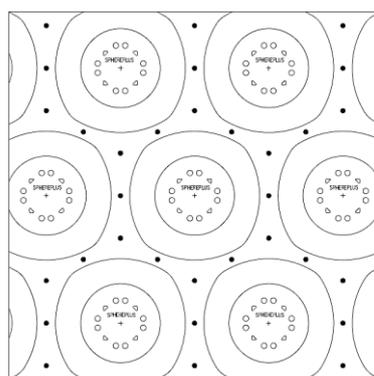
A quantificação da área de armadura de esforço transversal será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.3.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transversal necessárias a aplicar nas nervuras da laje, em função do esforço transversal atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 5.9 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>							
Laje		Sphereplus 5+16+5 - Favo			ht =	26	cm
					$A_{s,min}$ :	3,72	cm <sup>2</sup> /m
					$(A_{sw}/s)_{min}$ :	1,25	cm <sup>2</sup> /m
					$s_t$ :	0,165	m
					$s_b$ :	0,165	m
Transverso	Local	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	$V_{Rd,máx}$ (kN/m)	$V_{Ed}$ (kN/m)	$(A_{sw}/s)_{nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{sw}/s$ /nerv.	
	Junto a P3	20,84	76,80	64,48	4,33	Φ8//0,115 m	

Torna-se necessário referir que a quantificação da armadura e definição de uma solução de montagem da mesma é condicionada pelo espaçamento máximo limitado pelo Eurocódigo 2. Na figura seguinte está ilustrado o esquema de montagem adotado para a solução de laje em análise, verificando todos os requisitos existentes.



$$\text{Estribos: } 36,09 \text{ } \phi / \text{m}^2$$

$$s = 0,115 \text{ m} \leq 0,75 \times d \text{ m}$$

Figura 5.24 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Disposição da armadura de esforço transverso

Foi efetuado o mesmo procedimento na análise dos mapas do esforço de corte e verificou-se que o esforço transversal máximo resistente das lajes está condicionado à zona do maciço, validando assim as dimensões da zona sem blocos de aligeiramento junto aos pilares.

### 5.3.4 Estado limite último – Rotura por punçoamento

A quantificação da área de armadura de punçoamento será efetuada de acordo com o ponto 4.1.3 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.1.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de punçoamento necessárias a aplicar no painel de laje, em função do esforço de corte atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2. Também é apresentado qual o raio de aplicação da armadura medido a partir do centro do pilar.

Tabela 5.10 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar)

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>					
Laje		Sphere. 5+16+5 Favo ht = 26 cm			
Punçoamento	Local	N <sub>Ed</sub> Pilar (kN)	(A <sub>sw</sub> /s) (cm <sup>2</sup> /m)	R out (m)	
	Pilar	Canto P1:	115,77	5,57	1,05
		Bordo P2:	252,04	14,83	1,07
		Interior P3:	637,84	29,79	0,88

Após a análise da Tabela 5.10, verificou-se que os raios onde se coloca a armadura, indicados como “R out”, situam-se dentro das zonas maciças, concluindo assim, que as dimensões das

zonas maciças são suficientes para absorver os esforços de corte que provocam rotura da laje por punçoamento.

### 5.3.5 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise se encontra num caso em que está dispensado o controlo da deformação. Para isso, de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 22 * 1 * 1,25 * 1 * 1 = 27,5 \quad (5.10)$$

$$27,5 \geq \frac{6}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,218 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,22 m, está dispensado o controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo. Porém, e com o objetivo de estimar qual a deformação que a longo prazo a peça estaria sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, e com uma taxa de armadura de tração média de 0,64% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,26}{0,22}\right)^3 * 3,4 * 3,130 \leq \frac{6}{250} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 17,70 \text{ mm} < 24,00 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2, confirmando a dispensa de verificação de acordo com a expressão 5.11.

## 5.4 MODELAÇÃO DE UMA LAJE FUNGIFORME FERCA

Com uma disposição dos blocos igual à da figura seguinte, as zonas maciças junto aos pilares interiores formam secções quadradas com dimensões de  $2,40 \times 2,40 \text{ m}^2$ , tendo as restantes zonas dimensões proporcionais a estas.

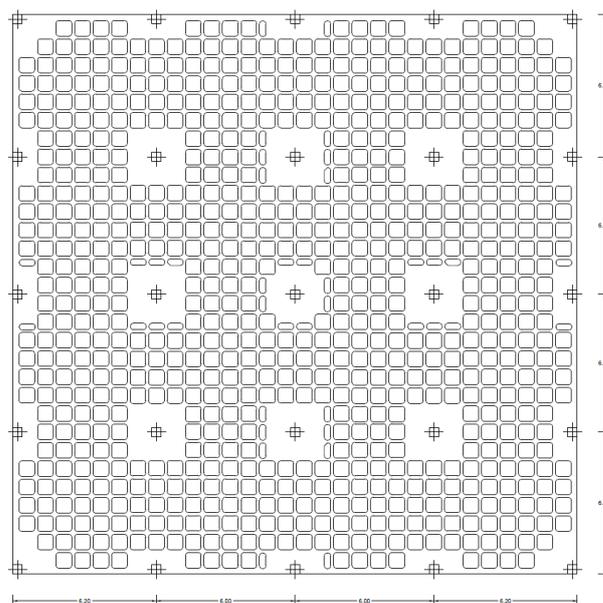


Figura 5.25 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Implantação dos moldes Ferca

A análise de todos os esforços atuantes será efetuada pelo mesmo procedimento que na análise das soluções anteriormente dimensionadas.

### 5.4.1 Caracterização da secção transversal reta

A solução a adotar será uma solução com uma altura total superior às lajes anteriormente analisadas. A falta de uma lâmina de betão inferior provoca uma redução considerável na inércia da peça, existindo assim a necessidade de aumentar a altura da laje fungiforme com moldes recuperáveis Ferca.

Após sucessivas modelações, a solução adotada foi uma solução do tipo FG800, constituída por moldes com altura de 250 mm e com uma lâmina superior de betão com 60 mm de espessura, perfazendo assim 310 mm de altura total da peça.

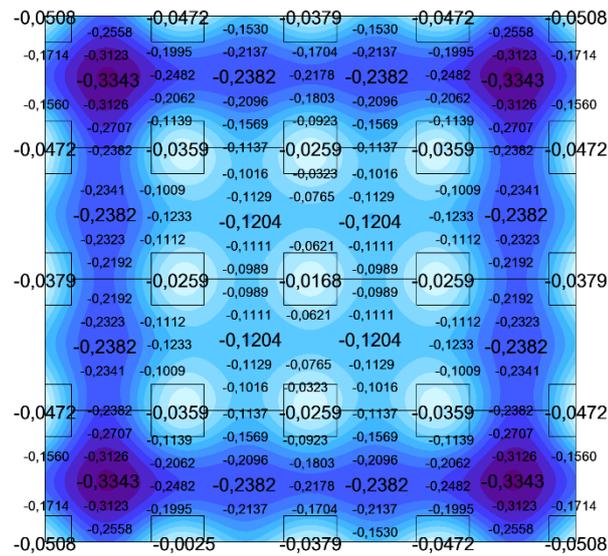


Figura 5.26 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Modelação Robot para verificação da deformação elástica

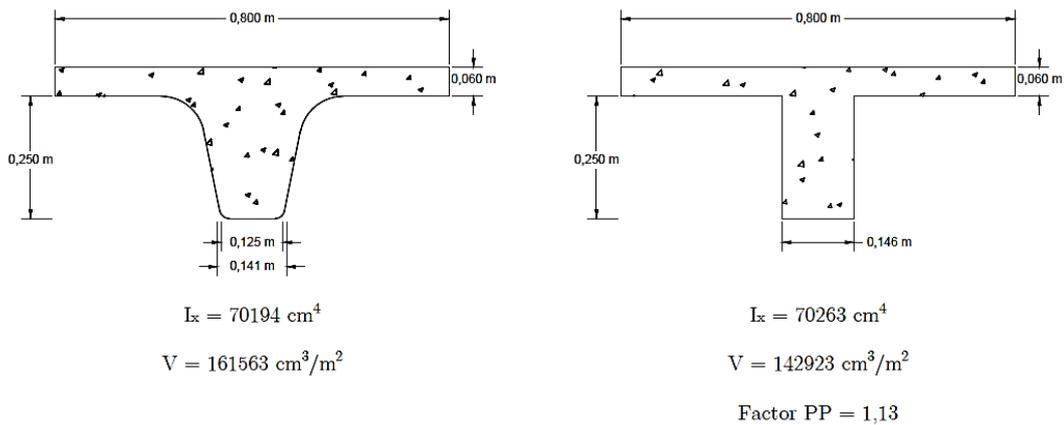


Figura 5.27 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Secção equivalente (Robot)

### 5.4.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.4.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 5.11 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>							
Laje		FG800 250+60 ht = 31 cm					
		A <sub>s,min</sub> - : 4,56 cm <sup>2</sup> /m		A <sub>s,min</sub> +: 0,77 cm <sup>2</sup> /m			
Flexão/Banda	Local	M <sub>Ed</sub> Médio	A <sub>s,nec</sub>	A <sub>t</sub>	A <sub>s,central</sub>	A <sub>s,lateral</sub>	
		(kN.m/m)	(cm <sup>2</sup> /m)	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> /m)	(cm <sup>2</sup> /m)	
		Face Superior	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> I	15,43	1,66	9,96	4,56
	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> II		15,72	1,70	10,20	4,56	4,56
	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> III	64,23	7,20	43,20	14,40	4,80	
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> I	30,70	3,35	20,10	3,35	1,68
M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> II		14,99	1,62	9,72	1,62	0,81	

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 5.5 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{EdIII}^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{EdI}^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4.

### 5.4.3 Estado limite último – Rotura por esforço transverso

O cálculo da resistência ao esforço transverso da laje fungiforme Ferca é condicionado pela largura das nervuras, assim como o número de nervuras por metro de laje.

A quantificação da área de armadura de esforço transverso será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.4.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transverso necessárias a aplicar nas nervuras da laje, em função do esforço transverso atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 5.12 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>							
Laje		FG 800 250+60			ht = 31 cm		
					A <sub>s,min</sub> :	0,77	cm <sup>2</sup> /m
					(A <sub>sw/s</sub> ) <sub>min</sub> :	1,76	cm <sup>2</sup> /m
					s <sub>l</sub> :	0,203	m
					s <sub>t</sub> :	0,203	m
Transverso	Local	V <sub>Rd,c</sub> (kN/m)	V <sub>Rd,máx</sub> (kN/m)	V <sub>Ed</sub> (kN/m)	(A <sub>sw/s</sub> ) <sub>nec</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	A <sub>sw/s</sub> /nerv.	
	Junto a P3	21,14	132,92	69,44	3,26	-	

Verificou-se a condição de o esforço transverso máximo resistente da zona nervurada se encontrar na parte sem blocos da laje (junto ao pilar) e concluiu-se que a dimensão da zona maciça é suficiente para a laje em questão.

#### 5.4.4 Estado limite último – Rotura por punçoamento

A quantificação da área de armadura de punçoamento será efetuada de acordo com o ponto 4.1.3 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 5 e a solução considerada no ponto 5.4.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de punçoamento necessárias a aplicar no painel de laje, em função do esforço de corte atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2. Também é apresentado qual o raio de aplicação da armadura medido a partir do centro do pilar.

Tabela 5.13 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Ferca – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar)

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>					
Laje		FG 800 250+60	ht = 31 cm		
<b>Punçoamento</b>	Local	<b>N<sub>Ed</sub> Pilar</b> (kN)	<b>(A<sub>sw</sub>/s)</b> (cm <sup>2</sup> /m)	<b>R out</b> (m)	
	Pilar	Canto P1:	114,96	0,00	0,92
		Bordo P2:	257,73	7,34	0,94
		Interior P3:	676,89	15,59	0,80

Após a análise da Tabela 5.13, verificou-se que os raios onde se coloca a armadura, indicados como “R out”, situam-se dentro das zonas maciças, concluindo assim, que as dimensões das zonas maciças são suficientes para absorver os esforços de corte que provocam rotura da laje por punçoamento.

#### 5.4.5 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise se encontra num caso em que está dispensado o controlo da deformação. Para isso de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 22 * 0,8 * 1,25 * 1 * 1 = 22 \quad (5.12)$$

$$22 \geq \frac{6}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,27 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,27 m, está dispensado o controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo. Porém, e com o objetivo de estimar qual a deformação que a longo prazo a peça estaria sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, com uma taxa de armadura de tração média de 0,61% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,31}{0,27}\right)^3 * 3,6 * 3,343 \leq \frac{6}{250} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 18,21 \text{ mm} < 24,00 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2, confirmando a dispensa de verificação de acordo com a expressão 5.13.

### 5.5 MEDIÇÕES E ANÁLISE DE CUSTOS

De forma a comparar as soluções de laje analisadas neste caso de estudo, foi criada uma tabela, que, em função do tipo de laje analisada, discrimina e contabiliza todo o material que foi

considerado no dimensionamento da mesma. Para uma comparação mais simplificada, todas as medições foram reduzidas para a construção de um metro quadrado de laje. Após a quantificação de todo o material é possível efetuar uma atribuição de preços unitários e comparar as soluções. O mapa de quantidades detalhado de todas as soluções consideradas neste caso de estudo encontra-se no anexo II.

Neste mapa de quantidades não foram atribuídos custos unitários aos blocos de aligeiramento, permitindo assim a elaboração de um gráfico que em função do custo unitário do bloco é determinado um custo total da laje por unidade de área. O gráfico elaborado encontra-se apresentado a seguir.

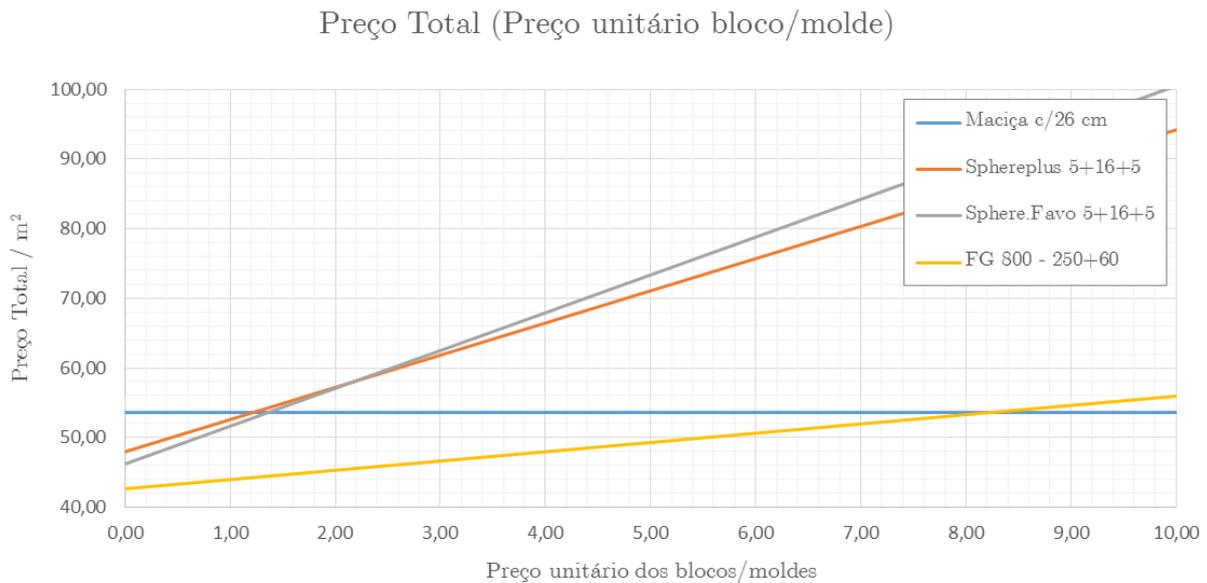


Figura 5.28 – Caso de estudo I – Preço de laje/m<sup>2</sup> em função do custo unitário do bloco

## 6 CASO DE ESTUDO II

A estrutura a ser modelada será constituída por painéis de laje com  $7,04 \times 7,04 \text{ m}^2$ , tendo no total 16 painéis, como ilustrado na Figura 1. Os pilares, onde apoiam os painéis, terão  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  e um comprimento total de 3 metros. O apoio dos painéis de laje será modelado de acordo com o descrito no caso de estudo anterior.

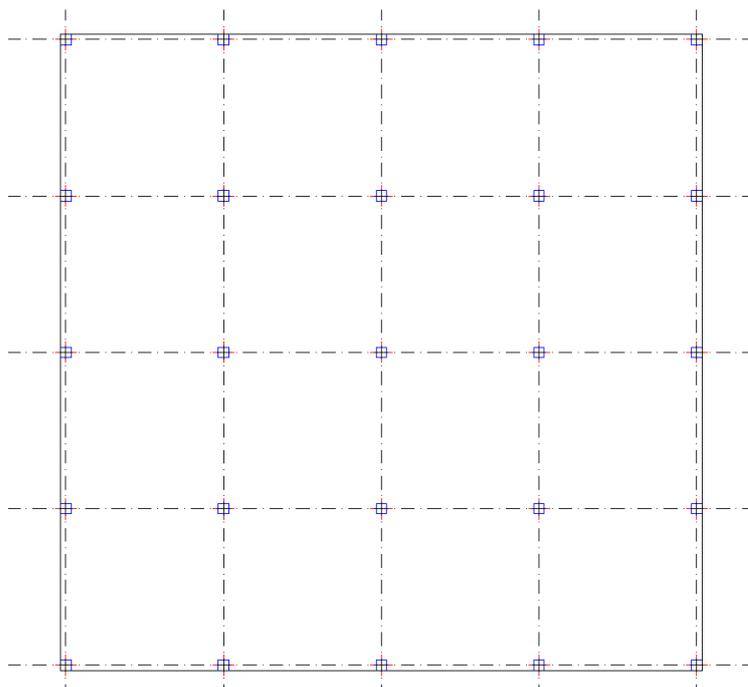


Figura 6.1 – Caso de estudo II – Planta estrutural

As cargas a aplicar na estrutura consideradas além do peso próprio da laje, como as restantes cargas permanentes e sobrecarga, têm ambas o valor de  $3 \text{ kN/m}^2$ .

Considerou-se que o betão a utilizar pertenceria à classe C25/30 e o aço à classe S400, adotando-se um recobrimento para todos os elementos estruturais de 4 centímetros.

A análise de esforços de dimensionamento das secções de betão armado, assim como também a distribuição de armaduras, serão realizadas de acordo com tudo o que foi descrito no capítulo 5 do relatório.

## 6.1 MODELAÇÃO DE UMA LAJE FUNGIFORME MACIÇA

### 6.1.1 Caracterização da secção transversal reta

A altura da laje a adotar será aquela que satisfaça, utilizando o menor volume de betão possível, todos os critérios de dimensionamento abordados no capítulo 4.

A definição da altura de uma laje fungiforme normalmente é condicionada pelo estado limite de utilização relativo ao controlo da deformação. De forma a tentar satisfazer desde o início este limite mais condicionante, através do método simplificado de cálculo da flecha a longo prazo, admitindo uma taxa de armaduras de 0.5% e desprezando qualquer efeito das armaduras de compressão, estimou-se que a espessura ideal para a peça, de acordo com os materiais definidos, seria de 30 cm. O valor da flecha instantânea foi obtido através da modelação da estrutura no programa de cálculo automático.

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 * \eta * a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,30}{0,26}\right)^3 * 4 * 0,049 \leq 0,024 \Leftrightarrow 0,029 \approx 0,028 \quad (6.1)$$

Nota: Esta análise prévia não dispensa a verificação posterior do estado limite de utilização relativo às deformações a longo prazo, pois a taxa de armadura média poderá não ser a estimada.

### 6.1.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.1.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 6.1 – Caso de estudo II – Laje fungiforme e maciça – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>							
Laje		Maciça c/ 30 cm					
		$A_{s,min}$ : 4,39 cm <sup>2</sup> /m					
Flexão/Banda	Local	$M_{Ed}$ Médio	$A_{s,nec}$	$A_t$	$A_{s,central}$	$A_{s,lateral}$	
		(kN.m/m)	(cm <sup>2</sup> /m)	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> /m)	(cm <sup>2</sup> /m)	
	Face Superior	$M_{Ed}^+ I$	15,82	1,77	12,46	4,39	4,39
		$M_{Ed}^- II$	20,01	2,25	15,84	4,50	4,39
		$M_{Ed}^- III$	90,24	10,78	75,89	21,56	7,19
	Face Inferior	$M_{Ed}^+ I$	65,67	7,68	54,07	7,68	4,39
$M_{Ed}^+ II$		38,47	4,40	30,98	4,40	4,39	

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 6.6 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{Ed}III^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{Ed}I^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4 do capítulo 5.

### 6.1.3 Estado limite último – Rotura por punçoamento

A quantificação da área de armadura de punçoamento será efetuada de acordo com o ponto 4.1.3 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.1.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de punçoamento necessárias a aplicar no painel de laje, em função do esforço de corte atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2. Também é apresentado qual o raio de aplicação da armadura medido a partir do centro do pilar.

Tabela 6.2 – Caso de estudo II – Laje fungiforme maciça – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar)

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>					
Laje		Maciça c/ 30 cm			
Punçoamento	Local	N <sub>Ed</sub> Pilar (kN)	(A <sub>sw</sub> /s) (cm <sup>2</sup> /m)	R out (m)	
	Pilar	Canto P1:	191,30	11,81	1,56
		Bordo P2:	430,16	27,59	1,55
		Interior P3:	1116,94	56,75	1,27

### 6.1.4 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise se encontra num caso em que está dispensado o controlo da deformação. Para isso, de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 22 * 1 * 1,25 * 1 * 1 = 27,5 \quad (6.2)$$

$$27,5 \geq \frac{7,04}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,256 \text{ m}$$

A altura útil da laje fungiforme maciça é de 0,26 m, estando dispensada da verificação da deformação a longo prazo.

## 6.2 MODELAÇÃO DE UMA LAJE FUNGIFORME NAUTILUS

Com uma disposição dos blocos igual à da figura seguinte, as zonas maciças junto aos pilares interiores formam secções quadradas com dimensões de 2,56 x 2,56 m<sup>2</sup>, tendo as restantes zonas dimensões proporcionais a estas.

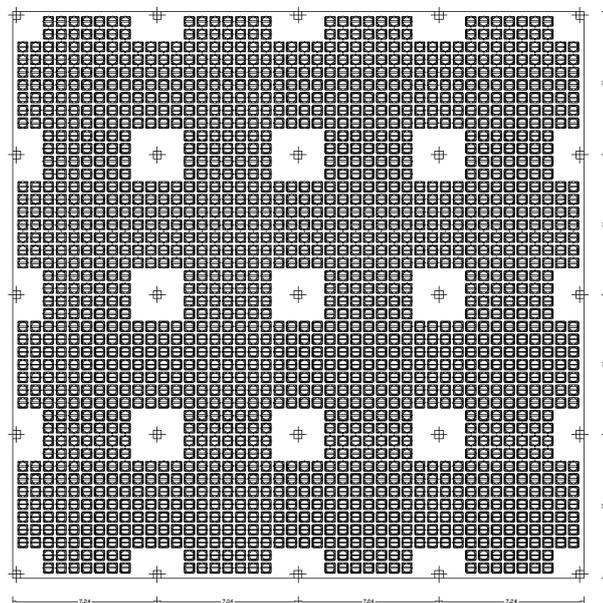


Figura 6.2 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Implantação dos blocos de aligeiramento

### 6.2.1 Caracterização da secção transversal reta

Efetuada o mesmo procedimento que nas lajes fungiformes Sphereplus, a relação entre peso próprio e inércia da peça permite obter qual a solução de laje fungiforme Nautilus que melhor se adapta a este caso de estudo. A solução adotada foi:

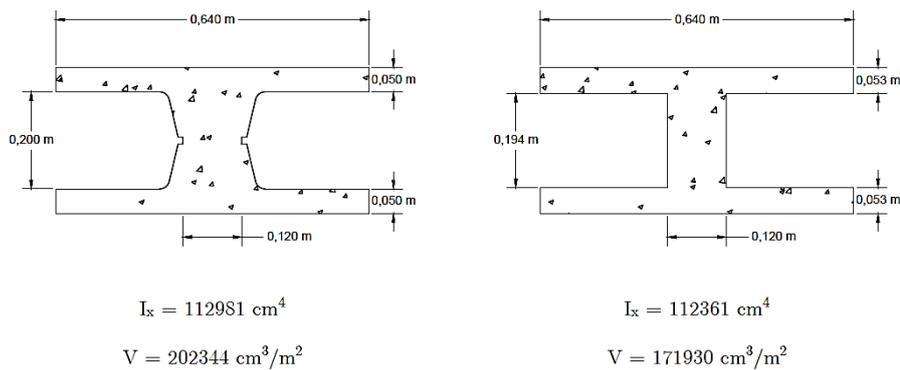


Figura 6.3 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Secção equivalente (Robot)

Na modelação com recurso ao Robot, alterou-se o peso do betão para 1,17 vezes mais, de forma a corrigir a secção com a inércia real assim como peso próprio.

### 6.2.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.2.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 6.3 - Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>							
Laje		Nautilus 5+20+5			ht = 30 cm		
		$A_{s,min}$ :			4,39 cm <sup>2</sup> /m		
Flexão/Banda	Local	$M_{Ed}$ Médio (kN.m/m)	$A_{s,nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_t$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{s,central}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{s,lateral}$ (cm <sup>2</sup> /m)	
	Face Superior	$M_{Ed}^-$ I	13,72	1,54	10,84	4,39	4,39
		$M_{Ed}^-$ II	19,88	2,24	15,77	4,48	4,39
		$M_{Ed}^-$ III	83,37	9,90	69,70	19,80	6,60
	Face Inferior	$M_{Ed}^+$ I	53,27	6,17	43,44	6,17	4,39
		$M_{Ed}^+$ II	30,28	3,44	24,22	4,39	4,39

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 6.6 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{EdIII}^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{EdI}^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4 do capítulo 5.

### 6.2.3 Estado limite último – Rotura por esforço transversal

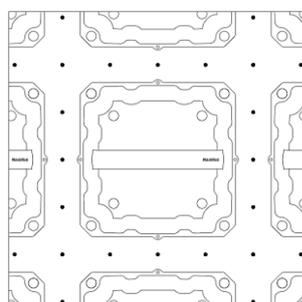
A quantificação da área de armadura de esforço transversal será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.2.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transverso necessárias a aplicar nas nervuras da laje, em função do esforço transverso atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 6.4 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>						
Laje		Nautilus 5+20+5				
		ht = 30 cm				
		$A_{s,min}$ :		4,39	cm <sup>2</sup> /m	
		$(A_{sw}/s)_{min}$ :		1,88	cm <sup>2</sup> /m	
		$s_l$ :		0,195	m	
		$s_t$ :		0,195	m	
Transverso	Local	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	$V_{Rd,máx}$ (kN/m)	$V_{Ed}$ (kN/m)	$(A_{sw}/s)_{nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{sw}/s$ /nerv.
	Junto a P3	35,98	136,16	112,09	4,41	Φ8//0,16 m

Torna-se necessário referir que a quantificação da armadura e definição de uma solução de montagem da mesma é condicionada pelo espaçamento máximo limitado pelo Eurocódigo 2. Na figura seguinte está ilustrado o esquema de montagem adotado para a solução de laje em análise, verificando todos os requisitos existentes.



Estribos: 17.09  $\phi/m^2$   
 $S = 0.160 \text{ m} \leq 0.75 \times d \text{ m}$

Figura 6.4 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Disposição da armadura de esforço transverso

### 6.2.4 Estado limite último – Rotura por punçoamento

A quantificação da área de armadura de punçoamento será efetuada de acordo com o ponto 4.1.3 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.2.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de punçoamento necessárias a aplicar no painel de laje, em função do esforço de corte atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2. Também é apresentado qual o raio de aplicação da armadura medido a partir do centro do pilar.

Tabela 6.5 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Nautilus – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar)

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>					
Laje		Nautilus 5+20+5	30	cm	
<b>Punçoamento</b>	Local	<b>N<sub>Ed</sub> Pilar</b> (kN)	<b>(A<sub>sw</sub>/s)</b> (cm <sup>2</sup> /m)	<b>R out</b> (m)	
	Pilar	Canto P1:	166,24	8,75	1,36
		Bordo P2:	372,65	21,35	1,36
		Interior P3:	965,97	43,96	1,13

Após a análise da Tabela 6.5, verificou-se que os raios onde se coloca a armadura, indicados como “R out”, situam-se dentro das zonas maciças, concluindo assim, que as dimensões das zonas maciças são suficientes para absorver os esforços de corte que provocam rotura da laje por punçoamento.

### 6.2.5 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise se encontra num caso em que está dispensado o controlo da deformação. Para isso de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 22 * 1 * 1,25 * 1 * 1 = 27,5 \quad (6.3)$$

$$27,5 \geq \frac{7,04}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,256 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,26 m, está dispensado o controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo. Porém, e com o objetivo de estimar qual a deformação que a longo prazo a peça estaria sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, e com uma taxa de armadura de tração média de 0,71% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,30}{0,26}\right)^3 * 3,2 * 4,720 \leq \frac{7,04}{250} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 23,20 \text{ mm} < 28,16 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2, confirmando a dispensa de verificação de acordo com a expressão 6.4.

### 6.3 MODELAÇÃO DE UMA LAJE FUNGIFORME SPHEREPLUS – ORTOGONAL

Com uma disposição dos blocos igual à da figura seguinte, as zonas maciças junto aos pilares interiores formam secções quadradas com dimensões de  $2,64 \times 2,64 \text{ m}^2$ , tendo as restantes zonas dimensões proporcionais a estas.

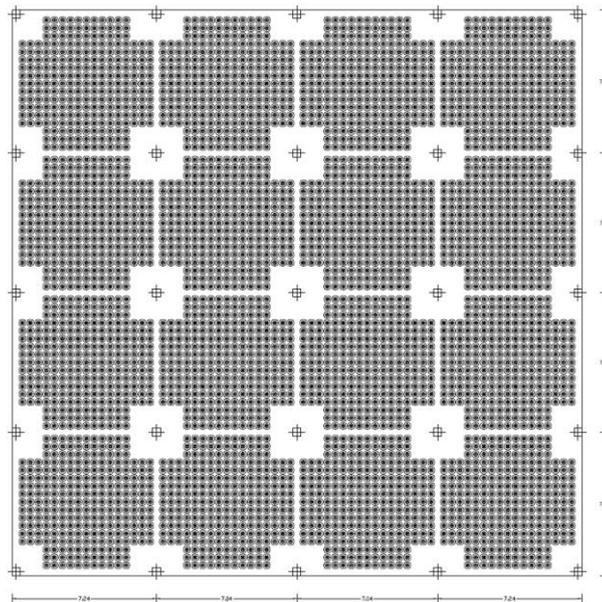


Figura 6.5 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Implantação dos blocos de aligeiramento

As nervuras que sobressaem na figura anterior, devido à sua reduzida dimensão da base, não acrescem rigidez à laje, deixando-a deformar-se de igual forma em relação aos casos anteriormente analisados.

### 6.3.1 Caracterização da secção transversal reta

Com recurso à folha de cálculo automático elaborada, a solução de laje fungiforme Sphereplus mais económica encontrada foi:

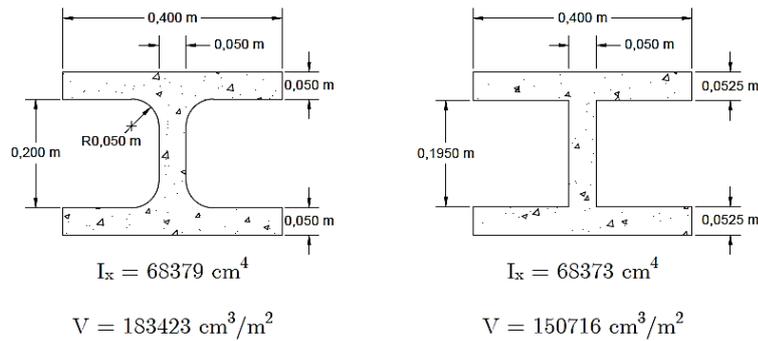


Figura 6.6 – Caso de estudo I – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Secção equivalente (Robot)

### 6.3.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.3.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 6.6 - Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>							
Laje		Sphereplus 5+20+5			ht = 30 cm		
		$A_{s,min}$ :			4,39 cm <sup>2</sup> /m		
Flexão/Banda	Local	$M_{Ed}$ Médio (kN.m/m)	$A_{s,nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_t$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{s,central}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{s,lateral}$ (cm <sup>2</sup> /m)	
	Face Superior	$M_{Ed}^-$ I	12,43	1,39	9,79	4,39	4,39
		$M_{Ed}^-$ II	18,44	2,07	14,57	4,39	4,39
		$M_{Ed}^-$ III	80,92	9,59	67,51	19,18	6,39
	Face Inferior	$M_{Ed}^+$ I	52,97	6,13	43,16	6,13	4,39
		$M_{Ed}^+$ II	29,21	3,31	23,30	4,39	4,39

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 6.6 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{EdIII}^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{EdI}^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4 do capítulo 5.

### 6.3.3 Estado limite último – Rotura por esforço transversal

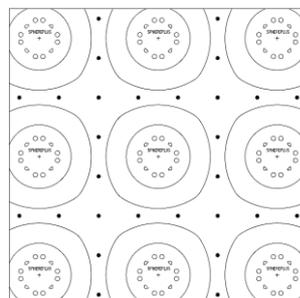
A quantificação da área de armadura de esforço transversal será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.3.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transverso necessárias a aplicar nas nervuras da laje, em função do esforço transverso atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 6.7 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>						
Laje		Sphereplus 5+20+5				
		ht = 30 cm		$A_{s,min}$ : 4,39 cm <sup>2</sup> /m		
		$(A_{sw}/s)_{min}$ : 1,25 cm <sup>2</sup> /m		$s_t$ : 0,195 m		
		$s_t$ : 0,195 m				
Transverso	Local	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	$V_{Rd,máx}$ (kN/m)	$V_{Ed}$ (kN/m)	$(A_{sw}/s)_{nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{sw}/s$ /nerv.
		Junto a P3	23,70	90,80	89,90	4,43

Torna-se necessário referir que a quantificação da armadura e definição de uma solução de montagem da mesma é condicionada pelo espaçamento máximo limitado pelo Eurocódigo 2. Na figura seguinte está ilustrado o esquema de montagem adotado para a solução de laje em análise, verificando todos os requisitos existentes.



Estribos: 31,25  $\phi$ /m<sup>2</sup>  
 $S = 0,13(3) \text{ m} \leq 0,75 \times d \text{ m}$

Figura 6.7 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Disposição da armadura de esforço transverso

### 6.3.4 Estado limite último – Rotura por punçoamento

A quantificação da área de armadura de punçoamento será efetuada de acordo com o ponto 4.1.3 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.3.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de punçoamento necessárias a aplicar no painel de laje, em função do esforço de corte atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2. Também é apresentado qual o raio de aplicação da armadura medido a partir do centro do pilar.

Tabela 6.8 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (ortogonal) – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar)

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>					
Laje		Sphere. 5+20+5 ht = 30 cm			
Punçoamento	Local	N <sub>Ed</sub> Pilar (kN)	(A <sub>sw</sub> /s) (cm <sup>2</sup> /m)	R out (m)	
	Pilar	Canto P1:	162,62	8,31	1,33
		Bordo P2:	366,69	20,85	1,35
		Interior P3:	964,32	44,29	1,14

Após a análise da Tabela 6.8, verificou-se que os raios onde se coloca a armadura, indicados como “R out”, situam-se dentro das zonas maciças, concluindo assim, que as dimensões das zonas maciças são suficientes para absorver os esforços de corte que provocam rotura da laje por punçoamento.

### 6.3.5 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise se encontra num caso em que está dispensado o controlo da deformação. Para isso de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 22 * 1 * 1,25 * 1 * 1 = 27,5 \quad (6.5)$$

$$27,5 \geq \frac{7,04}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,256 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,26 m, está dispensado o controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo. Porém, e com o objetivo de estimar qual a deformação que a longo prazo a peça estaria sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, e com uma taxa de armadura de tração média de 0,80% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,30}{0,26}\right)^3 * 2,9 * 4,800 \leq \frac{7,04}{250} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 21,38 \text{ mm} < 28,16 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2, confirmando a dispensa de verificação de acordo com a expressão 6.5.

## 6.4 MODELAÇÃO DE UMA LAJE FUNGIFORME SPHEREPLUS – FAVO DE MEL

Com uma disposição dos blocos igual à da figura seguinte, as zonas maciças junto aos pilares interiores formam secções hexagonais com dimensões de 1,80 m de lado, tendo as restantes zonas dimensões proporcionais a estas.

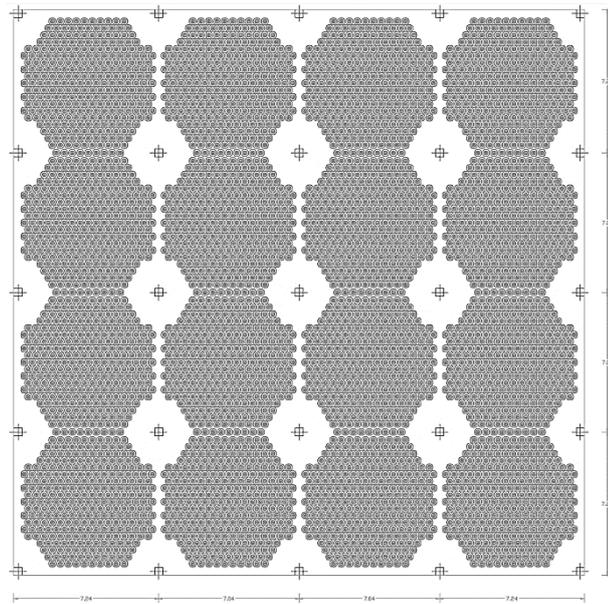


Figura 6.8 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus ( favo de mel ) – Implantação dos blocos de aligeiramento

### 6.4.1 Caracterização da secção transversal reta

Com recurso à folha de cálculo automático elaborada, a solução de laje fungiforme Sphereplus mais económica encontrada foi:

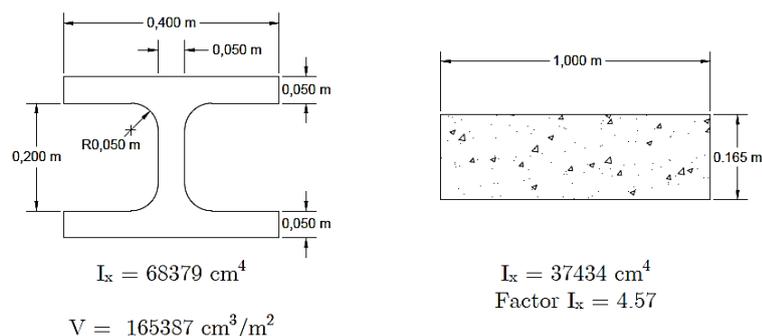


Figura 6.9 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Secção equivalente (Robot)

### 6.4.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.4.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 6.9 - Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>							
Laje		Sphereplus 5+20+5 Favo			ht = 30 cm		
					A <sub>s,min</sub> : 4,39 cm <sup>2</sup> /m		
Flexão/Banda	Local		M <sub>Ed</sub> Médio (kN.m/m)	A <sub>s,nec</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	A <sub>t</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>s,central</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	A <sub>s,lateral</sub> (cm <sup>2</sup> /m)
	Face Superior	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> I	10,14	1,13	7,96	4,39	4,39
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> II	17,72	1,99	14,01	4,39	4,39
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> III	76,85	9,08	63,92	18,16	6,05
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> I	48,70	5,62	39,56	5,62	4,39
		M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> II	26,64	3,02	21,26	4,39	4,39

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 6.6 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{EdIII}^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{EdI}^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4 do capítulo 5.

### 6.4.3 Estado limite último – Rotura por esforço transversal

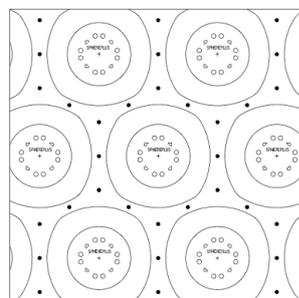
A quantificação da área de armadura de esforço transversal será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.4.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transversal necessárias a aplicar nas nervuras da laje, em função do esforço transversal atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 6.10 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transversal

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>						
Laje		Sphereplus 5+20+5 Favo				
		ht = 30 cm				
		$A_{s,min}$ :		4,39	cm <sup>2</sup> /m	
		$(A_{sw}/s)_{min}$ :		1,25	cm <sup>2</sup> /m	
		$s_l$ :		0,195	m	
		$s_t$ :		0,195	m	
Transverso	Local	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	$V_{Rd,máx}$ (kN/m)	$V_{Ed}$ (kN/m)	$(A_{sw}/s)_{nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{sw}/s$ /nerv.
	Junto a P3	23,70	90,80	50,85	2,50	Φ8//0,115 m

Torna-se necessário referir que a quantificação da armadura e definição de uma solução de montagem da mesma é condicionada pelo espaçamento máximo limitado pelo Eurocódigo 2. Na figura seguinte está ilustrado o esquema de montagem adotado para a solução de laje em análise, verificando todos os requisitos existentes.



Estribos: 36,09 Ø/m<sup>2</sup>  
 $s = 0,115 \text{ m} \leq 0,75 \times d \text{ m}$

Figura 6.10 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Disposição da armadura de esforço transversal

#### 6.4.4 Estado limite último – Rotura por punçoamento

A quantificação da área de armadura de punçoamento será efetuada de acordo com o ponto 4.1.3 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.4.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de punçoamento necessárias a aplicar no painel de laje, em função do esforço de corte atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2. Também é apresentado qual o raio de aplicação da armadura medido a partir do centro do pilar.

Tabela 6.11 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Sphereplus (favo de mel) – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar)

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>					
Laje		Sphere. 5+20+5 Favo ht = 30 cm			
Punçoamento	Local	N <sub>Ed</sub> Pilar (kN)	(A <sub>sw</sub> /s) (cm <sup>2</sup> /m)	R out (m)	
	Pilar	Canto P1:	155,01	7,38	1,28
		Bordo P2:	345,44	18,64	1,28
		Interior P3:	897,89	38,99	1,08

Após a análise da Tabela 6.11, verificou-se que os raios onde se coloca a armadura, indicados como “R out”, situam-se dentro das zonas maciças, concluindo assim, que as dimensões das zonas maciças são suficientes para absorver os esforços de corte que provocam rotura da laje por punçoamento.

### 6.4.5 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise se encontra num caso em que está dispensado o controlo da deformação. Para isso de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 22 * 1 * 1,25 * 1 * 1 = 27,5 \quad (6.7)$$

$$27,5 \geq \frac{7,04}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,256 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,26 m, está dispensado o controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo. Porém, e com o objetivo de estimar qual a deformação que a longo prazo a peça estaria sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, e com uma taxa de armadura de tração média de 0,75% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,30}{0,26}\right)^3 * 3,0 * 4,420 \leq \frac{7,04}{250} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 20,37 \text{ mm} < 24,00 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2, confirmando a dispensa de verificação de acordo com a expressão 6.7.

## 6.5 MODELAÇÃO DE UMA LAJE FUNGIFORME FERCA

Com uma disposição dos blocos igual à da figura seguinte, as zonas maciças junto aos pilares interiores formam secções quadradas com dimensões de  $2,40 \times 2,40 \text{ m}^2$ , tendo as restantes zonas dimensões proporcionais a estas.

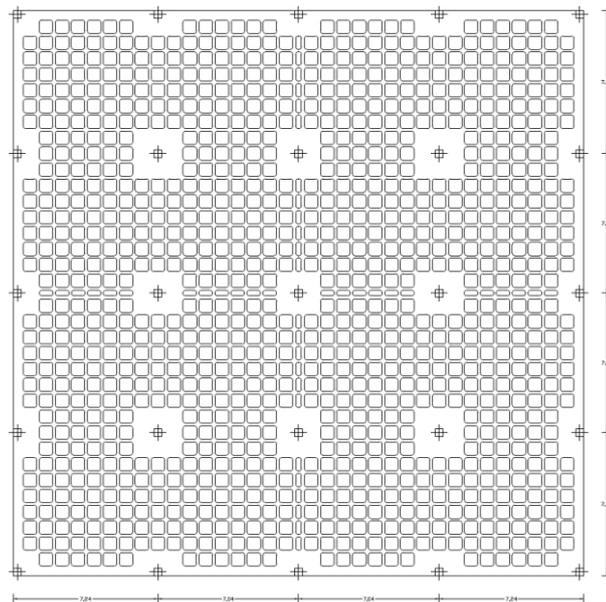


Figura 6.11 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Implantação dos moldes Ferca

### 6.5.1 Caracterização da secção transversal reta

Com o mesmo procedimento de escolha que no caso de estudo I, a solução adotada é constituída por moldes com altura de 300 mm e com uma lâmina superior de betão com 60 mm de espessura, perfazendo assim 360 mm de altura total da peça.

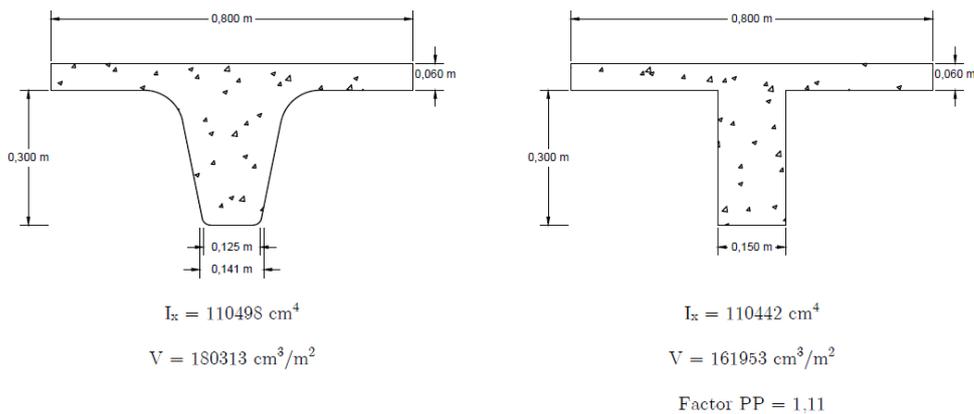


Figura 6.12 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Secção equivalente (Robot)

### 6.5.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.5.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 6.12 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>							
Laje		FG800 300+60 ht = 36 cm					
		A <sub>s,min</sub> - : 5,41 cm <sup>2</sup> /m		A <sub>s,min</sub> +: 1,25 cm <sup>2</sup> /m			
Flexão/Banda	Local	M <sub>Ed</sub> Médio	A <sub>s,nec</sub>	A <sub>t</sub>	A <sub>s,central</sub>	A <sub>s,lateral</sub>	
		(kN.m/m)	(cm <sup>2</sup> /m)	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> /m)	(cm <sup>2</sup> /m)	
	Face Superior	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> I	23,58	2,15	15,14	5,41	5,41
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> II	23,91	2,18	15,35	5,41	5,41
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> III	82,23	7,74	54,49	15,48	5,41
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> I	44,21	4,07	28,65	4,07	2,04
M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> II		22,96	2,09	14,71	2,09	1,25	

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 6.6 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{EdIII}^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{EdI}^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4 do capítulo 5.

### 6.5.3 Estado limite último – Rotura por esforço transversal

A quantificação da área de armadura de esforço transversal será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.5.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transversal necessárias a aplicar nas nervuras da laje, em função do esforço transversal atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 6.13 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transversal

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>						
Laje		FG800 300+60				
		ht = 36 cm				
		$A_{s,min}$ :		1,25	cm <sup>2</sup> /m	
		$(A_{sw}/s)_{min}$ :		1,76	cm <sup>2</sup> /m	
		$s_l$ :		0,240	m	
		$s_t$ :		0,240	m	
Transverso	Local	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	$V_{Rd,máx}$ (kN/m)	$V_{Ed}$ (kN/m)	$(A_{sw}/s)_{nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{sw}/s$ /nerv.
	Junto a P3	29,56	196,91	117,25	3,75	-

Verificou-se a condição de o esforço transversal máximo resistente da zona nervurada se encontrar na parte sem blocos da laje (junto ao pilar) e conclui-se que a dimensão da zona maciça é suficiente para a laje em questão.

#### 6.5.4 Estado limite último – Rotura por punçoamento

A quantificação da área de armadura de punçoamento será efetuada de acordo com o ponto 4.1.3 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 6 e a solução considerada no ponto 6.5.1.

Na tabela seguinte é possível consultar quais as áreas de armadura de punçoamento necessárias a aplicar no painel de laje, em função do esforço de corte atuante, para que este verifique todos

os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2. Também é apresentado qual o raio de aplicação da armadura medido a partir do centro do pilar.

Tabela 6.14 – Caso de estudo II – Laje fungiforme Ferca – Esforços de corte, áreas de armadura de punçoamento, raio de aplicação de armaduras (c/ centro no pilar)

Caso de Estudo II: 7,04 x 7,04 m <sup>2</sup>					
Laje		FG800 300+60 ht = 36 cm			
Punçoamento	Local	N <sub>Ed</sub> Pilar (kN)	(A <sub>sw</sub> /s) (cm <sup>2</sup> /m)	R out (m)	
	Pilar	Canto P1:	158,04	0,00	1,12
		Bordo P2:	361,01	11,51	1,20
		Interior P3:	955,03	27,33	1,11

Após a análise da Tabela 6.14, verificou-se que os raios onde se coloca a armadura, indicados como “R out”, situam-se dentro das zonas maciças, concluindo assim, que as dimensões das zonas maciças são suficientes para absorver os esforços de corte que provocam rotura da laje por punçoamento.

### 6.5.5 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise se encontra num caso em que está dispensado o controlo da deformação. Para isso de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 22 * 0,8 * 1,25 * 1 * 1 = 22 \quad (6.9)$$

$$22 \geq \frac{7,04}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,32 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,32 m, está dispensado o controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo. Porém, e com o objetivo de estimar qual a deformação que a longo prazo a peça estaria sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, com uma taxa de armadura de tração média de 0,61% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,36}{0,32}\right)^3 * 3,6 * 4,737 \leq \frac{7,04}{250} \Leftrightarrow$$

(6.10)

$$\Leftrightarrow 24,28 \text{ mm} < 28,16 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2, confirmando a dispensa de verificação de acordo com a expressão 6.9.

## 6.6 MEDIÇÕES E ANÁLISE DE CUSTOS

De forma a comparar as soluções de laje analisadas neste caso de estudo, foi criada uma tabela que, em função do tipo de laje analisada, discrimina e contabiliza todo o material que foi considerado no dimensionamento da mesma. Para uma comparação mais simplificada todas as medições foram reduzidas para a construção de um metro quadrado de laje. Após a quantificação de todo o material, é possível efetuar uma atribuição de preços unitários e comparar as soluções. O mapa de quantidades detalhado de todas as soluções consideradas neste caso de estudo encontra-se no anexo III.

Neste mapa de quantidades não foram atribuídos custos unitários aos blocos de aligeiramento, permitindo assim a elaboração de um gráfico que em função do custo unitário do bloco é

determinado um custo total da laje por unidade de área. O gráfico elaborado encontra-se apresentado a seguir.

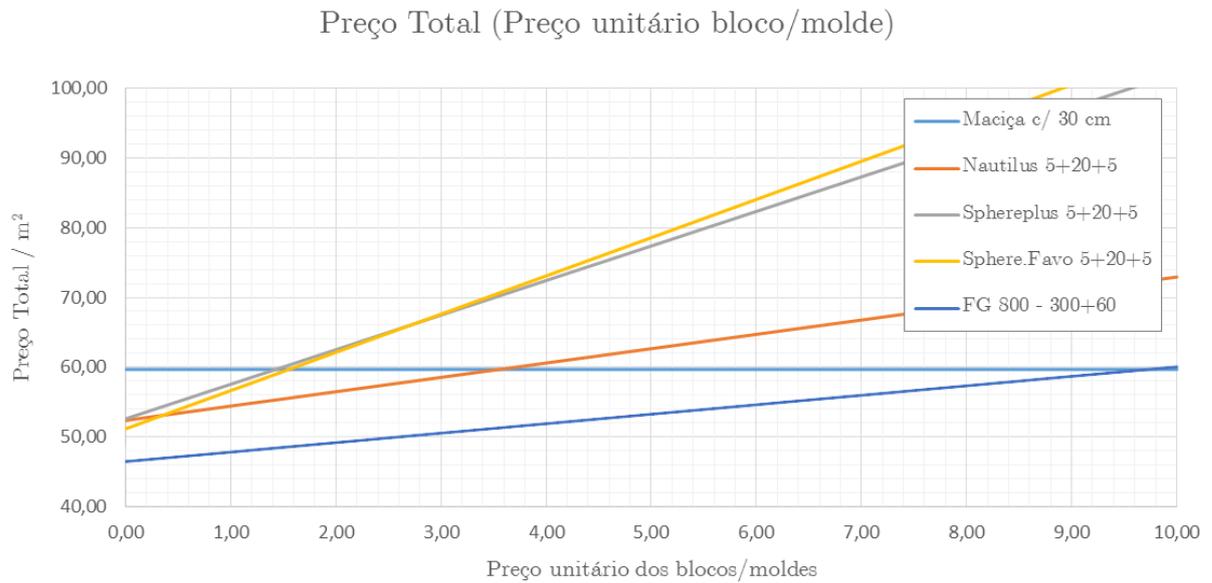


Figura 6.13 – Caso de estudo II – Preço de laje/m<sup>2</sup> em função do custo unitário do bloco



## 7 CASO DE ESTUDO III

A planta a analisar será constituída por painéis de laje de  $5 \times 8 \text{ m}^2$ , tendo no total 4 painéis de laje armados unidireccionalmente na dimensão do vão maior, Figura 7.1. Os pilares terão  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ , tendo nas suas extremidades apoios duplos e comprimento total de três metros, apoiando a laje a meio dos pilares.

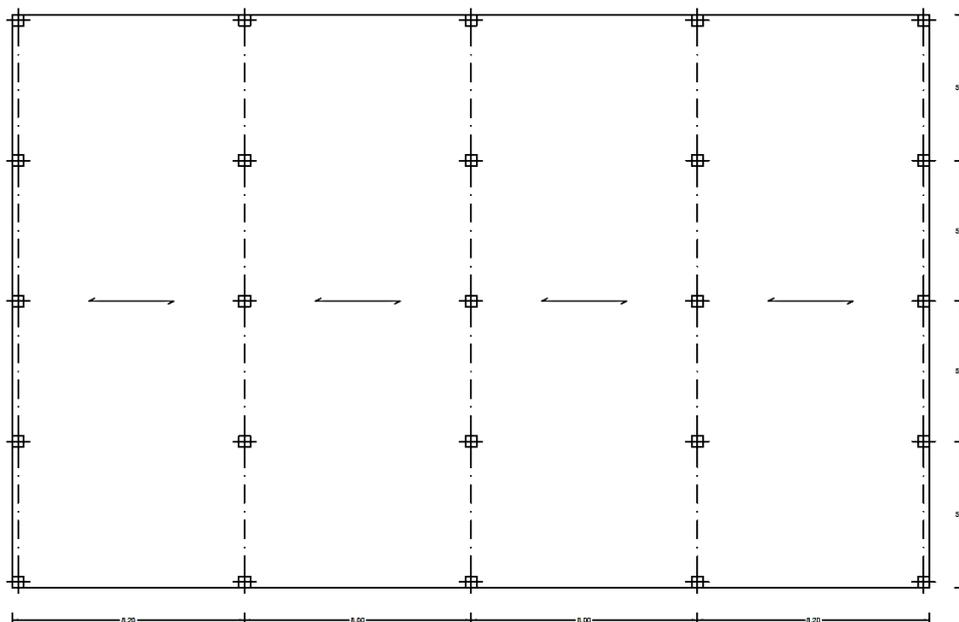


Figura 7.1 – Caso de estudo III – Planta estrutural

As restantes cargas permanentes a atuar tomam o valor de  $3 \text{ kN/m}^2$  assim como a sobrecarga respetiva a escritórios.

O betão utilizado é da classe C25/30 e o aço S400 e o recobrimento adotado para todos os elementos é de 4 centímetros.

A análise comparativa entre as soluções de lajes modeladas terá como base a comparação de esforços em pontos específicos da planta estrutural. Analisar-se-ão os momentos fletores médios por banda, com a dimensão do vão, esforços de corte junto a três pilares, sempre de acordo com o ilustrado a seguir.

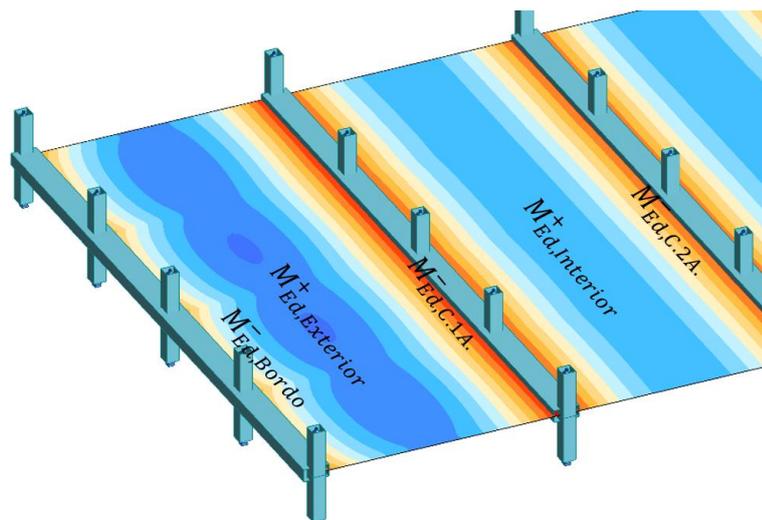


Figura 7.2 – Caso de estudo III - Localização dos momentos fletores a analisar na laje

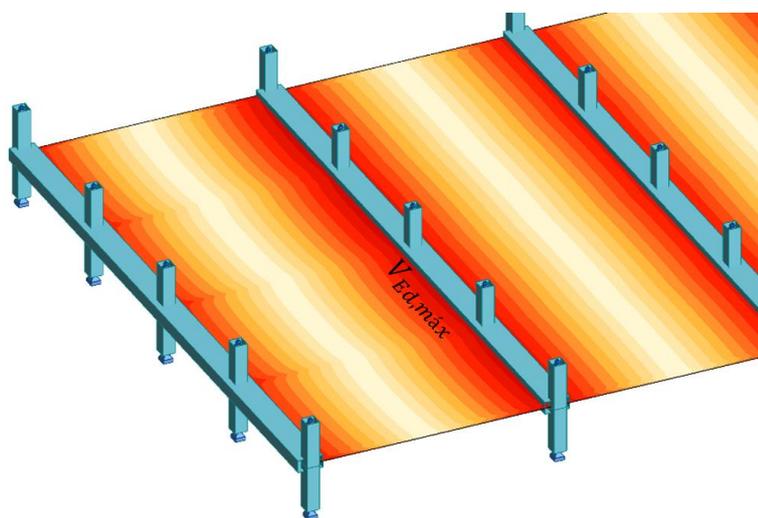


Figura 7.3 – Caso de estudo III - Localização dos esforços de corte a analisar na laje

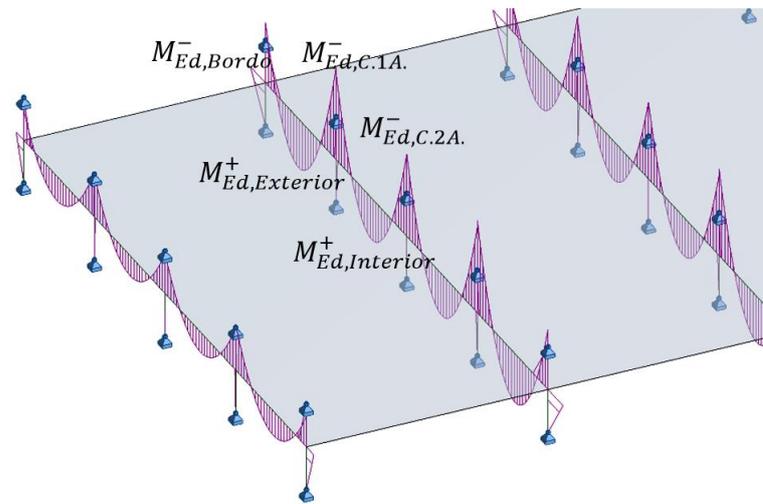


Figura 7.4 – Caso de estudo III - Localização dos momentos fletores a analisar na viga

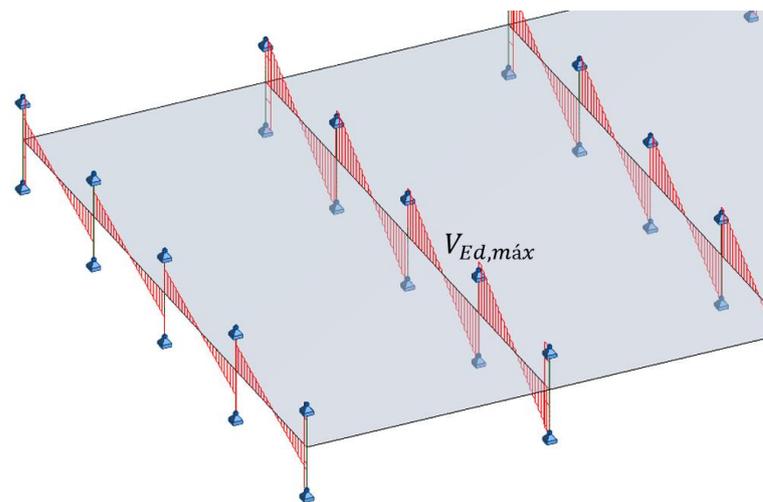


Figura 7.5 – Caso de estudo III - Localização dos esforços de corte a analisar na viga

Os seguintes esquemas de armaduras, apresentados na Figura 7.6 e Figura 7.7, representam as armaduras a aplicar no painel de laje mais condicionante em toda a estrutura.

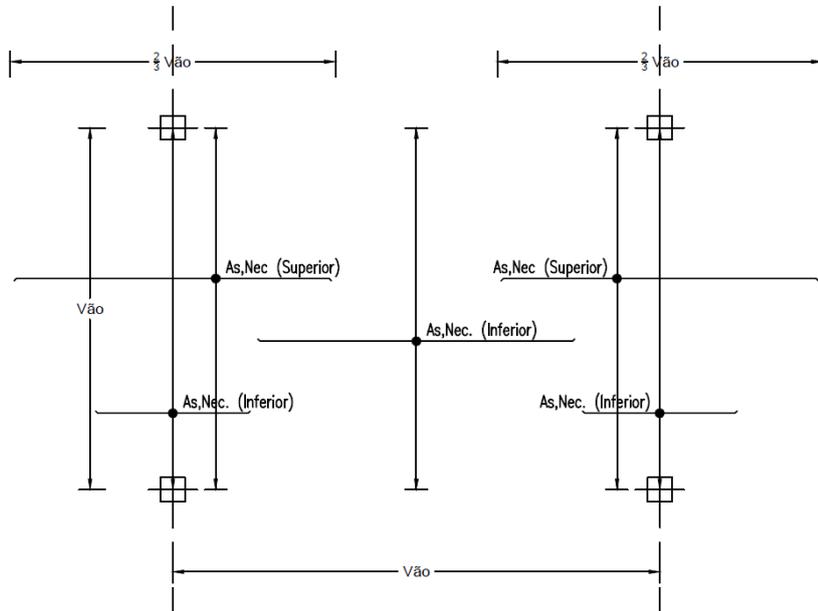


Figura 7.6 - Caso de estudo III - Esquema de montagem de armaduras – Laje

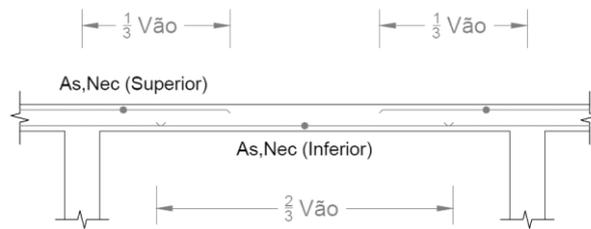


Figura 7.7 - Caso de estudo III - Esquema de montagem de armaduras – Banda

## 7.1 MODELAÇÃO DE UMA LAJE UNIDIRECIONAL MACIÇA

### 7.1.1 Caracterização da secção transversal reta

Devido ao elevado peso próprio de uma solução de laje maciça, considerou-se que as vigas que suportam a laje maciça unidirecional teriam uma altura superior à da laje, tendo no total  $0,80 \times 0,40 \text{ m}^2$ .

Limitando a deformação a longo prazo ao valor limite regulamentado pelo Eurocódigo 2, é possível determinar qual a deformação instantânea desejável para cada solução de altura, de acordo com o seguinte. A solução adotada foi de 0,28 m de espessura. (A percentagem de armadura de uma laje representa aproximadamente 0,5% da secção transversal reta da mesma.)

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 * \eta * a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,28}{0,24}\right)^3 * 4 * \delta_{inst} \leq 0,032 \Leftrightarrow \delta_{inst} \leq 0,005 \quad (7.1)$$

Após a modelação da solução escolhida no programa de cálculo, verificou-se que a deformação instantânea mais condicionante é igual a 4,97 mm, sendo inferior ao valor máximo desejável.

Nota: Esta análise prévia não dispensa a verificação posterior do estado limite de utilização relativo às deformações a longo prazo, pois a taxa de armadura média poderá não ser a estimada.

### 7.1.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A análise da rotura de flexão passa por definir uma área de armadura de flexão para os locais indicados na Figura 7.2 e Figura 7.4 de acordo com as disposições de armaduras ilustradas na Figura 7.6 e Figura 7.7.

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 7 e a solução considerada no ponto 7.1.1.

Nas tabelas seguintes é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje e nas bandas, respetivamente, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 7.1 – Caso de estudo III – Laje unidirecional maciça – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da laje

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>				
Laje		Maciça c/ 28 cm		
		A <sub>s,min</sub> : 4,06 cm <sup>2</sup> /m		
Flexão/Banda	Local		M <sub>Ed</sub> Médio	A <sub>s,nec</sub>
			(kN.m/m)	(cm <sup>2</sup> /m)
	Face Superior	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> Bordo	50,35	6,35
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.1A.	101,89	13,50
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.2A.	85,68	11,18
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Exterior	64,21	8,21
M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Interior		46,08	5,78	

Tabela 7.2 – Caso de estudo III – Laje unidirecional maciça – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da banda

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>				
Banda		0,80 x 0,40		
		A <sub>s,min</sub> : 3,89 cm <sup>2</sup>		
Flexão/Banda	Local		M <sub>Ed</sub>	A <sub>s,nec</sub>
			(kN.m)	(cm <sup>2</sup> )
	Face Superior	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> Bordo	243,58	22,19
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.1A.	371,43	36,04
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.2A.	331,78	31,58
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Exterior	196,81	17,51
M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Interior		166,33	14,56	

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 7.4 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{Ed}C1A^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{Ed}Exterior^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. O mesmo acontece para a armadura das bandas. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 7.6 e Figura 7.7.

### 7.1.3 Estado limite último – Rotura por esforço transversal

A quantificação da área de armadura de esforço transversal será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 7 e a solução considerada no ponto 7.1.1.

Nas tabelas seguintes é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transversal necessárias a aplicar nas nervuras da laje e na banda, respetivamente, em função do esforço transversal atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 7.3 – Caso de estudo III – Laje unidirecional maciça – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da laje

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>						
Laje		Maciça			ht =	28 cm
					$A_{s,min}$ :	4,06 cm <sup>2</sup> /m
					$(A_{sw}/s)_{min}$ :	- cm <sup>2</sup> /m
					$s_l$ :	- m
					$s_t$ :	- m
Transverso	Local	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	$V_{Rd,máx}$ (kN/m)	$V_{Ed}$ (kN/m)	$(A_{sw}/s)_{nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{sw}/s$ Solução
	Ligação Laje-Banda	111,12	-	76,00	-	-

Tabela 7.4 – Caso de estudo III – Laje unidirecional maciça – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da banda

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>						
Banda (Laje Maciça)		b =		80 cm	h =	40 cm
					$A_{s,min}$ :	3,89 cm <sup>2</sup> /m
					$(A_{sw}/s)_{min}$ :	8,00 cm <sup>2</sup> /m
					$s_l$ :	0,27 m
					$s_t$ :	0,27 m
Transverso	Local	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	$V_{Rd,máx}$ (kN/m)	$V_{Ed}$ (kN/m)	$(A_{sw}/s)_{nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{sw}/s$ Solução
	Ligação Laje-Banda	116,21	804,41	412,49	11,71	-

#### 7.1.4 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise está dispensada do cálculo da deformação a longo prazo. Para isso de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que

limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 19 * 1 * 1,25 * \frac{7}{8} * 1 = 20,8 \quad (7.2)$$

$$20,8 \geq \frac{8}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,38 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,24 m, não se encontra no caso de dispensa do controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo.

Estimando qual a deformação que a longo prazo a peça está sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, e com uma taxa de armadura de tração média de 0,52% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,28}{0,24}\right)^3 * 3,9 * 4,970 \leq \frac{8}{250} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 30,78 \text{ mm} < 32,00 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2.

## 7.2 MODELAÇÃO DE UMA LAJE UNIDIRECIONAL TUBULAR

Com uma disposição em planta dos perfis tubulares de aligeiramento de acordo com a figura seguinte, formam-se bandas maciças, com orientação vertical em planta, com 90 cm de largura.

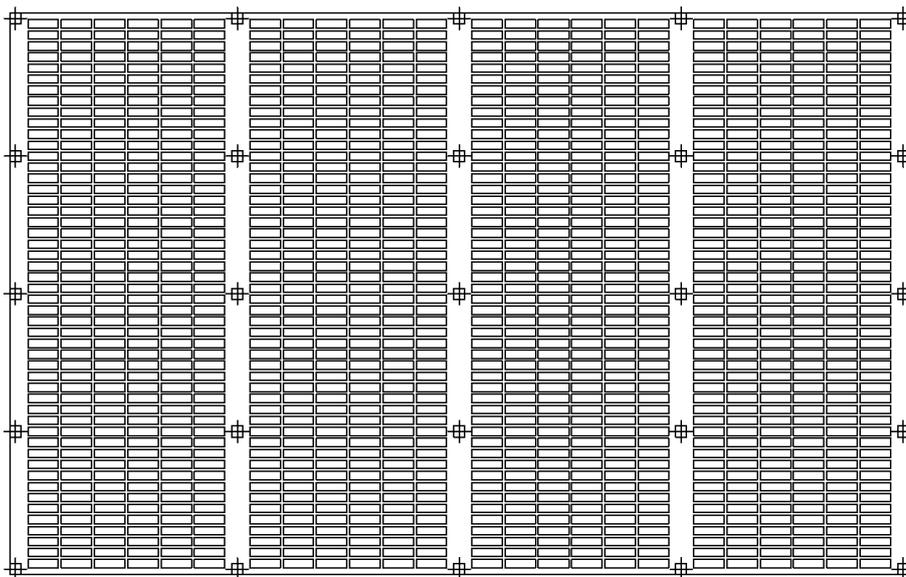


Figura 7.8 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Implantação dos blocos de aligeiramento

### 7.2.1 Caracterização da secção transversal reta

Em função das deformações instantâneas obtidas na modelação da laje fungiforme maciça, é possível, através de uma relação entre peso próprio da laje e momento de inércia da mesma, escolher qual será a solução otimizada (menor volume de betão) da laje unidirecional aligeirada com perfis tubulares que satisfaça a deformação elástica máxima pretendida inicialmente (igual ou inferior à da laje unidirecional maciça) e conseqüentemente que cumpra, à partida, o limite máximo regulamentar da deformação a longo prazo.

Estimou-se que a solução de laje que melhor satisfaria este critério era a que se apresenta na figura seguinte:

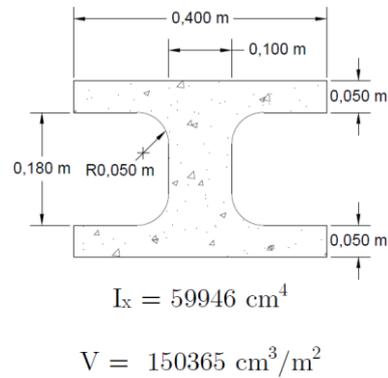


Figura 7.9 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Caracterização da secção transversal reta

Como no programa de cálculo automático é possível modelar uma laje aligeirada com perfis tubulares, não existe necessidade de transformar esta secção numa secção equivalente para posterior modelação. A laje introduzida no Robot respeita as seguintes dimensões de acordo com a figura seguinte.

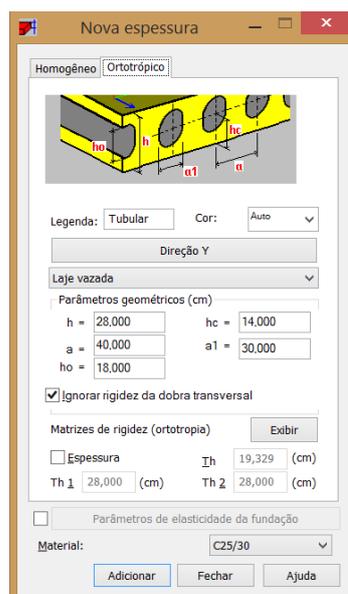


Figura 7.10 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Modelação da laje no Robot

## 7.2.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 7 e a solução considerada no ponto 7.2.1.

Nas tabelas seguintes é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje e nas bandas, respetivamente, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 7.5 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da laje

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>				
Laje		Tubular c/ 28 cm		
		A <sub>s,min</sub> : 3 cm <sup>2</sup> /m		
Flexão/Banda	Local		M <sub>Ed</sub> Médio (kN.m/m)	A <sub>s,nec</sub> (cm <sup>2</sup> /m)
	Face Superior	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> Bordo	39,98	4,99
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.1A.	91,17	11,96
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.2A.	77,75	10,07
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Exterior	58,79	7,47
M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Interior		39,50	4,93	

Tabela 7.6 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da banda

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>				
Banda		0,90 x 0,28		
		A <sub>s,min</sub> :	2,92 cm <sup>2</sup>	
Flexão/Banda	Local	M <sub>Ed</sub> (kN.m)	A <sub>s,nec</sub> (cm <sup>2</sup> )	
	Face Superior	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> Bordo	225,07	33,98
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.1A.	274,39	43,31
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.2A.	252,07	39,01
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Exterior	126,24	17,33
		M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Interior	112,10	15,17

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 7.4 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{Ed}C1A^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{Ed}Exterior^+$ , assinalado a azul na tabela anterior. O mesmo acontece para a armadura das bandas. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 7.6 e Figura 7.7.

### 7.2.3 Estado limite último – Rotura por esforço transversal

A quantificação da área de armadura de esforço transversal será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 7 e a solução considerada no ponto 7.2.1.

Nas tabelas seguintes é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transversal necessárias a aplicar nas nervuras da laje e na banda, respetivamente, em função do esforço

transverso atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 7.7 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da laje

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>						
<b>Laje</b>		<b>Tubular (50+180+50)</b>			<b>ht = 28 cm</b>	
					<b>A<sub>s,min</sub>: 4,06 cm<sup>2</sup>/m</b>	
					<b>(A<sub>sw/s</sub>)<sub>min</sub>: 2,50 cm<sup>2</sup>/m</b>	
					<b>s<sub>1</sub>: 0,18 m</b>	
					<b>s<sub>t</sub>: 0,18 m</b>	
<b>Transverso</b>	Local	<b>V<sub>Rd,c</sub></b> (kN/m)	<b>V<sub>Rd,máx</sub></b> (kN/m)	<b>V<sub>Ed</sub></b> (kN/m)	<b>(A<sub>sw/s</sub>)<sub>nec</sub></b> (cm <sup>2</sup> /m)	<b>A<sub>sw/s</sub></b> Solução
	Ligação Laje-Banda	35,34	167,59	69,13	3,68	-

Tabela 7.8 – Caso de estudo III – Laje unidirecional tubular – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da laje

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>						
<b>Banda (Laje Tubular)</b>		<b>b = 90 cm</b>			<b>h = 28 cm</b>	
					<b>A<sub>s,min</sub>: 2,92 cm<sup>2</sup>/m</b>	
					<b>(A<sub>sw/s</sub>)<sub>min</sub>: 9,00 cm<sup>2</sup>/m</b>	
					<b>s<sub>1</sub>: 0,18 m</b>	
					<b>s<sub>t</sub>: 0,18 m</b>	
<b>Transverso</b>	Local	<b>V<sub>Rd,c</sub></b> (kN/m)	<b>V<sub>Rd,máx</sub></b> (kN/m)	<b>V<sub>Ed</sub></b> (kN/m)	<b>(A<sub>sw/s</sub>)<sub>nec</sub></b> (cm <sup>2</sup> /m)	<b>A<sub>sw/s</sub></b> Solução
	Ligação Laje-Banda	100,00	603,31	347,39	14,80	-

### 7.2.4 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise está dispensada do cálculo da deformação a longo prazo. Para isso de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 19 * 1 * 1,25 * \frac{7}{8} * 1 = 20,8 \quad (7.4)$$

$$20,8 \geq \frac{8}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,38 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,24 m, não se encontra no caso de dispensa do controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo.

Estimando qual a deformação que a longo prazo a peça está sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, e com uma taxa de armadura de tração média de 0,86% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,28}{0,24}\right)^3 * 2,8 * 4,803 \leq \frac{8}{250} \Leftrightarrow \quad (7.5)$$

$$\Leftrightarrow 21,36 \text{ mm} < 32,00 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2.

### 7.3 MODELAÇÃO DE UMA LAJE UNIDIRECIONAL FERCA

Com uma disposição em planta dos moldes de aligeiramento de acordo com a figura seguinte, formam-se bandas maciças, com orientação vertical em planta, com 92,5 cm de largura.

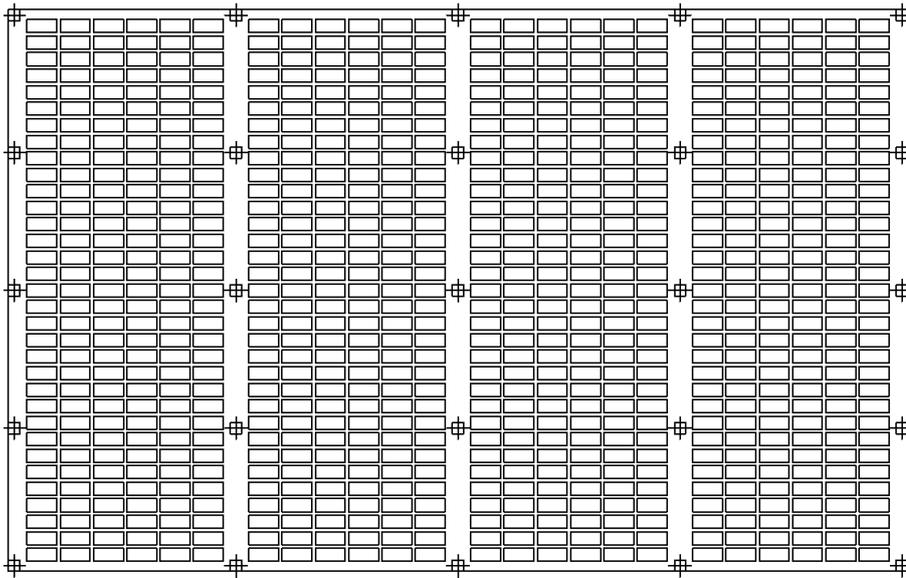


Figura 7.11 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Implantação dos moldes Ferca

### 7.3.1 Caracterização da secção transversal reta

Por um processo de tentativa-erro, como experimentado no capítulo 5, ponto 5.4.1 do presente relatório, a solução otimizada que satisfaz todos os critérios impostos para o dimensionamento da laje deste caso de estudo encontra-se ilustrada na figura seguinte, à esquerda, assim como a respetiva secção equivalente que foi modelada no programa de cálculo automático, à direita.

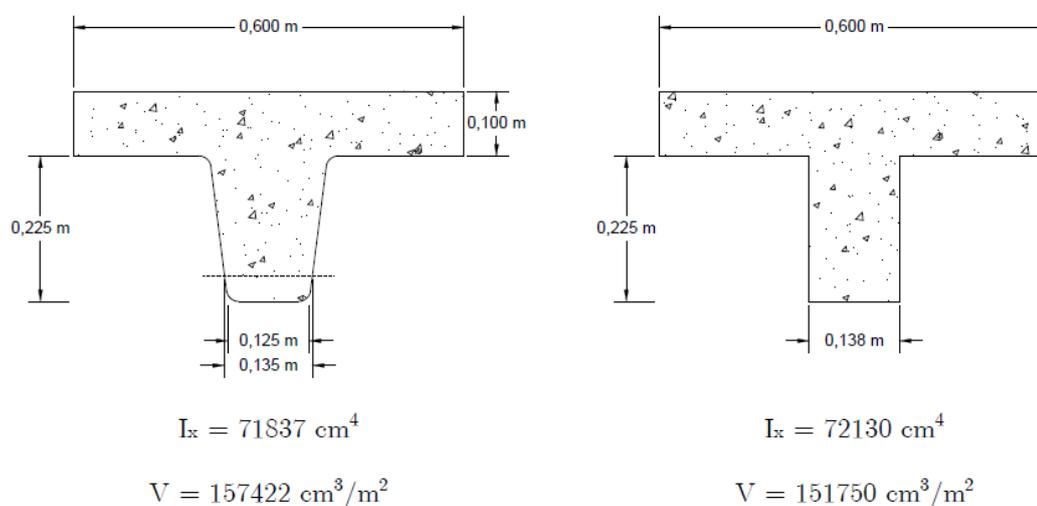


Figura 7.12 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Caracterização da secção transversal reta – Secção equivalente (Robot)

### 7.3.2 Estado limite último – Rotura por flexão

A quantificação da armadura de flexão será efetuada de acordo com o ponto 4.1.1 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 7 e a solução considerada no ponto 7.3.1.

Nas tabelas seguintes é possível consultar quais as áreas de armadura de flexão necessárias a aplicar no painel de laje e nas bandas, respetivamente, em função do momento fletor atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 7.9 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da laje

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>				
Laje		FG 600 225+100		
		A <sub>s,min</sub> : 4,82 cm <sup>2</sup> /m		
Flexão/Banda	Face Superior	Local	M <sub>Ed</sub> Médio (kN.m/m)	A <sub>s,nec</sub> (cm <sup>2</sup> /m)
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> Bordo	45,58	5,72
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.1A.	86,24	11,26
	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.2A.	74,25	9,58	
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Exterior	49,01	6,17
		M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Interior	39,08	4,87

Tabela 7.10 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Momentos médios e quantificação de áreas de armaduras de flexão da banda

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>				
Banda		0,925 x 0,325		
		A <sub>s,min</sub> : 3,56 cm <sup>2</sup>		
Flexão/Banda	Face Superior	Local	M <sub>Ed</sub> (kN.m)	A <sub>s,nec</sub> (cm <sup>2</sup> )
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> Bordo	191,17	22,23
		M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.1A.	252,49	30,61
	M <sub>Ed</sub> <sup>-</sup> C.2A.	228,14	27,21	
	Face Inferior	M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Exterior	116,88	12,89
		M <sub>Ed</sub> <sup>+</sup> Interior	101,25	11,04

Nota: De forma a simplificar todo o processo de análise de custos, elaborado no ponto 7.4 do presente relatório, considerou-se que as armaduras de flexão colocadas na face superior dos painéis teriam todas a mesma área e resistiriam ao momento fletor negativo mais condicionante,  $M_{Ed}C1A^-$ , assinalado a azul na tabela anterior. Na face inferior, as áreas de armadura de flexão

consideradas foram obtidas através do momento fletor  $M_{Ed}^{Exterior+}$ , assinalado a azul na tabela anterior. O mesmo acontece para a armadura das bandas. A aplicação das armaduras de flexão deverá respeitar sempre os esquemas apresentados na Figura 7.6 e Figura 7.7.

### 7.3.3 Estado limite último – Rotura por esforço transversal

A quantificação da área de armadura de esforço transversal será efetuada de acordo com o ponto 4.1.2 do presente relatório, utilizando os materiais definidos no ponto 7 e a solução considerada no ponto 7.3.1.

Nas tabelas seguintes é possível consultar quais as áreas de armadura de esforço transversal necessárias a aplicar nas nervuras da laje e na banda, respetivamente, em função do esforço transversal atuante, para que este verifique todos os limites de segurança impostos pelo Eurocódigo 2.

Tabela 7.11 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transversal da laje

Caso de Estudo I: 6 x 6 m <sup>2</sup>						
Laje		FG 600 225+100			ht = 32,5 cm	
					$A_{s,min}$ :	0,77 cm <sup>2</sup> /m
					$(A_{sw/s})_{min}$ :	2,30 cm <sup>2</sup> /m
					$s_l$ :	0,203 m
					$s_t$ :	0,203 m
Transverso	Local	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	$V_{Rd,máx}$ (kN/m)	$V_{Ed}$ (kN/m)	$(A_{sw/s})_{nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{sw/s}$ Solução
	Junto a P3	38,14	183,09	61,33	2,75	-

Tabela 7.12 – Caso de estudo III – Laje unidirecional Ferca – Esforços de corte e quantificação da área de armadura de esforço transverso da laje

Caso de Estudo III: 8 x 5 m <sup>2</sup>						
		b = 92,5 cm	h = 32,5 cm			
Banda (Laje FG600)				$A_{s,min}$ :	3,56 cm <sup>2</sup> /m	
				$(A_{sw}/s)_{min}$ :	9,25 cm <sup>2</sup> /m	
				$s_1$ :	0,25 m	
				$s_2$ :	0,25 m	
Transverso	Local	$V_{Rd,c}$ (kN/m)	$V_{Rd,máx}$ (kN/m)	$V_{Ed}$ (kN/m)	$(A_{sw}/s)_{nec}$ (cm <sup>2</sup> /m)	$A_{sw}/s$ Solução
	Junto a P3	114,93	736,33	324,39	11,64	-

### 7.3.4 Estado limite de utilização – Controlo da deformação

Antes de calcular a deformação a longo prazo, será necessário verificar se a laje em análise está dispensada do cálculo da deformação a longo prazo. Para isso de acordo com o ponto 4.2.2 do presente relatório, deverá ser retirado com recurso à Tabela 4.2 um valor da relação  $l/d$ , que limita a altura da peça em função do vão, das características geométricas, dos materiais e da estrutura.

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{corr} = \frac{l}{d} k_t k_\sigma k_l k_f = 19 * 0,8 * 1,25 * \frac{7}{8} * 1 = 16,63 \quad (7.6)$$

$$16,63 \geq \frac{8}{d} \Leftrightarrow d \geq 0,48 \text{ m}$$

Uma vez que a altura útil da peça é 0,285 m, não se encontra no caso de dispensa do controlo da deformação através do cálculo das flechas a longo prazo.

Estimando qual a deformação que a longo prazo a peça está sujeita, com recurso ao CEB-FIP Model Code 90, ponto 7.5, e com uma taxa de armadura de tração média de 0,74% tem-se:

$$\left(\frac{h}{d}\right)^3 \eta (1 - 20\rho_{cm}) a_c \leq \frac{l}{250} \Leftrightarrow \left(\frac{0,325}{0,285}\right)^3 * 3,0 * 4,802 \leq \frac{8}{250} \Leftrightarrow \quad (7.7)$$

$$\Leftrightarrow 21,36 \text{ mm} < 32,00 \text{ mm}$$

A deformação a longo prazo encontra-se dentro do limite máximo regulamentado pelo Eurocódigo 2.

#### 7.4 MEDIÇÕES E ANÁLISE DE CUSTOS

De forma a comparar as soluções de laje analisadas neste caso de estudo, foi criada uma tabela, que, em função do tipo de laje analisada, discrimina e contabiliza todo o material que foi considerado no dimensionamento da mesma. Para uma comparação mais simplificada todas as medições foram reduzidas para a construção de um metro quadrado de laje. Após a quantificação de todo o material é possível efetuar uma atribuição de preços unitários e comparar as soluções. O mapa de quantidades detalhado de todas as soluções consideradas neste caso de estudo encontra-se no anexo IV.

Neste mapa de quantidades não foram atribuídos custos unitários aos blocos de aligeiramento, permitindo assim a elaboração de um gráfico que em função do custo unitário do bloco é determinado um custo total da laje por unidade de área. O gráfico elaborado encontra-se apresentado a seguir.

Preço Total (Preço unitário bloco/molde)

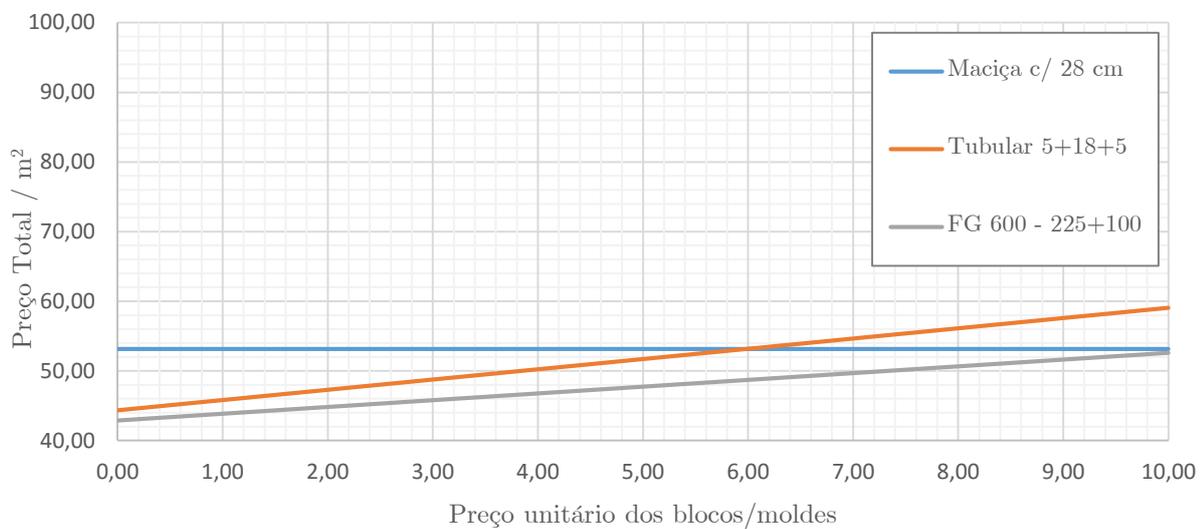


Figura 7.13 – Caso de estudo III – Preço de laje/m<sup>2</sup> em função do custo unitário do bloco

## 8 CONCLUSÕES

A realização dos três casos de estudo permitiu concluir que relativamente à solução de laje maciça, quer fungiforme ou unidirecional, esta não é a solução economicamente mais viável, uma vez que associado à utilização de grandes volumes de betão está a utilização de grandes volumes de armadura de flexão. Porém as duas vantagens associadas a esta solução, comparativamente com a solução de lajes nervuradas, é a facilidade de realização, pois o rendimento de colocação de armaduras é ligeiramente superior e a não necessidade de colocação de armadura de esforço transverso.

Em alternativa às lajes maciças, para o caso das lajes fungiformes, é a laje fungiforme aligeirada com bloco Sphereplus com disposição ortogonal. Esta laje permite uma grande redução de volume de betão, aproximadamente 28% e conseqüentemente a redução do volume de armadura de flexão, cerca de 15%, porém existe a necessidade de colocação de armadura de esforço transverso, igualando o seu somatório de volumes de armadura ao caso da laje maciça. Comparativamente à laje fungiforme aligeirada com moldes Ferca, esta solução poderá tornar-se uma mais-valia, uma vez que, utilizando o mesmo volume de betão e além da rapidez de execução e disposição de armaduras, os blocos conseguem ser produzidos a baixo custo ao contrário dos moldes recuperáveis. Porém, ao adotar-se uma solução com moldes Ferca o volume de armaduras total é inferior ao de uma solução que utiliza blocos Sphereplus dispostos na ortogonal cerca de 25%.

Além da solução de laje fungiforme com bloco Sphereplus foi dimensionada também uma laje fungiforme com o mesmo bloco, porém com disposição em favo de mel. Esta disposição permite que se aglomerem mais blocos de aligeiramento por unidade de área, reduzindo o volume de betão em aproximadamente 33% comparativamente à solução de laje maciça, oferecendo a mesma resistência ao esforço transversal e não interferindo com os esforços de flexão, pois durante o dimensionamento das secções de armadura foi particularmente analisada a posição do eixo neutro e verificado que este se encontrava sempre na lâmina superior da laje, não comprimindo as nervuras existentes entre blocos. A margem de diferença existente entre o preço desta solução, sem considerar o preço dos blocos, e uma solução de laje maciça é inferior à margem existente entre uma solução de laje fungiforme com blocos Ferca e uma laje maciça, porém, como explicado no parágrafo anterior, estes blocos devido ao fato de não serem recuperáveis conseguem-se tornar mais baratos em relação ao preço de fabrico, tornando a solução ainda mais viável que a solução de uma laje fungiforme com blocos Sphereplus com disposição ortogonal.

O sistema Nautilus apresenta exatamente as mesmas vantagens que o sistema Sphereplus embora este tipo de bloco possa tornar-se mais caro, uma vez que a produção não é efetuada pela empresa acolhedora do estágio curricular realizado.

Em relação às lajes unidireccionais, a utilização de perfis de aligeiramento não recuperáveis é certamente a solução mais viável para a execução deste tipo de soluções. Além de reduzir em aproximadamente 40% e 8% em relação à solução de laje maciça e solução de laje com moldes Ferca, respetivamente, o baixo custo na produção dos mesmos e a maior facilidade de montagem de armaduras torna esta solução bastante competitiva face às outras soluções analisadas.

Por fim, a desvantagem comum a todas as soluções com aligeiramentos totalmente envolvidos por betão é a necessidade de se efetuar uma betonagem da laje por fases, como existe um volume de ar no interior dos blocos estes facilmente flutuam. Na primeira fase a betonagem atinge a base dos blocos e após o betão ganhar alguma presa betona-se até à altura de laje pretendida, resultando numa maior demora na fase de betonagem.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] NP EN 1992-1-1, 2010. Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão – Regras gerais e regras para edifícios;
- [2] AutoDesk, Robot Structural Analysis, User’s Guide, [Web]  
<http://www.autodesk.pt/products/simulation/features/robot-structural-analysis>;
- [3] FercaNorte - Empresa [Web] (14/01/2015) em <http://www.FercaNorte.com.pt>;
- [4] FercaNorte – Catálogo de produtos;
- [5] Daliform Group – [Web] (14/01/2015) em <http://www.daliform.com/>;
- [6] Airdeck – Intelligent Floorsystems – [Web] (14/01/2015) em <http://www.airdeck.be/>;
- [7] Capítulo 11 – Estados limite de utilização, edição 2014/2015, Apontamentos da unidade curricular de “Estruturas de Betão Armado”;
- [8] CEB-FIP Model Code 1990, Design Code, Comité Euro-International Du Béton;
- [9] Traité de Génie Civil de l’Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Dimensionnement Des Structures En Béton – Aptitude au service et éléments de structures, Volume 8, 1999;

*BIBLIOGRAFIA*

## ANEXOS

Anexo I: Catálogo FercaNorte

Anexo II: Caso de estudo I – Mapa de quantidades

Anexo III: Caso de estudo II – Mapa de quantidades

Anexo IV: Caso de estudo III – Mapa de quantidades



## ANEXO I: CATÁLOGO FERCA NORTE





# FERCA NORTE

ESTRUTURAS, LAJES E COFRAGENS, LDA. | **MK4**

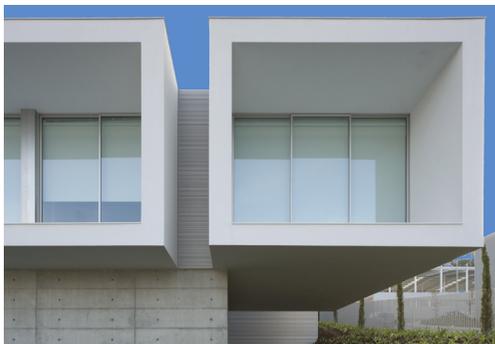
## PRODUTOS

-  PRÉ-ESFORÇO
-  APARELHOS DE APOIO
-  MOLDES FERCA
-  PÓS-ESCORAMENTO
-  BLOCOS NAUTILUS
-  BLOCO FERCA
-  CUPOLEX
-  IMPERMEABILIZAÇÃO



## CATÁLOGO DE PRODUTOS

PT AO MZ



## APOIO TÉCNICO

- VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL
- MODELAÇÃO ESTRUTURAL
- PROJECTOS DE APLICAÇÃO
- SOLUÇÕES VARIANTES
- ESTUDOS ECONÓMICOS
- COMPATIBILIZAÇÃO



A Fercanorte - Estruturas, Lajes e Cofragens, Lda. é uma empresa de engenharia que tem dedicado todos os seus esforços baseando-se em conceitos estruturais que permitem a realização de soluções de lajes, recorrendo a técnicas e produtos, de modo a satisfazer os pressupostos de qualidade e funcionalidades estruturais e arquitectónicas, com custos finais vantajosos e competitivos relativamente a outras soluções estruturais.

Nesse sentido, o início da sua actividade foi desde logo focado na introdução de soluções de lajes fungiformes, sem vigas, que permitiram a combinação dos factores essenciais e decisivos para a aceitação por parte de projectistas, arquitectos, empreiteiros e donos de obra das soluções preconizadas. Essas soluções foram concretizadas inicialmente com recurso a blocos de aligeiramento leve, fungiblocos, passando de seguida para o aligeiramento com moldes plásticos recuperáveis, atingindo dessa forma os requisitos de simplicidade e rapidez de execução de cofragens e colocação de armaduras, em malhas estruturais que permitiram a utilização de espaços polivalentes para estacionamento, zonas comerciais e habitacionais.

Complementarmente, a introdução e promoção do pré-esforço em edifícios, desde 1982, constituindo soluções em betão armado pré-esforçado, associado às mais diversas

soluções estruturais de lajes, veio alargar o seu campo de actuação e intervenção, permitindo assim a satisfação de programas arquitectónicos com exigências estruturais ainda mais elevadas, e garantindo, paralelamente, a boa funcionalidade dessas estruturas de acordo com as exigências regulamentares.

A Fercanorte está também presente nos mercados de Angola e Moçambique.

Em Angola, e a curto prazo também em Moçambique, a Fercanorte alargou a sua área de actividades, em parceria com empresas especializadas, no sector da impermeabilização e protecção de estruturas enterradas em contacto com água, representando a CETCO com os produtos VOLTEX (geotêxtil bentonítico expansivo) e no sector das coberturas metalotêxteis tensionadas.



As soluções estruturais de lajes mais frequentemente utilizadas em edifícios, caracterizadas com recurso a aligeiramentos e ou com recurso a pré-esforço, dentro da gama alargada de produtos comercializados pela FERCANORTE, poderá esquematizar-se da seguinte forma:

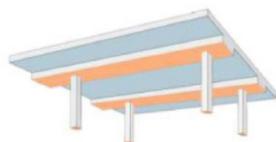
## LAJE MACIÇA (FLAT SLAB)

betão armado ou betão armado pré-esforçado



## LAJE MACIÇA UNIDIRECIONAL COM BANDAS

betão armado ou betão armado pré-esforçado



## LAJE MACIÇA BIDIRECIONAL COM BANDAS

betão armado ou betão armado pré-esforçado



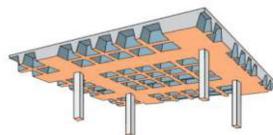
## LAJE NERVURADA FUNGIFORME COM MOLDES (WAFFLE)

betão armado ou betão armado pré-esforçado



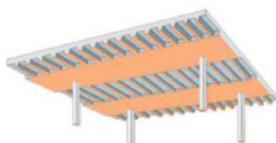
## LAJE NERVURADA BIDIRECIONAL COM MOLDES E BANDAS

betão armado ou betão armado pré-esforçado



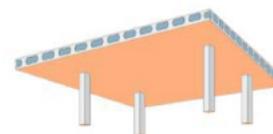
## LAJE NERVURADA UNIDIRECIONAL COM MOLDES E BANDAS

betão armado ou betão armado pré-esforçado



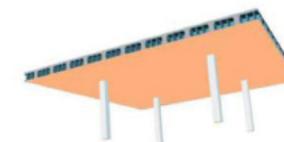
## LAJE FUNGIFORME COM BLOCOS NAUTILUS

betão armado ou betão armado pré-esforçado



## LAJE FUNGIFORME COM BLOCOS FERCANORTE

betão armado ou betão armado pré-esforçado



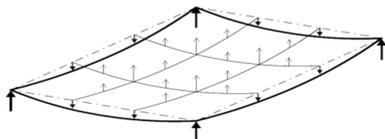
Tirando partido do excelente comportamento à tracção do aço de alta resistência aliado à elevada capacidade de resistência à compressão do betão, constitui-se o betão armado pré-esforçado.

Assim, ao traccionarem-se os cordões de aço, introduzem-se nos elementos estruturais forças internas de compressão bem como forças internas resultantes do traçado dos cordões.

Desta forma os esforços finais dos elementos estruturais pré-esforçados ficarão sujeitos a uma combinação de esforços das acções exteriores e da acção do pré-esforço, resultando num estado de tensão e de deformação extremamente favorável.

## Vantagens da utilização do pré-esforço:

- Maiores vãos das estruturas
- Maiores esbeltezas dos elementos estruturais
- Diminuição do peso próprio
- Melhoria do comportamento em serviço e a longo prazo
- Menores deformações
- Utilização racional dos betões e aços de alta resistência



Esquema de cargas equivalentes ao pré-esforço

## Técnicas e sistemas de pré-esforço:

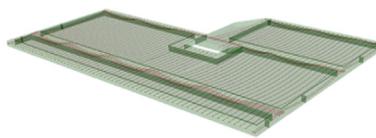
- As armaduras são tensionadas depois do betão ter adquirido a resistência necessária (pré-esforço por pós-tensão);
- A transferência das forças de pré-esforço são realizadas nas extremidades através de dispositivos mecânicos de fixação das armaduras (ancoragens) e ao longo dos cordões.

## Princípio esquemático do pré-esforço como acção:



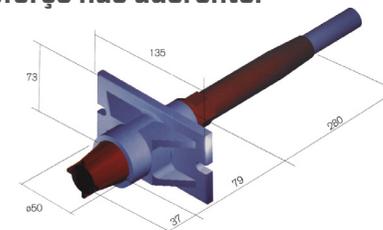
Acção do cabo de pré-esforço exercida sobre o betão

A Fercanorte utiliza nos seus projectos o sistema de pré-esforço **Mekano4**.



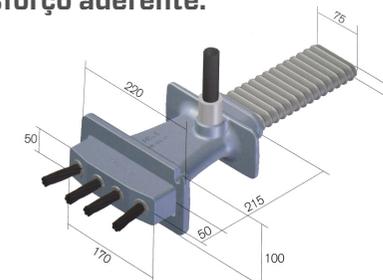
Modelação tridimensional da acção do pré-esforço

## Pré-esforço não aderente:

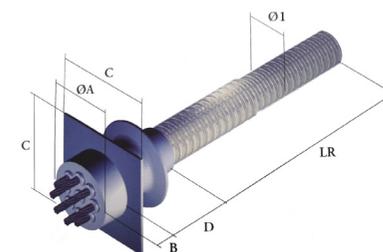


Ancoragem MK4 MUNB 1/0,6"

## Pré-esforço aderente:



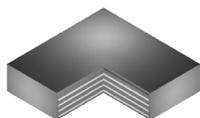
Ancoragem MK4 ML 4/0,6"



Ancoragem MK4 MSA

A Fercanorte representa em exclusivo a gama completa de aparelhos de apoio da Mekano4, fabricante de reconhecida capacidade técnica, cuja ampla experiência e numerosos projectos executados lhe permitiu desenvolver uma gama variada de aparelhos de apoio para pontes e estruturas.

## APARELHOS DE APOIO ELASTOMÉRICOS

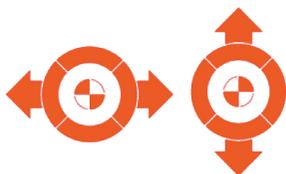


Os aparelhos de apoio elastoméricos são utilizados na transmissão de cargas verticais e, permitindo pequenas rotações e deslocamentos da superestrutura. Consistem em placas de material elastomérico intercaladas por chapas em aço unidas ao elastómero por vulcanização.

## APARELHOS DE APOIO TIPO PANELA (POT)



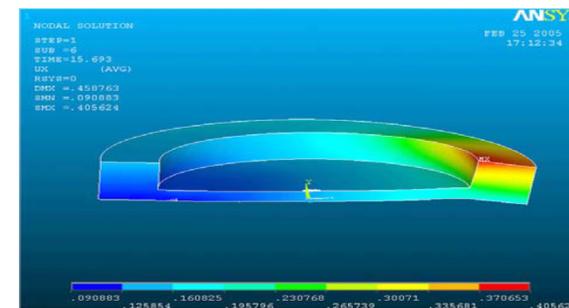
**FIXOS** Os apoios tipo panela fixos (PF) transmitem cargas verticais e horizontais entre o tabuleiro e os pilares. Estes apoios permitem quaisquer rotações da superestrutura, mas impedem todos os deslocamentos longitudinais ou transversais.



**GUIADOS** Os apoios tipo panela guiados (PG) transmitem cargas verticais e horizontais (estas últimas desde que perpendiculares à guia do apoio) entre o tabuleiro e os pilares. Estes apoios permitem quaisquer rotações da superestrutura, mas permitem apenas o deslocamento em uma das direcções (usualmente, a longitudinal).



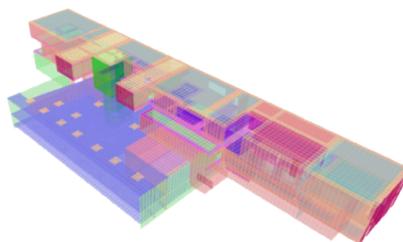
**MULTIDIRECCIONAIS** Os apoios tipo panela multidireccionais (PM) transmitem apenas cargas verticais entre o tabuleiro e os pilares, permitindo quaisquer rotações e deslocamentos da superestrutura.



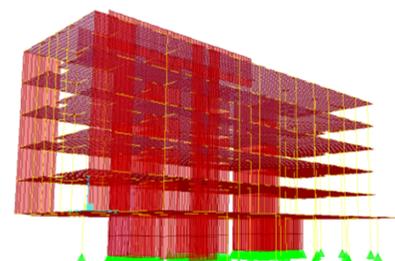
A FERCANORTE disponibiliza os seus serviços técnicos para apoio e acompanhamento de projecto, dimensionamento, verificações de estados limites últimos e de utilização e análise económica das soluções de lajes de betão armado e betão armado pré-esforçado.

As análises têm em conta o seguinte:

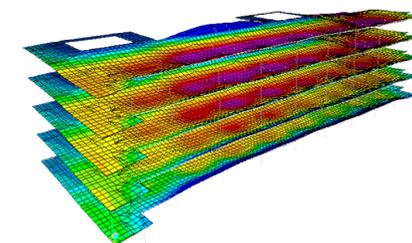
- Modelação estrutural recorrendo a elementos finitos
- Optimização das secções de betão
- Verificação de deformação para as condições de serviço
- Evolução das propriedades dos materiais no tempo (fluência, retracção e relaxação)
- Efeitos das deformações impostas externas e internas
- Análise de custos com base em dados do mercado
- Projecto de aplicação de pré-esforço, cálculo de perdas, verificação e optimização das armaduras passivas e activas (flexão, esforço transversal e punçoamento).



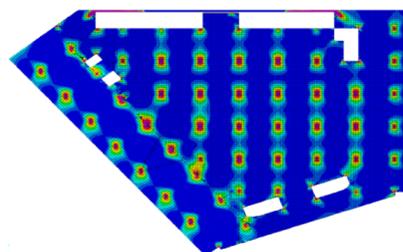
Modelação Estrutural



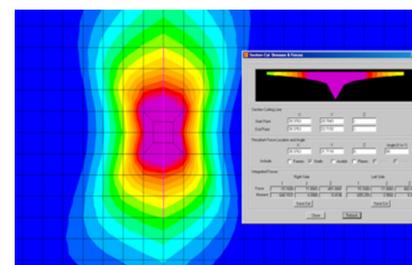
Efeitos das deformações impostas externas e internas



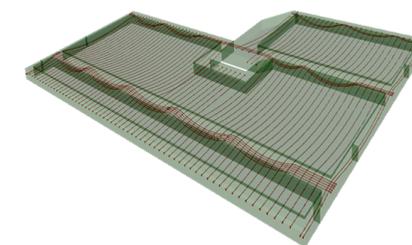
Análise de deformações a tempo infinito



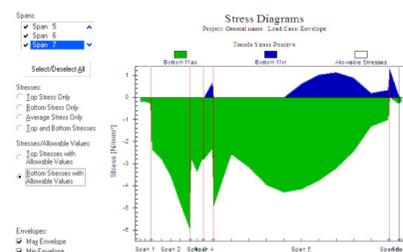
Verificação e optimização das armaduras passivas e activas



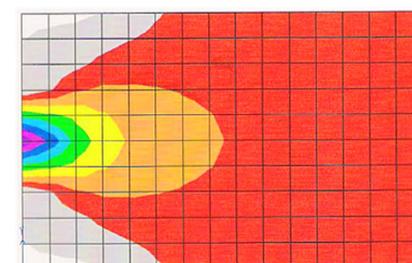
Optimização das armaduras passivas



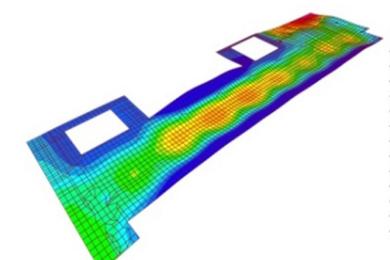
Modelação tridimensional da acção do pré-esforço



Análises de tensões provocadas pela acção do cabo



Análises de tensões nas zonas de ancoragens



Análise de deformações a tempo infinito

## CUPOLEX

O sistema que permite a ventilação da caixa-de-ar na constituição de qualquer piso:

- Um sistema de “cúpulas” de plástico reciclado
- Uma estrutura modulada auto-sustentada
- Uma base para a betonagem do piso térreo
- Aumenta o isolamento à permeabilidade e à transmissão térmica.
- Permite a drenagem e a ventilação permanente em qualquer sentido
- A caixa-de-ar, capaz de se constituir com variadas alturas, cria um piso falso, adequado às instalações técnicas de condutas ou acessórios das redes de infra-estruturas.



Plástico reciclado auto-sustentado



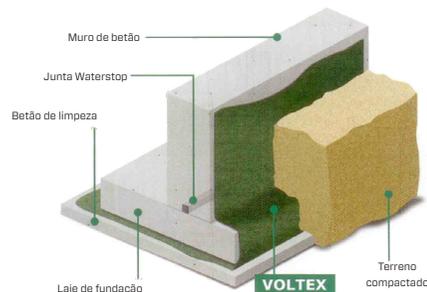
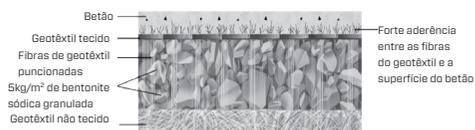
Impermeabilidade e isolamento térmico; permite a drenagem e a ventilação



# IMPERMEABILIZAÇÃO

## TELAS BENTONÍICAS VOLTEX

- Compósito impermeabilizante altamente eficaz, formado por geotêxtil de alta resistência e bentonite sódica, na quantidade de 5 kg por metro quadrado.
- Acção expansiva em contacto com a água sela pequenas fendas no betão, que configuram situações normalmente incontroláveis.
- Forte ligação mecânica com o betão, pela aderência das fibras do geotêxtil com a superfície do betão durante a betonagem.

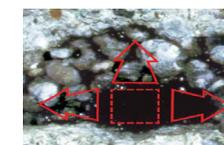


## JUNTAS BENTONÍICAS WATERSTOP

Fornecidas em tiras flexíveis de bentonite sódica expandem em contacto com a água, proporcionando um isolamento activo de juntas de betão.

Vantagens das juntas Waterstop:

- Fácil instalação, sem necessidade de soldas
- Isolamento activo, pela sua acção expansiva, preenchendo eventuais fendas
- Não são necessárias peças especiais para cruzamentos e cantos
- Seguro; não tóxico nem necessita de cuidados especiais de manuseamento
- Flexível
- Pode instalar-se em betão existente sem necessidade de abertura de roços



# CATÁLOGO

---



## 1 > SISTEMAS DE PRÉ-ESFORÇO

1.1 SISTEMA NÃO ADERENTE

1.2 SISTEMA ADERENTE



## 2 > LAJES NERVURADAS - MOLDES

2.1 MOLDES FG 900

2.2 MOLDES FG 800

2.3 MOLDES FG 600T

2.4 MOLDES FG 600

2.5 REI 120



## 3 > PÓS-ESCORAMENTO - LAJES NERVURADAS COM MOLDES

3.1 PÓS-ESCORAMENTO (CALHAS E CABEÇAIS)



## 4 > LAJES NERVURADAS - NAUTILUS

4.1 MÓDULO “NAUTILUS - FN”



## 5 > LAJES NERVURADAS - FUNGIBLOCOS

5.1 BLOCO FERCA FF 80

5.2 BLOCO FERCA FB 75

5.3 BLOCO FERCA FB 65



## 6 > PISOS TÉRREOS - SISTEMA VENTILADO

6.1 CUPOLEX



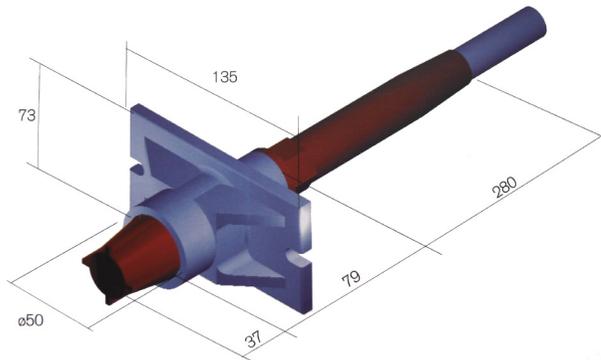
## 7 > IMPERMEABILIZAÇÃO

7.1 MANTAS BENTONÍICAS VOLTEX

7.2 JUNTAS EXPANSIVAS WATERSTOP

7.3 BENTONITE GRANULAR VOLCLAY E BENTOSEAL

1.1 SISTEMA NÃO ADERENTE

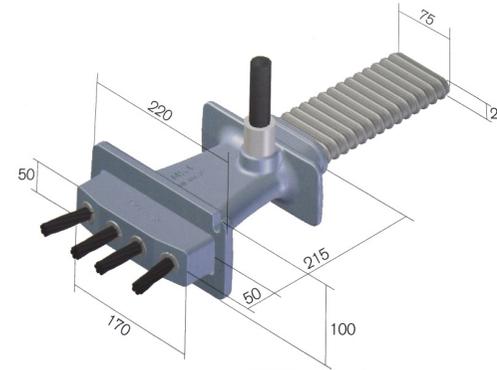


Ancoragem MK4 MUNB 1/0,6"

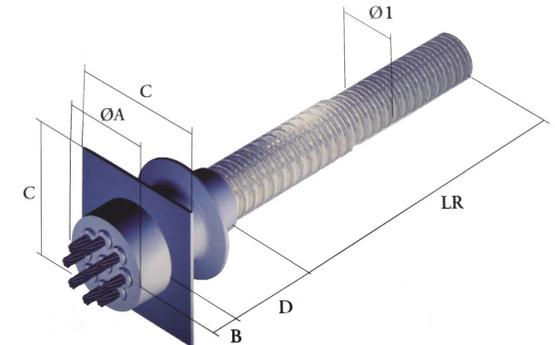
Monocordão	Unidade	
Secção Nominal	mm <sup>2</sup>	140
Diâmetro Nominal	mm	15,2
Tensão de Rotura	MPa	1860
Força de Rotura	kN	260
Força Máxima de Tensionamento (1)	kN	195
Ø ext. Monocordão	mm	18,0
Peso do Monocordão	kg/m	1,25
Módulo de Elasticidade	kN/mm <sup>2</sup>	200±10

Nota (1) - 75% Fpuk

1.2 SISTEMA ADERENTE



Ancoragem Plana MK4 ML4/0,6"



Ancoragem MK4 MSA

	Tipo		ØA	B	C	D	LR	Ø1	Nº de Cordões	Força de Rotura	Força Máxima de Tensionamento (1)	Peso	Secção
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	Fpuk (kN)		
Ancoragens MSA (15,2 mm)	4-0,6"	T-4	110	50	170	155	600	51/56	2*	521*	391*	2,22*	280*
									3*	782*	586*	3,33*	420*
									4*	1042*	782*	4,44*	560*
	5-0,6"	T-4	110	50	170	155	600	51/56	5	1303	977	5,55	700
									6	1564	1173	6,66	840
									7	1824	1368	7,77	980
	7-0,6"	T-5	129	61	194	150	600	62/67	8	2085	1564	8,88	1120
									9	2346	1759	9,99	1260
									10	2607	1955	11,10	1400
	9-0,6"	T-6	144	60	220	175	900	72/77	11	2867	2150	12,21	1540
									12	3128	2346	13,32	1680

\* Valores também válidos para as ancoragens planas ML4/0,6"

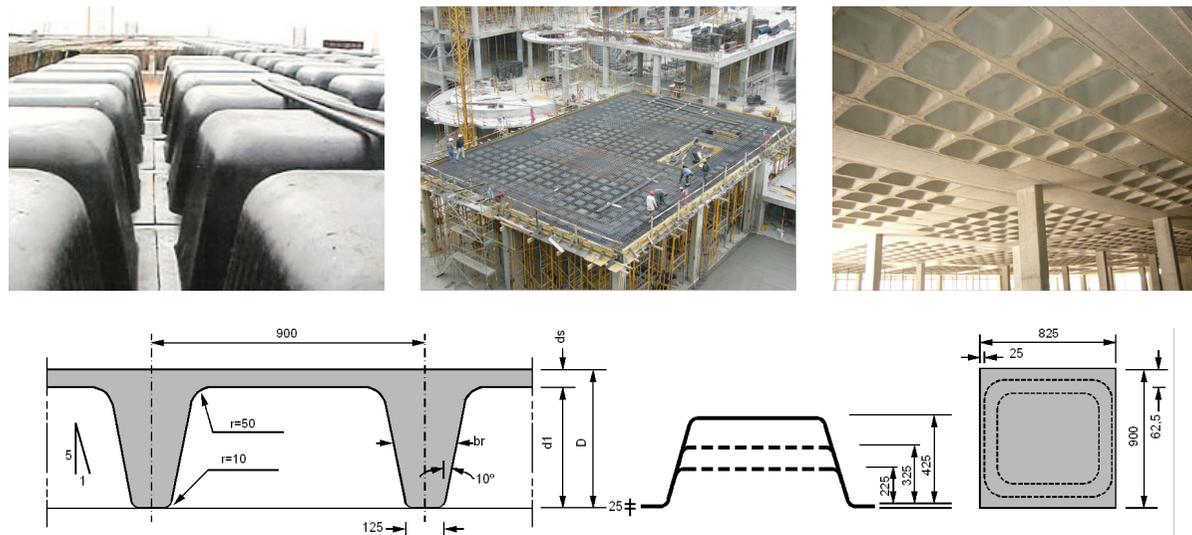
Nota (1) - 75% Fpuk



### 2.1 MOLDES FG 900

Os moldes “FG 900” são utilizados na construção de lajes nervuradas nas duas direcções ortogonais, vulgarmente designadas como lajes Fungiformes nervuradas, segundo módulos de 900 mm entre eixos de nervuras.

Existem três tipos de moldes “FG 900”, com alturas de 225 mm, 325 mm e 425 mm. Foram concebidos com duas abas mais estreitas de forma a serem descofrados ao 3º dia após betonagem, mantendo a estrutura vertical de suporte. São interiormente reforçados para garantir deformações muito pequenas. O seu reduzido peso permite um fácil manuseamento em obra.



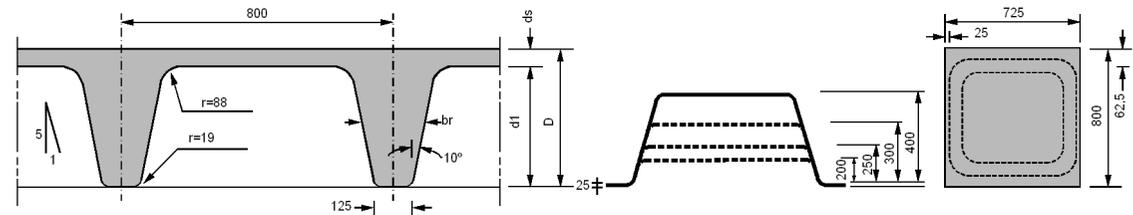
Altura do Molde	Espessura da Lâmina	Altura Total	Largura Média da Nervura	Área da Secção	Distância ao C.G da		Inércia (por nervura)	Módulo de Flexão (por nervura)		Volume de Vazio		Peso Próprio	Volume de Betão
					Face Superior	Face Inferior		cm³/nerv.	cm³/nerv.	m³/molde	m³/m²		
mm	mm	mm	mm	cm²	mm	mm	cm⁴/nerv.	cm³/nerv.	cm³/nerv.	m³/molde	m³/m²	KN/m²	m³/m²
225	50	275	172	816	83	192	49561	5971	2581	0,113	0,139	3,45	0,136
	75	300	176	1040	87	213	65670	7548	3083			4,05	0,161
	100	325	180	1266	95	230	84158	8858	3659			4,65	0,186
325	50	375	192	1043	122	253	125718	10304	4969	0,156	0,192	4,60	0,183
	75	400	197	1268	123	277	159245	12947	5749			5,20	0,208
	100	425	203	1493	128	297	194449	15191	6547			5,85	0,233
425	50	475	207	1310	165	310	255029	15456	8226	0,197	0,242	5,85	0,233
	75	500	212	1536	163	337	314390	19347	9315			6,45	0,258
	100	525	217	1761	165	360	374573	22701	10450			7,10	0,283
<b>d1</b>	<b>ds</b>	<b>D</b>	<b>br</b>	<b>A</b>	<b>rs</b>	<b>ri</b>	<b>I</b>	<b>Ws</b>	<b>Wi</b>	<b>Vv</b>	<b>Betão 25 KN/m³</b>		



### 2.2 MOLDES FG 800

Os moldes “FG 800” são utilizados na construção de lajes nervuradas nas duas direcções ortogonais, vulgarmente designadas como lajes Fungiformes nervuradas, segundo módulos de 800 mm entre eixos de nervuras.

Existem quatro tipos de moldes “FG 800”, com alturas de 200 mm, 250 mm, 300 mm e 400 mm. Foram concebidos com duas abas mais estreitas de forma a serem descofrados ao 3º dia após a betonagem, mantendo a estrutura vertical de suporte. São interiormente reforçados para garantir deformações muito pequenas. O seu reduzido peso permite um fácil manuseamento em obra.



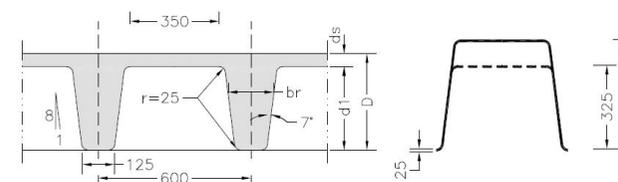
Altura do Molde	Espessura da Lâmina	Altura Total	Largura Média da Nervura	Área da Secção	Distância ao C.G da		Inércia (por nervura)	Módulo de Flexão (por nervura)		Volume de Vazio		Peso Próprio	Volume de Betão
					Face Superior	Face Inferior		cm <sup>3</sup> /nerv.	cm <sup>3</sup> /nerv.	m <sup>3</sup> /molde	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>		
mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	mm	mm	cm <sup>4</sup> /nerv.	cm <sup>3</sup> /nerv.	cm <sup>3</sup> /nerv.	m <sup>3</sup> /molde	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	KN/m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
200	50	250	164	710	76	174	35092	4617	2017	0,080	0,125	3,15	0,125
	75	275	169	910	82	193	47499	5793	2461				
	100	300	173	1110	90	210	62176	6908	2961				
250	50	300	173	810	95	205	60694	6389	2961	0,095	0,148	3,80	0,152
	75	325	177	1010	99	226	79426	8023	3514				
	100	350	182	1210	106	244	100258	9458	4109				
300	50	350	182	918	115	235	96048	8352	4087	0,115	0,179	4,30	0,171
	75	375	186	1118	117	258	122897	10504	4763				
	100	400	190	1318	123	277	151574	12323	5472				
400	50	450	200	1162	156	294	203062	13017	6907	0,145	0,226	5,60	0,224
	75	475	204	1362	157	318	251824	16040	7919				
	100	500	208	1562	160	340	301779	18861	8876				
<b>d1</b>	<b>ds</b>	<b>D</b>	<b>br</b>	<b>A</b>	<b>rs</b>	<b>ri</b>	<b>I</b>	<b>Ws</b>	<b>Wi</b>	<b>Vv</b>		<b>Betão 25 KN/m<sup>3</sup></b>	



### 2.3 MOLDES FG 600T

Concebidos para a construção de lajes nervuradas predominantemente numa direcção, com 600 mm de afastamento entre nervuras principais e afastamento variável entre nervuras transversais secundárias, tendo as nervuras largura  $b=125$  mm. Dois módulos de topo (A) podem ser combinados com um número variável de módulos interiores (B), obtendo-se moldes com comprimentos de 1200mm, 1910mm, etc.

Existem moldes com 325mm e 425 mm de altura.

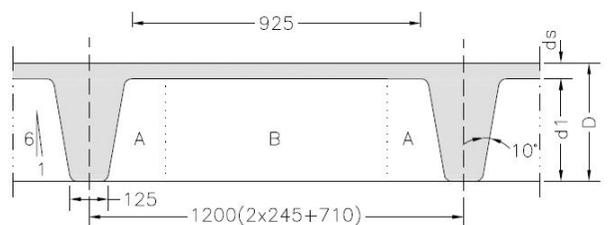
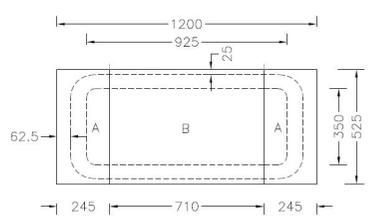


**Tabela 1 - Geometria e características técnicas**

Altura do Molde mm	Espessura da Lâmina mm	Altura Total mm	Espessura Média da Nervura mm	Área da Secção da Nervura cm <sup>2</sup>	Distância ao C. G. da		Inércia (por nervura) cm <sup>4</sup> /nerv.	Módulo de Flexão (por nervura)	
					Face superior mm	Face inferior mm		cm <sup>3</sup> /nerv.	cm <sup>3</sup> /nerv.
325	50	375	171	838	136	239	104560	7688	4375
	75	400	175	988	138	262	132740	9619	5066
	100	425	178	1138	143	282	162540	11366	5764
425	50	475	184	1057	179	296	210410	11755	7108
	75	500	187	1207	180	320	258750	14375	8086
	100	525	190	1357	184	341	308450	16764	9045
<b>d1</b>	<b>ds</b>	<b>D</b>	<b>br</b>	<b>A</b>	<b>vs</b>	<b>vi</b>	<b>I</b>	<b>Ws</b>	<b>Wi</b>



## FG 600T - Malha de Nervuras: 0,60 x 1,20 m (2A+1B)



## FG 600T - Malha de Nervuras: 0,60 x 1,91 m (2A+2B)

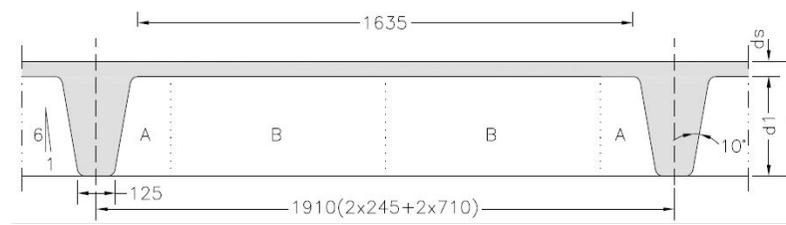
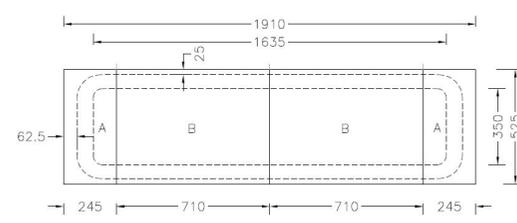


Tabela 2 - Volumes e Pesos Próprios

Altura do Molde mm	Espessura da Lâmina mm	Altura Total mm	Malha de Nervuras 0,60 x 1,20 m				Malha de Nervuras 0,60 x 1,91 m			
			Volume de Vazio		Peso Próprio KN/m <sup>2</sup>	Volume de Betão m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	Volume de Vazio		Peso Próprio KN/m <sup>2</sup>	Volume de Betão m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
			m <sup>3</sup> /molde	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>			m <sup>3</sup> /molde	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>		
325	50	375	0,143	0,199	4,41	0,176	0,242	0,211	4,10	0,164
	75	400			5,03	0,201			4,72	0,189
	100	425			5,66	0,226			5,35	0,214
425	50	475	0,179	0,249	5,66	0,226	0,306	0,267	5,20	0,208
	75	500			6,28	0,251			5,82	0,233
	100	525			6,91	0,276			6,45	0,258
<b>d1</b>	<b>ds</b>	<b>D</b>	<b>Vv</b>		<b>Betão 25 KN/m<sup>3</sup></b>		<b>Vv</b>		<b>Betão 25 KN/m<sup>3</sup></b>	

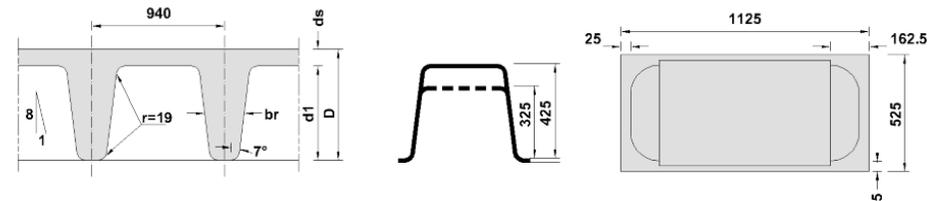


### 2.4 MOLDES FG 600

Concebidos para a construção de lajes nervuradas predominantemente numa direcção, com 600 mm de afastamento entre nervuras principais e 1.200 mm de afastamento entre nervuras transversais secundárias, tendo as nervuras largura  $b=125$  mm.

Foram desenhados com abas estreitas nos dois lados opostos para permitir que os moldes possam facilmente ser descofrados, mantendo a estrutura de suporte vertical. Os moldes são nervurados interiormente de forma a constituírem uma unidade monolítica alongada, o que assegura deformações muito pequenas.

Existem moldes com 325mm e 425 mm de altura.



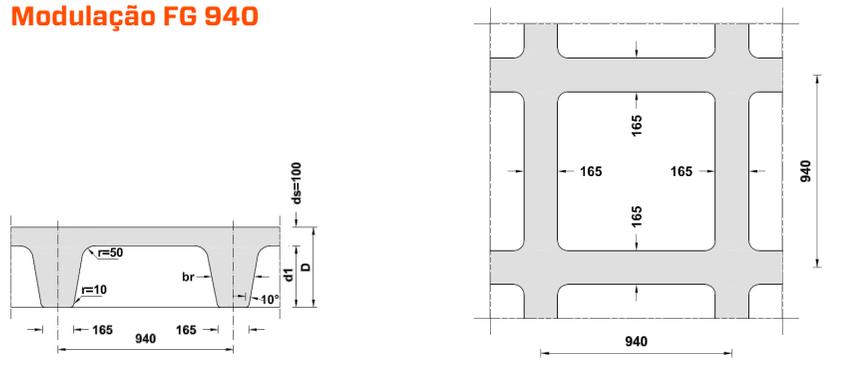
Altura do Molde	Espessura da Lâmina	Altura Total	Largura Média da	Área da Secção	Distância ao C.G da		Inércia (por nervura)	Módulo de Flexão (por nervura)		Volume do Vazio		Malha de Nervuras 0.60m x 1.20m	
					Face Superior	Face Inferior						Peso Próprio	Volume de betão
mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	mm	mm	cm <sup>4</sup> /nerv.	cm <sup>3</sup> /nerv.	cm <sup>3</sup> /nerv.	m <sup>3</sup> /molde	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	KN/m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
325	50	375	172	838	137	238	108773	7945	4568	0,151	0,210	4,13	0,165
	75	400	175	988	139	261	135256	9716	5186			4,75	0,190
	100	425	178	1138	144	281	164000	11373	5840			5,38	0,215
425	50	475	184	1057	180	195	200453	11136	6795	0,190	0,264	5,28	0,211
	75	500	188	1207	181	319	249191	13759	7814			5,90	0,236
	100	525	191	1357	185	340	299250	16201	8793			6,53	0,261
<b>d1</b>	<b>ds</b>	<b>D</b>	<b>br</b>	<b>A</b>	<b>rs</b>	<b>ri</b>	<b>I</b>	<b>Ws</b>	<b>Wi</b>	<b>Vv</b>		<b>Betão 25 KN/m<sup>3</sup></b>	



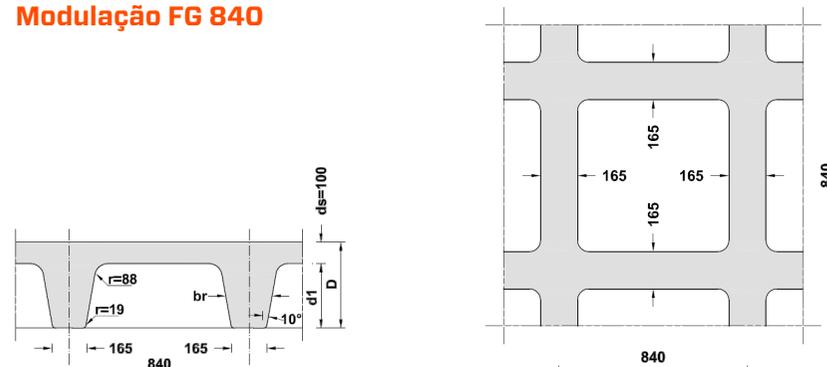
### 2.5 RESISTÊNCIA AO FOGO REI 120

- Moldes FG 940 e FG 840
- Aumento da largura das nervuras / espessura da lâmina de compressão

#### Modulação FG 940



#### Modulação FG 840



Largura do Molde	Altura do Molde	Espessura da Lâmina	Altura Total	Largura Média da Nervura (exclui lâmina)	Área da Seção	Distância ao C.G da		Inércia (por nervura)	Módulo de Flexão (por nervura)		Volume do Vazio		Peso Próprio	Volume de betão
						Face Superior	Face Inferior							
mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	mm	mm	cm <sup>4</sup> /nerv.	cm <sup>3</sup> /nerv.	cm <sup>3</sup> /nerv.	m <sup>3</sup> /molde	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	KN/m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
840	200	100	300	200	1261	97	203	76267	7863	3757	0,080	0,113	4,666	0,187
	250	100	350	209	1383	114	236	122327	10730	5183	0,095	0,135	5,384	0,215
	300	100	400	218	1514	132	268	184186	13953	6873	0,115	0,163	5,925	0,237
	400	100	500	236	1803	171	329	363478	21256	11048	0,145	0,205	7,363	0,295
940	225	100	325	205	1407	101	224	101368	10036	4525	0,113	0,128	4,928	0,197
	325	100	425	222	1669	136	289	230865	16975	7988	0,156	0,177	6,211	0,248
	425	100	525	240	1966	175	350	438924	25081	12541	0,197	0,223	7,551	0,302
	d1	ds	D	br	A	rs	ri	I	Ws	Wi	Vv		Betão 25 KN/m <sup>3</sup>	

## 3.1 PÓS-ESCORAMENTO (CALHAS E CABEÇAIS)

Sistema de componentes complementares de cofragem e escoramento, especialmente concebido para a utilização com moldes recuperáveis.

Este sistema permite a retirada, aos 3 dias após as betonagens, dos prumos principais, vigas primárias e secundárias, calhas e moldes.

A laje ficará escorada com prumos suplementares, localizados apenas sob os cabeçais (malha de prumos de 1,80m x 2,50m ou 1,60m x 2,50m).



**Carga axial nos prumos de pós-escoramentos das zonas aligeiradas com moldes recuperáveis:**

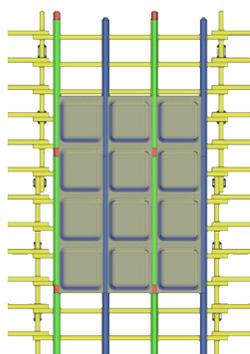
Malha de Moldes de 0,80 m x 0,80 m (FG8M) - [Malha de Prumos = 1,60 m x 2,50 m]

Tipo de Molde	Espessura total da Laje (Ht)	Altura do Molde (Hm)	Lâmina de Compressão (Lc)	Peso Próprio/m <sup>2</sup>	Carga no Prumo (pós-escoramento)
FG8M200	0,250	0,200	0,050	3,15	12,60
	0,275		0,075	3,75	15,00
	0,300		0,100	4,40	17,60
FG8M250	0,300	0,250	0,050	3,80	15,20
	0,325		0,075	4,45	17,80
	0,350		0,100	5,05	20,20
FG8M300	0,350	0,300	0,050	4,30	17,20
	0,375		0,075	4,90	19,60
	0,400		0,100	5,55	22,20
FG8M400	0,450	0,400	0,050	5,60	22,40
	0,475		0,075	6,25	25,00
	0,500		0,100	6,85	27,40
	(m)	(m)	(m)	(KN/m <sup>2</sup> )	(KN)

Malha de Moldes de 0,90 m x 0,90 m (FG9M) - [Malha de Prumos = 1,80 m x 2,50 m]

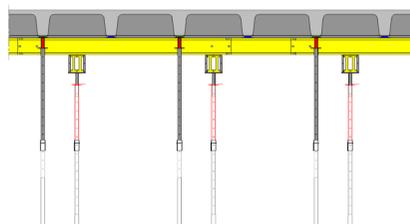
Tipo de Molde	Espessura total da Laje (Ht)	Altura do Molde (Hm)	Lâmina de Compressão (Lc)	Peso Próprio/m <sup>2</sup>	Carga no Prumo (pós-escoramento)
FG9M225	0,275	0,225	0,050	3,45	15,53
	0,300		0,075	4,05	18,23
	0,325		0,100	4,65	20,93
FG9M325	0,375	0,325	0,050	4,60	20,70
	0,400		0,075	5,20	23,40
	0,425		0,100	5,85	26,33
FG9M425	0,475	0,425	0,050	5,85	26,33
	0,500		0,075	6,45	29,03
	0,525		0,100	7,10	31,95
	(m)	(m)	(m)	(KN/m <sup>2</sup> )	(KN)

Planta

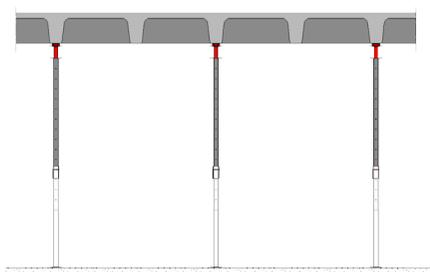


Cortes

1ª Fase - Preparação da laje  
Escoramento + Pós-Escoramento



2ª Fase - 3 dias após a betonagem  
Pós-Escoramento



### Elementos do Pós-Escoramento

Calha 2,50 m



Calha 2,35 m



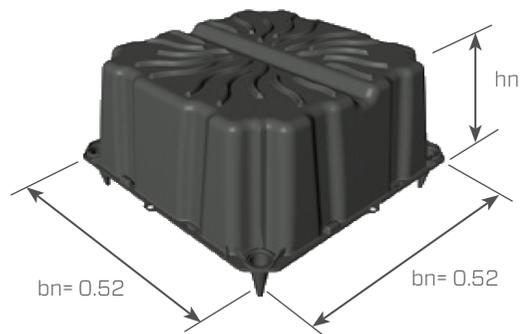
Cabeçal



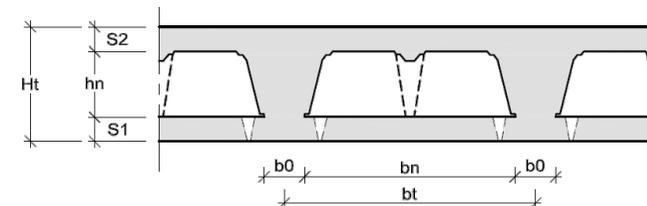


## 4.1 MÓDULO “NAUTILUS-FN” SINGLE

- Lajes fungiformes nervuradas.
- Tecto plano em betão à vista.



	Modelo Nautilus [hn] cm	Altura dos Pés [s1] cm	Largura das Nervuras [b0] cm
Módulo Simples	H 13	5	12
	H 16	6	14
	H 20	7	16
	H 24	8	18
	H 28	9	20
		10	

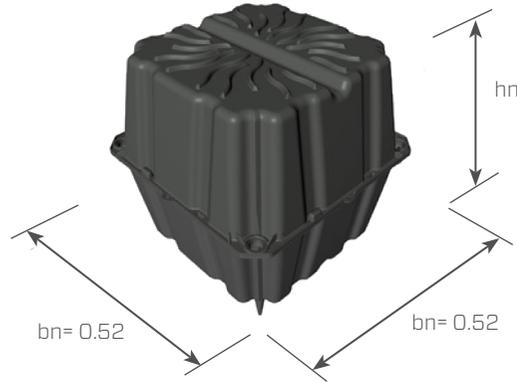


Espessura Total	Lâmina Inferior	Altura “Nautilus”	Lâmina Superior	Largura da Nervura	Dimensão “Nautilus”	Distância entre eixos de nervura	Inércia (por nervura)	Volume de Vazios		Consumo de Betão	Peso Próprio
[Ht]	[s1]	[hn]	[s2]	[b0]	[bn]	[bt]	[I]	[Vv]		[Vb]	[p.p.]
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>4</sup> /nerv.	m <sup>3</sup> /un.	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>
Ht = 23	5	13	5	12	52	64	56467	0,028	0,068	0,162	4,04
Ht = 26	5	16	5	12	52	64	78043	0,032	0,078	0,182	4,55
Ht = 30	5	20	5	12	52	64	113451	0,039	0,095	0,205	5,12
Ht = 34	5	24	5	12	52	64	157116	0,046	0,112	0,228	5,69
Ht = 38	5	28	5	12	52	64	209820	0,051	0,125	0,255	6,39

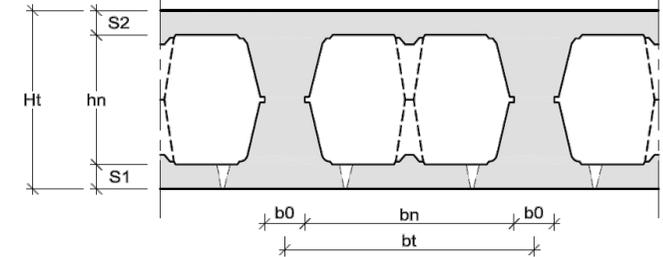


## 4.2 MÓDULO “NAUTILUS-FN” DUPLO

- Lajes fungiformes nervuradas.
- Tecto plano em betão à vista.



	Modelo Nautilus [hn] cm	Altura dos Pés [s1] cm	Largura das Nervuras [b0] cm
Módulo Duplo	H 26	5	12
	H 29	6	14
	H 32	7	16
	H 33	8	18
	H 36	9	20
	H 37	10	
	H 40		
	H 41		



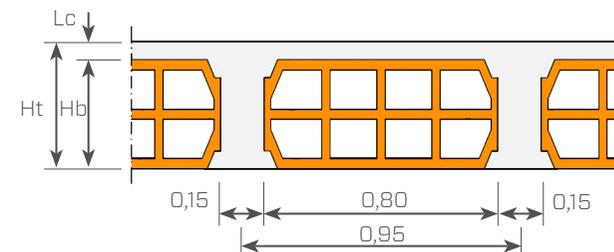
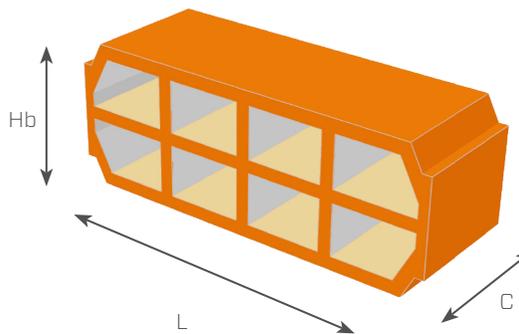
Espessura Total	Lâmina Inferior	Altura “Nautilus”	Lâmina Superior	Largura da Nervura	Dimensão “Nautilus”	Distância entre eixos de nervura	Inércia (por nervura)	Volume de Vazios		Consumo de Betão	Peso Próprio
[Ht]	[s1]	[hn]	[s2]	[b0]	[bn]	[bt]	[I]	[Vv]		[Vb]	[p.p.]
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>4</sup> /nerv.	m <sup>3</sup> /un.	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>
Ht = 38	6	26	6	12	52	64	227696	0,057	0,139	0,241	6,02
Ht = 41	6	29	6	12	52	64	277452	0,060	0,146	0,264	6,59
Ht = 44	6	32	6	12	52	64	333395	0,064	0,156	0,284	7,09
Ht = 45	6	33	6	12	52	64	353475	0,067	0,164	0,286	7,16
Ht = 48	6	36	6	12	52	64	418133	0,070	0,171	0,309	7,73
Ht = 49	6	37	6	12	52	64	441052	0,071	0,173	0,317	7,92
Ht = 52	6	40	6	12	52	64	515393	0,078	0,190	0,330	8,24
Ht = 53	6	41	6	12	52	64	497963	0,079	0,193	0,337	8,43
Ht = 56	6	44	6	12	52	64	576062	0,084	0,205	0,355	8,87
Ht = 60	6	48	6	12	52	64	639574	0,092	0,225	0,375	9,38
Ht = 64	6	52	6	12	52	64	764442	0,097	0,237	0,403	10,08
Ht = 68	6	56	6	12	52	64	1048163	0,102	0,249	0,431	10,77



## 5.1 BLOCO FERCA FF80

### CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS:

BLOCO	DIMENSÕES (cm)			Peso unitário
	L cm	C cm	Hb cm	Kg
FF 80/20	80,0	26,6	20,0	19,0
FF 80/25	80,0	26,6	25,0	23,0
FF 80/30	80,0	26,6	30,0	24,0
FF 80/35	80,0	26,6	35,0	25,0
FF 80/40	80,0	26,6	40,0	26,0



### LAJES NERVURADAS BIDIRECCIONAIS (elementos para cálculo):

BLOCO	Ht	Hb	Lc	Largura da Nervura	Volume de Aligeiramento		Volume de betão	Peso próprio da laje	Inercia da laje $I_x=I_y$ (/nervura)	Resistência térmica*	
	cm	cm	cm		cm	m³/módulo				m³/m²	m³/m²
FF 80/20	25,0	20,0	5,0	15,0	0,124	0,137	0,112	3,55	39715	0,451	0,528
FF 80/25	30,0	25,0	5,0	15,0	0,156	0,173	0,127	4,00	67665	0,458	0,542
FF 80/30	35,0	30,0	5,0	15,0	0,188	0,208	0,142	4,45	105500	0,466	0,552
FF 80/35	40,0	35,0	5,0	15,0	0,220	0,244	0,156	4,85	154320	0,473	0,561
FF 80/40	45,0	40,0	5,0	15,0	0,252	0,279	0,171	5,25	215180	0,480	0,570

NOTA: Tabela efectuada para módulos com 3 peças (0.80 x 0.80)

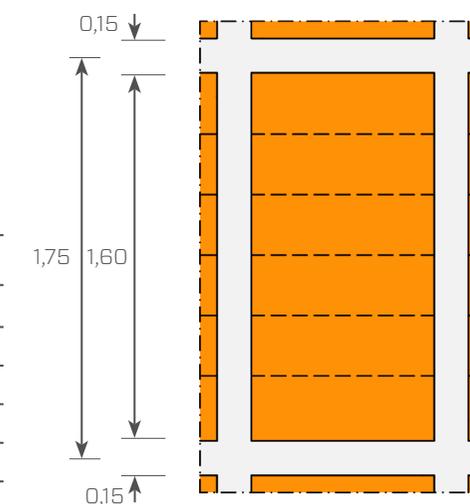
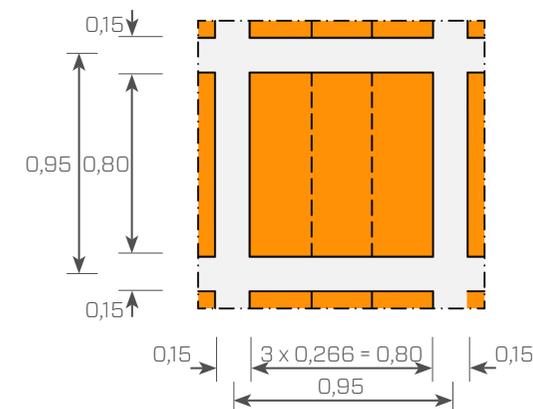
\* Não incluem, quaisquer revestimentos ou camadas de forma adicionais, nem resistências térmicas superficiais (exterior e interior)

### LAJES NERVURADAS UNIDIRECCIONAIS (elementos para cálculo):

BLOCO	Ht	Hb	Lc	Largura da Nervura	Volume de Aligeiramento		Volume de betão	Peso próprio da laje	Inercia da laje $I_y$ (/nervura)	Resistência térmica*	
	cm	cm	cm		cm	m³/módulo				m³/m²	m³/m²
FF 80/20	25,0	20,0	5,0	15,0	0,248	0,149	0,101	3,30	39715	0,479	0,562
FF 80/25	30,0	25,0	5,0	15,0	0,312	0,188	0,112	3,70	67665	0,485	0,576
FF 80/30	35,0	30,0	5,0	15,0	0,376	0,226	0,124	4,05	105500	0,491	0,585
FF 80/35	40,0	35,0	5,0	15,0	0,440	0,265	0,135	4,40	154320	0,496	0,592
FF 80/40	45,0	40,0	5,0	15,0	0,504	0,303	0,147	4,75	215180	0,502	0,600

NOTA: Tabela efectuada para módulos com 6 peças (0.80 x 1.60)

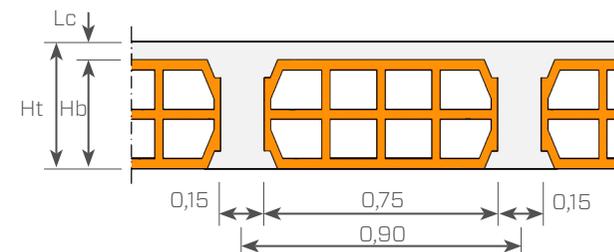
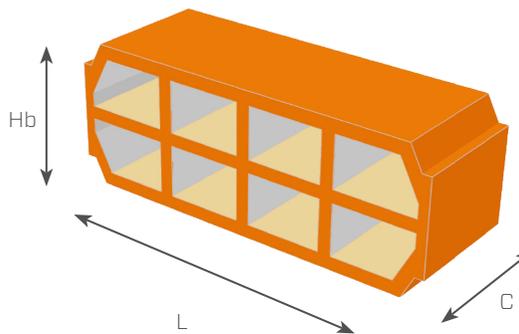
\* Não incluem, quaisquer revestimentos ou camadas de forma adicionais, nem resistências térmicas superficiais (exterior e interior)



## 5.2 BLOCO FERCA Fb75

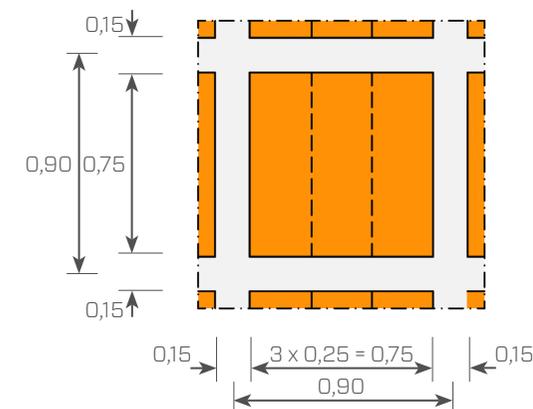
### CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS:

BLOCO	DIMENSÕES (cm)			Peso unitário
	L cm	C cm	Hb cm	Kg
Fb 75/20	75,0	25,0	20,0	20,0
Fb 75/25	75,0	25,0	25,0	22,0
Fb 75/30	75,0	25,0	30,0	24,0
Fb 75/34	75,0	25,0	34,0	27,0
Fb 75/40	75,0	25,0	40,0	31,0



### LAJES NERVURADAS BIDIRECCIONAIS (elementos para cálculo):

BLOCO	Ht	Hb	Lc	Largura da Nervura	Volume de Aligeiramento		Volume de betão	Peso próprio da laje	Inercia da laje $I_x=I_y$ (/nervura)	Resistência térmica*					
	cm	cm	cm		cm	m³/módulo				m³/m²	m³/m²	kN/m²	cm⁴	Ascendente	Descendente
	m² .°C/W														
Fb 75/20	25,0	20,0	5,0	15,0	0,109	0,135	0,116	3,60	42370	0,428	0,504				
Fb 75/25	30,0	25,0	5,0	15,0	0,137	0,169	0,131	4,10	71300	0,435	0,518				
Fb 75/30	35,0	30,0	5,0	15,0	0,165	0,204	0,147	4,55	110170	0,443	0,528				
Fb 75/34	40,0	34,0	6,0	15,0	0,187	0,231	0,169	5,15	164380	0,454	0,540				
Fb 75/40	46,0	40,0	6,0	15,0	0,221	0,273	0,187	5,95	232000	0,463	0,552				

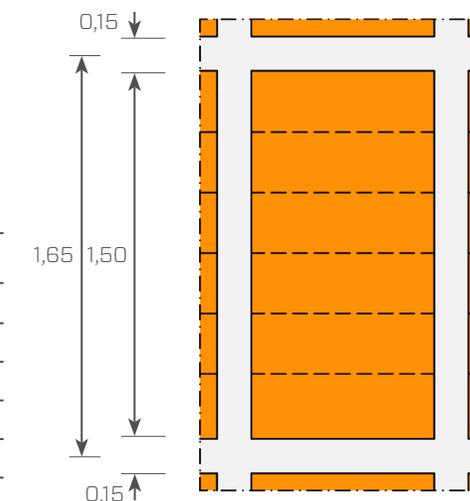


NOTA: Tabela efectuada para módulos com 3 peças (0.75 x 0.75)

\* Não incluem, quaisquer revestimentos ou camadas de forma adicionais, nem resistências térmicas superficiais (exterior e interior)

### LAJES NERVURADAS UNIDIRECCIONAIS (elementos para cálculo):

BLOCO	Ht	Hb	Lc	Largura da Nervura	Volume de Aligeiramento		Volume de betão	Peso próprio da laje	Inercia da laje $I_y$ (/nervura)	Resistência térmica*					
	cm	cm	cm		cm	m³/módulo				m³/m²	m³/m²	kN/m²	cm⁴	Ascendente	Descendente
	m² .°C/W														
Fb 75/20	25,0	20,0	5,0	15,0	0,225	0,152	0,098	3,25	42370	0,455	0,538				
Fb 75/25	30,0	25,0	5,0	15,0	0,281	0,189	0,111	3,70	71300	0,461	0,552				
Fb 75/30	35,0	30,0	5,0	15,0	0,338	0,228	0,123	4,05	110170	0,467	0,560				
Fb 75/34	40,0	34,0	6,0	15,0	0,383	0,258	0,142	4,60	164380	0,477	0,571				
Fb 75/40	46,0	40,0	6,0	15,0	0,450	0,303	0,157	5,50	232000	0,485	0,581				



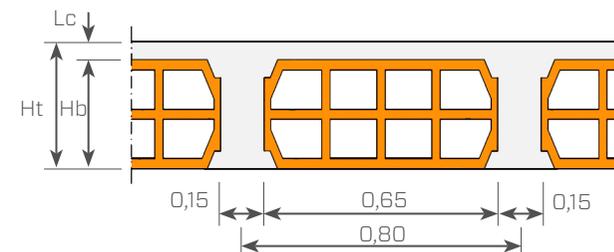
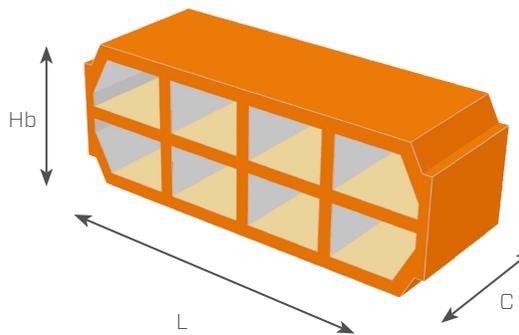
NOTA: Tabela efectuada para módulos com 6 peças (0.75 x 1.50)

\* Não incluem, quaisquer revestimentos ou camadas de forma adicionais, nem resistências térmicas superficiais (exterior e interior)

## 5.3 BLOCO FERCA Fb65

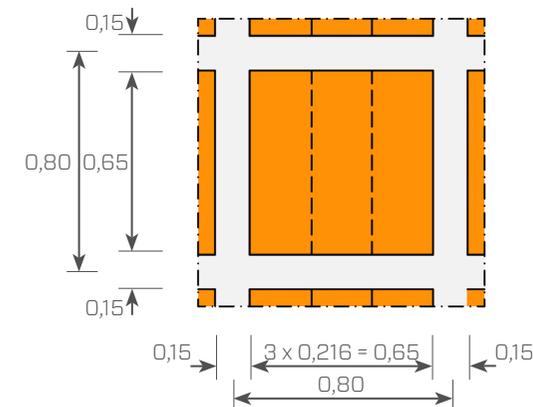
### CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS:

BLOCO	DIMENSÕES (cm)			Peso unitário
	L cm	C cm	Hb cm	Kg
Fb 65/20	65,0	21,6	20,0	14,0
Fb 65/25	65,0	21,6	25,0	17,0
Fb 65/30	65,0	21,6	30,0	18,0
Fb 65/34	65,0	21,6	34,0	20,0
Fb 65/40	65,0	21,6	40,0	28,0



### LAJES NERVURADAS BIDIRECCIONAIS (elementos para cálculo):

BLOCO	Ht	Hb	Lc	Largura da Nervura	Volume de Aligeiramento		Volume de betão	Peso próprio da laje	Inercia da laje $I_x=I_y$ (/nervura)	Resistência térmica*	
	cm	cm	cm		cm	m³/módulo				m³/m²	m³/m²
Fb 65/20	25,0	20,0	5,0	15,0	0,081	0,127	0,123	3,85	40800	0,413	0,485
Fb 65/25	30,0	25,0	5,0	15,0	0,102	0,159	0,140	4,40	68550	0,421	0,500
Fb 65/30	35,0	30,0	5,0	15,0	0,123	0,192	0,157	4,85	105800	0,430	0,511
Fb 65/34	40,0	34,0	6,0	15,0	0,140	0,219	0,181	5,50	157920	0,442	0,524
Fb 65/40	46,0	40,0	6,0	15,0	0,166	0,259	0,201	6,40	222480	0,452	0,536

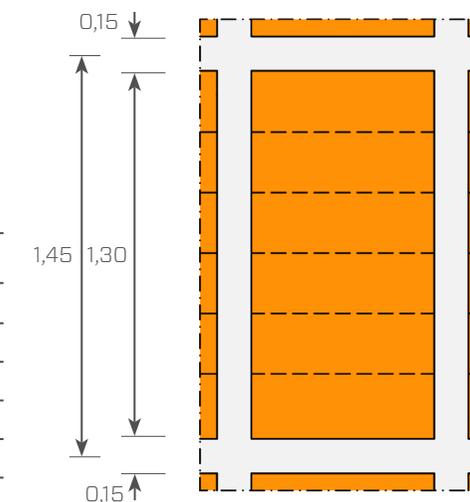


NOTA: Tabela efectuada para módulos com 3 peças (0.65 x 0.65)

\* Não incluem, quaisquer revestimentos ou camadas de forma adicionais, nem resistências térmicas superficiais (exterior e interior)

### LAJES NERVURADAS UNIDIRECCIONAIS (elementos para cálculo):

BLOCO	Ht	Hb	Lc	Largura da Nervura	Volume de Aligeiramento		Volume de betão	Peso próprio da laje	Inercia da laje $I_y$ (/nervura)	Resistência térmica*	
	cm	cm	cm		cm	m³/módulo				m³/m²	m³/m²
Fb 65/20	25,0	20,0	5,0	15,0	0,169	0,146	0,104	3,50	40800	0,443	0,522
Fb 65/25	30,0	25,0	5,0	15,0	0,211	0,182	0,118	3,95	68550	0,449	0,536
Fb 65/30	35,0	30,0	5,0	15,0	0,254	0,219	0,131	4,35	105800	0,456	0,545
Fb 65/34	40,0	34,0	6,0	15,0	0,287	0,247	0,152	4,90	157920	0,467	0,557
Fb 65/40	46,0	40,0	6,0	15,0	0,338	0,291	0,169	6,00	222480	0,475	0,567

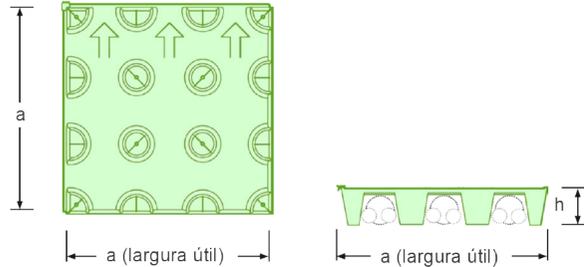


NOTA: Tabela efectuada para módulos com 6 peças (0.65 x 1.30)

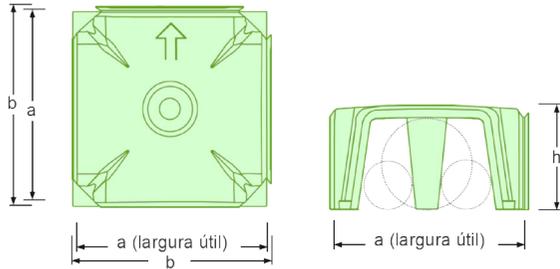
\* Não incluem, quaisquer revestimentos ou camadas de forma adicionais, nem resistências térmicas superficiais (exterior e interior)

6.1 CUPOLEX

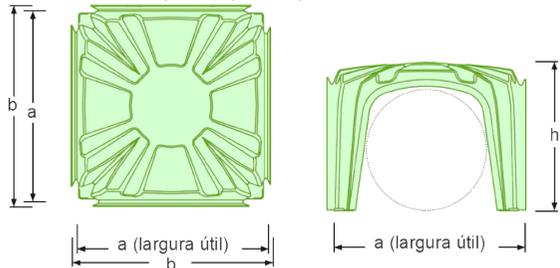
CUPOLEX WINDY h5, h10



CUPOLEX h9.5, h13.5, h20, h26, h30, h35, h40, h45, h50



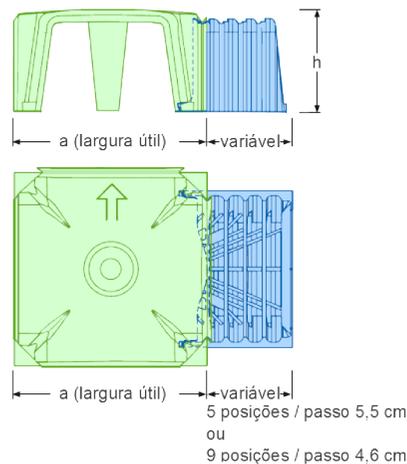
CUPOLEX h55, h60, h65, h70



Denominação	a cm	b cm	h cm	Consumo de Betão (até ao cimo da cúpula) m³/m²	Passagem de Tubos uni.Ømm
Windy h5	56,0	56,0	5,0	0,008	7Ø30
Windy h10	56,0	56,0	10,0	0,011	3Ø75 ou 6Ø50
Cupolex h9,5	56,0	57,1	9,5	0,014	4Ø70
Cupolex h13,5	56,0	58,0	13,5	0,030	3Ø60 ou 1Ø90*
Cupolex h20	56,0	58,0	20,0	0,040	2Ø100 ou 1Ø150*
Cupolex h26	56,0	58,0	26,0	0,035	2Ø145 ou 1Ø190*
Cupolex h30	56,0	57,2	30,0	0,042	2Ø145 ou 1Ø260*
Cupolex h35	56,0	58,0	35,0	0,045	2Ø150 ou 1Ø300*
Cupolex h40	56,0	58,0	40,0	0,060	2Ø140 ou 1Ø250*
Cupolex h45	56,0	58,0	45,0	0,065	2Ø150 ou 1Ø300*
Cupolex h50	56,0	57,0	50,0	0,065	2Ø150 ou 1Ø300*
Cupolex h55	71,0	74,5	55,0	0,069	1Ø450
Cupolex h60	71,0	74,5	60,0	0,070	1Ø460
Cupolex h65	71,0	74,5	65,0	0,071	1Ø470
Cupolex h70	71,0	74,5	70,0	0,073	1Ø480

Nota: \* cortando o cone central

BETONSTOP h20, h26, h30, h35, h40, h45, h50, h55, h60, h65, h70



Denominação	Nº de posições	Passo cm
Betonstop h20	5	5,5
Betonstop h26	5	5,5
Betonstop h30	5	5,5
Betonstop h35	5	5,5
Betonstop h40	5	5,5
Betonstop h45	5	5,5
Betonstop h50	5	5,5
Betonstop h55	9*	4,6
Betonstop h60	9*	4,6
Betonstop h65	9*	4,6
Betonstop h70	9*	4,6

Nota: \* módulos divisíveis a meio

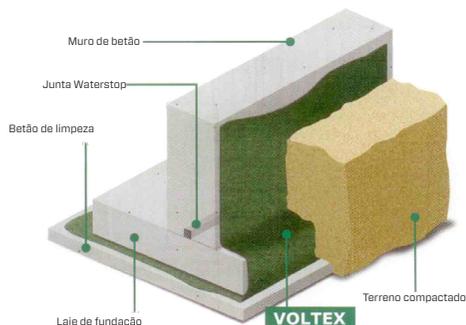
### 7.1 TELAS BENTONÍICAS VOLTEX

Voltex destina-se à impermeabilização de superfícies horizontais e verticais de betão. Apresenta-se sob três formas diferentes:

**VOLTEX** - barreira geosintética de bentonite sódica, especialmente formulada para impermeabilização de estruturas de betão.

**VOLTEX DS** - barreira geosintética melhorada. A uma das faces do Voltex convencional, acrescentou-se uma camada de polietileno de alta densidade, reduzindo drasticamente a permeabilidade do material. Adequado para quando é necessária uma barreira dupla à entrada de água.

**VOLTEX CRDS** - uma fórmula especial do Voltex DS para águas agressivas, com alto nível de contaminação e elevada condutividade eléctrica



Propriedade	Método de Ensaio	Valor de referência
Resistência hidrostática	ASTM D 5385 mod.	70 m
Permeabilidade	ASTM D 5084	1 x 10 <sup>-9</sup> cm/sec.
Resistência à tracção	ASTM D 4632	422 N
Resistência à perfuração	ASTM D 4833	445 N
Flexibilidade a baixa temperatura	ASTM D 1970	Não afectado a -32°C
Aderência ao betão	ASTM D 903 mod.	2.6 kN/m

Voltex é fornecido em paletes de 35 rolos, de 1.1 m x 5.0 m (192.5 m<sup>2</sup>), podendo ser produzido à medida para projectos especiais de grandes dimensões, des que uma das dimensões seja de 5.0 m e a outra se compreenda entre 1.1 m e 40.0 m. O peso do produto depende do conteúdo de humidade, podendo variar entre os 6 e os 7 kg/m<sup>2</sup>.

### 7.2 JUNTAS EXPANSIVAS WATERSTOP

As juntas expansivas Waterstop destinam-se ao isolamento de juntas de betonagem ficando confinadas entre a peça de betão existentes e a nova peça a betonar. Apresentam-se sob três formas diferentes:

**WATERSTOP RX-101** - com secção rectangular de 20 mm x 25 mm. Fornecida em caixas com 30 m.

**WATERSTOP RX-102** - com secção semicircular de 20 mm x 10 mm. Fornecida em caixas com 61 m.

**WATERSTOP XP** - para isolamento em ambientes de águas contaminadas. Com secção rectangular de 10 mm x 15 mm. Fornecida em caixas com 48 m.

As juntas RX101 e RX102, fixam-se ao betão com recurso à malha **Revofix**. A Junta XP é colocada com recurso quer à malha metálica **Revofix**, quer ao selante/adeseivo **Cetseal**.

Propriedade	Método de Ensaio	Resultado
Peso específico a 250C	ASTM D-71	1,57
Ponto de reamolecimento	ASTM D-30	N.A.
Penetração	ASTM D-217 150 GLT 300 GLT	58 85
Ponto de inflamação	ASTM D-93-97	365
Envelhecimento	Forno mecânico 4 horas a 1000C	Conservado 99% de sólidos
Resistência à fluência	2 cm de junta exposta a 580C durante 7 dias	Não fluido
Vida de armazenagem		Indefinida
Temperaturas de aplicação		- 50C a + 520C
Temperaturas de serviço		- 400C a + 1000C
Pressão hidrostática	Teste de pressão	70,4 m

### 7.3 BENTONITE GRANULAR E BENTOSEAL

Para a selagem de pontos críticos (esquinas, furos, uniões), pode utilizar-se a **bentonite granular** em cordão ou pasta, misturando água, bem como o preparado pronto de bentonite com adição de polímeros expansivos **Bentoseal**, especialmente indicado para superfícies verticais e águas de alta condutividade eléctrica.



### Torre das Antas

Porto



### ANF - Imofarma

Porto



### Escola Secundária

Lousada



### Plataforma das Artes

Guimarães



### EDP Renováveis

Porto



### Gaiart's Plaza Centrum

V. N. Gaia



### Europa - Ar Lindo

Celeirós, Braga



### Moradia Sr. Nuno Afonso

Monção



### Biblioteca Agostinho Neto

Luanda | Angola



### C.C. Dolce Vita

Porto



### Escola Tec. Agro-Alimentar

Malange | Angola



### IURD

Luanda | Angola



### Mercado Manuel Firmino

Aveiro



### Hospital Escola U. Fernando Pessoa

Gondomar



### Igreja N. Sra. Conceição

Guimarães



### Escola EB2/3 Frei João

Vila do Conde



### Hospital Privado da Boavista

Porto



### Escola EB2/3 Gondomar

Gondomar



---

**FERCANORTE**  
ESTRUTURAS, LAJES E  
COFRAGENS, LDA. | **MK4**

Rua do Campo Alegre, nº 100 - 3º Esq  
4150 - 168 Porto  
Portugal

**tel** +351 226 094 338 / 45  
**fax** +351 226 004 409  
**tlm** +351 961 547 343

geral@fercanorte.com.pt  
comercial@fercanorte.com.pt  
**www** fercanorte.com.pt

---

ANGOLA  
**FERCANORTE**  
ENGENHARIA E  
EMPREENDIMENTOS, LDA. | **MK4**

Avº 21 de Janeiro  
Condomínio das Mangueirinhas - Anexo  
Bairro Morro Bento II  
Luanda  
Angola

**tel** +244 948 799 044  
**tlm** +244 943 023 647  
+244 948 799 044

fna@fercanorte.com.pt  
**www** fercanorte.com.pt

---

**FERCAMOÇ**  
ENGENHARIA, LDA. | **MK4**

Rua Faralay, n.º 97  
Bairro Sommerschild  
Maputo  
Moçambique

**tlm** +258 842 357 131

fercamz@fercanorte.com.pt  
**www** fercanorte.com.pt

## ANEXO II: CASO DE ESTUDO I – MAPA DE QUANTIDADES



## 11.2 ANEXO II: CASO DE ESTUDO I – MAPA DE QUANTIDADES

Caso de Estudo I - Mapa de Quantidades									
Materiais/Custo:				Cargas Aplicadas/Peso:					
1. Betão C25/30 :	80,00	€/m <sup>3</sup>		1. Peso Próprio	Var.	kN/m <sup>3</sup>			
2. S 400 :	1,00	€/kg		2. R. C. P.	3,00	kN/m <sup>3</sup>			
3. Cofragem:	15,00	€/m <sup>2</sup>		3. Sobrecarga	3,00	kN/m <sup>3</sup>			
5. Blocos Sphereplus :	?	€/molde		<b>Nota:</b> Utilização: Escritórios					
6. Moldes FercaNorte :	?	€/molde							
Laje	Maciça c/ 26 cm		Sphereplus 5+16+5		Sphere.Favo 5+16+5		FG 800 - 250+60		
	-	uni.	2752	uni.	3232	uni.	752+40(1/2)	uni.	
Moldes/Blocos	-		4,62	moldes/m <sup>2</sup>	5,43	moldes/m <sup>2</sup>	1,33	moldes/m <sup>2</sup>	
	-		?	€/m <sup>2</sup>	?	€/m <sup>2</sup>	?	€/m <sup>2</sup>	
Consumo de Betão/m <sup>2</sup>	0,260	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,192	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,180	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,187	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	
	20,80	€/m <sup>2</sup>	15,33	€/m <sup>2</sup>	14,37	€/m <sup>2</sup>	14,99	€/m <sup>2</sup>	
Aço de Flexão	Face Superior	9,70	kg/m <sup>2</sup>	8,01	kg/m <sup>2</sup>	7,46	kg/m <sup>2</sup>	7,20	kg/m <sup>2</sup>
		9,70	€/m <sup>2</sup>	8,01	€/m <sup>2</sup>	7,46	€/m <sup>2</sup>	7,20	€/m <sup>2</sup>
	Face Inferior	8,05	kg/m <sup>2</sup>	6,79	kg/m <sup>2</sup>	6,50	kg/m <sup>2</sup>	4,19	kg/m <sup>2</sup>
		8,05	€/m <sup>2</sup>	6,79	€/m <sup>2</sup>	6,50	€/m <sup>2</sup>	4,19	€/m <sup>2</sup>
	Total	17,75	€/m <sup>2</sup>	14,80	€/m <sup>2</sup>	13,96	€/m <sup>2</sup>	11,39	€/m <sup>2</sup>
Estribos	Área de Reforço	-	m <sup>2</sup>	28,16	m <sup>2</sup>	29,36	m <sup>2</sup>	30,24	m <sup>2</sup>
	Armadura	-	kg/m <sup>2</sup>	3,63	kg/m <sup>2</sup>	3,54	kg/m <sup>2</sup>	1,52	kg/m <sup>2</sup>
		-	€/m <sup>2</sup>	2,84	€/m <sup>2</sup>	2,88	€/m <sup>2</sup>	1,27	€/m <sup>2</sup>
<b>Preço Total/m<sup>2</sup></b>	53,55	€/m <sup>2</sup>	47,97+Blocos	€/m <sup>2</sup>	46,21+Blocos	€/m <sup>2</sup>	42,65+Moldes	€/m <sup>2</sup>	



**ANEXO III: CASO DE ESTUDO II – MAPA DE QUANTIDADES**



## 11.3 ANEXO III: CASO DE ESTUDO II – MAPA DE QUANTIDADES

## Caso de Estudo II - Mapa de Quantidades

## Materiais/Custo:

1. Betão C25/30 :	80,00	€/m3
2. S 400 :	1,00	€/kg
3. Cofragem:	15,00	€/m2
4. Blocos Nautilus	?	€/molde
5. Blocos Sphereplus :	?	€/molde
6. Moldes FercaNorte :	?	€/molde

## Cargas Aplicadas/Peso:

1. Peso Próprio	Var.	kN/m <sup>3</sup>
2. R. C. P.	3,00	kN/m <sup>3</sup>
3. Sobrecarga	3,00	kN/m <sup>3</sup>

Nota: Utilização: Escritórios

Laje		Maciça c/ 30 cm		Nautilus 5+20+5		Sphereplus 5+20+5		Sphere.Favo 5+20+5		FG 800 - 300+60	
		-	uni.	1680	uni.	4048	uni.	4476	uni.	1056+48(1/2)	uni.
Moldes/Blocos		-		2,06	moldes/m <sup>2</sup>	4,96	moldes/m <sup>2</sup>	5,49	moldes/m <sup>2</sup>	1,35	moldes/m <sup>2</sup>
		-		?	€/m2	?	€/m2	?	€/m2	?	€/m2
Consumo de Betão/m <sup>2</sup>		0,300	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,218	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,208	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,198	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,209	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
		24,00	€/m2	17,41	€/m2	16,65	€/m2	15,87	€/m2	16,70	€/m2
Aço de Flexão	Face Superior	10,78	kg/m <sup>2</sup>	9,90	kg/m <sup>2</sup>	9,59	kg/m <sup>2</sup>	9,08	kg/m <sup>2</sup>	7,93	kg/m <sup>2</sup>
		10,78	€/m2	9,90	€/m2	9,59	€/m2	9,08	€/m2	7,93	€/m2
	Face Inferior	9,88	kg/m <sup>2</sup>	8,37	kg/m <sup>2</sup>	8,31	kg/m <sup>2</sup>	7,82	kg/m <sup>2</sup>	5,09	kg/m <sup>2</sup>
		9,88	€/m2	8,37	€/m2	8,31	€/m2	7,82	€/m2	5,09	€/m2
	Total	20,66	€/m2	18,27	€/m2	17,90	€/m2	16,89	€/m2	13,02	€/m2
Estribos	Área de Reforço	-	m <sup>2</sup>	43,01	m <sup>2</sup>	42,59	m <sup>2</sup>	41,14	m <sup>2</sup>	43,80	m <sup>2</sup>
	Armadura	-	kg/m <sup>2</sup>	1,93	kg/m <sup>2</sup>	3,53	kg/m <sup>2</sup>	4,08	kg/m <sup>2</sup>	2,03	kg/m <sup>2</sup>
		-	€/m2	1,68	€/m2	3,04	€/m2	3,39	€/m2	1,79	€/m2
Preço Total/m <sup>2</sup>		59,66	€/m2	52,35+Blocos	€/m2	52,58+Blocos	€/m2	51,15+Blocos	€/m2	46,51+Moldes	€/m2



## ANEXO IV: CASO DE ESTUDO III – MAPA DE QUANTIDADES



## 11.4 ANEXO IV: CASO DE ESTUDO III – MAPA DE QUANTIDADES

Caso de Estudo III - Mapa de Quantidades					
Materiais/Custo:			Cargas Aplicadas/Peso:		
1. Betão C25/30 :	80,00	€/m <sup>3</sup>	1. Peso Próprio	Var.	kN/m <sup>3</sup>
2. S 400 :	1,00	€/kg	2. R. C. P.	3,00	kN/m <sup>3</sup>
3. Cofragem:	15,00	€/m <sup>2</sup>	3. Sobrecarga	3,00	kN/m <sup>3</sup>
4. Blocos Nautilus	?	€/molde	<b>Nota:</b> Utilização: Escritórios		
5. Blocos Sphereplus :	?	€/molde			
6. Moldes FercaNorte :	?	€/molde			

Laje		Maciça c/ 28 cm		Tubular 5+18+5		FG 600 - 225+100	
		-	uni.	1200	uni.	792	uni.
Moldes/Blocos		-		1,47	moldes/m <sup>2</sup>	0,97	moldes/m <sup>2</sup>
		-		?	€/m <sup>2</sup>	?	€/m <sup>2</sup>
Consumo de Betão/m <sup>2</sup>		0,295	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,176	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,190	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
		23,59	€/m <sup>2</sup>	14,12	€/m <sup>2</sup>	15,20	€/m <sup>2</sup>
Aço de Flexão (Laje + Banda)	Face Superior	9,26	kg/m <sup>2</sup>	9,07	kg/m <sup>2</sup>	7,77	kg/m <sup>2</sup>
		9,26	€/m <sup>2</sup>	9,07	€/m <sup>2</sup>	7,77	€/m <sup>2</sup>
	Face Inferior	5,30	kg/m <sup>2</sup>	4,93	kg/m <sup>2</sup>	3,96	kg/m <sup>2</sup>
		5,30	€/m <sup>2</sup>	4,93	€/m <sup>2</sup>	3,96	€/m <sup>2</sup>
Total	14,56	€/m <sup>2</sup>	13,99	€/m <sup>2</sup>	11,73	€/m <sup>2</sup>	
Estribos	Área de Reforço	(Vigas)	m <sup>2</sup>	568,00	m <sup>2</sup>	566,00	m <sup>2</sup>
	Armadura	0,47	kg/m <sup>2</sup>	1,24	kg/m <sup>2</sup>	0,95	kg/m <sup>2</sup>
		0,47	€/m <sup>2</sup>	1,24	€/m <sup>2</sup>	0,95	€/m <sup>2</sup>
Preço Total/m <sup>2</sup>		53,15	€/m <sup>2</sup>	44,35+Perfis	€/m <sup>2</sup>	42,88+Moldes	€/m <sup>2</sup>



