



Instituto Superior de  
**Engenharia** do Porto

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – CONSTRUÇÕES

**MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE EDIFÍCIOS –  
COMPARAÇÃO ENTRE PRÉ-FABRICAÇÃO E  
CONSTRUÇÃO TRADICIONAL EM BETÃO  
ARMADO**

Rui Emanuel Magalhães Leite

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em  
Engenharia Civil — Ramo de Construções

Orientador: Professor José Carlos de Almeida Gouveia Lello

Outubro de 2015



## ÍNDICE GERAL

|  |       |
|--|-------|
| Resumo.....  | v     |
| Abstract .....   | vii   |
| Agradecimentos .....   | ix    |
| Índice de texto.....   | xi    |
| Índice de Figuras .....  | xvii  |
| Índice de Quadros .....  | xxiii |
| Símbolos .....   | xxv   |
| 1 Introdução.....  | 1     |
| 2 Construção Pré-fabricada .....   | 11    |
| 3 Comparação entre Construção Pré-fabricada e Construção Tradicional ..... | 17    |
| 4 Construção com Elementos Pré-fabricados.....                             | 37    |
| 5 Caso de Estudo.....  | 101   |
| Conclusão .....  | 123   |
| Referências Bibliográficas .....   | 125   |
| Anexo I.....   | 129   |
| Anexo II.....  | 139   |



## RESUMO

Em Portugal, a temática da Construção Pré-fabricada, enquanto método construtivo, ainda não se encontra desenvolvida de forma muito aprofundada. Na sua grande maioria, os trabalhos e estudos efetuados centram-se em aspetos de projeto e dimensionamento de determinados componentes pré-fabricados. Elementos estruturais pré-fabricados são já frequentemente utilizados, por exemplo, em vias de comunicação, pontes, viadutos, passagens inferiores e superiores.

No entanto, no âmbito dos edifícios, esta tecnologia ainda não está totalmente explorada, exceção feita a naves industriais.

A definição de construção pré-fabricada ainda não é consensual e as dúvidas subsistem, tanto por parte da população em geral, como dos próprios intervenientes no setor da construção.

Dadas as suas potencialidades, pretende-se estudar a construção pré-fabricada, no setor dos edifícios, enquanto metodologia construtiva e compará-la com a metodologia de construção tradicional.

Numa primeira fase, o trabalho irá consistir em explorar um conjunto de conceitos, métodos, tecnologias e materiais utilizados em alguns países com maior grau de aplicação destas técnicas.

Posteriormente, será feita uma comparação entre construção pré-fabricada e construção tradicional, no que diz respeito a planeamento, prazos, custos, sustentabilidade, segurança ou qualidade, com base em estudos comparativos já realizados a nível internacional.

Atendendo à informação recolhida, será realizado um trabalho onde são referidos processos, que poderão ajudar a compreender melhor o que é a construção pré-fabricada enquanto método construtivo inovador – quais as suas vantagens, implicações e condicionantes – e avaliar a sua viabilidade enquanto solução construtiva.

**Palavras-Chave:** pré-fabricação, ligações, métodos construtivos, construção tradicional.



## **ABSTRACT**

In Portugal, the topic of prefabricated building as a construction method isn't very developed yet. The huge majority of works and studies focus on project and dimensioning aspects of some prefabricated components. Prefabricated structural elements are frequently used, for example in communication routes, bridges, viaducts, over and under passages.

However, as far as buildings are concerned, this technology isn't completely explored yet, except for industrial premises.

The definition of prefabricated building isn't consensual yet and there are still doubts both from the population in general and the building stakeholders.

Given the potentials of prefabricated building, we intend to study it as building methodology in the building construction industry as well as compare it with the traditional building construction.

In a first phase, the assignment will consist of exploring a range of concepts, methods, technologies and materials used in some countries with a greater degree of application of these techniques.

Afterwards, a comparison will be made between prefabricated building and traditional building as far as planning, deadlines, costs, sustainability, security or quality are concerned, based in comparative studies already made internationally.

With the information gathered, a work will be carried out. It will mention processes that can help understand what prefabricated building as an innovative building method is -its advantages, implications and constraints – and evaluate its viability as a construction solution.

**Key-words:** Prefabrication, connections, building methods, traditional building.



## **AGRADECIMENTOS**

A elaboração deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração, estímulo e empenho de diversas pessoas. Gostaria, por essa razão, de expressar toda a minha gratidão e apreço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta tarefa se tornasse uma realidade.

Para com o professor José Lello, não há agradecimentos que cheguem. As notas dominantes da sua orientação foram a utilidade das suas recomendações, experiência e conhecimento no tema desenvolvido e a cordialidade com que sempre me recebeu.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, estou grato por todas as condições que ofereceu para a obtenção de conhecimento, que sem ele não teria sido possível desenvolver esta dissertação, assim como a todos os colegas de curso que me ajudaram a tornar este documento mais completo.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à minha família, em especial, aos meus pais, pelo apoio incondicional que sempre demonstraram e por terem deito com que tudo isto tudo fosse possível.



# ÍNDICE DE TEXTO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introdução.....  | 1  |
| 1.1   | Contextualização.....  | 1  |
| 1.2   | Enquadramento e Objetivo .....   | 2  |
| 1.2.1 | Enquadramento.....   | 2  |
| 1.2.2 | Objetivo .....   | 3  |
| 1.3   | Estrutura da Dissertação.....  | 3  |
| 1.4   | Industrialização da Construção Civil .....                               | 4  |
| 1.5   | Resumo Histórico da Pré-fabricação .....                                 | 7  |
| 2     | Construção Pré-fabricada .....   | 11 |
| 2.1   | Sistemas de Pré-fabricação.....  | 12 |
| 2.2   | Tipos de Pré-fabricação .....  | 13 |
| 2.2.1 | Pré-fabricação Leve e Pré-fabricação Pesada .....                        | 13 |
| 2.3   | Pré-fabricação no Mercado Nacional e Internacional .....                 | 14 |
| 2.3.1 | Mercado Internacional .....  | 14 |
| 2.3.2 | Mercado Nacional .....   | 15 |
| 3     | Comparação entre Construção Pré-fabricada e Construção Tradicional ..... | 17 |
| 3.1   | Introdução .....   | 17 |
| 3.2   | Planeamento.....   | 18 |
| 3.2.1 | Prazos .....   | 19 |
| 3.2.2 | Mão-de-Obra .....  | 20 |
| 3.2.3 | Equipamentos.....  | 21 |
| 3.2.4 | Transporte .....   | 22 |
| 3.3   | Custo/Economia.....  | 23 |
| 3.4   | Segurança .....  | 24 |

## Índice de texto

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 3.5       | Qualidade .....  | 25 |
| 3.5.1     | Durabilidade .....   | 26 |
| 3.5.2     | Custo do ciclo de vida .....   | 27 |
| 3.5.3     | Desempenho.....  | 30 |
| 3.6       | Sustentabilidade .....   | 30 |
| 3.7       | Gestão dos Riscos.....   | 32 |
| 3.8       | Perceção dos Vários Intervenientes sobre a Pré-fabricação .....  | 33 |
| 3.9       | Sumário .....  | 35 |
| 4         | Construção com Elementos Pré-fabricados .....  | 37 |
| 4.1       | Sistemas Estruturais Pré-fabricados .....  | 37 |
| 4.1.1     | Sistemas Reticulados .....   | 40 |
| 4.1.1.1   | Pilares .....  | 41 |
| 4.1.1.2   | Vigas .....  | 42 |
| 4.1.2     | Sistemas de Pavimentos e Coberturas .....  | 47 |
| 4.1.2.1   | Lajes de Vigotas Pré-esforçadas .....  | 48 |
| 4.1.2.1.1 | Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Lajes de Vigotas Pré-esforçadas de Betão.....                              | 48 |
| 4.1.2.1.2 | Vantagens da Aplicação de Vigotas de Betão Pré-esforçado em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado) .....    | 49 |
| 4.1.2.1.3 | Desvantagens da Aplicação de Vigotas de Betão Pré-esforçado em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado) ..... | 49 |
| 4.1.2.2   | Pré-lajes .....  | 49 |
| 4.1.2.2.1 | Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Pré-lajes .....  | 50 |
| 4.1.2.2.2 | Vantagens da Aplicação de Pré-lajes em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado) .....                         | 50 |
| 4.1.2.2.3 | Desvantagens da Aplicação de Pré-lajes em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado) .....                      | 51 |

## Índice de texto

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 4.1.2.3   | Lajes Alveolares.....  | 51 |
| 4.1.2.3.1 | Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Lajes Alveolares .....   | 51 |
| 4.1.2.3.2 | Vantagens da Aplicação de Lajes Alveolares em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado) .....                                | 52 |
| 4.1.2.3.3 | Desvantagens da Aplicação de Lajes Alveolares em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado) .....                             | 52 |
| 4.1.2.4   | Lajes Duplo T .....  | 52 |
| 4.1.2.4.1 | Vantagens da Aplicação de Lajes Duplo T em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado) .....                                   | 53 |
| 4.1.2.4.2 | Desvantagens da Aplicação de Lajes Duplo T em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado) .....                                | 54 |
| 4.1.2.5   | Lajes Minos.....   | 54 |
| 4.1.2.5.1 | Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Lajes Minos .....  | 55 |
| 4.1.2.5.2 | Vantagens da Aplicação de Lajes Minos em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado).....                                      | 56 |
| 4.1.2.5.3 | Desvantagens da Aplicação de Lajes Minos em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado) .....                                  | 56 |
| 4.1.3     | Sistemas de Paredes Resistentes .....  | 56 |
| 4.1.3.1   | Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Painéis Pré-fabricados de Betão .....  | 58 |
| 4.1.3.2   | Vantagens da Aplicação do Sistema de Paredes Resistentes Pré-fabricados em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado).....    | 58 |
| 4.1.3.3   | Desvantagens da Aplicação do Sistema de Paredes Resistentes Pré-fabricados em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)..... | 60 |
| 4.1.4     | Sistema de Parede de Fachada.....  | 60 |
| 4.1.5     | Sistema de Estruturas Celulares .....  | 61 |
| 4.1.5.1   | Vantagens da Aplicação do Sistema de Estruturas Celulares .....  | 62 |
| 4.1.5.2   | Desvantagens da Aplicação do Sistema de Estruturas Celulares.....  | 62 |

## Índice de texto

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 4.2       | Ligação entre Elementos Estruturais Pré-fabricados..... | 62 |
| 4.2.1     | Tipos de Ligações.....                                  | 63 |
| 4.2.1.1   | Pilar – Fundação.....                                   | 64 |
| 4.2.1.1.1 | Ligação por Encaixe.....                                | 65 |
| 4.2.1.1.2 | Ligação por Armaduras Salientes.....                    | 66 |
| 4.2.1.1.3 | Ligação por Conexão de Varões.....                      | 67 |
| 4.2.1.1.4 | Ligação por Chapas Aparafusadas.....                    | 68 |
| 4.2.1.1.5 | Ligação por Pós-tensão.....                             | 69 |
| 4.2.1.1.6 | Ligação por Rótula.....                                 | 70 |
| 4.2.1.2   | Pilar – Pilar.....                                      | 70 |
| 4.2.1.2.1 | Ligação Fora do nível do Piso.....                      | 70 |
| 4.2.1.2.2 | Ligação ao Nível do Piso.....                           | 75 |
| 4.2.1.3   | Viga – Pilar.....                                       | 76 |
| 4.2.1.3.1 | Ligação Sem Continuidade.....                           | 76 |
| 4.2.1.3.2 | Ligação Com Continuidade.....                           | 78 |
| 4.2.1.4   | Viga – Viga.....  | 82 |
| 4.2.1.4.1 | Ligação entre Vigas Coaxiais.....                       | 82 |
| 4.2.1.4.2 | Ligação entre Vigas Principais e Secundarias.....       | 86 |
| 4.2.1.5   | Laje – Viga.....  | 87 |
| 4.2.1.5.1 | Ligação Laje – Viga de Extremidade.....                 | 87 |
| 4.2.1.5.2 | Ligação Laje – Viga Central.....                        | 89 |
| 4.2.1.6   | Laje – Laje.....  | 92 |
| 4.2.1.6.1 | Entre Lajes com Vigotas.....                            | 93 |
| 4.2.1.6.2 | Entre Lajes Alveolares.....                             | 94 |
| 4.2.1.6.3 | Entre Pré-lajes Maciças.....                            | 95 |
| 4.2.1.6.4 | Entre Lajes Duplo T.....                                | 96 |

## Índice de texto

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| 4.2.1.6.5 | Entre Lajes Minos .....   | 96  |
| 4.2.1.7   | Laje – Parede .....   | 97  |
| 4.2.1.8   | Parede – Fundação.....  | 99  |
| 4.2.1.9   | Parede – Parede .....   | 100 |
| 5         | Caso de Estudo.....   | 101 |
| 5.1.      | Descrição da Estrutura.....   | 101 |
| 5.2.      | Sistema Tradicional.....  | 102 |
| 5.2.1.    | Processo Construtivo.....   | 102 |
| 5.2.2.    | Pré-dimensionamento.....  | 103 |
| 5.3.      | Estrutura Pré-fabricada (réplica da estrutura <i>in situ</i> ).....     | 108 |
| 5.3.1.    | Processo Construtivo.....   | 108 |
| 5.3.2.    | Pré-dimensionamento.....  | 109 |
| 5.4.      | Estrutura Realizada com Elementos Pré-fabricados Montados em Obra ..... | 110 |
| 5.4.1.    | Processo Construtivo.....   | 110 |
| 5.4.2.    | Pré-dimensionamento.....  | 110 |
| 5.5.      | Armaduras .....   | 113 |
| 5.6.      | Análise de custos e prazos .....  | 119 |
| 5.6.1.    | Medições .....  | 119 |
| 5.6.2.    | Duração das tarefas.....  | 120 |
| 5.6.3.    | Custos .....  | 121 |
|           | Conclusão .....   | 123 |
|           | Referências Bibliográficas .....  | 125 |
|           | Anexos .....  | 129 |
|           | Anexo I.....  | 129 |
|           | Anexo II.....   | 139 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Parâmetros da industrialização.....   | 4  |
| Figura 2 - Cassino de Biarritz [3].....  | 8  |
| Figura 3 - Construção pré-fabricada na Polônia no período pós-guerra [5] .....                                     | 9  |
| Figura 4 - Edifício “Ronan Point (explosão de gás no 18º andar gerou um colapso progressivo) [7] ...               | 10 |
| Figura 5 - Centro comercial Bourbon - Porto Alegre [5] .....   | 10 |
| Figura 6 - Sistemas de Pré-fabricação .....  | 12 |
| Figura 7 - Peso relativo dos vários tipos de obras em Portugal [14].....   | 15 |
| Figura 8 - Evolução da utilização de pré-fabricação em Portugal - Obras Públicas [8] .....                         | 16 |
| Figura 9 - Comparação do período de trabalho em estaleiro, em percentagem .....                                    | 19 |
| Figura 10 - Comparação da quantidade de mão-de-obra para a mesma atividade, em percentagem                         | 20 |
| Figura 11 - Equipamentos de elevação [8] .....   | 21 |
| Figura 12 - Transporte de pilares com 35m de altura [20] .....   | 22 |
| Figura 13 - Detalhe do posicionamento dos elementos no meio de transporte [20].....                                | 22 |
| Figura 14 - Transporte de uma viga caixão [21] .....   | 23 |
| Figura 15 - Requisitos de qualidade dos edifícios [17].....  | 26 |
| Figura 16 - Ciclo de vida do elemento .....  | 27 |
| Figura 17 - Ciclo de vida da estrutura .....   | 29 |
| Figura 18- Análise SWOT da Construção Pré-fabricada .....  | 35 |
| Figura 19 - Estruturas pré-fabricadas mais comuns.....   | 38 |
| Figura 20 - Estrutura reticulada contraventada por um núcleo resistente [31] .....                                 | 40 |
| Figura 21 - Edifício da unidade industrial: estrutura reticulada de piso único [29].....                           | 40 |
| Figura 22 - Edifício de escritórios situado em Bruxelas, Bélgica: estruturas reticuladas de 36 pisos [29]<br>..... | 41 |
| Figura 23 - Algumas soluções possíveis de pilares pré-fabricados .....   | 42 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 24 - Vigas pré-fabricadas em edifícios.....   | 43 |
| Figura 25 - Vigas principais de cobertura: Vigas Delta [25].....   | 44 |
| Figura 26 - Dimensões comuns em vigas de cobertura de secção transversal “I” [adaptada de 30] ...  | 44 |
| Figura 27 - Madre pré-fabricada pré-esforçada .....  | 45 |
| Figura 28 - Exemplos de vigas de secção constante.....   | 45 |
| Figura 29 - Exemplos de vigas com abas laterais.....   | 46 |
| Figura 30 - Exemplo de viga caleira pré-fabricada .....  | 46 |
| Figura 31 - Edifício de com grandes vãos [27].....   | 47 |
| Figura 32 - Lajes Pré-fabricadas.....  | 47 |
| Figura 33 - Sequência de aplicação de lajes de vigotas pré-esforçadas (adaptado de [33]; [34]) .....                                       | 48 |
| Figura 34 - Sequência de aplicação de pré-lajes (adaptado de [35]; [36]).....  | 50 |
| Figura 35 - Sequência de aplicação de lajes alveolares (adaptado de [37]).....   | 51 |
| Figura 36 - Disposição de armaduras das lajes duplo T.....   | 53 |
| Figura 37 - Constituição de uma laje minos .....   | 55 |
| Figura 38 - Sequência de aplicação de lajes minos (adaptado de [51]; [52]).....  | 55 |
| Figura 39 - Construção sequencial de 2000 moradias na área de Al Falah, Abu Dhabi, com recurso a sistemas de paredes resistentes [40]..... | 57 |
| Figura 40 - Moradia executada em sistemas de paredes resistentes [41].....   | 57 |
| Figura 41 - Sequência de aplicação de painéis pré-fabricados (adaptado de [42]; [43]) .....  | 58 |
| Figura 42 - Painéis portantes [27].....  | 60 |
| Figura 43 - Princípio de fachadas não portante e autoportante [27].....  | 61 |
| Figura 44 - Compartimentos pré-fabricados em fábrica [22].....   | 61 |
| Figura 45 - Ligação Pilar – Fundação por encaixe [46] .....  | 65 |
| Figura 46 - Ligação Pilar – Fundação com armaduras salientes no Pilar [46] .....   | 66 |
| Figura 47 - Ligação Pilar – Fundação com armaduras salientes na Fundação [46] .....  | 66 |
| Figura 48 - Ligação Pilar – Fundação por conexão de varões [46] .....  | 67 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 49 - Tipos de ligadores entre varões [46].....                                      | 68 |
| Figura 50 - Ligação Pilar – Fundação por chapa aparafusada [46].....                       | 68 |
| Figura 51 - Ligação Pilar - Fundação por parafusos [46] .....                              | 69 |
| Figura 52 - Ligação Pilar – Fundação por pós-tensão [46] .....                             | 69 |
| Figura 53 - Ligação Pilar – Fundação por rótula.....                                       | 70 |
| Figura 54 - Ligação Pilar – Pilar por emendas [49].....                                    | 71 |
| Figura 55 - Ligação Pilar – Pilar por soldadura de varões de aço sobrepostos [46].....     | 71 |
| Figura 56 - Ligação Pilar – Pilar por chapas soldadas [46] .....                           | 72 |
| Figura 57 - Ligação Pilar – Pilar por soldadura de chapas e varões [46] .....              | 72 |
| Figura 58 - Ligação Pilar – Pilar por ligadores de varões de aço sobrepostos [46].....     | 73 |
| Figura 59 - Ligação Pilar – Pilar por parafusos [46].....                                  | 73 |
| Figura 60 - Ligação Pilar – Pilar por pós-tensão [46].....                                 | 74 |
| Figura 61 - Ligação Pilar – Pilar por rótula .....   | 74 |
| Figura 62 - Ligação Pilar – Pilar ao nível do piso, com interferência de viga [2] .....    | 75 |
| Figura 63 - Tipos de ligações Viga – Pilar [28] .....                                      | 76 |
| Figura 64 - Exemplo de consola curta de betão [49].....                                    | 77 |
| Figura 65 - Ligação com placa de apoio (neoprene) .....                                    | 77 |
| Figura 66 - Exemplos de acessórios de ligação [49] .....                                   | 78 |
| Figura 67 - Ligação com betonagem em obra do nó Viga – Pilar.....                          | 79 |
| Figura 68 - Ligação Viga - Pilar com armadura de continuidade.....                         | 79 |
| Figura 69 - Ligação Viga – Pilar por chapas soldadas .....                                 | 80 |
| Figura 70 - Ligação Viga – Pilar com recurso a ligação aparafusada (adaptado de [50])..... | 80 |
| Figura 71 - Ligação Viga – Pilar por pós-esforço .....                                     | 81 |
| Figura 72 - Ligação Híbrida Viga – Pilar .....   | 81 |
| Figura 73 - Ligação Viga – Viga por juntas em dente e varões soldados .....                | 82 |
| Figura 74 - Ligação Viga – Viga por juntas em dente e barras .....                         | 83 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 75 - Ligação Viga – Viga por betonagem <i>in situ</i> .....   | 83 |
| Figura 76 - Ligação Viga-Viga por chapas metálicas aparafusadas com betonagem <i>in situ</i> .....           | 84 |
| Figura 77 - Ligação Viga – Viga por pré-esforço .....  | 84 |
| Figura 78 - Ligação Viga – Viga por chapas metálicas verticais .....   | 85 |
| Figura 79 - Ligação Viga – Viga por juntas em dente.....   | 85 |
| Figura 80 - Exemplos de ligação entre vigas principais e secundárias sem continuidade [adaptado de 46] ..... | 86 |
| Figura 81 - Exemplos de ligação entre vigas principais e secundárias com continuidade [adaptado de 46] ..... | 87 |
| Figura 82 - Ligação Laje – Viga de extremidade com amarração .....   | 88 |
| Figura 83 - Ligação Laje – Viga de extremidade com chapas metálicas aparafusadas.....                        | 88 |
| Figura 84 - Ligação Laje – Viga de extremidade com chapas soldadas .....                                     | 89 |
| Figura 85 - Ligação Laje – Viga de extremidade simplesmente apoiada.....                                     | 89 |
| Figura 86 - Ligação Laje – Viga central com amarração com betonagem <i>in situ</i> .....                     | 90 |
| Figura 87 - - Ligação Laje – Viga central com amarração sem betonagem <i>in situ</i> .....                   | 90 |
| Figura 88 - Ligação Laje – Viga central com chapas metálicas aparafusadas.....                               | 91 |
| Figura 89 - Ligação Laje – Viga central com chapas soldadas .....  | 91 |
| Figura 90 - Ligação Laje – Viga central com armadura ordinária .....   | 92 |
| Figura 91 - Tipos de vigotas pré-fabricadas.....   | 93 |
| Figura 92 - Ligação entre lajes alveolares.....  | 94 |
| Figura 93 - Laje alveolar com armadura lateral.....  | 94 |
| Figura 94 - Ligação entre pré-lajes maciças através de chapas soldadas.....                                  | 95 |
| Figura 95 - Ligação entre pré-lajes maciças através da colocação de armaduras transversais [45].....         | 95 |
| Figura 96 - Ligação entre lajes duplo T .....  | 96 |
| Figura 97 - Ligação entre lajes minos .....  | 96 |
| Figura 98 - Ligação Laje – Parede com betonagem <i>in situ</i> do nó .....                                   | 97 |

## Índice de Figuras

|   |     |
|---|-----|
| Figura 99 - Ligação Laje - Parede sem betonagem <i>in situ</i> do nó..... | 97  |
| Figura 100 - Ligação Laje – Parede a meia altura da laje .....            | 98  |
| Figura 101 - Tipos de ligações Parede – Fundação .....                    | 99  |
| Figura 102 - Ligação indentada entre painéis de parede [45].....          | 100 |
| Figura 103 - Área de implantação do edifício .....                        | 102 |
| Figura 104 - Distribuição das lajes.....                                  | 103 |
| Figura 105 - Planta das escadas .....                                     | 105 |
| Figura 106 - Corte das escadas (corte A-A) .....                          | 105 |
| Figura 107 - Disposição e vãos das vigas.....                             | 106 |
| Figura 108 - Local de implantação dos pilares .....                       | 107 |
| Figura 109 - Dimensões da laje alveolar [19] .....                        | 111 |
| Figura 110 - Tabela de dimensionamento da laje alveolar [19].....         | 111 |
| Figura 111 - Viga com consola curta .....                                 | 118 |



## ÍNDICE DE QUADROS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Primeiros acontecimentos relativos a utilização de elementos pré-fabricados .....        | 8   |
| Tabela 2 - Tipo de transporte e limites correspondentes [8].....                                    | 22  |
| Tabela 3 - Economia gerada pela utilização de materiais pré-fabricados .....                        | 23  |
| Tabela 4 - Fases do ciclo de vida do produto .....  | 28  |
| Tabela 5 - Fases do ciclo de vida da estrutura .....  | 29  |
| Tabela 6 - Desempenho ambiental qualitativo da pré-fabricação de acordo com alguns indicadores      | 31  |
| Tabela 7 - Principais benefícios e restrições da utilização da construção pré-fabricada.....        | 34  |
| Tabela 8 - Vantagens dos sistemas estruturais pré-fabricados.....                                   | 39  |
| Tabela 9 - Dimensões e características das lajes de pavimentos pré-fabricados (adaptada de [39]) .. | 54  |
| Tabela 10 - Classificação das ligações .....  | 64  |
| Tabela 11 - Pré-dimensionamento das vigas .....   | 106 |
| Tabela 12 - Pré-dimensionamento dos pilares .....   | 108 |
| Tabela 13 - Pré-dimensionamento das vigas (2º caso) .....   | 113 |
| Tabela 14 - Armaduras das lajes do caso 1 e 2 .....   | 115 |
| Tabela 15 - Armaduras longitudinais das vigas do caso 1 e 2 .....                                   | 115 |
| Tabela 16 - Armaduras transversais das vigas do caso 1 e 2 .....                                    | 115 |
| Tabela 17 - Esforços exercidos nos pilares do caso 1 e 2.....                                       | 116 |
| Tabela 18 - Armaduras dos pilares do caso 1 e 2.....  | 117 |
| Tabela 19 -Armaduras das lajes alveolares do caso 3.....  | 117 |
| Tabela 20 - Armadura de distribuição das lajes alveolares.....                                      | 117 |
| Tabela 21 - Armaduras longitudinais das vigas do caso 3.....  | 118 |
| Tabela 22 - Armaduras transversais das vigas do caso 3 .....  | 118 |
| Tabela 23 - Esforços exercidos nos pilares do caso 3.....   | 119 |
| Tabela 24 - Armaduras dos pilares do caso 3.....  | 119 |

## ÍNDICE DE QUADROS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 25 – Quantidade necessária de material .....              | 120 |
| Tabela 26 - Prazos de execução.....                              | 120 |
| Tabela 27 - Custos associados a material .....                   | 121 |
| Tabela 28 - Custo total de cada metodologia.....                 | 122 |
| Tabela 29 - Medição de cofragem do caso 1.....                   | 130 |
| Tabela 30 - Medição de betão dos casos 1 e 2.....                | 130 |
| Tabela 31 - Medição de armadura das lajes dos casos 1 e 2.....   | 131 |
| Tabela 32 - Medição de armadura das vigas dos casos 1 e 2.....   | 132 |
| Tabela 33 - Medição de armadura dos pilares dos casos 1 e 2..... | 133 |
| Tabela 34 - Medição de betão do caso 3.....                      | 134 |
| Tabela 35 - Medição de armadura das lajes do caso 3.....         | 135 |
| Tabela 36 - Medição de armadura das vigas do caso 3.....         | 136 |
| Tabela 37 - Medição de armadura dos pilares do caso 3.....       | 137 |

## SÍMBOLOS

$G_k$  – Valor característico de ações permanentes

$Q_k$  – Valor característico de ações variáveis

$P_{ed}$  – Valor de cálculo do esforço atuante

$V_{ed}$  – Valor de cálculo do esforço transversal atuante

$M_{ed}$  – Valor de cálculo do momento fletor atuante

$A_c$  – Área da secção transversal de betão

$N_{ed}$  – Valor de cálculo do esforço normal atuante

$N_{rd}$  – Valor de cálculo do esforço normal resistente

$f_{cd}$  – Valor de cálculo da tensão de cedência do betão à compressão

$f_{syd}$  – Valor de cálculo da tensão de cedência do aço para armaduras de betão armado

$d$  – Altura útil de uma secção transversal

$b$  – Largura total de uma secção transversal

$h$  – Altura

$l$  – Comprimento

$A_s$  – Área da secção de uma armadura para betão armado

$A_{s,min}$  – Área da secção mínima de armaduras

$A_{s,max}$  – Área da secção máxima de armaduras

EC – Eurocódigo

RSA – Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A pré-fabricação é um processo industrial que tem tido grande desenvolvimento na Europa, apesar de em Portugal ainda ter uma dimensão moderada.

Apresenta-se como uma solução com fortes argumentos no que toca a automação, mecanização, otimização e rentabilização de processos da construção, carências de mão-de-obra em comparação com a construção tradicional, prazos de execução e impactos ambientais, controlo de qualidade e consumos energéticos.

Podem ser obtidos elementos pré-fabricados usando como matéria-prima três tipos principais de materiais: o betão, o metal e a madeira.

Na pré-fabricação em betão recorre-se ao betão e ao aço em varão ou cordão, quando há pré-esforço, sendo que na construção metálica pré-fabricada, os materiais de eleição são alumínio e o aço.

Todos os aspetos daqui em diante abordado prendem-se com a pré-fabricação em betão.

O desenvolvimento da indústria da pré-fabricação é indissociável do desenvolvimento do betão armado.

Hoje a pré-fabricação é vista como uma alternativa da construção tradicional, em que parte dos elementos são pré-fabricados em indústrias especializadas, sendo depois colocados em obra de modo a se assemelharem o mais possível às estruturas tradicionais. [1]

A indústria da construção requer uma vasta gama de escolhas na seleção dos componentes de edifícios. Na próxima década prevê-se que a procura crescente destes componentes ultrapasse largamente a oferta, pelo que, pelas suas características, a indústria da pré-fabricação, estrategicamente colocada de modo a dar resposta a este aumento de procura, deverá crescer drasticamente.

A pré-fabricação não deve ser vista apenas como uma variação da construção tradicional, com as suas técnicas de betonagem *in situ*. Todos os sistemas de construção têm as suas características que

de uma forma ou de outra influenciam o aspeto final do edifício, a altura do mesmo, a estabilidade, etc.

Em suma, a pré-fabricação pode desempenhar um papel fundamental no processo evolutivo do setor da construção. Com fortes potencialidades ao nível da sustentabilidade, produtividade e gestão de processos, pode ser um dos motores para impulsionar o setor para uma tendência de crescimento e afirmação enquanto indústria produtiva, racionalizada, sustentável e competitiva, ultrapassando os desafios e exigências atuais.

## **1.2 ENQUADRAMENTO E OBJETIVO**

### **1.2.1 Enquadramento**

O mercado da pré-fabricação tem evoluído ao longo dos tempos, quer em pequenas construções como em grandes. Essa evolução deve-se tanto ao desenvolvimento e aperfeiçoamento dos materiais de construção, como à industrialização e utilização de novas tecnologias na construção.

Devido às suas grandes vantagens, e não descurando os seus inconvenientes e devido ao constante desenvolvimento, a pré-fabricação aumentou o seu campo de aplicação em diversos tipos de estruturas tais como em estruturas de edifícios, de obras de arte, hidráulicas e em vias de comunicação.

As soluções pré-fabricadas, quando comparadas com soluções betonadas *in situ*, apresentam diversas vantagens, entre as quais se distinguem: a possibilidade da redução global dos custos, devido ao menor número de operações em obra, a menores necessidades de cofragem e escoramentos no processo construtivo, ao aumento de segurança durante a construção e ao menor impacto em termos ambientais.

Também devido à necessidade de aumentar a velocidade da produção em fábrica são utilizados betões com características mecânicas e de durabilidade superiores aos utilizados nas construções tradicionais o que permite uma maior qualidade e longevidade das construções pré-fabricadas, quando comparadas com outras soluções.

Grande parte destas vantagens depende da repetição e boa organização dos trabalhos o que nem sempre é de fácil implementação.

### 1.2.2 Objetivo

Com base nas práticas utilizadas e em estudos efetuados noutros países, pretende-se fazer uma recolha de diversos fatores como sendo técnicas, dados e conceitos relacionados com a construção pré-fabricada e compará-los com a construção tradicional.

Com esses elementos pretende-se analisar a viabilidade dessas técnicas construtivas, que posteriormente terão a finalidade de auxiliar donos de obra, projetistas e empreiteiros e, desta forma, contribuir para a evolução do mercado da construção pré-fabricada em Portugal.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho será composto por uma série de capítulos com o objetivo de dar conhecimento sobre a temática da pré-fabricação na área da construção, como técnica inovadora na construção de edifícios comparando-a sempre com a referência que é a construção tradicional.

No primeiro capítulo serão expostas as motivações que levam à realização desse trabalho, a partir de um enquadramento e dos objetivos do tema, fazendo referência à industrialização da construção civil e enquadrando historicamente a pré-fabricação de edifícios.

O segundo capítulo corresponde a uma introdução aos principais conceitos, onde é feita uma apresentação de definições e diferentes abordagens ligadas à pré-fabricação. É também feita referência à pré-fabricação no mercado nacional e internacional.

No terceiro capítulo é feita uma recolha de alguns estudos realizados internacionalmente, onde é explicada a diferença entre construção pré-fabricada e construção tradicional no que diz respeito, por exemplo, a planeamento, custos, qualidade ou sustentabilidade, de modo a perceber-se efetivamente quais são as vantagens e condicionantes de ambas as técnicas.

No quarto capítulo serão referidos os principais sistemas estruturais em edifícios pré-fabricados, bem como os elementos estruturais pré-fabricados mais utilizados, tendo em conta as suas exigências funcionais. Neste capítulo serão referidos alguns tipos de ligações existentes mais importantes.

No último capítulo (quinto) serão apresentadas as principais conclusões relativas ao trabalho desenvolvido e feitas considerações acerca de desenvolvimentos que se consideram necessários com o objetivo de um melhor conhecimento e divulgação das soluções pré-fabricadas. Neste capítulo será

feita a descrição de um caso prático onde serão referidas as fases de construção de um edifício habitacional de 4 andares, construído por três metodologias distintas, sendo elas, de forma tradicional, replicando o mesmo edifício mas recorrendo a pré-fabricação e um último caso com elementos pré-fabricados montados em obra. A elaboração destes três tipos de métodos tem como objetivo identificar a metodologia construtiva mais adequada, e desta forma ajudar no processo de decisão. A encerrar a presente dissertação, apresenta-se uma síntese do trabalho desenvolvido e apontam-se algumas perspetivas para futuros desenvolvimentos

### 1.4 INDUSTRIALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Com a necessidade cada vez mais iminente de aliar o desenvolvimento de novas tecnologias, a necessidade de otimizar a produção com o aumento da qualidade e diminuir o tempo de execução, apareceram novas técnicas e sistemas construtivos nos quais se pode encaixar a pré-fabricação.

Com o desenvolvimento da pré-fabricação houve a necessidade de aproveitar as novas tecnologias para a sua aplicação, sendo assim a industrialização do sector da construção civil foi o caminho a ser seguido.

A pré-fabricação é uma das manifestações da industrialização. Pode-se dizer que a industrialização é o resultado da interação das tecnologias materializadas, quer no processo de produção, quer no próprio produto.

Alguns autores, caso de Gérard Blachere, diretor do CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - Paris), define a industrialização como sendo o somatório de racionalizar, mecanizar e automatizar.

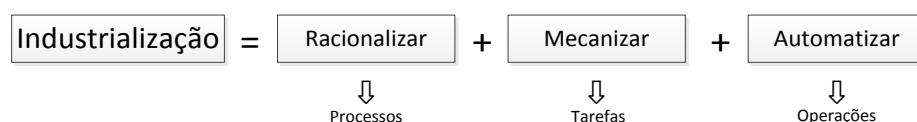


Figura 1 - Parâmetros da industrialização

## Introdução

Outra definição, dada por Sabbatini (1989), é: "Industrialização da construção é um processo evolutivo que, através de ações organizacionais e da implementação de inovações tecnológicas, métodos de trabalho e técnicas de planeamento e controle, tem como objetivo incrementar a produtividade e o nível de produção de modo a aprimorar o desempenho da atividade construtiva". [2]

Resumidamente pode dizer-se que a industrialização está associada à utilização de novas tecnologias, substituindo a habilidade do homem pela máquina, com o intuito de aumentar a qualidade e a produtividade.

Logo, é correto dizer que a industrialização começou com a evolução das máquinas e ferramentas para a produção de bens e serviços. Essa evolução não foi feita de uma forma repentina, mas sim de forma gradual. Essa evolução pode ser dividida em três fases: [2]

1. A primeira fase, referente aos primórdios da era industrial, assinala o nascimento de máquinas genéricas polivalentes, iniciando-se por volta dos anos 60 do século XVIII, conhecida como a primeira revolução industrial.
2. A segunda fase assinala a transformação dos mecanismos com o intuito de ajustá-los à execução de determinadas tarefas. Nessa etapa o homem deixa de repetir ciclos iguais relegando essa tarefa para as máquinas (segunda revolução industrial iniciada por volta dos anos 60 do século XIX).
3. A última fase inicia-se em torno dos anos 50 do século XX, após a segunda guerra mundial e é caracterizada pelo automatismo.

## Capítulo 1

Ao longo do tempo a industrialização desenvolveu-se tornando-se num processo organizacional caracterizado principalmente por:

- ✓ Padronização de elementos construtivos;
- ✓ Contínuo fluxo de produção;
- ✓ Mecanização, sempre que possível, dos trabalhos manuais;
- ✓ Aumento do nível e da qualidade organizacional dos trabalhos.

A industrialização da construção civil trás alguns benefícios tais como:

- ✓ Aumento da produção: está a tornar-se cada vez mais numa necessidade (em países com crescimento populacional exponencial), e a melhor forma de aumentar a produção é utilizar novas tecnologias, pois estas garantem uma produção eficiente;
- ✓ Aumento da qualidade: conseguida com a implementação e controle de qualidade aos materiais utilizados, podendo ser feito na própria fábrica;
- ✓ Diminuição do tempo de execução: conseguida por meio de uma boa programação das atividades e uma correta e rigorosa aplicação desta programação aos recursos de produção.

Mas para além dos benefícios, a industrialização tem pontos menos positivos. Os principais constrangimentos, são a necessidade de dispor de grandes capitais para investir em equipamentos, recursos humanos e pesquisas.

Com base na informação referida anteriormente, pode-se constatar que a industrialização tem vantagens e condicionantes. No entanto para que seja possível a industrialização são necessárias algumas condições, como as seguintes: repetição, divisibilidade, padronização e precisão, continuidade, mecanização, parcelamento do processo de trabalho, permutabilidade, controle e transporte.

## Introdução

Os materiais industrializados apresentam características próprias que podem diferenciá-los dos outros. De entre as principais características destacam-se as seguintes:

- ✓ Facilidade de utilização por meios mecânicos;
- ✓ Capacidade de desempenhar funções estruturais;
- ✓ Desempenho de funções isolantes e de resistência ao fogo;
- ✓ Resistência mecânica adequada;
- ✓ Boa durabilidade.

Os materiais pré-fabricados, principalmente os elementos estruturais como as vigas, pilares, lajes, sapatas e painéis pré-fabricados de fachadas, possuem as características atrás referidas, uma vez que foram sendo adquiridas e melhoradas ao longo do tempo.

### 1.5 RESUMO HISTÓRICO DA PRÉ-FABRICAÇÃO

Antes de fazer referência à evolução histórica da construção pré-fabricada, é importante definir o que é a pré-fabricação. Segundo alguns autores a pré-fabricação pode ser definida como “fabricação de um certo elemento antes do seu posicionamento final na obra”. Ou seja, fabricação e posterior transporte de um elemento da fábrica para a obra onde irá ser aplicado.

Uma outra definição, partilhada por outros autores é: “pré-fabricação é um método industrial de construção em que os elementos fabricados, em grandes séries, por métodos de produção em massa (instalação industrial), são montados na obra, mediante equipamentos e dispositivos de elevação”. [2]

Tanto a primeira como a segunda definição têm em comum o facto de que na pré-fabricação os elementos são produzidos num local e posteriormente transportados para o seu lugar definitivo em obra. A segunda definição já mostra a importância da industrialização no processo da pré-fabricação, focalizando-se na produção em série e nos dispositivos de montagem dos materiais produzidos.

A pré-fabricação surgiu com o aparecimento do betão armado, só que em pequenas dimensões e em proporções menores às atingidas com a industrialização do mesmo.

## Capítulo 1

O grande incremento na utilização de betão armado nas construções ocorreu no período entre ao final do século XIX e início do século XX. Na mesma época, surgiram também as primeiras aplicações de elementos fabricados fora do seu local final de utilização na construção civil. Cita-se a construção do Cassino de Biarritz, em França, em 1891, (Fig. 2) como a primeira construção a utilizar elementos pré-fabricados, no caso, as vigas.



Figura 2 - Cassino de Biarritz [3]

Na tabela 1, estão indicados alguns dos principais acontecimentos históricos relacionados com o desenvolvimento de elementos pré-fabricados. [4]

Tabela 1 - Primeiros acontecimentos relativos a utilização de elementos pré-fabricados

| Ano  | Acontecimento  |
|------|--|
| 1895 | Primeira construção de estrutura porticada com betão pré-fabricado - Construção de Weavne's Mill, em Inglaterra.   |
| 1900 | Aparecimento dos primeiros elementos de grande dimensão para coberturas (elementos com dimensões de aproximadamente 1,20m de altura, 5,10m de largura e 0,05m de espessura) - Estados Unidos da América. |
| 1904 | Arquiteto inglês John Brodie desenvolve o 1º sistema de painéis pré-fabricados – Inglaterra.   |
| 1905 | Execução de elementos de pisos para um edifício de quatro andares – Estados Unidos da América.   |
| 1906 | Início da execução daqueles que devem ser considerados os primeiros elementos pré-fabricados – vigas treliça "Visintini" e estacas de betão armado, na Europa  |
| 1907 | Construção de um edifício industrial em que todos os elementos foram pré-fabricados executados no estaleiro de obras – Estados Unidos da América.  |
| 1907 | Execução das primeiras aplicações do processo "tilt up", no qual as paredes são fabricadas e depois erguidas para a posição vertical – Estados Unidos da América.  |

## Introdução

Desde o final de 1910 até pouco depois do final da segunda guerra mundial (1950), o desenvolvimento da pré-fabricação acompanhou o desenvolvimento do betão armado.

Dessa forma, vários autores apontam o período pós guerra como o início da utilização de pré-fabricados. Nesse período foi necessário construir em grande escala, sobre tudo na Europa, devido a devastação provocada pela guerra, sendo a pré-fabricação uma forma eficiente de dar resposta às necessidades exigidas.



Figura 3 - Construção pré-fabricada na Polónia no período pós-guerra [5]

O período compreendido entre 1950 e 1970 ficou caracterizado pela necessidade de serem construídos diversos edifícios, tanto habitacionais como escolares, hospitalares e industriais e pontes devido à devastação provocada pela segunda guerra mundial.

Utilizando uma filosofia baseada nos sistemas fechados, as construções ocorridas no período de pós-guerra na Europa na área de habitação criaram um estigma associando a construção pré-fabricada, que durante muitos anos esteve associada à uniformidade, monotonia e rigidez na arquitetura, com flexibilidade "zero". [6]

Já o período compreendido entre 1970 e 1980 ficou marcado pela rejeição social para com os edifícios pré-fabricados, como consequência de acidentes resultantes da aplicação dos mesmos (acidente no Edifício "Ronan Point" em Inglaterra, que ruiu após explosão de uma botija de gás). Este contexto deu origem ao declínio dos sistemas pré-fabricados de ciclo fechado de produção. [6]

## Capítulo 1



Figura 4 - Edifício “Ronan Point (explosão de gás no 18º andar gerou um colapso progressivo) [7]

Após 1980, foi a fase que ficou marcada pela demolição de grandes conjuntos habitacionais e pela consolidação da construção em ciclo aberto (fabricação de elementos para várias empresas). Esse período ficou caracterizado pela padronização e consolidação de componentes pré-fabricados. [6]

No início dos anos 90 surgiu na europa a “segunda geração tecnológica” no campo da industrialização da construção, que ficou caracterizada pela flexibilidade de processos de produção, de forma a atender à encomenda de elementos especiais (elementos produzidos tendo em conta as necessidades arquitetónicas do empreendimento), como é o caso do centro comercial Bourbon em Porto Alegre (Fig. 5). [5]



Figura 5 - Centro comercial Bourbon - Porto Alegre [5]

## 2 CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA

Este capítulo tem como objetivo ajudar a definir e clarificar o conceito de construção pré-fabricada, referindo quais as conceções e definições que são hoje adotadas pelas principais entidades de referência neste tema, descrevendo a pré-fabricação no mercado nacional e internacional.

Como referido anteriormente, a pré-fabricação é uma ferramenta extremamente eficiente para proporcionar um incremento aos níveis de industrialização dos processos de produção, se adotada dentro de uma visão sistemática da construção de um edifício, em que a racionalização seja parte fundamental desse processo.

A pré-fabricação é então um método construtivo alternativo ao tradicional. Isto é, uma obra construída com recurso a elementos pré-fabricados não tem de ser visualmente diferente, estruturalmente melhor ou pior, do que outra construída pelo método tradicional. Apenas de salientar neste ponto que, quando se aborda neste documento o termo “construção tradicional”, este é referente aos métodos de construção mais convencionais e comuns em Portugal, de construção *in situ* da quase totalidade de uma dada obra.

A grande diferença entre ambas as técnicas reside essencialmente no faseamento construtivo, que, no caso da construção pré-fabricada, consiste basicamente nas seguintes etapas: [8]

- ✓ Divisão da estrutura e sistemas, subsistemas e elementos de menor dimensão;
- ✓ Fabrico dos elementos num local diferente do definitivo onde vão estar em serviço;
- ✓ Transporte e montagem no local do empreendimento;
- ✓ Ligação entre os vários componentes, garantindo um comportamento estrutural e de conforto, eficaz e de acordo com a regulamentação aplicável.

A pré-fabricação pode ser aplicada em diversas obras, desde passagens superiores, inferiores, até aos edifícios. Em cada uma das áreas, o conceito e o faseamento construtivo devem ser pensados e planeados de forma diferente, tendo em conta as particularidades de cada obra. Neste documento, apenas será abordado de forma mais aprofundada o conceito de construção pré-fabricada aplicado à temática dos edifícios.

## 2.1 SISTEMAS DE PRÉ-FABRICAÇÃO

O sistema de pré-fabricação é um sistema de construção de um edifício que inclui o planeamento e descrição de todos os processos e operações a efetuar, tanto em fábrica como no local da obra. Estamos perante um sistema de pré-fabricação, quando o índice de pré-fabricação de uma determinada obra é elevado e, portanto, é realizado em obra apenas um número reduzido de operações. [9]

Os principais conceitos associados aos sistemas de pré-fabricação são os de pré-fabricação total, pré-fabricação parcial, sistema aberto e fechado.

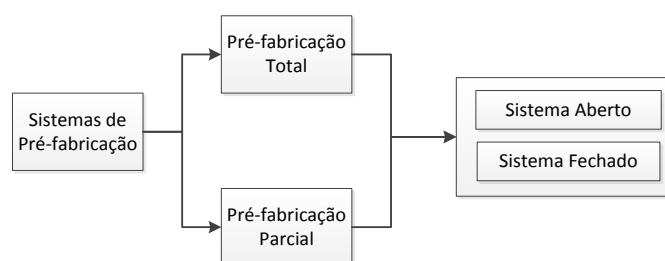


Figura 6 - Sistemas de Pré-fabricação

Estamos perante um sistema aberto quando o fabricante admite a incorporação de materiais de construção e componentes produzidos por outros fabricantes e sem que o sistema defina exaustivamente as diversas soluções de montagem possíveis e os processos de construção adotar em cada caso, ou seja, as soluções e processos construtivos não estão, à partida, totalmente definidos.

Por outro lado, trata-se de um sistema fechado quando os seus constituintes (materiais de construção e componentes) e os processos construtivos estão previamente definidos pelo fabricante, o que implica, à partida, que não possam ser incluídos outros fabricantes no processo. [9]

É também importante associar a um sistema de pré-fabricação o seu grau de pré-fabricação.

Quando o grau de pré-fabricação do edifício é bastante elevado, trata-se de um sistema de pré-fabricação total, embora na prática, a pré-fabricação de elementos nunca atinja os 100%.

Estamos perante um sistema de pré-fabricação parcial quando se pretende fazer referência a determinados elementos de construção que têm um elevado índice de industrialização.

## **2.2 TIPOS DE PRÉ-FABRICAÇÃO**

Do ponto de vista técnico, o termo pré-fabricação é utilizado para designar um conjunto de técnicas utilizadas na construção que têm como princípio a produção de elementos construtivos, estruturais ou não, fora do seu local de implantação definitivo, sendo posteriormente montados e ligados em obra, entre si ou a uma estrutura já existente. [9]

Consoante o peso ou dimensão das peças e elementos, pode dividir-se a pré-fabricação em leve, pesada e ligeira.

### **2.2.1 Pré-fabricação Leve e Pré-fabricação Pesada**

É corrente dividir-se a pré-fabricação em leve e pesada. A principal distinção estes dois tipos de pré-fabricação decorre do peso dos componentes pré-fabricados.

A pré-fabricação leve, está normalmente associada a soluções à base de materiais de pequeno peso, normalmente não-estruturais, incluindo fachadas, fachadas de vidro, elementos de cofragem perdidas, paredes divisórias ligeiras e tetos falsos, perfis metálicos, entre outros, que recorrem usualmente no local apenas a operações de montagem e / ou ao recurso mínimo a métodos de ligação por argamassas. [10]

A pré-fabricação pesada, refere-se à produção de elementos de construção pré-fabricados de betão armado e pré-esforçado. Esta solução abrange elementos estruturais, tais como escadas, lajes, pilares e vigas, e fica pré-acabada logo nas instalações fabris antes de chegar ao local de instalação. [10]

Alguns autores, como por exemplo Paz Branco, falam de pré-fabricação ligeira como sendo a produção de componentes de pequena dimensão para edifícios de melhor qualidade e preço como resultado da fabricação em série de componentes fora do seu local de utilização e posteriormente montados no local final.

Como exemplo de pré-fabricação ligeira temos os lanços de escadas, as caixas de estores e as placas de betão para acabamento de coberturas. [11]

## **2.3 PRÉ-FABRICAÇÃO NO MERCADO NACIONAL E INTERNACIONAL**

Nem sempre foi fácil a aceitação por parte da população e dos vários intervenientes no processo construtivo de soluções pré-fabricadas, em grande parte devido à conotação negativa associada a fraca qualidade das mesmas. Foi preciso desenvolver investigações, mecanismos de certificação, apoios governamentais e institucionais, para levar a cabo o desenvolvimento do conceito e o crescimento da indústria da pré-fabricação.

### **2.3.1 Mercado Internacional**

Muitos países já utilizam a pré-fabricação das mais variadas formas há alguns anos. Cada um desenvolveu um sistema que encaixa na sua própria cultura e tecnologia construtiva, sendo que alguns deles já têm uma tradição bastante alargada na temática da construção pré-fabricada. Independentemente das razões, sejam elas ambientais, económicas ou culturais, estes países têm vindo a desenvolver o conceito, apostando na inovação, eficiência, produtividade e rentabilidade do setor da construção civil.

A pré-fabricação teve origem no Reino Unido. No entanto, a construção pré-fabricada tem sido largamente adotada em outros países, por exemplo nos Estados Unidos da América, Japão e em países do Norte da Europa. [12]

Atualmente na Europa existem entidades e normas que definem parâmetros técnicos a respeito da construção com elementos pré-fabricados, entre elas podemos citar a PCA – Precast Concrete Association, a BSI – British Standards Institution, entre outros. Já nos EUA a entidade regulamentadora é a ACI – American Concrete Institute.

Apesar de uma diminuição de obras públicas e de questões sobre verbas governamentais para projetos de auto-estradas, a indústria de produtos pré-fabricados de betão deverá continuar o seu ritmo ascendente no ano 2015 com um crescimento de 6%, levando as vendas da indústria para mais de 18 biliões de dólares (~16 milhões de milhões de euros) na América do Norte. Será o terceiro ano consecutivo de crescimento sólido, após aumento de 5,2% em 2013 e de 5% em 2014, de acordo com o Relatório de Análise Comparativa da PCA. [13]

### 2.3.2 Mercado Nacional

A construção civil é uma das atividades mais importantes da economia portuguesa, em 2002 representava, segundo vários estudos, cerca de 7% do Produto Interno Bruto e empregando cerca de 9% da força de trabalho nacional. [14]

A construção de edifícios, como se pode verificar na figura 7, corresponde à parcela mais importante do conjunto total das atividades ligadas à construção civil.

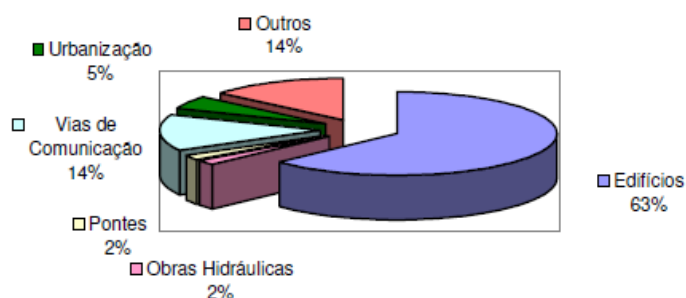


Figura 7 - Peso relativo dos vários tipos de obras em Portugal [14]

Em Portugal, a indústria de elementos pré-fabricados em betão apresentou um crescimento a um ritmo inferior comparativamente ao resto da Europa. Este facto é explicado pelo baixo custo da mão-de-obra. Outra razão possível é por Portugal se encontrar numa zona de elevada sismicidade, e também devido ao facto de serem exigidas ligações entre os diversos elementos construtivos que requerem um dimensionamento cuidadoso.

No nosso país a pré-fabricação de elementos em betão tornou-se numa primeira fase mais frequente na construção de pontes, caminhos-de-ferro e auto-estradas. Além disso, também são frequentemente utilizados na construção de infra-estruturas de esgotos e saneamento, nomeadamente manilhas, caixas de visita e casas de máquinas.

## Capítulo 2

Numa segunda fase, surge a sua aplicação em edifícios habitacionais, com a aplicação de algumas técnicas – exemplo disso são os componentes estruturais, como pilares, vigas, e painéis de fachada em betão.



Figura 8 - Evolução da utilização de pré-fabricação em Portugal - Obras Públicas [8]

Existe em Portugal a ANIPB – Associação Nacional dos Industriais da Pré-fabricação em Betão que já demonstra alguma capacidade de dar resposta às necessidades do mercado com garantias de qualidade, rapidez e economia apesar de apenas ter maior grau de utilização no setor dos edifícios comerciais e industriais.

Segundos dados fornecidos pela ANIPB relativos a 2005, existem 200 empresas de pré-fabricação dos quais 61 são associados da ANIPB, que consomem cerca de 10% do total de cimento utilizado em Portugal e empregam cerca de 6400 trabalhadores tendo 550 milhões de euros de volume total de negócios.

## **3 COMPARAÇÃO ENTRE CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA E CONSTRUÇÃO TRADICIONAL**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

Hoje em dia, o conceito de pré-fabricação é ainda visto por alguns projetistas e profissionais da área da Engenharia Civil como apenas uma variante técnica da construção tradicional. Ou seja, ainda se considera que a única diferença entre um projeto com elementos pré-fabricados e outro com elementos construídos no local é o facto de, no primeiro, os elementos serem produzidos em fábrica e montados posteriormente. Esta ideia não está de todo correta, tendo em conta que, só se poderá tirar partido desta técnica construtiva se o projeto for, desde início, pensado e concebido para ser constituído por elementos pré-fabricados. Todo o processo deve ser elaborado, desde o seu início, de forma integrada.

As exigências no que diz respeito a prazos são crescentes e determinantes para a competitividade de uma empresa e as questões ambientais e energéticas são encaradas como um dos grandes desafios do setor. A produção em fábrica permite implementar processos produtivos mais eficientes e racionais, superar as necessidades de trabalhadores especializados, tirar partido da repetição de tarefas e aplicar um controlo de qualidade mais rigoroso e eficaz. Para além disso, a pré-fabricação consegue proporcionar construções com mais qualidade, durabilidade, fiabilidade e segurança. Ainda assim, enfrenta algumas dificuldades de implementação e entraves ao seu desenvolvimento, que se deve procurar desmistificar, como são exemplo o estigma social da baixa qualidade ou a restrição à criatividade conceptual.

O objetivo deste capítulo é estabelecer uma comparação entre as duas metodologias de construção, sob o ponto de vista de vários parâmetros, que será feita de forma qualitativa ou quantitativa, quando tal for possível. É necessário referir que estas comparações nem sempre são simples ou lineares, tendo em conta que as técnicas adotadas se tornam aparentemente complexas devido à interdependência entre tarefas e recursos. A unicidade de cada projeto torna bastante difícil o estabelecimento de um referencial de comparação entre as técnicas construtivas. [15]

## 3.2 PLANEAMENTO

Um dos maiores condicionantes da construção pré-fabricada é o aumento das fases de planeamento e pré-construção em comparação com a construção *in situ*, sendo necessário um maior esforço antecipado de engenharia. O trabalho de projeto e o planeamento extensivo têm de ser conduzidos de forma precisa antes da fase de fabrico. A coordenação entre conceção, transporte e montagem em estaleiro constituem componentes decisivas no sucesso da implementação desta técnica. [15]

Quando se opta por utilizar a pré-fabricação num determinado projeto, é importante inclui-la no processo de desenvolvimento o mais cedo possível, idealmente nas fases iniciais. Problemas como falhas na compatibilidade, que resultam em aumentos de custos, são comuns quando os componentes pré-fabricados não são considerados até se chegar a uma fase tardia no projeto. Estas alterações implicam um conjunto de problemas ligados ao reajuste dos componentes, que normalmente são entregues em estaleiro segundo determinadas dimensões e especificidades indicadas inicialmente. Trabalhar com elevada precisão e uma boa supervisão pode reduzir a quantidade de ajustes e adaptações que por vezes é necessário efetuar. [16]

A impossibilidade de fazer alterações em estaleiro constitui um entrave à construção pré-fabricada.

Os gestores e coordenadores de projeto precisam de exercer e ter conhecimentos das várias vertentes, de forma a aproveitar todos os benefícios e potencialidades da rapidez de construção associada à pré-fabricação.

Caso se verifiquem estas interações desde cedo, o desenvolvimento fica facilitado e a finalização dos vários projetos e consequente produção podem ter início mais cedo.

Uma das grandes vantagens da construção pré-fabricada é permitir que o projeto e subsequente fabrico decorram em simultâneo e em paralelo com outras atividades. [17]

Outra vantagem em termos de planeamento de tarefas é o facto de se erguer o edifício mais rápido, possibilitando a execução de trabalhos no interior mais cedo do que na construção tradicional.

### 3.2.1 Prazos

Poupar tempo é um dos benefícios mais significativos da construção pré-fabricada. A redução do tempo de construção no local tem um grande impacto na duração global de todo o projeto. Sendo o trabalho em estaleiro tradicionalmente vulnerável e propício a atrasos devidos às condições atmosféricas, que constituem um dos parâmetros mais variáveis do planeamento construtivo, a utilização de componentes pré-fabricados permite reduzir o risco de atrasos e assegurar as exigências do projeto. [15]

Com base em estudos realizados em alguns países europeus a construção pré-fabricada em comparação com as tecnologias construtivas convencionais pode reduzir o tempo de construção de 21 para 12 meses, permitindo mais 33% de área útil e reduzindo ainda o custo de construção em 17%. [15]

Outro estudo realizado no Reino Unido mostra que a construção pré-fabricada pode reduzir para menos de metade o período de trabalho em estaleiro (Fig. 9). [18]

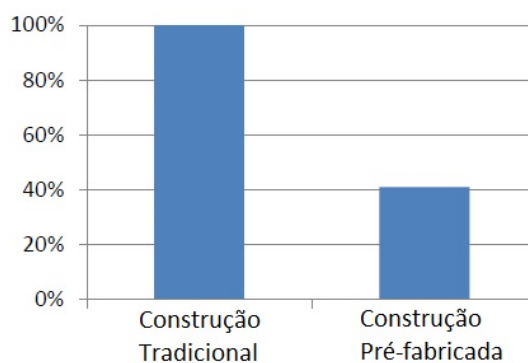


Figura 9 - Comparação do período de trabalho em estaleiro, em percentagem

Segundo o mesmo estudo, pode perceber-se que há ainda maiores discrepâncias quando se trata do tempo despendido para finalizar a envolvente exterior. A construção pré-fabricada consegue uma redução de praticamente 80% em relação à construção tradicional. [18]

Conseguir tornar as estruturas estanques mais rápido tem três grandes vantagens [18]:

- ✓ A qualidade é protegida porque as condições meteorológicas não danificam o que já está construído;
- ✓ O mau tempo não provoca paragens e atrasos nas tarefas seguintes;
- ✓ As condições de trabalho melhoram porque os trabalhadores estão protegidos da chuva, frio ou sol.

A questão dos prazos é particularmente importante no setor dos edifícios comerciais, industriais ou na promoção imobiliária. Nestes casos, por vezes pode ser compensado o possível custo acrescido das soluções pré-fabricadas com a colocação dos estabelecimentos em funcionamento num período mais curto de tempo e consequente obtenção mais rápida de receitas.

#### 3.2.2 Mão-de-Obra

Comparada com a construção tradicional, a construção pré-fabricada necessita de menor quantidade de mão-de-obra em estaleiro. Para além disso, a mão-de-obra utilizada na montagem é geralmente mais qualificada, com outro tipo de comportamento e mais eficiente.

Por outro lado, a falta de mão-de-obra qualificada constitui uma barreira à implementação da pré-fabricação. Esta metodologia requer mão-de-obra mais qualificada, tanto para a montagem em estaleiro como para o fabrico. Muitos dos problemas relacionados com a falta de qualidade dos edifícios pré-fabricados estão relacionados com a montagem, e não com defeitos dos materiais, componentes ou da própria estrutura. [15]

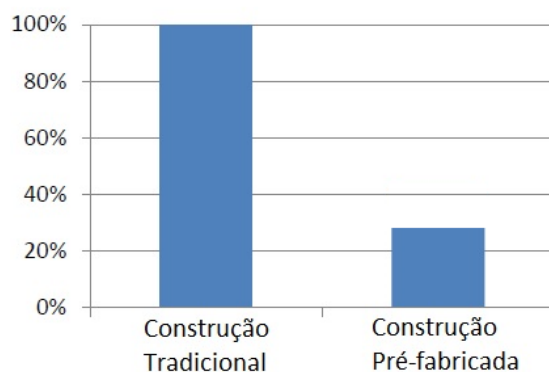


Figura 10 - Comparação da quantidade de mão-de-obra para a mesma atividade, em percentagem

É importante referir que aumentar a produtividade não implica um aumento de mão-de-obra, utilizando a pré-fabricação. O facto de os elementos serem produzidos em ambientes controlados, em fábrica, facilita a aplicação de maquinaria e automação à construção, reduz as necessidades de mão-de-obra em estaleiro, proporciona um melhor ambiente de trabalho, facilita o controlo de qualidade e permite uma maior previsibilidade na entrega do produto final. [12]

### 3.2.3 Equipamentos

Um dos fatores que pode restringir o uso da pré-fabricação é a capacidade de transporte e manuseamento de grandes componentes em estaleiro. Alguns fabricantes disponibilizam gruas nos seus meios de transporte, no entanto esses equipamentos precisam de ser ajustados ao local. Na configuração do estaleiro, é necessário ter em conta a distância máxima de montagem, que limita simultaneamente o peso do elemento e o equipamento a utilizar.

El Debs (2000) cita que os fatores que interferem na escolha dos equipamentos e da capacidade são os seguintes:

- ✓ Pesos, dimensões e raios de levantamento das peças maiores e mais pesadas;
- ✓ Número de levantamentos a serem feitos e a frequência das operações;
- ✓ Mobilidade requerida, condições de campo e espaço disponível;
- ✓ Necessidade de transportar os elementos levantados;
- ✓ Necessidade de manter os elementos no ar por longos períodos;
- ✓ Condições topográficas de acesso;
- ✓ Disponibilidade e custo do equipamento.



Figura 11 - Equipamentos de elevação [8]

### 3.2.4 Transporte

A logística do transporte constitui um fator determinante na viabilidade da construção pré-fabricada. O método de transporte e o itinerário impõem limitações de peso, tamanho e altura (Tab. 2).

Os elementos pré-fabricados dos edifícios podem ter que ser sobredimensionados e projetados de modo a evitar danos durante o transporte, o que também pode contribuir para o aumento dos custos do projeto. Este aspeto pode revelar-se uma condicionante da construção pré-fabricada, quando comparada com a construção tradicional.

Tabela 2 - Tipo de transporte e limites correspondentes [8]

| Tipo de transporte    | Comprimento pré-fabricado (m)         | Largura pré-fabricado (m)            | Altura total (m) | Peso pré-fabricado Ton. |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------|
| Normal                | Dentro dos limites do veículo – 13.50 | Dentro dos limites do veículo – 2.50 | 4.00             | 25                      |
| Licença Anual         | 25.0                                  | 3.00                                 | 4.60             | 30                      |
| Carro Piloto          | 32.5                                  | 4.50                                 | 5.00             | 45                      |
| Carro Piloto e G.N.R. | >32.5                                 | >4.50                                | >5.00            | > 45                    |

Como os elementos pré-fabricados de betão possuem, geralmente, grandes dimensões, há a necessidade de que sejam transportados em veículos de mesma magnitude e isto torna a logística ainda mais complexa. As peças precisam ser posicionadas no veículo de forma a minimizar a quantidade de movimentos para o seu içamento e fixação no local definitivo.



Figura 12 - Transporte de pilares com 35m de altura [20]



Figura 13 - Detalhe do posicionamento dos elementos no meio de transporte [20]



Figura 14 - Transporte de uma viga caixão [21]

### 3.3 CUSTO/ECONOMIA

Outro grande aspecto da construção pré-fabricada relaciona-se com o custo. A utilização de técnicas de pré-fabricação permite reduzir custos em todas as etapas da cadeia de produção, por exemplo, relacionados com a economia de materiais (Tab. 3) e mão-de-obra na fase de construção, tendo em conta a possibilidade de atingir uma dada produção em serie.

Tabela 3 - Economia gerada pela utilização de materiais pré-fabricados

| <b>Economia</b>                          | <b>%</b> |
|--|----------|
| <b>Betão</b>                             | 20 a 25  |
| <b>Cimento</b>                           | 25 a 33  |
| <b>Aço</b>                               | 50 a 62  |
| <b>Madeiras</b>                          | 70 a 90  |
| <b>Duração da execução da construção</b> | 40 a 54  |

A possibilidade de reaproveitamento em fábrica das cofragens e outros elementos de moldagem, pela quantidade de elementos iguais que se fabricam, também é um fator a ter em conta na avaliação económica da construção pré-fabricada, quando comparada com a construção tradicional.

Embora o custo inicial seja mais elevado, quando utilizados elementos pré-fabricados, os benefícios financeiros decorrentes da poupança de tempo podem conseguir colmatar esse acréscimo no custo inicial.

Uma vez que a construção é finalizada mais cedo, os fluxos de rendimento decorrentes da venda/aluguer também têm início mais cedo. Os custos de verificação de conformidade em estaleiro são reduzidos porque os componentes pré-fabricados já são sujeitos a um controlo de qualidade rigoroso em condições de fábrica.

### 3.4 SEGURANÇA

O facto de a pré-fabricação implicar períodos de construção mais curtos ou de possibilitar a construção em fábrica de certos elementos pode trazer inúmeros benefícios em termos de segurança. Os trabalhadores em fábrica encontram-se num ambiente mais controlado e não são afetados pelas condições meteorológicas. Por sua vez, os trabalhadores em estaleiro podem ver reduzida a exposição a condições meteorológicas adversas como chuva, frio ou calor excessivos, a partir do momento em que o trabalho em estaleiro diminui.

Desta forma a pré-fabricação tem a capacidade de potencializar condições de segurança segundo duas vertentes:

1. **Segurança estrutural** que se traduz na possibilidade de usar ensaios não destrutivos em peça antes da sua aplicação, o que permite corrigir eventuais falhas ou defeitos. Ensaios com ultra-sons, ensaios de carga com leitura direta (fissuras e deformações), ou com leitura indireta (instrumentação das peças com extensómetros, tanto nas armaduras como no betão), são alguns exemplos de ensaios realizados. [23]
2. **Segurança no trabalho** proporcionada por uma redução da possibilidade de acidentes em obra, consequência de vários fatores com sendo: [23]
  - ✓ Maior qualificação dos operários intervenientes na montagem (pessoal especializado) e menor número de trabalhadores envolvidos nas operações, diminuindo a exposição a riscos;

## Comparação entre Construção Pré-fabricada e Construção Tradicional

- ✓ Utilização de equipamentos de transporte, de elevação e de montagem adequados, existindo muito menos elementos e materiais auxiliares, como, por exemplo, escoramento, cimbramentos e cofragem;
- ✓ As peças acabadas, quando montadas, ficam prontas (ou quase prontas), uma vez que algumas são complementadas em obra com armaduras e betonagem para exercer a função para que foram concebidas. Por exemplo, o uso de lajes pré-fabricadas irá permitir a utilização mais rápida do pavimento, o que se traduz numa maior possibilidade de desenvolvimento de outras atividades, podendo, deste modo gerir melhor o tempo das atividades que se seguem;
- ✓ A utilização de elementos pré-fabricados permite a construção em várias frentes de trabalho, pelo que a quantidade de equipamento utilizado e o prazo de execução das frentes de trabalho são necessariamente menores, contribuindo, assim, para que a exposição ao risco seja menor;
- ✓ Como os elementos pré-fabricados são produtos industrializados, o desperdício de materiais é mínimo (devido à diminuição do volume de betão e ausência da cofragem), ficando a construção mais limpa e com menor geração de entulho.

### 3.5 QUALIDADE

A construção pré-fabricada traz vantagens em termos de qualidade, tendo em conta que os sistemas de controlo aplicados em fábrica são mais rigorosos do que em estaleiro, o que leva a um menor número de falhas precoces devido à incorreta instalação ou a danos decorrentes das operações de construção.

É possível obter um produto final com mais qualidade devido ao maior grau de precisão, às dimensões standardizadas e à apertada supervisão em fábrica. A garantia de qualidade durante a fabricação baseia-se em quatro pontos:

- ✓ Mão-de-obra;
- ✓ Instalações e equipamentos na fábrica;
- ✓ Matéria-prima e processos operacionais;
- ✓ Controle de qualidade na execução.

Tecnologias informáticas avançadas ajudam a controlar o alinhamento e precisão das peças, permitindo que cada produto na linha de fabrico seja diferente do anterior, possibilitando uma produção em massa personalizada. [15]

Em estaleiro é apenas necessário assegurar que a montagem é realizada de acordo com as normas e padrões aplicáveis, para que o projeto cumpra os requisitos de desempenho.

As três maiores questões que podem ser colocadas sobre qualquer casa construída com recurso a pré-fabricação, quando comparada com outra construída por métodos tradicionais, são: [15]

- ✓ Será que vai durar tanto tempo? – Durabilidade
- ✓ Será que vai ter o mesmo custo de manutenção? – Custo do ciclo de vida
- ✓ Será que vai funcionar tão bem? – Desempenho

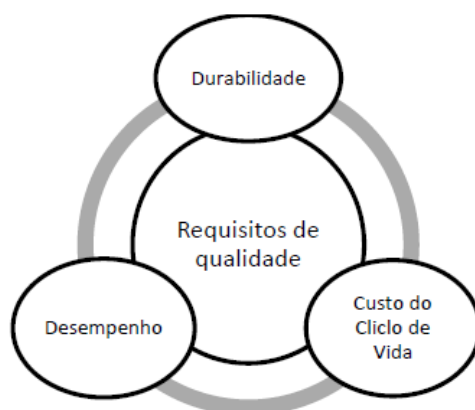


Figura 15 - Requisitos de qualidade dos edifícios [17]

### 3.5.1 Durabilidade

Durabilidade é um importante conceito a ter em conta quando se trata de especificar os requisitos para elementos pré-fabricados. Os elementos utilizados acima ou abaixo do nível do solo podem ser expostos a condições ambientais adversas. Sem durabilidade, o elemento pode deteriorar-se a um ritmo muito superior.

A durabilidade de edifícios construídos utilizando qualquer um dos métodos construtivos é semelhante. É expectável que tal suceda, tendo em conta que os principais componentes que são afetados pelos agentes de degradação são os mesmos para cada tipo de construção.

As construções pré-fabricadas possuem maior potencial em termos de durabilidade do que as construções *in situ*, devido ao uso altamente potencializado e otimizado dos materiais pré-fabricados. Isso é obtido por meio de utilização de equipamentos modernos e de procedimentos de fabricação cuidadosamente elaborados.

A pré-fabricação emprega equipamentos tecnologicamente avançados para a preparação do betão. Aditivos e adjuvantes são utilizados para conseguir os desempenhos mecânicos específicos, para cada classe de betão. A relação água/cimento pode ser reduzida ao mínimo possível e a compactação e cura são executadas em condições controladas, o que proporciona uma mistura mais eficaz do que aquela que é feita no local da obra.

### 3.5.2 Custo do ciclo de vida

É importante distinguir ciclo de vida do elemento pré-fabricado e ciclo de vida da estrutura pré-fabricada.

No que diz respeito ao elemento, o ciclo de vida avalia as atividades ou processos desde a extração de matérias-primas até à sua deposição final.

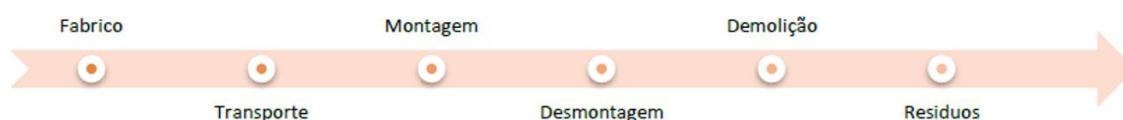


Figura 16 - Ciclo de vida do elemento

### Capítulo 3

O ciclo de vida de elementos pré-fabricados de betão de acordo com a figura 16 obedece às fases, que compreendem as diversas tarefas, conforme a tabela 4.

Tabela 4 - Fases do ciclo de vida do produto

| <b>Fases</b>                  | <b>Tarefas</b>  |
|-------------------------------|---|
| <b>Fabrico</b>                | Receção, armazenamento e preparação dos materiais<br>Produção de betão<br>Manipulação dos materiais<br>Pré-esforço<br>Betonagem<br>Compactação<br>Cura<br>Desmoldagem<br>Acabamentos<br>Armazenamento final das peças |
| <b>Transporte</b>             | Carga<br>Descarga   |
| <b>Montagem</b>               | Estabilização de equipamentos<br>Colocação de acessórios de elevação de cargas<br>Posicionamento do elemento<br>Eventual escoramento provisório   |
| <b>Desmontagem</b>            | Mobilização de equipamentos para o local<br>Aplicação de acessórios de suspensão de cargas<br>Posicionamento do elemento no transporte  |
| <b>Demolição</b>              | Mobilização de equipamentos<br>Transporte de resíduos   |
| <b>Tratamento de resíduos</b> | Utilização de resíduos<br>Deposição final   |

Tendo em conta as fases referidas na tabela 4, a construção pré-fabricada tem um custo mais elevado inicialmente, devido principalmente a fase de transporte e montagem, mas como já foi referido anteriormente, esse custo inicial é compensado com a rapidez com que é executada a construção.

## Comparação entre Construção Pré-fabricada e Construção Tradicional

No que diz respeito estrutura, o ciclo de vida avalia todas as etapas desde a fase de planeamento até ao desmonte da estrutura.

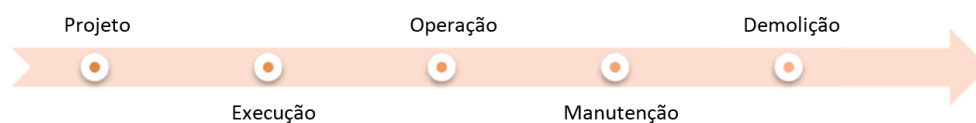


Figura 17 - Ciclo de vida da estrutura

O ciclo de vida de uma estrutura pré-fabricada conforme a figura 17 apresenta fases, que compreendem diversas tarefas, conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Fases do ciclo de vida da estrutura

| Fases             | Tarefas   |
|-------------------|---|
| <b>Projeto</b>    | Programação das atividades construtivas<br>Análise do terreno<br>Viabilidade física, económica e financeira |
| <b>Execução</b>   | Produção dos materiais em fábrica<br>Gestão de recursos humanos<br>Transporte e montagem dos elementos      |
| <b>Operação</b>   | Utilização por parte dos ocupantes  |
| <b>Manutenção</b> | Correção de patologias<br>Modernização do edifício  |
| <b>Demolição</b>  | Atividade de desmonte<br>Remoção de resíduos  |

Tendo em conta as fases referidas na tabela 5, pode-se concluir que, os custos de manutenção de uma estrutura pré-fabricada são menores comparativamente à construção tradicional, uma vez que os elementos pré-fabricados são alvo de testes que certificam a sua qualidade aquando da sua fabricação, o que posteriormente permite que a manutenção seja feita mais espaçadamente. A construção tradicional é realizada por vezes em condições climáticas adversas, o que pode por em causa a qualidade da construção. Devido a este fator os edifícios tradicionais têm maior probabilidade de serem alvo de intervenções futuras.

### 3.5.3 Desempenho

Hoje em dia já existe um conjunto de normas que têm como objetivo assegurar que os edifícios têm um desempenho satisfatório em serviço, independentemente do método construtivo utilizado. No entanto, é necessário referir que o comportamento em serviço de um edifício pré-fabricado difere substancialmente do verificado num edifício construído pelos métodos tradicionais. O faseamento construtivo deve ser considerado desde início no projeto. Os elementos pré-fabricados devem estar preparados não só para a fase de serviço, como sucede normalmente na construção tradicional, mas também para as fases de fabrico, transporte e montagem, sendo necessário garantir o equilíbrio durante todas as fases do processo construtivo. [8]

No caso da construção pré-fabricada, outro fator bastante importante a considerar são as ligações entre os componentes. Como se sabe, para garantir o comportamento estrutural adequado de um edifício é necessário que a transmissão das cargas entre elementos seja feita de forma correta e de acordo com o estipulado em projeto. Posto isto, é de salientar que as ligações entre os elementos assumem-se de maior importância no comportamento global da estrutura e, em particular, no caso de construções pré-fabricadas. Devem ser corretamente dimensionadas e especificadas em projeto e executadas em obra de forma rigorosa. [24]

## 3.6 SUSTENTABILIDADE

Nos dias de hoje, a preocupação com a preservação do meio ambiente representa um desafio a nível global. Existem já um conjunto de medidas aplicadas para regular o impacto ambiental e o desempenho energéticos dos edifícios, como a Diretiva Europeia dos Edifícios Sustentáveis. Quando se trata de sustentabilidade, podem abordar-se os seguintes aspetos: energia, água, materiais, desperdício, poluição, saúde e bem-estar, gestão e ecologia. [24]

O setor da construção e as suas atividades inerentes continuam a ter um grande peso nos impactos negativos sobre o meio ambiente, nomeadamente no que diz respeito a consumos energéticos, utilização irracional de recursos naturais, poluição, desperdício ou ruído. Vários estudos apontam a pré-fabricação como uma solução competitiva e adequada neste campo. A nível Europeu, a pré-fabricação tem sido encarada como tendo um papel fundamental para tornar as atividades de construção mais sustentáveis. [16]

## Comparação entre Construção Pré-fabricada e Construção Tradicional

No âmbito do programa PREPARE (Preventive Environmental Protection Approaches) um grupo de trabalho que se dedica a analisar a construção do ponto de vista de tecnologias eficientes, avançou com os seguintes potenciais benefícios da pré-fabricação: [16]

- ✓ Redução de 50% na quantidade de água utilizada para construir um edifício convencional;
- ✓ Redução de 50% no uso de materiais oriundos de uma pedreira;
- ✓ Redução de pelo menos 50% no consumo de energia. Naturalmente que ao reduzirem-se os períodos de construção o impacto da atividade de construção no ambiente local será significativamente diminuído.

A performance ambiental da pré-fabricação para os diferentes parâmetros estipulados pela Movement for Innovation pode ser encontrada na tabela seguinte. [16]

Tabela 6 - Desempenho ambiental qualitativo da pré-fabricação de acordo com alguns indicadores

| <b>Indicador de sustentabilidade</b> | <b>Consequência resultante da utilização da pré-fabricação</b>   | <b>Efeito</b> |
|--------------------------------------|--|---------------|
| Energia (em serviço)                 | Melhorias na qualidade dos edifícios, asseguraram padrões consistentes de isolamento e instalações                                 | Positivo      |
| Energia (construção)                 | Redução de desperdício e aumento da reciclagem reduz a energia gasta na construção, associada ao fabrico de determinados elementos | Positivo      |
| Energia (transporte)                 | O transporte de elementos pré-fabricados pode despende mais energia devido aos equipamentos de transporte solicitados              | Negativo      |
| Desperdício                          | Os elementos produzidos em fábrica permitem reduzir muito do desperdício frequentemente associado às atividades em estaleiro       | Positivo      |
| Água                                 | Em fábrica é possível um maior controlo e potencial reutilização da água do que em estaleiro                                       | Positivo      |
| Espécies por hectare                 | A redução da poluição em estaleiro limita o impacto nas espécies existentes no local   | Positivo      |

Por outro lado, a pré-fabricação satisfaz os requisitos da desconstrução de um edifício enquanto processo que se caracteriza pelo seu desmantelamento cuidadoso, de modo a possibilitar a recuperação de materiais e componentes da construção, promovendo a sua reutilização e reciclagem.

### 3.7 GESTÃO DOS RISCOS

A construção pré-fabricada muda os perfis de risco dos empreendimentos e a respetiva gestão e mitigação. Enquanto alguns se tornam menos significativos em termos de probabilidade de ocorrência e de potencial impacto (flutuações de preço durante o processo construtivo ou atrasos devido às más condições climatéricas), outros poderão tornar-se mais significativos (decisões de planeamento imprevisíveis ou configurações que não sejam adequados ao método construtivo).

As alterações tardias ao projeto têm um maior impacto quando se utiliza pré-fabricação, porque o trabalho em fábrica, baseado nos vários projetos de especialidade, começa bastante cedo, muito antes de se dar início ao trabalho em estaleiro. As alterações que implicam trabalho em fábrica adicional poderão ter um custo elevado e causar atrasos, trazendo inclusive custos adicionais correspondentes a multas por falhas nos prazos de execução. Pelo contrário, as abordagens tradicionais conseguem absorver as alterações em projeto mais facilmente, mesmo depois de se ter dado início ao trabalho em estaleiro. Torna-se, por isso, vital envolver o fabricante dos componentes desde as etapas iniciais do empreendimento, trabalhando numa estreita colaboração com a equipa de projeto, o arquiteto e o cliente, de forma a assegurar que o projeto desenvolvido se adequa ao processo de fabrico. Uma colaboração estreita com os coordenadores de projeto assegura que todas as questões que possam ter impacto sobre o *design*/conceção sejam resolvidas antes dos projetos serem fixados. [17]

As técnicas de construção pré-fabricada dependem da montagem dos elementos no tempo certo. Outros trabalhos não poderão prosseguir até que estes estejam no local respetivo. Uma falha na entrega no prazo estipulado por parte do fornecedor poderá implicar um atraso e uma reprogramação das atividades seguintes, com consequências no prazo de execução e custos extraordinários. Estes riscos podem ser mitigados através de uma gestão correta e eficaz da cadeia de fornecimento. Para além disso, deverão ser identificados os elementos cujo fabrico requer mais tempo para assegurar que as ordens são efetuadas no momento adequado.

Fazendo um balanço, pode concluir-se que, no caso da construção pré-fabricada, os riscos aumentam nas etapas iniciais do projeto, antes de se dar início ao trabalho em estaleiro. A gestão do

risco torna-se assim muito importante quando se opta pela pré-fabricação. Mitigar os riscos requer um processo disciplinado, boa coordenação e uma cultura que não aceita alterações tardias ao projeto. [17]

### **3.8 PERCEÇÃO DOS VÁRIOS INTERVENIENTES SOBRE A PRÉ-FABRICAÇÃO**

Um dos maiores desafios é alterar a percepção negativa da população em geral relativamente a construção pré-fabricada. Esta percepção foi fundada por acontecimentos menos positivos ocorridos no passado, por problemas devido principalmente a mão-de-obra. Estes acontecimentos originaram uma barreira à aceitação da pré-fabricação enquanto alternativa viável de construção. Um dos maiores desafios é deixar para trás esta conotação com sistemas construtivos de fraca qualidade.

Pode verificar-se uma certa relutância em adotar novos sistemas, por mais inovadores que estes se apresentem, por falta de conhecimentos técnicos e de viabilidade. Os projetistas optam por não utilizar sistemas que consideram não trazer benefícios para a construção ou cujos impactos no processo desconhecem. [16]

Outra barreira relaciona-se com a percepção do cliente sobre o conceito estético do edifício. Normalmente, os que optam por soluções arquitetonicamente mais tradicionais têm a ideia errada de que estas não serão conseguidas com recurso à pré-fabricação. [16]

Um estudo realizado em 2002 nos EUA, concluiu que os clientes não eram resistentes a novas formas de construção, mas sim a novos materiais de construção. Outro estudo realizado em 2007 com o objetivo de avaliar o grau de utilização da construção fora do estaleiro de obra nos EUA, permitiu obter algumas conclusões no que diz respeito à percepção de vários intervenientes do setor, desde arquitetos, engenheiros a empreiteiros.

Os principais resultados são apresentados na tabela seguinte. [15]

### Capítulo 3

Tabela 7 - Principais benefícios e restrições da utilização da construção pré-fabricada

| Fatores apontados por Arquitetos e Engenheiros       |                                       |
|--|---------------------------------------|
| Benefícios   | Restrições                            |
| Redução do tempo de construção                       | Dificuldade de transporte             |
| Redução do custo global do empreendimento            |                                       |
| Promoção da qualidade do produto                     | Dificuldade de montagem               |
| Aumento da eficiência da gestão da obra em estaleiro |                                       |
| Redução de paragens e atrasos em obra                | Limitação das opções de <i>design</i> |
| Redução do impacto negativo no meio ambiente         |                                       |

Foi encontrada uma relação linear entre os níveis de satisfação dos arquitetos e engenheiros e a percentagem de utilização de técnicas de pré-fabricação. Isto significa que o aumento do conhecimento por parte destes intervenientes sobre a construção pré-fabricada é uma das mais eficazes vias para aumentar a sua utilização. Ainda de referir que arquitetos e engenheiros ou empreiteiros que já utilizaram alguma vez a pré-fabricação têm uma atitude mais positiva em relação à mesma do que aqueles que nunca a usaram. A falta de conhecimento acerca destas técnicas pode ser um dos maiores desafios a enfrentar. [15]

Existem, no entanto, outros contextos em que a imagem da pré-fabricação tem mudado significativamente. Um estudo elaborado na Alemanha em 2004 revelou a perceção da população e os resultados mais significativos foram os seguintes: [19]

- ✓ 20% vivem numa casa pré-fabricada;
- ✓ 82% consideravam adquirir uma casa pré-fabricada;
- ✓ 92% sabiam que uma casa pré-fabricada poderia ser planeada de acordo com as suas necessidades específicas;
- ✓ 84% consideraram adequados os preços praticados;
- ✓ 95% viam as tecnologias de pré-fabricação como seguras, viáveis e sensatas enquanto método construtivo;

## Comparação entre Construção Pré-fabricada e Construção Tradicional

- ✓ 50% indicaram que a construção pré-fabricada estava a definir as tendências em áreas como o *design* e a eficiência energética.
- ✓ Quase todos conheciam alguém que morava numa casa pré-fabricada.

### 3.9 SUMÁRIO

A diminuição de custos, aumento da qualidade, aumento da produtividade ou a diminuição dos problemas relacionados com a mão-de-obra são fatores importantes, que devem ser cuidadosamente analisados pelos vários intervenientes do setor de modo a conseguir levar a uma maior aceitação da construção pré-fabricada.

Apesar de, hoje em dia, já ser praticamente consensual o facto de a prefabricação ser o caminho a seguir pelas empresas do setor da construção, esta tecnologia construtiva ainda tem subjacentes alguns inconvenientes que estão, provavelmente, na origem da sua reprovação generalizada, mas que devem ser encarados como desafios a ultrapassar e superar.

Resumindo todos os aspetos referidos neste capítulo, pode efetuar-se uma análise SWOT, ainda que simplificada, para sintetizar alguns dos fatores mais importantes a considerar (Fig. 17). [24]

|  |   |
|--|---|
| <b>Vantagens</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Rapidez de construção;</li><li>✓ Maior previsibilidade de custos e prazos;</li><li>✓ Menos quantidade de energia consumida na fase de construção;</li><li>✓ Redução do desperdício de materiais e recursos; Considera o processo de desconstrução;</li><li>✓ Menor impacto do estaleiro no meio ambiente local;</li><li>✓ Aumento da segurança em estaleiro;</li><li>✓ Diminuição da necessidade de espaço de armazenamento em estaleiro;</li><li>✓ Redução das paragens e atrasos em obra.</li></ul> | <b>Inconvenientes</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Mais energia consumida nas operações de transporte e montagem dos componentes;</li><li>• Custos iniciais mais elevados</li><li>• Impossibilidade ou grande dificuldade de efetuar alterações em estaleiro;</li><li>• Necessidade de mão-de-obra especializada.</li></ul>  |
| <b>Oportunidades</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Aumento da qualidade dos produtos finais construídos;</li><li>✓ Maior controlo e coordenação ao longo de todos os processos;</li><li>✓ Flexibilidade de soluções;</li><li>✓ Aumento da produtividade do setor da construção;</li><li>✓ Edifícios sustentáveis e energeticamente eficientes;</li><li>✓ Participação do cliente e fabricante no processo de conceção - maior acompanhamento.</li></ul>  | <b>Ameaças</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Aumento dos custos de transporte;</li><li>• Falta de conhecimento e formação dos vários intervenientes da indústria da construção na temática da construção pré-fabricada;</li><li>• Perceção errada de edifícios pré-fabricados com fraca qualidade por parte da maioria da população;</li><li>• Inércia à mudança por parte de Projetistas, Empreiteiros e Utilizadores.</li></ul> |

Figura 18- Análise SWOT da Construção Pré-fabricada



## 4 CONSTRUÇÃO COM ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS

No capítulo 4 é feita referência aos sistemas estruturais pré-fabricados mais utilizados bem como às exigências necessárias desses sistemas. São referidos alguns dos tipos de ligações existentes mais importantes, onde são exemplificados alguns dos mecanismos de transmissão de forças mais significativos.

A viabilidade da construção com recurso a elementos pré-fabricados depende em grande parte das soluções das ligações adotadas. A impossibilidade de transportar e manusear elementos de grandes dimensões implica a divisão destes em elementos mais pequenos, criando a necessidade de elaborar ligações entre os elementos que permitam a transferência adequada das forças aplicadas na estrutura até às fundações.

Por estas razões quando se fala em pré-fabricação pensa-se nas ligações entre os elementos pré-fabricados e na influência que estas têm no comportamento da estrutura. [10]

### 4.1 SISTEMAS ESTRUTURAI PRÉ-FABRICADOS

Na construção pré-fabricada, o conceito de sistema estrutural associa-se muitas vezes ao próprio fabricante como forma de proteger a sua marca comercial, sendo a produção de soluções normalizadas um entrave à escolha de estruturas pré-fabricadas por parte dos projetistas. A realidade porém é diferente, embora existam várias marcas comerciais disponíveis de estruturas pré-fabricadas, estas baseiam-se num conjunto reduzido de sistemas estruturais, cujos critérios de dimensionamento são semelhantes. [25]

A escolha do sistema estrutural para um determinado edifício resulta da ponderação de um conjunto de fatores, sendo eles: [25]

- ✓ Tipo de utilização;
- ✓ Segurança estrutural;
- ✓ Segurança ao fogo;
- ✓ Estética;
- ✓ Recursos materiais e financeiros;

## Capítulo 4

- ✓ Conforto térmico e acústico;
- ✓ Espaço disponível;
- ✓ Prazo de execução;
- ✓ Ações.

Em função da altura e do tipo de utilização dos edifícios, podem encontrar-se várias soluções estruturais, destacando-se os seguintes tipos de estruturas pré-fabricadas: [26]

- ✓ Moradias de um só piso, com um vão normalmente de 3 a 6 m e uma altura entre lajes de 3 m (a);
- ✓ Edifícios de habitação ou escritórios com 2 ou mais pisos, com um vão que ronda 3 a 6 m e uma altura entre pisos de 3 a 4 m (b);
- ✓ Auto-silos com 2 a 4 pisos e com vãos normalmente de 7,5 a 15 m e uma altura entre pisos de 3 m (c);
- ✓ Grandes armazéns com 2 a 4 pisos, com vãos normalmente de 10 a 20 m numa direção e 3 a 6 m na direção ortogonal, e uma altura entre pisos de 5 a 7 m (d);
- ✓ Grandes áreas comerciais de um único piso de 5 a 7 m de altura e 10 a 15 m de vão (e);
- ✓ Naves industriais ou agrícolas ou pequenos armazéns de um único piso com 5 a 7 m de altura e vãos normalmente de 10 a 30 m numa direção e 3 a 5 m na direção ortogonal (f);
- ✓ Edifícios mistos com um piso geral para armazém ou indústria, e um segundo piso, de menor pé direito e numa zona restrita para escritórios (g).

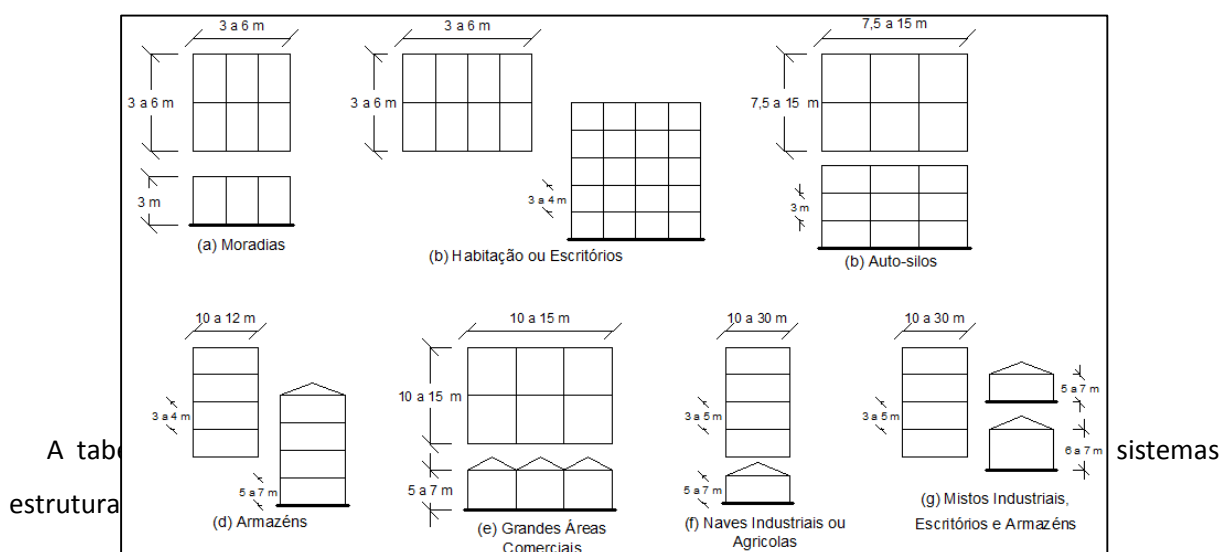


Figura 19 - Estruturas pré-fabricadas mais comuns

## Construção com Elementos Pré-fabricados

Tabela 8 - Vantagens dos sistemas estruturais pré-fabricados

| Principais vantagens dos sistemas estruturais pré-fabricados      |   |
|---|---|
| Maior possibilidade de focar o empreendimento                     | Construção menos suscetível a variações climáticas                      |
| Melhoria na qualidade de gestão do projeto                        | Maior organização no estaleiro de obra                                  |
| Garantia de rápida execução da obra                               | Garantia de qualidade   |
| Redução de diversos custos indiretos ou de difícil contabilização | Construção limpa e conseqüentemente com menor dano para o meio ambiente |
| Maior segurança no cumprimento do cronograma                      | Rastreabilidade de processos  |
| Construção sem desperdícios                                       | Menor rotatividade de mão-de-obra                                       |
| Menor estrutura administrativa, fiscalização, e controle em obra  | Redução do nº de horas dos trabalhadores expostos a riscos              |

A conceção de estruturas pré-fabricadas de edifícios tem como base alguns sistemas estruturais simples. Estes sistemas podem ser combinados de modo a obter uma solução eficiente que cumpra as necessidades específicas do edifício. Os sistemas mais comuns são: [27]

- ✓ Sistemas reticulados (elementos de viga, elementos de pilar, ligações)
- ✓ Sistemas de pavimento e de cobertura (elementos de piso, elementos de cobertura, ligações);
- ✓ Sistemas de paredes resistentes (elementos de parede, ligações);
- ✓ Sistemas de parede de fachada (painéis de fachada, ligações);
- ✓ Sistemas de estruturas celulares (elementos em caixão).

Vários destes sistemas estruturais podem ser combinados na mesma construção pré-fabricada, dando origem a sistemas híbridos.

### 4.1.1 Sistemas Reticulados

As estruturas reticuladas são constituídas por vigas e pilares pré-fabricados (peças lineares) incluindo pontualmente, paredes e núcleos resistentes, de modo a proporcionar um aumento de resistência em relação a ações horizontais.

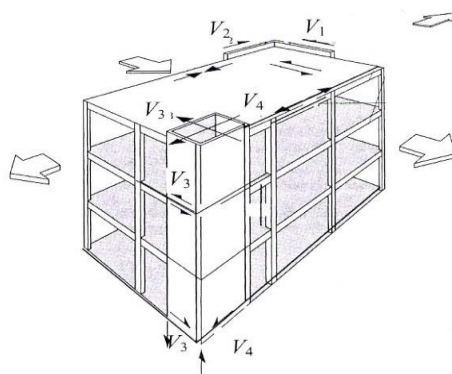


Figura 20 - Estrutura reticulada contraventada por um núcleo resistente [31]

Dependendo do tipo de utilização do edifício, pode-se optar por um sistema não contraventado, no caso de edifícios de 1 a 3 pisos, ou por um sistema contraventado por paredes resistentes e núcleos de escadas e elevadores, no caso de edifícios com mais de 3 pisos.

Sistemas não contraventados, são utilizados na maioria dos casos na construção de edifícios industriais, em que a estrutura é constituída por pilares encastrados na fundação e vigas de cobertura simplesmente apoiadas nos pilares (Fig. 21). À medida que aumenta o número de pisos há uma diminuição dos vãos e aumento da secção transversal dos pilares, de modo a proporcionar à estrutura uma resistência adequada ao incremento das cargas gravíticas (por aumento do número de pisos) e devido às ações sísmicas provenientes do desenvolvimento em altura do edifício.



Figura 21 - Edifício da unidade industrial: estrutura reticulada de piso único [29]

O sistema contraventado é aplicado maioritariamente em edifícios destinados a escritórios ou habitação, com estrutura formada por vigas e pilares pré-fabricados contraventados por núcleos de escadas e elevadores e paredes resistentes (Fig. 22) pré-fabricados ou betonados *in situ*.



Figura 22 - Edifício de escritórios situado em Bruxelas, Bélgica: estruturas reticuladas de 36 pisos [29]

### 4.1.1.1 Pilares

Os pilares pré-fabricados são normalmente de secção transversal retangular (Fig. 23) e requerem normalmente uma dimensão mínima de 30 cm, de modo que seja possível a ligação viga/pilar e forneça uma resistência ao fogo para cerca de duas horas, tornando possível a aplicação destes elementos em diversos tipos de edifícios. O comprimento dos pilares vai normalmente até 12 m de altura em edifícios de 1 piso e 15 m para edifícios de vários pisos tornando estes os elementos normalmente com maiores dimensões, pois deste modo diminuem o número de ligações a efetuar em obra. No entanto, o seu grande comprimento condiciona o seu manuseamento durante todo o processo, desde o fabrico, armazenamento, transporte e a montagem em obra. Devem por isso ser previstos tanto em fase de projeto como em fase de obra pontos de elevação e fixação destas peças, principalmente se estiver prevista betonagem complementar *in situ*, nos nós de ligação viga-pilar. [30]

Em edifícios industriais, é comum os pilares acomodarem consolas curtas, para a colocação de estruturas de apoio, como pontes rolantes ou passadiços para infraestruturas aéreas, tais como redes de extinção de incêndios, redes de gás comprimido, redes de água ou eletricidade, necessárias neste tipo de edifícios. Outra das características dos pilares são as suas faces laterais que podem ser

completamente lisas ou com rasgos verticais de cima abaixo, para permitir o encaixe de painéis de parede. [30]

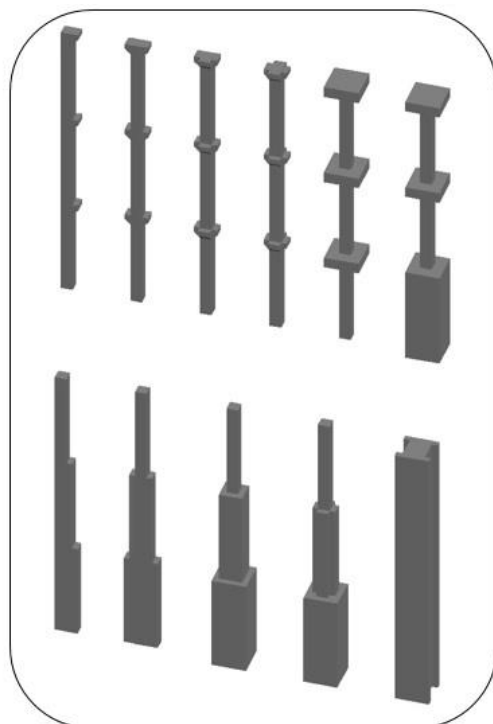


Figura 23 - Algumas soluções possíveis de pilares pré-fabricados

#### 4.1.1.2 Vigas

As vigas pré-fabricadas têm a função de suportar as lajes de pavimento e cobertura, bem como servir de auxílio no travamento de painéis verticais.

Estes tipos de vigas são normalmente pré-esforçadas através de pré ou pós-tensão e apresentam uma diversidade de secções estudadas, sendo as mais comuns as secções “I” “T” e “U”.

Existe uma vasta gama de vigas pré-fabricadas para edifícios, apresentando vários tipos de aplicações, secções e dimensões. Em termos funcionais as vigas podem distinguir-se em:

- ✓ Vigas principais de cobertura
- ✓ Vigas secundárias de cobertura
  - Vigas travessas (madres)
  - Vigas de secção constante para fins múltiplos
  - Vigas em “U” aberto
- ✓ Vigas de piso
- ✓ Vigas caleira

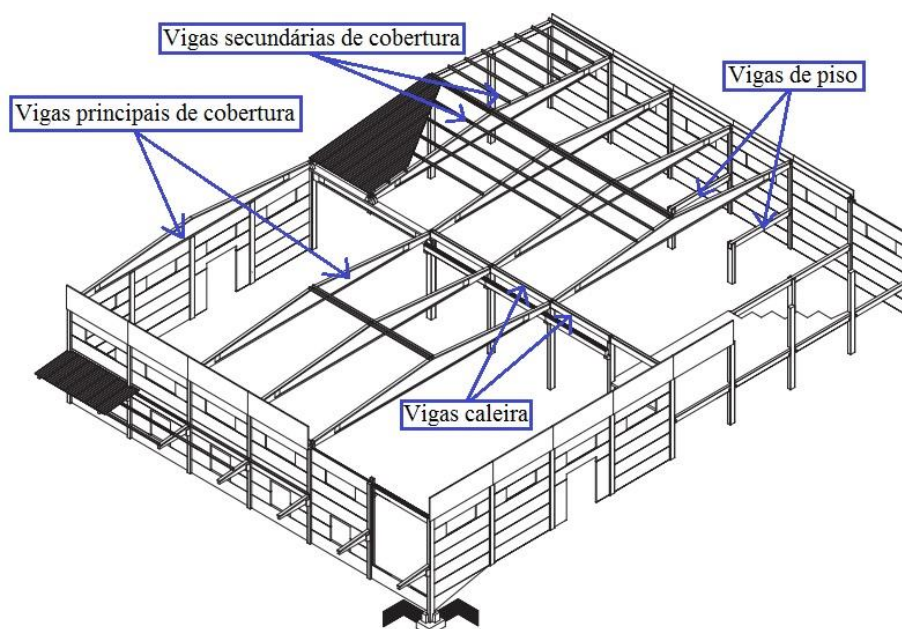
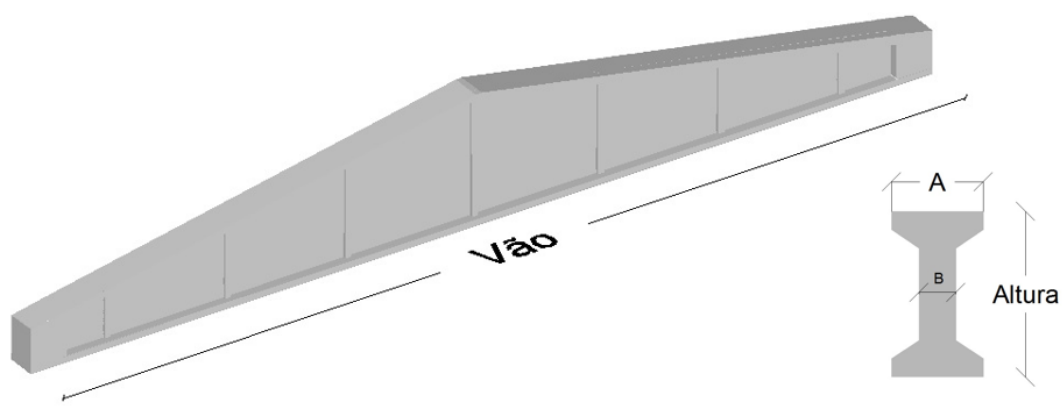


Figura 24 - Vigas pré-fabricadas em edifícios

**Vigas principais de cobertura** (asnas) são vigas delta com secção transversal em I (Fig. 25) destinadas a receber as vigas secundárias de cobertura (madres), normalmente utilizadas em edifícios industriais onde se requer maiores vãos. Podem possuir altura variável com inclinações entre 5 a 12%, de acordo com as dimensões apresentadas na figura 26, ou altura constante. [25]



Figura 25 - Vigas principais de cobertura: Vigas Delta [25]



| A (mm)    | B (mm)    | Altura (mm) | Vão (m) |
|-----------|-----------|-------------|---------|
| 250 – 300 | 80 – 120  | 800 – 1400  | 10 – 25 |
| 300 – 400 | 120 – 150 | 1200 – 2000 | 15 – 25 |
| 300 – 500 | 150 – 250 | 1300 – 2500 | 25 – 40 |

Figura 26 - Dimensões comuns em vigas de cobertura de secção transversal “I” [adaptada de 30]

**Vigas secundárias da cobertura** (madres ou vigas travessas) são vigas pré-esforçadas por pré-tensão, utilizadas com a finalidade de suportar o revestimento da cobertura.

Podem ser vigas travessas (madres) com comprimentos entre 2,5 m a 14 m, e a altura da secção transversal pode variar entre 0,12 e 0,60 m. [31]

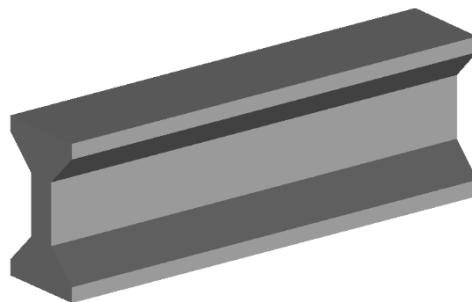


Figura 27 - Madre pré-fabricada pré-esforçada

As vigas secundárias de cobertura podem também ser vigas de secção constante utilizadas como suporte de coberturas e como elementos de travamento, podendo também ser aplicadas em grandes vãos (entre 10 a 35 m), em pavimentos com cargas elevadas ou em casos em que seja necessário suportar pontes rolantes. Podem adotar diferentes geometrias como as representadas na figura 28. [30]

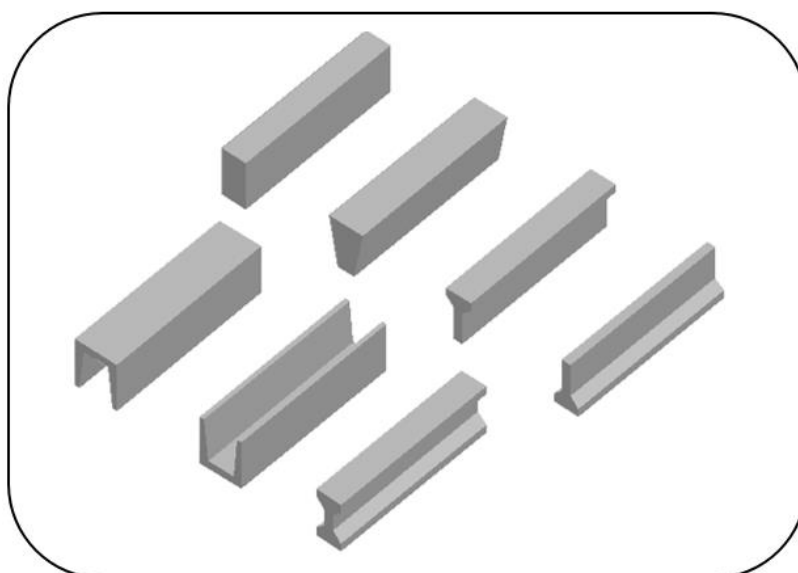


Figura 28 - Exemplos de vigas de secção constante

**Vigas de pisos** são vigas que se apoiam diretamente sobre os pilares ou indiretamente, através de consolas curtas, utilizadas como apoio de lajes de pisos intermédios, podendo funcionar simultaneamente como elementos de travamento das estruturas.

Estas vigas permitem vencer vãos entre 4 e 20 m e a sua secção transversal varia em função do fabricante, da dimensão dos vãos, das cargas associadas e dos elementos de ligação, sendo as mais comuns as secções transversais retangulares em L e T invertido e soluções variadas de vigas largas com abas laterais para apoio dos painéis da laje. [25]

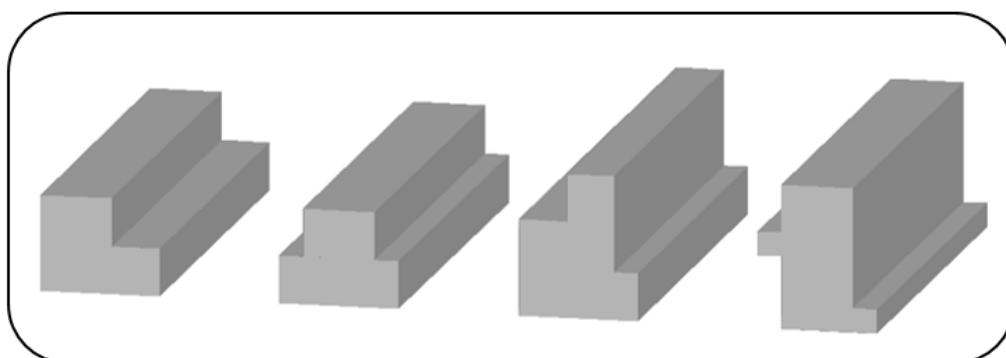


Figura 29 - Exemplos de vigas com abas laterais

Vigas caleira são vigas que podem ser apoiadas no topo dos pilares exteriores ou interiores, utilizadas com o objetivo de drenar as águas pluviais, descarregando-as por meio de tubos de queda, garantindo também o travamento dos pilares da estrutura. São normalmente de secção vazada.

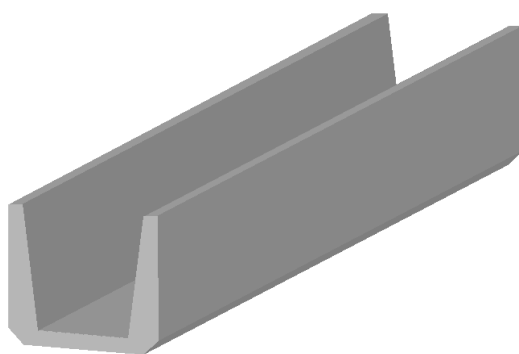


Figura 30 - Exemplo de viga caleira pré-fabricada

#### 4.1.2 Sistemas de Pavimentos e Coberturas

Este tipo de sistema engloba estruturas constituídas por vários tipos de laje pré-fabricadas, montadas de forma a distribuir a carga concentrada e transferir as forças horizontais para os elementos estruturais verticais. São utilizados em todos os tipos de construção e em combinação com outros materiais, como estruturas metálicas ou de betão executado *in situ*.

Este sistema necessita que as lajes tenham extensão suficiente para cobrir vão de uma fachada a outra do edifício, possibilitando a ausência de pilares interiores.

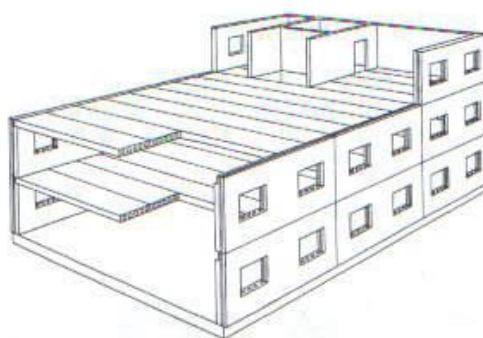


Figura 31 - Edifício de com grandes vãos [27]

Neste tipo de sistema é possível aplicar uma série de lajes, das quais se destacam as seguintes: [29]

- ✓ Lajes de vigotas pré-esforçadas;
- ✓ Pré-lajes;
- ✓ Lajes alveolares;
- ✓ Lajes em T ou  $\pi$  (duplo T);
- ✓ Lajes Minos.

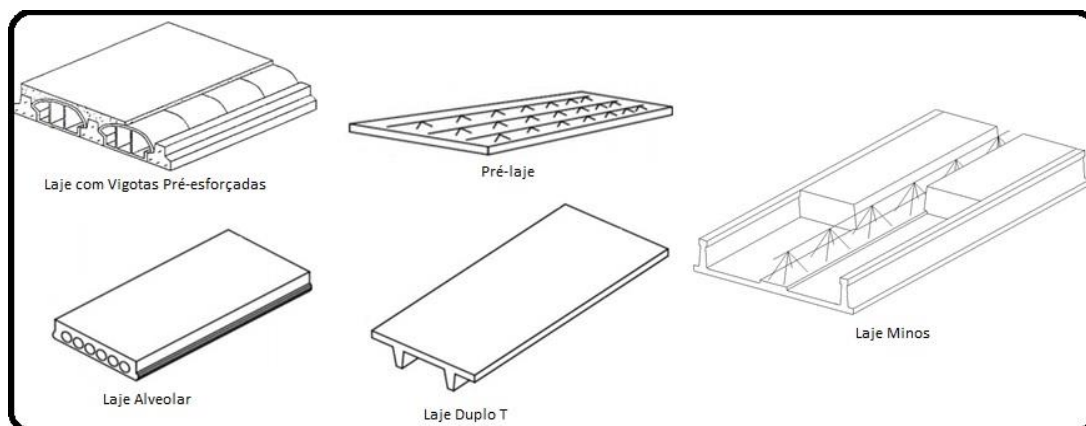


Figura 32 - Lajes Pré-fabricadas

#### 4.1.2.1 Lajes de Vigotas Pré-esforçadas

As lajes de vigotas pré-esforçadas são constituídas por vigotas pré-fabricadas de betão pré-esforçado, onde assentam blocos de cofragem, permitindo o aligeiramento do pavimento. Esta solução é aplicada habitualmente em estruturas betonadas *in situ*, em que o conceito de pré-fabricação se restringe apenas às vigotas e aos blocos de aligeiramento.

Existem alguns cuidados a ter em conta na sua execução, tais como a preocupação de garantir o bom nivelamento dos apoios, montar um escoramento provisório para apoio das vigotas, colocar os blocos de cofragem de modo a permitir a execução de tarugos de contraventamento e maciçar a laje junto aos apoios deixando um intervalo (cerca de 40 cm) entre o início das vigotas e o primeiro bloco de aligeiramento. [32]

##### 4.1.2.1.1 Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Lajes de Vigotas Pré-esforçadas de Betão

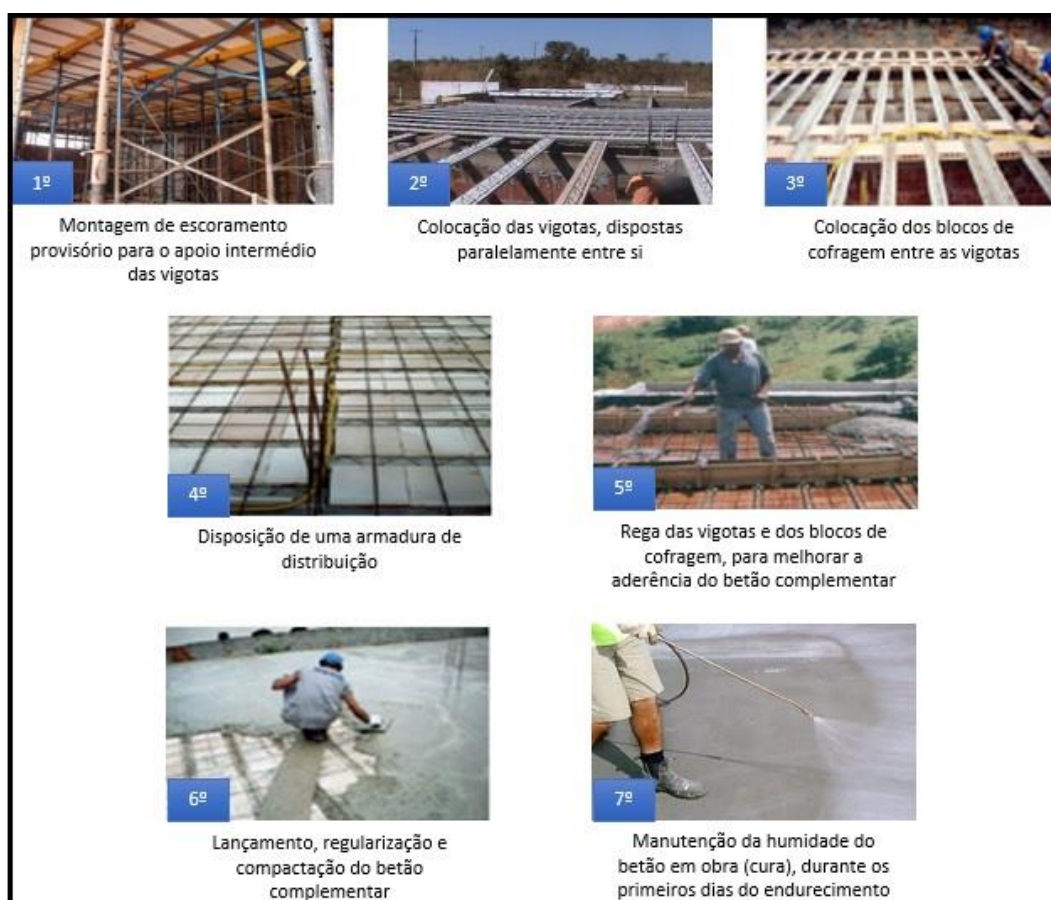


Figura 33 - Sequência de aplicação de lajes de vigotas pré-esforçadas (adaptado de [33]; [34])

### 4.1.2.1.2 Vantagens da Aplicação de Vigotas de Betão Pré-esforçado em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Possuem menor peso próprio, o que permite o aligeiramento das estruturas de suporte de cargas verticais do edifício;
- ✓ Necessitam apenas de cofragem dos tarugos;
- ✓ Dispensam o uso de cofragens contínuas, existindo apenas a montagem de escoramentos das vigotas;
- ✓ São de simples e rápida montagem;
- ✓ Permitem economizar mão-de-obra de execução;
- ✓ Por integrarem na sua composição elementos vazados, proporcionam melhor isolamento térmico entre andares.

### 4.1.2.1.3 Desvantagens da Aplicação de Vigotas de Betão Pré-esforçado em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Possuem reduzida capacidade de isolamento a ruídos aéreos;
- ✓ Apresentam pior comportamento em caso de incêndio;
- ✓ A estrutura apresenta pior contraventamento quando sujeita a ações horizontais.

## 4.1.2.2 Pré-lajes

As pré-lajes são constituídas por lajes maciças executadas a partir de pré-lajes de betão armado ou pré-esforçado, que servem normalmente de cofragem a uma camada de betão complementar com função resistente. São aplicadas em edifícios de habitação e serviços.

Estas lajes na fase de execução possuem fios de pré-esforço ou armadura ordinária, armadura de distribuição e uma armadura disposta em treliça (“treillis”), enquanto que na fase final também dispõem de uma armadura superior de continuidade, estas armaduras têm como função aumentar a rigidez e resistir durante o transporte, montagem e betonagem do betão complementar, melhorando a ligação com o mesmo. [32]

## Capítulo 4

### 4.1.2.2.1 Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Pré-lajes



Figura 34 - Sequência de aplicação de pré-lajes (adaptado de [35]; [36])

### 4.1.2.2.2 Vantagens da Aplicação de Pré-lajes em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Necessitam de pequena quantidade de escoramento e dispensam o uso de uma cofragem contínua;
- ✓ Requerem menos mão-de-obra, simplificando o processo construtivo e tornando-o mais rápido;
- ✓ Reduzem a quantidade de armadura a colocar em obra;
- ✓ Permitem um elevado controlo de qualidade do betão e do aço utilizados na fabricação das pré-lajes;
- ✓ Garantem um bom contraventamento em relação a ações sísmicas.

### 4.1.2.2.3 Desvantagens da Aplicação de Pré-lajes em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Poderão surgir problemas na interface betão complementar / pré-laje, devido a eventuais ações mecânicas, vibrações ou efeitos resultantes de variações térmicas acentuadas;
- ✓ A sua execução implica cuidados particulares de forma a garantir a ligação entre a pré-laje e o betão complementar;
- ✓ Pode ocorrer eventual fissuração nas zonas de ligação entre pré-lajes, quando existam revestimentos de teto contínuos;
- ✓ A rentabilidade da solução está associada à repetição de vãos.

### 4.1.2.3 Lajes Alveolares

As lajes alveolares (ou alveoladas) são constituídas por painéis pré-fabricados de betão pré-esforçado, dispostos lado a lado, aligeirados por meio de alvéolos longitudinais.

Por permitirem a execução de pavimentos que suportam cargas elevadas e diferentes sobrecargas de utilização, podem ser aplicadas em edifícios habitacionais, comerciais e/ou de serviços, escolares, desportivos, industriais, salas de espetáculos, igrejas, garagens, auto-silos e pontões.

#### 4.1.2.3.1 Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Lajes Alveolares

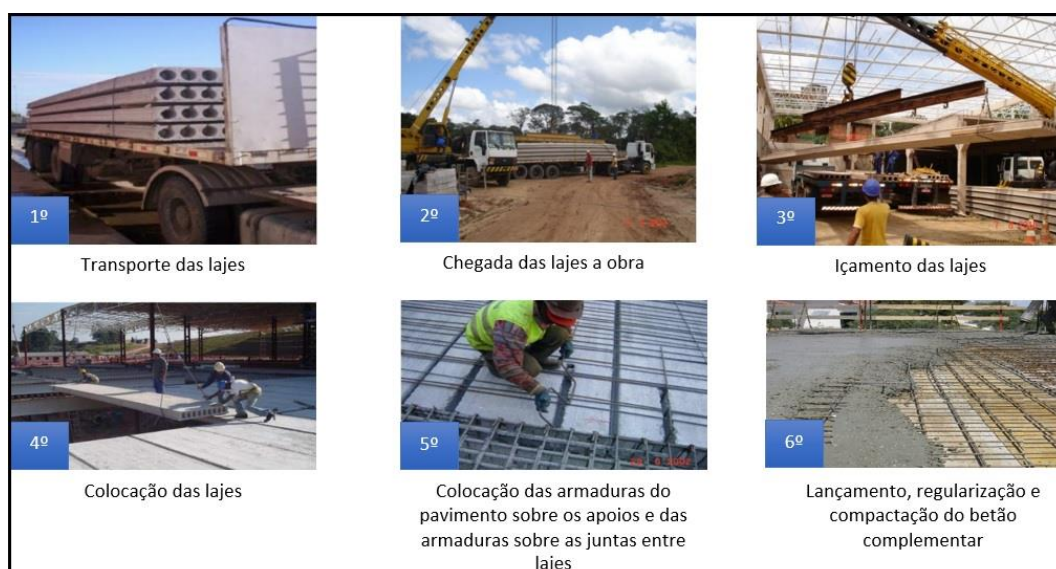


Figura 35 - Sequência de aplicação de lajes alveolares (adaptado de [37])

### 4.1.2.3.2 Vantagens da Aplicação de Lajes Alveolares em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Por serem autoportantes, não necessitam de escoramentos para a sua montagem;
- ✓ Permitem vencer grandes vãos, mesmo com cargas de utilização elevadas;
- ✓ Fáceis de transportar, uma vez que somente os painéis e o aço para a armadura de distribuição deverão ser transportados e recebidos na obra;
- ✓ Têm elevada resistência a agentes atmosféricos;
- ✓ Permitem reduzir as atividades em obra, devido ao facto de possibilitarem a eliminação quase total de serviços de carpintaria, armação e revestimentos;
- ✓ Indicadas para obras realizadas em estaleiros reduzidos, por permitirem executar os trabalhos com menor material.

### 4.1.2.3.3 Desvantagens da Aplicação de Lajes Alveolares em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Possuem reduzida capacidade de isolamento a ruídos aéreos;
- ✓ Apresentam pior comportamento em caso de incêndio;
- ✓ Têm limitações relativamente ao posicionamento de cargas concentradas suspensas;
- ✓ Requerem equipamento pesado para a colocação, normalmente com recurso a gruas;
- ✓ Existência de juntas aparentes.

### 4.1.2.4 Lajes Duplo T

As lajes duplo T são lajes pré-fabricadas de betão, com excelente acabamento inferior, dispensando revestimento.

Apresentam-se como a solução ideal para pavimentos com grandes vãos sujeitos a elevadas sobrecargas. As suas características geométricas, associadas a diferentes níveis de pré-esforço, proporcionam uma elevada capacidade resistente [38]. No momento da sua fabricação é colocada nas lajes uma armadura disposta em T (Fig. 36) para o pavimento resistir às cargas exercidas sobre ele. As

várias lajes são posteriormente ligadas por conectores soldados e por uma camada de betão armado, o que confere à estrutura um acréscimo de resistência e um melhor funcionamento global.



Figura 36 - Disposição de armaduras das lajes duplo T

Muito utilizadas quando se pretende dimensionar lajes com grandes vãos, podem ser aplicadas em pavimentos e coberturas de parques de estacionamento, edifícios comerciais, fábricas e armazéns, estruturas de instalações desportivas e de lazer, hospitais, escolas e muros de suporte.

As lajes duplo T quanto à sua aplicação em obra, seguem a mesma linha de raciocínio que as pré-lajes descritas anteriormente.

#### 4.1.2.4.1 Vantagens da Aplicação de Lajes Duplo T em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)




- ✓ Permitem vencer grandes vãos;
- ✓ Permitem obter pavimentos mais aligeirados do que os habitualmente usados;
- ✓ Permitem conduzir com grande facilidade instalações elétricas e tubos de água no sentido das lajes, nos vãos existentes entre as nervuras;
- ✓ Por serem autoportantes, não necessitam o uso de escoramentos e admitem cargas imediatamente após a montagem;
- ✓ Permitem uma grande flexibilidade na modulação de edifícios.

4.1.2.4.2 Desvantagens da Aplicação de Lajes Duplo T em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Só resistem praticamente a momentos positivos;
- ✓ Têm reduzida capacidade de resistir a sismos e a ação do fogo;
- ✓ Possuem reduzida capacidade de isolamento acústico.

A tabela 9 indica as dimensões mais comuns dos vários tipos de pavimentos pré-fabricados descritos anteriormente.

Tabela 9 - Dimensões e características das lajes de pavimentos pré-fabricados (adaptada de [39])

| CORTE ESQUEMÁTICO   | TIPO                                     | VÃO (m) | ESPESSURA (mm) | LARGURA (mm) | PESO/m <sup>2</sup> (KN/m <sup>2</sup> ) |
|---|--|---------|----------------|--------------|--|
|  | vigotas e abobadihas                     | 7       | 200-300        | 200-600      | 1.8-2.4                                  |
|  | pré-lajes                                | 7       | 100-200        | 600-2400     | 2.4-4.8                                  |
|  | elementos vazados em betão pré-esforçado | 20      | 120-800        | 1200         | 2.0-7.5                                  |
|  | elementos pré-esforçado duplo T          | 24(30)  | 200-800        | 1200-2400    | 2.0-5.0                                  |

4.1.2.5 Lajes Minos

As lajes minos constituem uma ótima solução para a construção de lajes planas, podendo ser utilizadas em moradias, edifícios habitacionais, comerciais e parques de estacionamento. [51]

Os pavimentos constituídos por este tipo de lajes, baseiam-se na colocação de pranchas pré-fabricadas dispostas lado a lado. Estas pranchas podem ter até 1,20 m de largura e vencer vãos superiores a 10 m. [51]

Sendo a altura mínima do elemento pré-fabricado 0,22 m, a espessura deste tipo de laje pode variar entre 0,26 m a 0,40 m com contabilização de uma camada de betão complementar. [45].

## Construção com Elementos Pré-fabricados

A zona interior da laje é preenchida por um material de aligeiramento (poliestireno expandido), podendo também ser utilizada para a passagem de tubagens caso seja necessário.

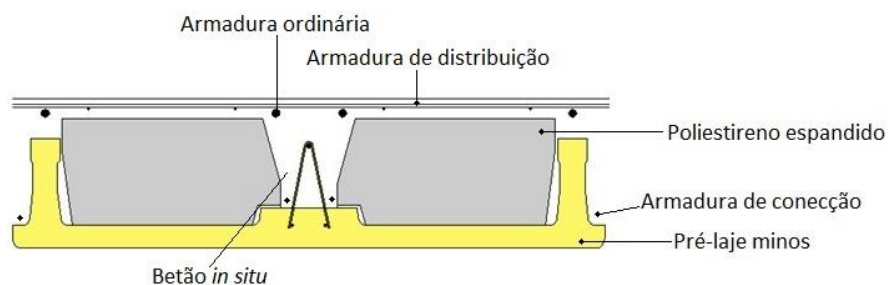


Figura 37 - Constituição de uma laje minos

### 4.1.2.5.1 Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Lajes Minos



Figura 38 - Sequência de aplicação de lajes minos (adaptado de [51]; [52])

### 4.1.2.5.2 Vantagens da Aplicação de Lajes Minos em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Apresenta menor coeficiente de transmissão térmica, o que possibilita aplicação de isolamento térmico com menor espessura;
- ✓ Sem ocorrência de desperdícios, o que proporciona maior limpeza na obra;
- ✓ Possibilita atingir grandes vãos (superiores a 10 m);
- ✓ Apresenta um peso reduzido, o que facilita a sua elevação;
- ✓ Possibilitam uma disponibilidade, uma vez que podem ser fabricadas de 5 cm em 5 cm, de acordo com as dimensões exatas da obra.

### 4.1.2.5.3 Desvantagens da Aplicação de Lajes Minos em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Poderão surgir problemas na interface betão complementar / pré-laje, devido a eventuais ações mecânicas, vibrações ou efeitos resultantes de variações térmicas acentuadas;
- ✓ Cuidados especiais no transporte e armazenamento das peças.

## 4.1.3 Sistemas de Paredes Resistentes

Este sistema estrutural apresentou uma grande expansão nos anos 50, com maior incidência nos países do Leste da Europa, face à necessidade de construção em grande escala, seguindo um plano normalizado e com reduzidos custos de execução. Ainda hoje este método construtivo é amplamente utilizado em países em expansão, como é o caso dos Emirados Árabes Unidos [44]. Neste país, está em curso um projeto que prevê a construção de mais de 13 000 moradias com recurso a este método construtivo, tirando partido da rapidez de execução associada às vantagens da construção modular que possibilita minimizar o custo global da obra.



Figura 39 - Construção sequencial de 2000 moradias na área de Al Falah, Abu Dhabi, com recurso a sistemas de paredes resistentes [40]

Esta técnica construtiva baseia-se na conceção de painéis produzidos em fábrica e posteriormente transportados para o local de implantação, que, quando montados, dão origem à estrutura tridimensional do edifício.

Neste sistema as paredes resistentes podem surgir isoladamente ou agrupadas em núcleos resistentes constituídos, normalmente, por núcleos de escadas e de elevadores, podendo ainda funcionar como elemento único da superestrutura, resistindo às cargas atuantes na ausência de vigas e pilares.

Nestes painéis podem ser feitas aberturas para portas e janelas assim como negativos para passagem de tubagens para instalação das especialidades.



Figura 40 - Moradia executada em sistemas de paredes resistentes [41]

#### 4.1.3.1 Metodologia Utilizada para a Aplicação em Obra de Painéis Pré-fabricados de Betão



Figura 41 - Sequência de aplicação de painéis pré-fabricados (adaptado de [42]; [43])

#### 4.1.3.2 Vantagens da Aplicação do Sistema de Paredes Resistentes Pré-fabricadas em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

**De conceção:** [44]

- ✓ Liberdade conceptual: é possível uma grande diversidade na especificidade do projeto, flexibilidade de conceção da cor, da textura e do tamanho, de modo a obter as expressões estéticas desejadas;
- ✓ Plasticidade: o betão pré-fabricado é um material de qualidade com plasticidade inicial incrivelmente receptiva às necessidades criativas do projetista;
- ✓ Controlo de qualidade: o betão pré-fabricado produzido em fábrica permite a existência de um controlo rigoroso. Permite a inspeção da superfície acabada antes da sua instalação.

**Funcionais:** [44]

- ✓ Invólucro eficiente: a alta densidade e o bom controlo do ruído, possíveis com a construção em painéis de betão pré-fabricado, fazem com que estes elementos sejam estanques ao ar e à água, embora possuam mais juntas que uma parede betonada *in situ*;
- ✓ Propriedades térmicas: os painéis de betão pré-fabricado podem ser concebidos de modo a proporcionar um alto grau de eficiência energética. Podem ser concebidas as paredes

## Construção com Elementos Pré-fabricados

com características térmicas específicas para cada face da estrutura, de modo a satisfazer a sua orientação solar e o ambiente natural.

- ✓ Isolamento acústico: um controlo sonoro eficiente e económico é obtido através da densidade do betão pré-fabricado;
- ✓ Durabilidade: os painéis em betão pré-fabricado oferecem grandes qualidades de resistência ao desgaste por acção do tempo, e de resistência à corrosão;
- ✓ Manutenção reduzida ou inexistente: a pré-fabricação de painéis fornece um serviço com um mínimo de patologias possível. Os painéis apresentam superfícies densas e limpas que minimizam a acumulação de sujidade e bactérias.

### **Da construção em fábrica: [44]**

- ✓ Economia de tempo: a pré-fabricação combinada com a rápida montagem poupa um tempo precioso na construção total. Enquanto os painéis estão a ser produzidos, as fundações e os trabalhos *in situ* da estrutura desenvolvem-se, permitindo a entrega e a montagem dos painéis no momento preciso e pré-determinado no plano de trabalhos. Os atrasos nas betonagens devidos ao tempo necessário para a cura inicial do betão e para a montagem e remontagem das cofragens podem ser eliminados;
- ✓ Montagem económica: no local de fabrico o tempo de produção é minimizado, e a montagem é possível independentemente das condições meteorológicas;
- ✓ Edifício finalizado mais rapidamente: o uso de painéis pré-fabricados facilita o acesso mais breve ao edifício e minimiza os atrasos causados pelo mau tempo, permitindo haver construção durante todo o ano. O acabamento mais rápido da obra reduz os custos financeiros temporários e tem como resultados *cash-flows* antecipados;
- ✓ Planificação dos trabalhos: os problemas de sobreposição dos trabalhos diminuí com a utilização de painéis pré-fabricados. Isto economiza dispendiosos trabalhos na obra e acelera a construção;
- ✓ Eliminação de cofragens: os painéis pré-fabricados permitem eliminar a necessidade de cofragens temporárias.

#### 4.1.3.3 Desvantagens da Aplicação do Sistema de Paredes Resistentes Pré-fabricadas em relação às Lajes Tradicionais (Maciças de Betão Armado)

- ✓ Comportamento sensível ao colapso progressivo;
- ✓ Elevada sensibilidade às deformações impostas;
- ✓ Comportamento pouco dúctil na rutura.

#### 4.1.4 Sistema de Parede de Fachada

As paredes pré-fabricadas utilizadas em fachadas, podendo ser formadas por painéis maciços (com uma camada) ou painéis tipo sanduíche (com duas camadas) e dependendo das suas funções dentro da edificação, podem ser projetados como sistemas portantes ou sistemas não-portantes. Apresentam-se em todo o tipo de formato e execuções, com ou sem função estrutural.

Os sistemas de painéis portantes para fachadas suportam cargas verticais dos pavimentos superiores. Estes sistemas também podem contribuir para a estabilidade horizontal do edifício.

Normalmente eles são executados com duas camadas de betão e uma camada intermédia composta por um isolante térmico (painel sanduíche).

A fachada também pode ser constituída por um painel portante tipo “spandrel”, e nesse caso, os painéis atuam como vigas, transferindo as cargas verticais para os pilares. [27]

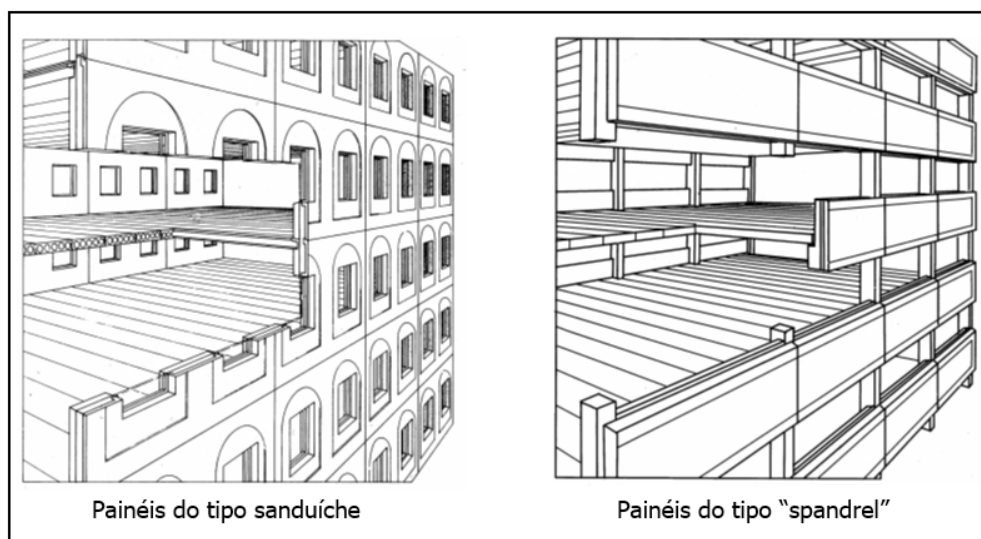


Figura 42 - Painéis portantes [27]

Os painéis não portantes (fachadas arquitetônicas de betão) têm apenas a função de revestimento e acabamento da estrutura, não resistindo desta forma a esforços solicitantes. Podem ser fixados individualmente na estrutura onde os pilares e as vigas suportam o peso próprio dos mesmos, ou os painéis podem ser autoportantes, e desta forma são apoiados uns sobre os outros, formando uma parede em cortina, sendo que as ligações entre os painéis e a estrutura neste caso possuem apenas a função de travar horizontalmente a parede da fachada. [30]

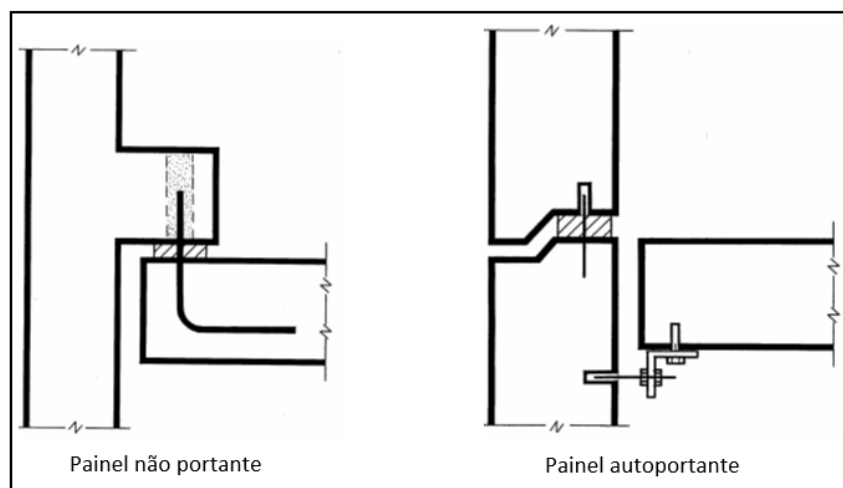


Figura 43 - Princípio de fachadas não portante e autoportante [27]

### 4.1.5 Sistema de Estruturas Celulares

As estruturas celulares são usadas como elementos singulares que podem ou não integrar parcelas constituintes de edifícios, como casas de banho, cozinhas, garagens, entre outros (Fig. 44).

Cerca de 80 a 95% do processo construtivo é efetuado em fábrica, sendo as unidades posteriormente transportadas para o local de implantação para dar lugar ao processo de montagem e ligação das mesmas, entre si e a restante estrutura previamente preparada, formando assim o edifício.

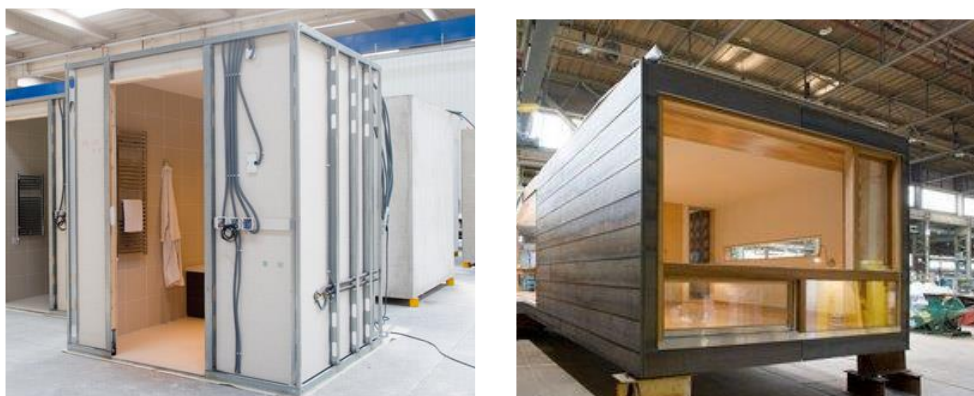


Figura 44 - Compartimentos pré-fabricados em fábrica [22]

#### 4.1.5.1 Vantagens da Aplicação do Sistema de Estruturas Celulares

- ✓ Possibilidade de integrar todos os acabamentos e equipamentos necessários ao seu funcionamento;
- ✓ Rapidez de montagem;
- ✓ Industrialização da fabricação.

#### 4.1.5.2 Desvantagens da Aplicação do Sistema de Estruturas Celulares

- ✓ Não podem apresentar dimensões muito avultadas, devido a limitações impostas pelo transporte;
- ✓ Apresenta menor flexibilidade arquitetónica.

## 4.2 LIGAÇÃO ENTRE ELEMENTOS ESTRUTURAIS PRÉ-FABRICADOS

A construção pré-fabricada é sujeita, de uma forma geral, ao mesmo tipo de ações que uma construção tradicional, pelo que as características estruturais que se exigem a este tipo de estrutura são as mesmas que no caso de uma estrutura executada *in situ*, embora no que diz respeito a elementos pré-fabricados, estes devem ser dimensionados tendo em conta a fase de transporte, armazenamento e montagem.

No entanto existem aspetos pertinentes relacionados com as ligações entre elementos pré-fabricados.

A conceção e dimensionamento das ligações, segundo Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI), devem satisfazer às seguintes exigências estruturais: [45]

- ✓ Resistência mecânica: todas as ligações entre os elementos estruturais deverão resistir de forma apropriada aos efeitos de ações que se farão sentir durante o tempo de vida útil da estrutura;
- ✓ Ductilidade: em termos gerais pretende-se que a estrutura apresente capacidade de permitir deformações antes da rotura. No caso de estruturas pré-fabricadas esta ductilidade decorre tanto dos seus elementos como das suas ligações;
- ✓ Durabilidade: deve-se ter em atenção que todos os elementos da estrutura, em especial, as ligações, deverão apresentar características de durabilidade adequada de acordo com a

exposição ambiental; em particular, a proteção contra a corrosão de elementos metálicos expostos deverá ser assegurada através do seu envolvimento em betão (ou argamassa) ou através do tratamento anticorrosivo das superfícies expostas;

- ✓ Resistência ao fogo: as estruturas pré-fabricadas deverão apresentar uma resistência ao fogo equivalente à das estruturas betonadas *in situ*; em alguns casos poderá ser necessário envolver os elementos metálicos aparentes (cachorros, chapas de ligação, etc.) em betão ou em outro material que reúna as características de isolamento requeridas;
- ✓ Estabilidade e equilíbrio: estas exigências estruturais referem-se não só ao comportamento definitivo da estrutura mas também ao comportamento provisório das diferentes fases de montagem.
- ✓ Normalização: um sistema de ligação normalizado torna-se benéfico, uma vez que permite a escolha de uma solução padrão economizando tempo e eliminando possíveis erros de cálculo, além de criar uma repetição para o trabalho diminuindo a probabilidade de erros na mão-de-obra. Os elementos necessários para uma ligação padronizada também podem ser mantidos em stock na fábrica.
- ✓ Simplicidade: um sistema de ligação simples é importante para conseguir um detalhe de ligação económico e menos suscetível de ser executado incorretamente. Consequentemente todos os arranjos de conexão devem consistir no menor número possível de peças não incorporadas no elemento.
- ✓ Movimento: As ligações não devem dificultar os movimentos necessários à estrutura, na maior parte dos casos devido a deformação das vigas e lajes, devido a cargas e/ou forças de pré-esforço e/ou variações de temperatura.

### 4.2.1 Tipos de Ligações

Existe uma vasta diversidade de soluções no que diz respeito a ligações entre elementos pré-fabricados.

O tipo de ligações existentes entre os elementos é uma das formas de classificar uma estrutura pré-fabricada.

## Capítulo 4

Existem quatro possíveis tipos de classificações no que diz respeito as ligações: [6]

- ✓ Quanto ao tipo de elementos ligados;
- ✓ Quanto aos esforços transmitidos;
- ✓ Quanto ao processo de execução;
- ✓ Quanto ao comportamento das ligações à flexão.

A tabela 10 apresenta as características das ligações dependendo do tipo de classificação.

Tabela 10 - Classificação das ligações

| Classificação         | Quanto ao tipo de elementos ligados  | Quanto aos esforços transmitidos                    | Quanto ao processo de execução  | Quanto ao comportamento das ligações à flexão                              |
|-----------------------|--|---|---|--|
| <b>Caraterísticas</b> | Pilar – Fundação<br>Pilar – Pilar<br>Pilar – Viga<br>Viga – Viga<br>Viga – Parede<br>Laje – Viga<br>Laje – Laje<br>Laje – Parede<br>Parede – Fundação<br>Parede – Parede | Tração<br><br>Compressão<br><br>Flexão<br><br>Corte | Aparafusadas<br><br>Atrito<br><br>Coladas<br><br>De continuidade betonadas em obra<br><br>Pré-esforçada<br><br>Soldadas | Simplemente apoiadas<br><br>Articuladas<br><br>Semi-rígidas<br><br>Rígidas |

### 4.2.1.1 Pilar – Fundação

As ligações pilar – fundação dizem respeito às ligações entre as extremidades inferiores dos pilares e as fundações.

A ligação entre estes dois elementos pode ser entre peças pré-fabricadas ou na maioria dos casos entre pilares pré-fabricados e fundações betonadas *in situ*.

### 4.2.1.1.1 Ligação por Encaixe

A ligação entre o pilar e a fundação por meio de encaixe é uma das ligações mais correntes em pré-fabricação. Nesta ligação o pilar é inserido num pedestal executado na fundação; o seu correto posicionamento é assegurado pela colocação de calços e cunhas de madeira entre as faces laterais do pilar e o pedestal; por fim o espaço livre entre o pilar e a superfície interior do pedestal é preenchida com argamassa não retrátil.

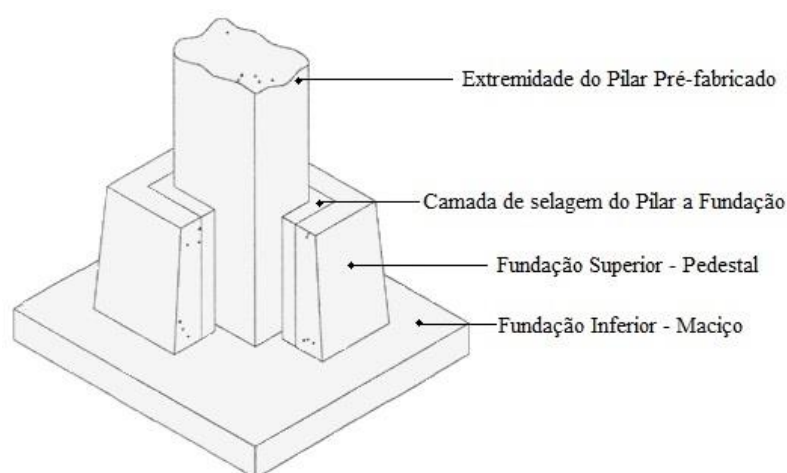


Figura 45 - Ligação Pilar – Fundação por encaixe [46]

#### Vantagens:

- ✓ Facilidade na montagem;
- ✓ Rapidez de execução;
- ✓ Permite a dispensa de escoramento provisório.

#### Inconvenientes:

- ✓ Necessidade de executar cavidades profundas (o que dificulta o correto preenchimento da cavidade entre o pedestal e o pilar) em edifícios altos;
- ✓ Custo elevado

#### 4.2.1.1.2 Ligação por Armaduras Salientes

A ligação com armaduras salientes do pilar (Fig. 46) ou da fundação (Fig. 47), consiste na introdução das armaduras em aberturas (bainhas) presentes no pilar ou na fundação que posteriormente são seladas por injeção de uma argamassa, normalmente designada por “grout”.

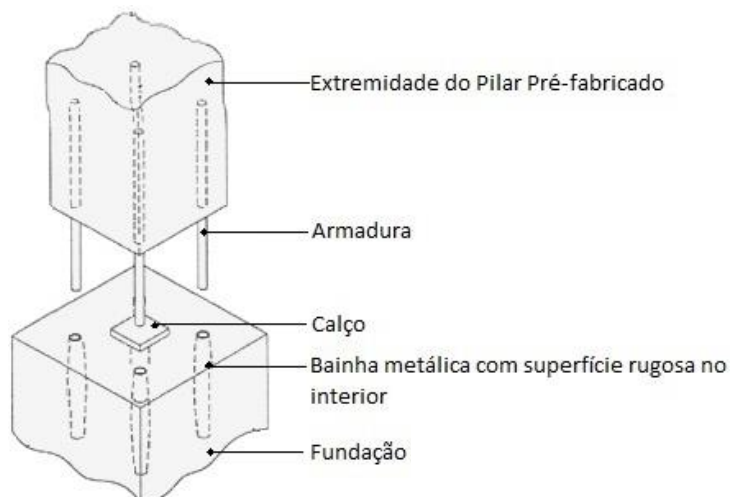


Figura 46 - Ligação Pilar – Fundação com armaduras salientes no Pilar [46]



Figura 47 - Ligação Pilar – Fundação com armaduras salientes na Fundação [46]

Vantagens:

- ✓ Existência da continuidade de momentos na base do pilar;
- ✓ Possibilidade de corrigir desvios de geometria.

Inconvenientes:

- ✓ Necessidade de utilização de escoramentos;
- ✓ Ocorrência de danos nas armaduras salientes durante a montagem ou transporte;
- ✓ Necessidade de limpeza das bainhas antes da selagem com “grout”;
- ✓ Sensibilidade a erros de posicionamento com resolução complexa.

### 4.2.1.1.3 Ligação por Conexão de Varões

Neste tipo de ligação parte da armadura do pilar fica saliente, sendo conectada, normalmente por soldadura ou com ligadores, à armadura saliente da fundação. Posteriormente é feita a betonagem *in situ* do local da conexão das armaduras.

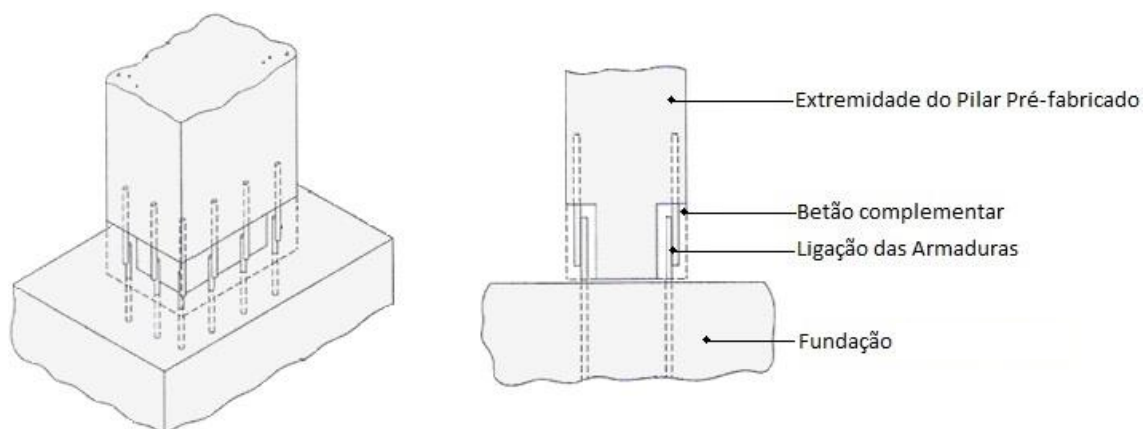


Figura 48 - Ligação Pilar – Fundação por conexão de varões [46]

Vantagens:

- ✓ Ideal para edifícios de grande altura;
- ✓ Capacidade resistente elevada.

Inconvenientes:

- ✓ Dificuldade de montagem;
- ✓ Necessidade de betonagem complementar no local de ligação das armaduras.

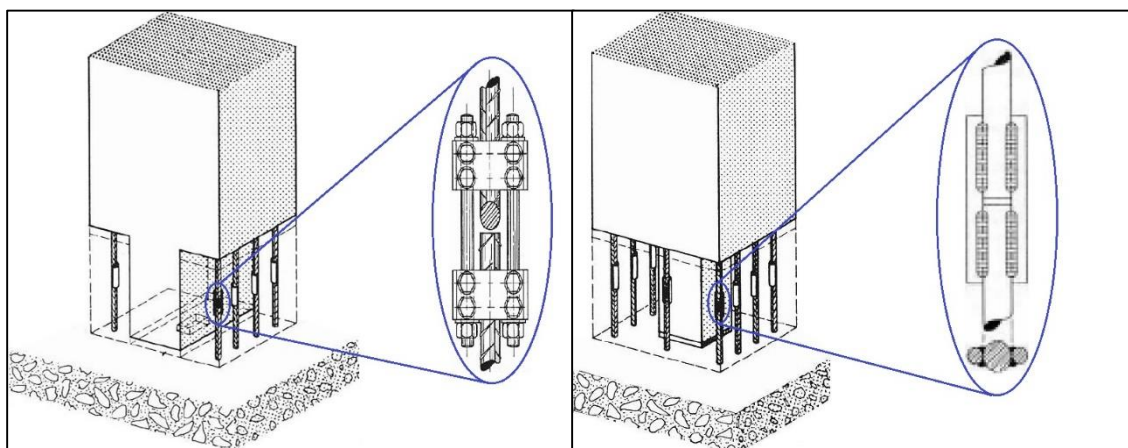


Figura 49 - Tipos de ligadores entre varões [46]

#### 4.2.1.1.4 Ligação por Chapas Aparafusadas

A ligação entre a fundação e o pilar é feita através de varões roscados embebidos na fundação que depois são aparafusados a uma chapa de aço presente na base do pilar que se encontra ligada as armaduras longitudinais do mesmo. Por fim a chapa e os varões roscados deverão ser tratados ou rebocados com argamassa não retrátil de forma a limitar o risco de corrosão do aço.

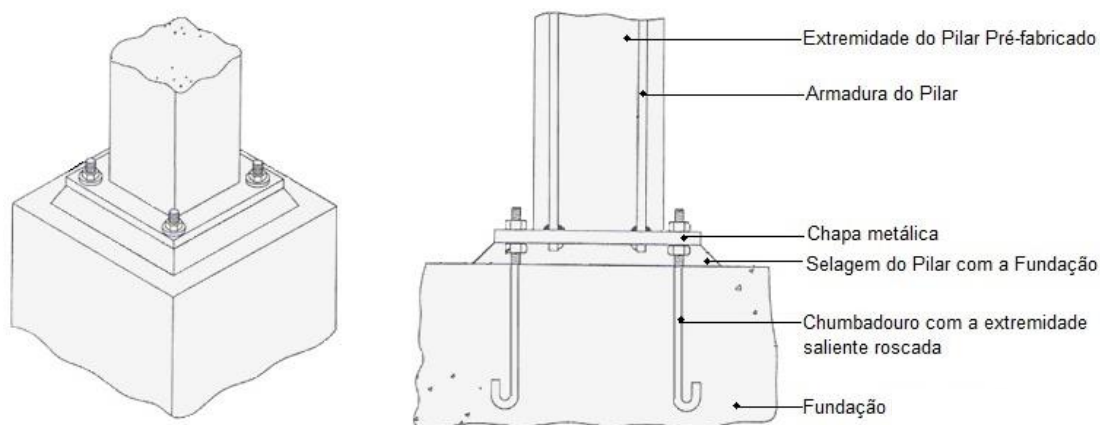


Figura 50 - Ligação Pilar – Fundação por chapa aparafusada [46]

Vantagens:

- ✓ Execução simples;
- ✓ Possibilidade de se efetuar o nivelamento através de um sistema de porcas e contraporcas.

Inconvenientes:

- ✓ Apresenta menor rigidez que outras soluções (por encaixe e por meio de armaduras salientes);
- ✓ Necessidade de tratamento contra agentes atmosféricos.

O pilar pode ser aparafusado à fundação sem o auxílio de uma chapa como mostra a figura 51.

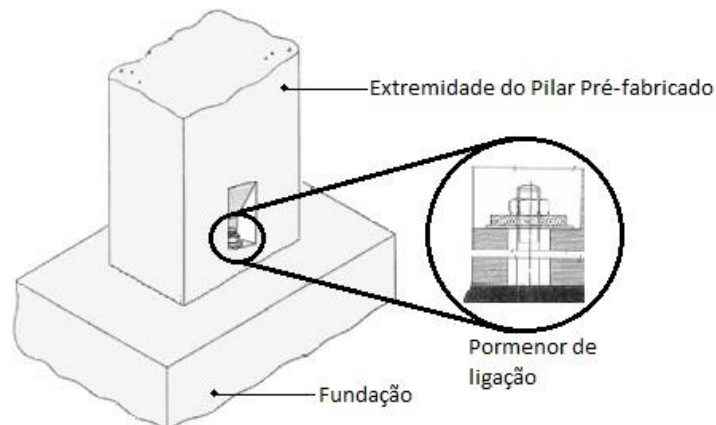


Figura 51 - Ligação Pilar - Fundação por parafusos [46]

#### 4.2.1.1.5 Ligação por Pós-tensão

Para a execução desta técnica é necessário a presença de bainhas no pilar pré-fabricado, onde são introduzidos os cabos de pré-esforço que posteriormente são tracionados, cabos esses que estão fixos no maciço de fundação.

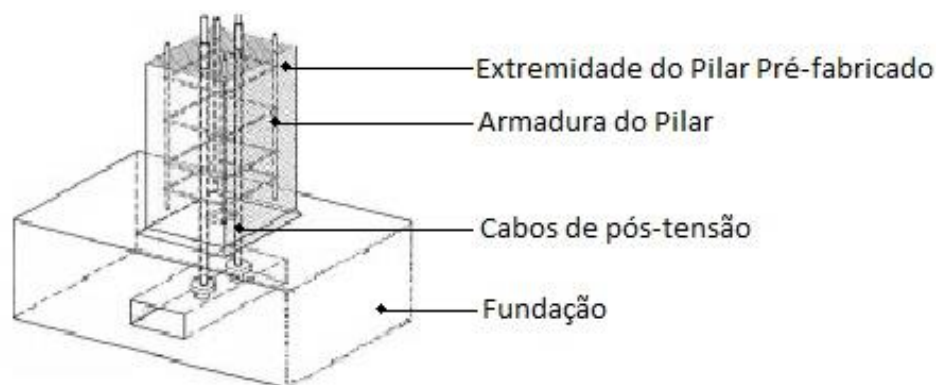


Figura 52 - Ligação Pilar – Fundação por pós-tensão [46]

Vantagens:

- ✓ A utilização de cabos de pré-esforço permite reduzir a área de armadura.

Inconvenientes:

- ✓ Processo caro.

#### 4.2.1.1.6 Ligação por Rótula

A ligação por rótula consiste na colocação de uma rótula na superfície superior da fundação que irá receber o pilar pré-fabricado. O pilar é simplesmente apoiado sobre o elemento de apoio.

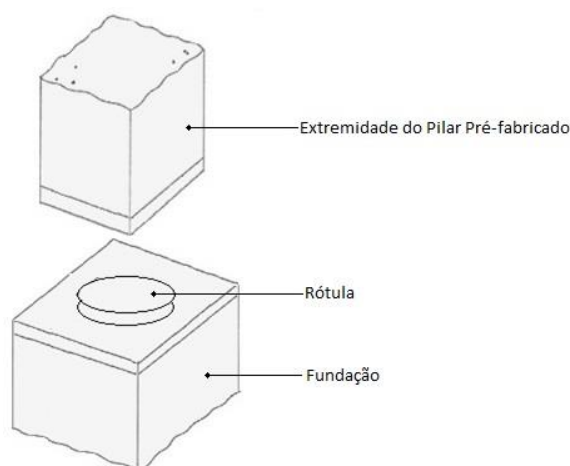


Figura 53 - Ligação Pilar – Fundação por rótula

#### 4.2.1.2 Pilar – Pilar

Este tipo de ligação é normalmente utilizado em construções de grande altura.

As ligações entre pilares podem ser projetadas e executadas de duas formas. A ligação pode ser executada fora do nível do piso, numa região superior a viga, ou ao nível do piso onde a viga intersecta o pilar.

##### 4.2.1.2.1 Ligação Fora do nível do Piso

A ligação quando é realizada na zona superior à viga é feita por sobreposição, onde o segmento superior do pilar apoia-se no inferior, e a solidarização dos mesmos é conseguida através de amarração das armaduras e preenchimento dos vazios com argamassa de alta resistência.

## Construção com Elementos Pré-fabricados

De seguida são apresentados alguns tipos de execução deste tipo de ligação:

### ✓ Ligação por emendas:

Neste tipo de ligação a imagem do que sucede com a ligação pilar – fundação com armaduras salientes, as mesmas presentes numa das faces do pilar são introduzidas em aberturas (bainhas) presentes no pilar que fica sobreposto.

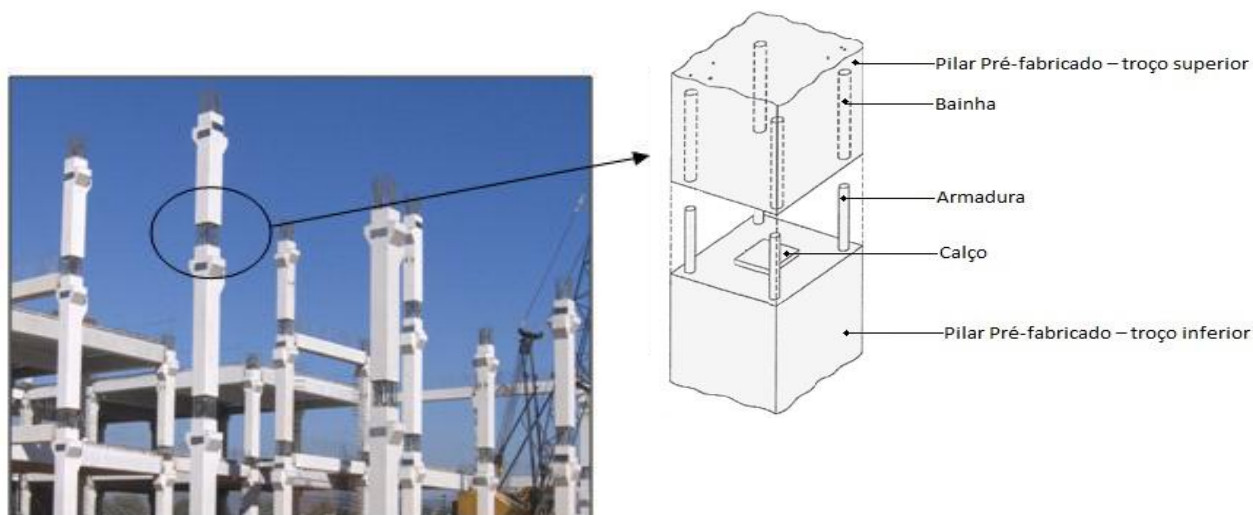


Figura 54 - Ligação Pilar – Pilar por emendas [49]

### ✓ Ligação por soldadura de varões de aço sobrepostos:

Neste tipo de ligação são deixadas armaduras salientes em ambas as extremidades dos pilares. As armaduras salientes na face superior do pilar interseam as armaduras salientes na face inferior do pilar sobreposto, sendo soldadas e posteriormente preenchido esse local com betão.

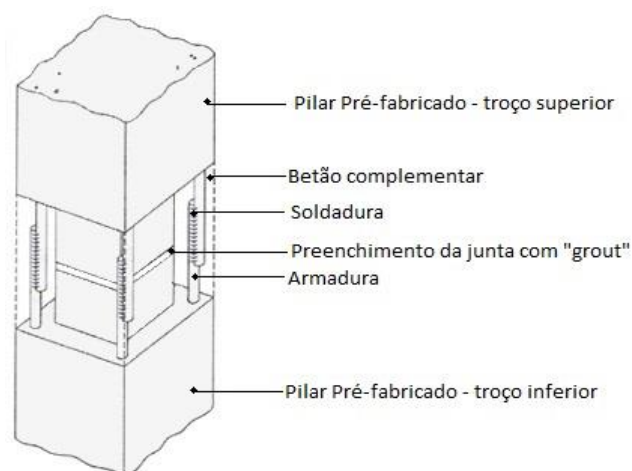


Figura 55 - Ligação Pilar – Pilar por soldadura de varões de aço sobrepostos [46]

✓ Ligação por chapas soldadas:

Neste tipo de ligação a união entre segmentos de pilares é realizada por meio de chapas soldadas.

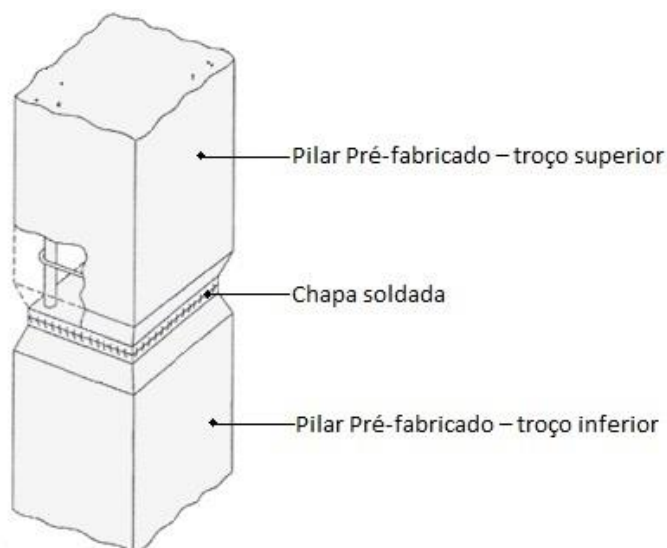


Figura 56 - Ligação Pilar – Pilar por chapas soldadas [46]

✓ Ligação por soldadura de chapas e varões:

Neste tipo de ligação os varões salientes na face superior do pilar inferior são soldados a uma chapa presente na face inferior do pilar sobreposto.

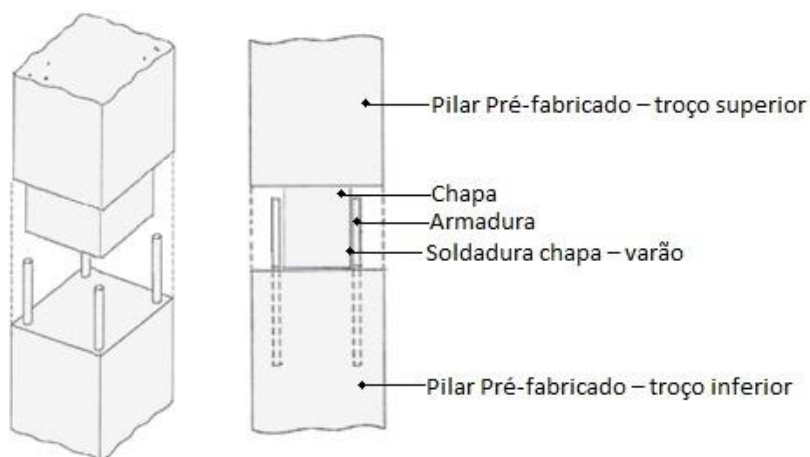


Figura 57 - Ligação Pilar – Pilar por soldadura de chapas e varões [46]

## Construção com Elementos Pré-fabricados

### ✓ Ligação por ligadores de varões de aço sobrepostos:

Neste tipo de ligação a amarração das armaduras é efetuada com recurso a conectores especializados para o efeito sendo por fim betonado esse local de ligação.

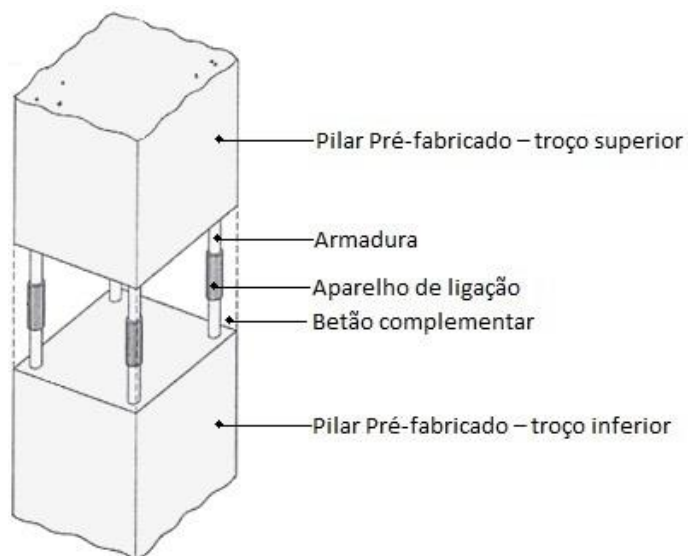


Figura 58 - Ligação Pilar – Pilar por ligadores de varões de aço sobrepostos [46]

### ✓ Ligação por parafusos:

Neste tipo de ligação a face superior do pilar possui parafusos salientes que são inseridos em aberturas na face inferior do pilar sequente.

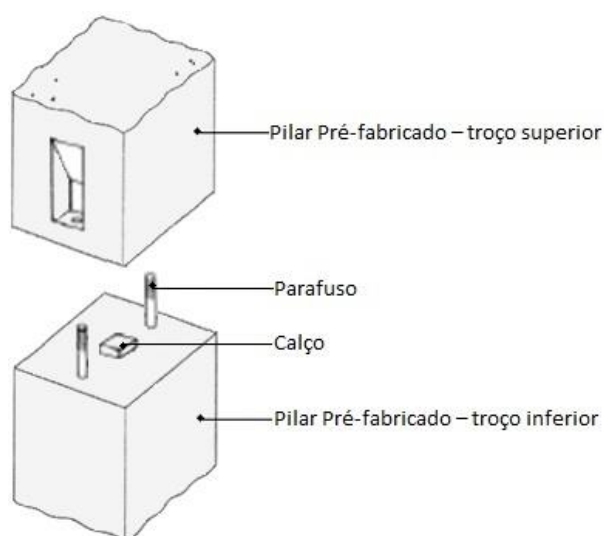


Figura 59 - Ligação Pilar – Pilar por parafusos [46]

✓ Ligação por pós-tensão:

Neste tipo de ligação todos os segmentos de pilares têm varões tensionados que são ligados em obra e posteriormente envolvidos por betão no local dessa ligação.

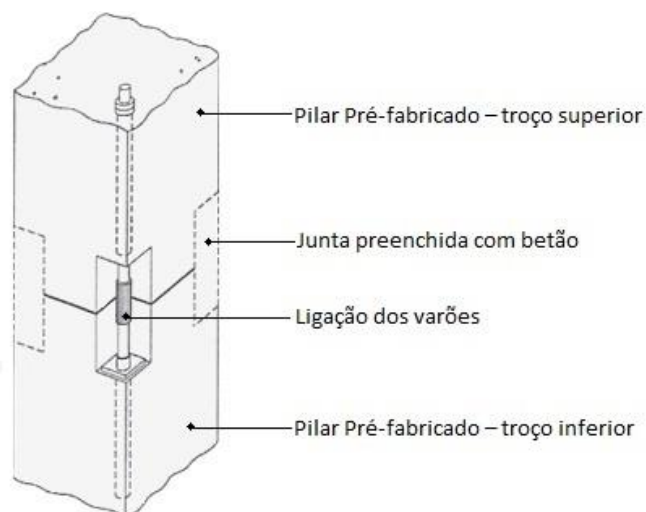


Figura 60 - Ligação Pilar – Pilar por pós-tensão [46]

✓ Ligação por rótula:

Neste tipo de ligação os pilares possuem no seu topo uma rótula simplesmente apoiada onde será apoiado o pilar sobreposto. Os diversos troços de pilares são simplesmente apoiados uns sobre os outros.

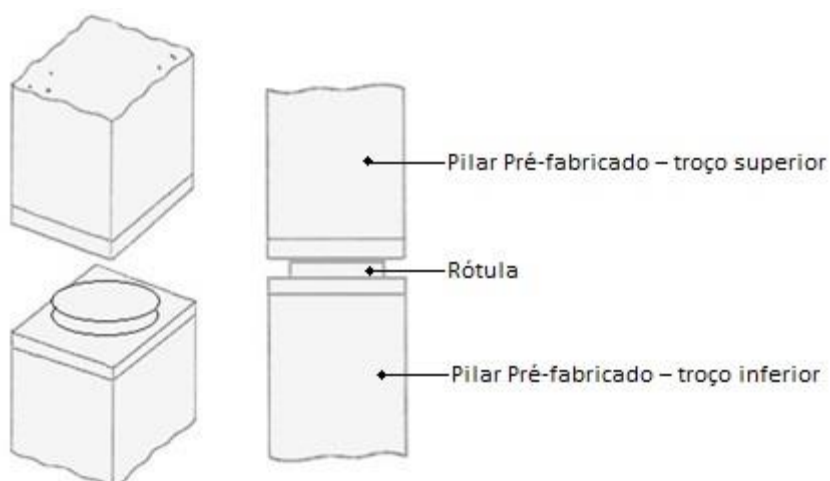


Figura 61 - Ligação Pilar – Pilar por rótula

4.2.1.2.2 Ligação ao Nível do Piso

Quando a ligação entre pilares é realizada ao nível do piso, essa ligação pode ser semelhante à ligação efetuada fora do nível do piso (referida anteriormente), quando as vigas (de piso) se apoiam nas laterais ou consolas curtas dos pilares.

Caso esta situação não se verifique, a vigas são apoiadas nos bordos do pilar inferior. Neste caso a viga interfere na ligação pilar-pilar, pelo que é necessária uma armadura secundária para a realização da referida ligação (Fig. 62).

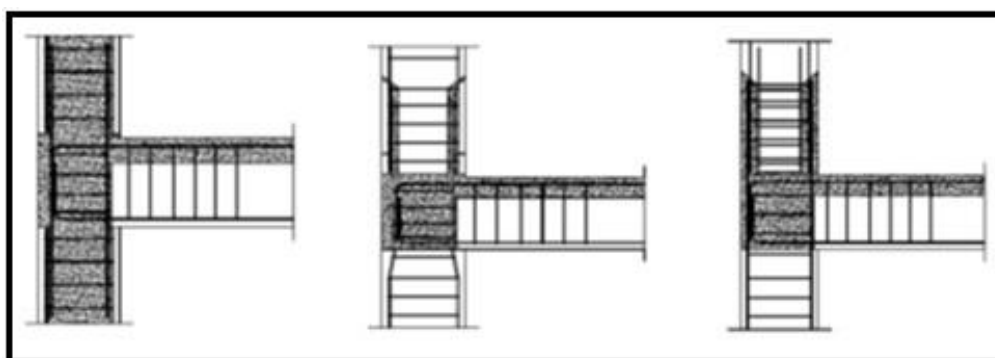


Figura 62 - Ligação Pilar – Pilar ao nível do piso, com interferência de viga [2]

### 4.2.1.3 Viga – Pilar

Atualmente existe uma vasta gama de ligações viga – pilar, variando mediante a complexidade, custo e comportamento estrutural exigido, ou seja, a ligação entre estes dois elementos depende essencialmente da magnitude e natureza das cargas aplicadas assim como das condições de apoio identificadas na zona de ligação.

De um modo geral, as ligações viga – pilar quando executadas entre elementos pré-fabricados podem ser de dois tipos:

- ✓ Tipo I: ligação sem continuidade, quando o pilar é contínuo, e a viga é descontínua.
- ✓ Tipo II: ligação com continuidade, quando o pilar é contínuo e as vigas são contínuas ou separada por componentes de ligação.

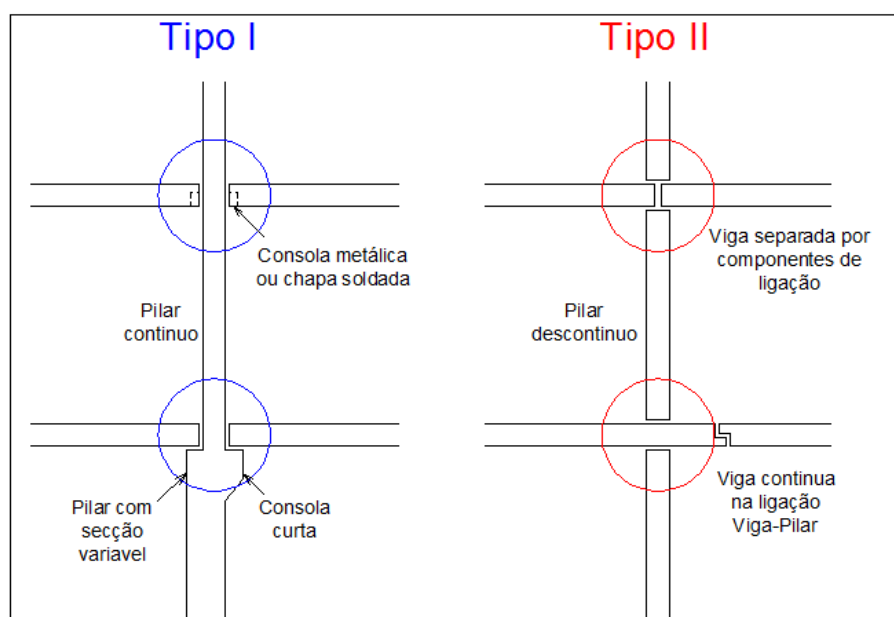


Figura 63 - Tipos de ligações Viga – Pilar [28]

#### 4.2.1.3.1 Ligação Sem Continuidade

A ligação viga – pilar sem continuidade, ou seja, sem transmissão de momentos, deve ser dimensionada para as ações de corte e tração.

As dimensões das zonas de contacto da viga com o pilar devem ser projetadas de forma a não existir sensibilidade relativamente às tolerâncias de fabrico e de montagem. [48]

Neste tipo de ligação, a conexão entre a viga e o pilar pode ser realizada da seguinte forma:

✓ Consola curta de betão:

A ligação é possível devido à presença de consolas curtas salientes do pilar. A viga é apoiada na consola, existindo entre esta e a viga uma camada de argamassa, chapas metálicas ou neoprene simples (podendo ser reforçadas com chapas metálicas), que permite fazer uma correta distribuição de tensões de compressão na zona de contacto entre a viga e a consola. A colocação de ferrolhos embebidos na consola e aparafusados à viga, permite além de transmissão de esforços axiais, resistir as ações de torção, em particular na fase da construção.

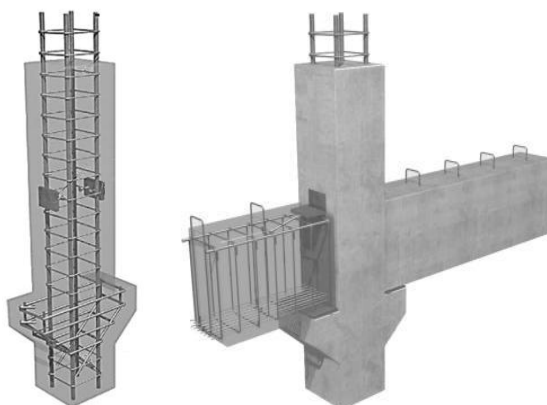


Figura 64 - Exemplo de consola curta de betão [49]

✓ Diretamente sobre a extremidade do pilar:

A ligação procede-se com a colocação da viga sobre o topo do pilar. É importante a existência de uma placa de apoio de neoprene ou metálica na zona de contacto da viga com o pilar de modo a evitar o contacto entre os dois elementos estruturais. É necessário que o pilar possua cintas, para resistir a esforços provocados por possíveis rotações da viga apoiada.

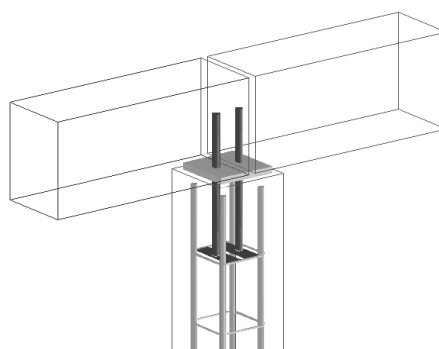


Figura 65 - Ligação com placa de apoio (neoprene)

✓ Encaixe de acessórios na face do pilar:

A ligação é executada por meio de aparelhos encastrados no pilar que recebem a viga. Justifica-se utilizar este tipo de ligação quando as cargas exercidas não atingem níveis elevados, quando existem diversas vigas apoiadas num único pilar, ou por questões estéticas, para que só existam juntas verticais.

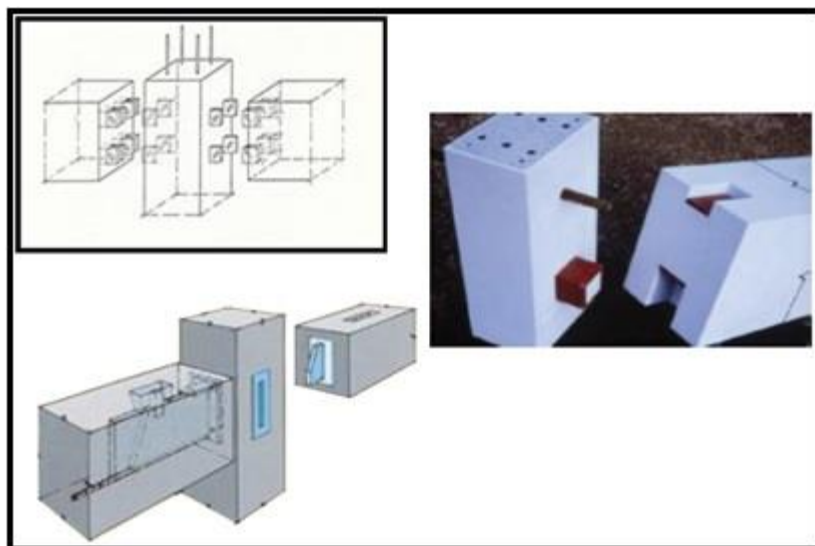


Figura 66 - Exemplos de acessórios de ligação [49]

#### 4.2.1.3.2 Ligação Com Continuidade

As ligações de continuidade devem ser projetadas para as ações na fase provisória com os mesmos critérios que as ligações sem continuidade de momentos. Os apoios referidos são, em geral, executados em seco, isto é, o betão da viga fica em contacto direto com o betão do pilar ou com interposição de uma fina camada de argamassa de regularização. [3]

Existem basicamente três tipos de ligação viga - pilar com continuidade: a ligação húmida, a ligação seca e a ligação com pré-esforço.

✓ Ligação húmida:

Este tipo de ligação consiste em deixar salientes nos extremos parte das armaduras dos elementos, e após a montagem, executar-se a betonagem *in situ* do nó de ligação entre a viga e o pilar. Tem como inconveniente o facto de ser necessário aguardar o

## Construção com Elementos Pré-fabricados

endurecimento do betão para finalizar a ligação, mas por outro lado, com esta solução obtém-se um melhor comportamento em relação às ações sísmicas.

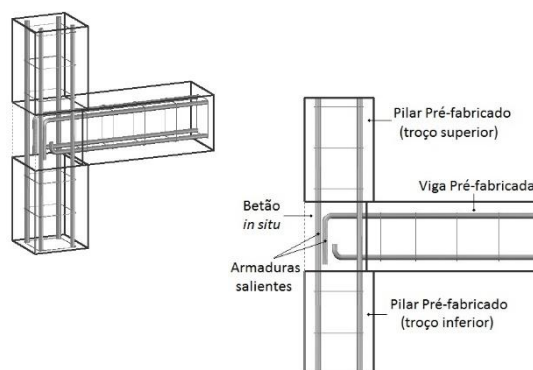


Figura 67 - Ligação com betonagem em obra do nó  
Viga – Pilar

### ✓ Ligação seca:

Neste tipo de ligação, a viga é apoiada em consolas curtas do pilar e no caso de haver necessidade de executar betonagem em obra, esta resume-se ao banzo superior da viga, onde se situam as armaduras superiores de continuidade e na zona entre a face do pilar e a viga.

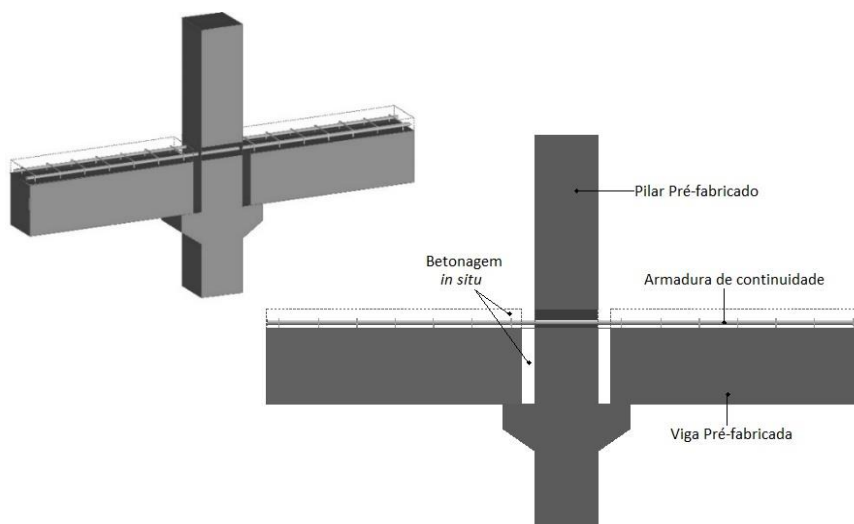


Figura 68 - Ligação Viga - Pilar com armadura de continuidade

Este tipo de ligação pode ainda ser efetuado com a soldadura de chapas ou perfis metálicos. Neste caso os elementos metálicos devem ser devidamente protegidos contra a corrosão, de forma a dispensar a sua manutenção. [3]

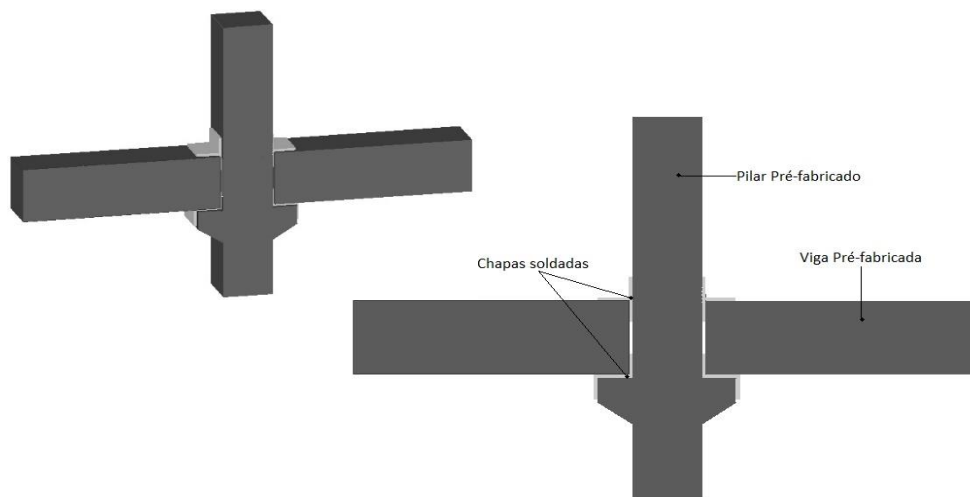


Figura 69 - Ligação Viga – Pilar por chapas soldadas

Outra forma de executar uma ligação seca é com recurso a ligação aparafusada, em que o topo da viga é ligado ao pilar através do aparafusamento de chapas metálicas, e a interface viga – pilar é preenchida com argamassa de alta resistência.

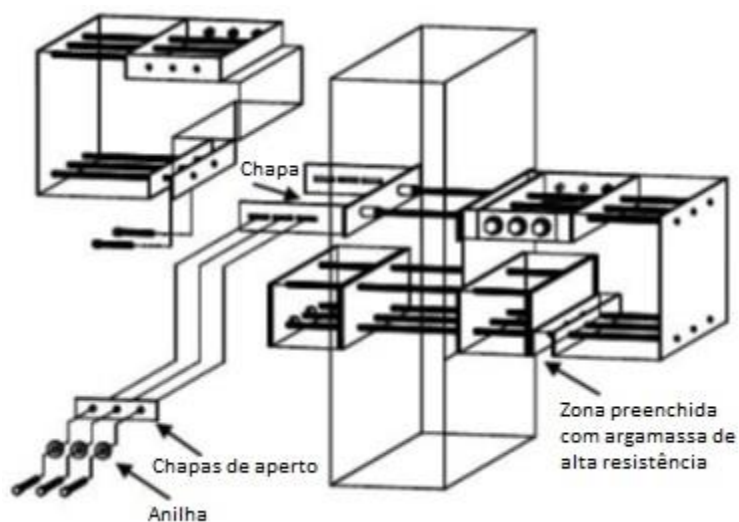


Figura 70 - Ligação Viga – Pilar com recurso a ligação aparafusada  
(adaptado de [50])

### ✓ Ligação com pré-esforço:

Este tipo de ligação, realizado com pré-esforço na zona das juntas, consiste no facto de as vigas se apoiarem nas consolas curtas do pilares e o espaço existente entre estes e as vigas ser preenchido com betão executado em obra. Posteriormente as barras de aço de pré-esforço são tensionadas garantindo assim uma ligação mais coesa e permitindo controlar fenómenos de fissuração devido a variações de temperatura e retração.

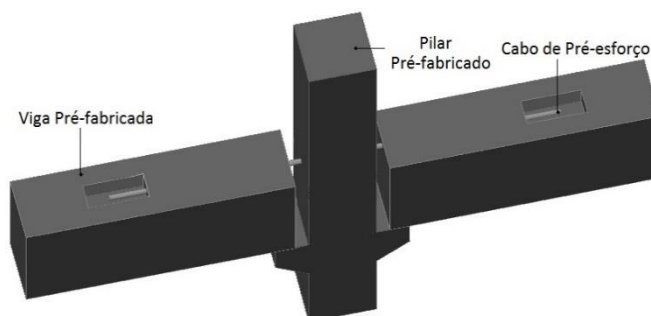


Figura 71 - Ligação Viga – Pilar por pós-esforço

A ligação viga – pilar com continuidade pode ser também realizada recorrendo a dois tipos diferentes de aço: armaduras ordinárias embebidas no betão e cabos de pré-esforço, tendo este tipo de ligação a designação de ligação híbrida.

Depois de colocadas as vigas, as armaduras ordinárias são posicionadas no topo e na base da viga atravessando o pilar de face a face em bainhas coincidentes quer nas vigas quer no pilar. A folga entre a viga e o pilar, assim com as bainhas onde são posicionadas as armaduras, são preenchidas com argamassa reforçada com fibras. Por fim, e após a argamassa ter ganho resistência suficiente, os cabos de pré-esforço são instalados no núcleo central da viga e tensionados. [53]

Este sistema tem como principal inconveniente na sua execução o facto de necessitar de escoramento provisório das vigas, antes da colocação das armaduras.

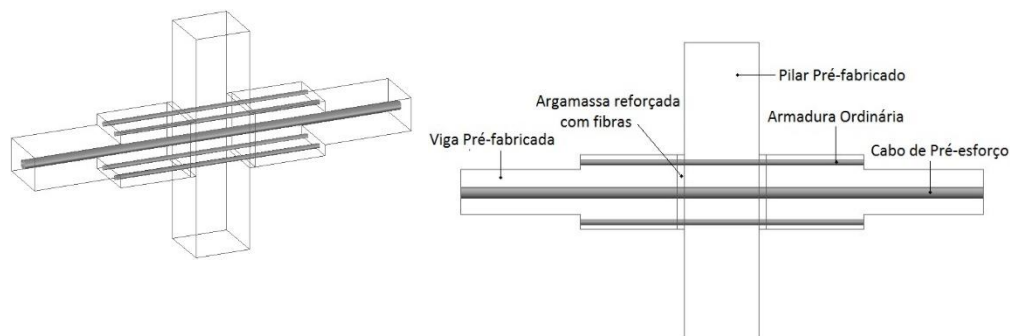


Figura 72 - Ligação Híbrida Viga – Pilar

#### 4.2.1.4 Viga – Viga

Os processos construtivos para a execução de ligações entre vigas são semelhantes aos de ligação entre vigas e pilares.

À imagem do que acontece com a ligação viga – pilar, este tipo de ligação também é caracterizado pelo facto de poder ou não existir continuidade.

Na ligação viga – viga, de acordo com a posição dos eixos longitudinais dos diferentes troços, podem considerar-se duas situações distintas. Uma em que a ligação se realiza entre vigas coaxiais (vigas com o mesmo eixo) e outra em que a ligação se realiza com o apoio de vigas secundárias em vigas principais.

##### 4.2.1.4.1 Ligação entre Vigas Coaxiais

A ligação entre vigas com o mesmo eixo ocorre, normalmente, quando se pretende deslocar a ligação para fora da região crítica (nó entre a viga e o pilar), onde os momentos fletores são menores [50].

A ligação quando se pretende assegurar a continuidade pode ser realizada por meio de:

- ✓ Juntas em dente e varões soldados:

Neste tipo de ligação, à semelhança do que acontece com a ligação viga – pilar por consola curta, um dos troços da viga é apoiada sobre o troço seguinte, ambos os troços possuem armaduras salientes nas extremidades que posteriormente são soldadas em obra.

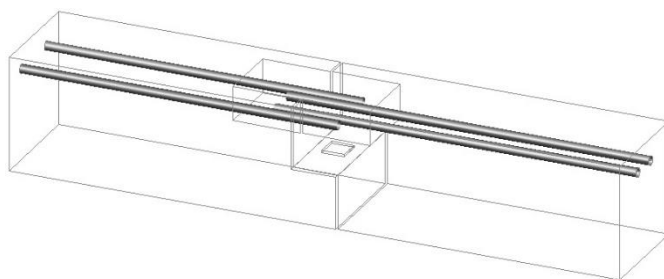


Figura 73 - Ligação Viga – Viga por juntas em dente e varões soldados

✓ Juntas em dente e barras:

Este método de ligação permite que um dos troços da viga seja apoiado sobre o troço seguinte devido às juntas em dente. Posteriormente são introduzidas barras em orifícios executados para o efeito de forma a assegurar a ligação entre as vigas.

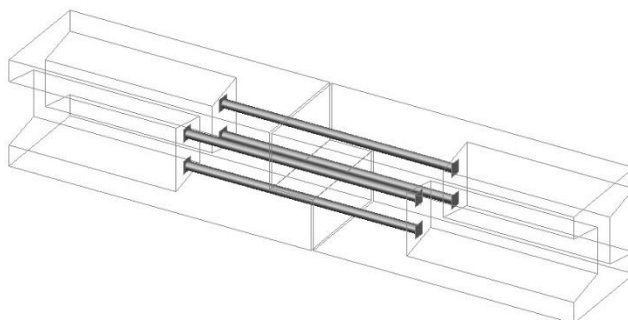


Figura 74 - Ligação Viga – Viga por juntas em dente e barras

✓ Betonagem *in situ*:

Este tipo de ligação consiste na betonagem em obra do nó de ligação onde as armaduras salientes de ambos os troços da viga se intersectam.

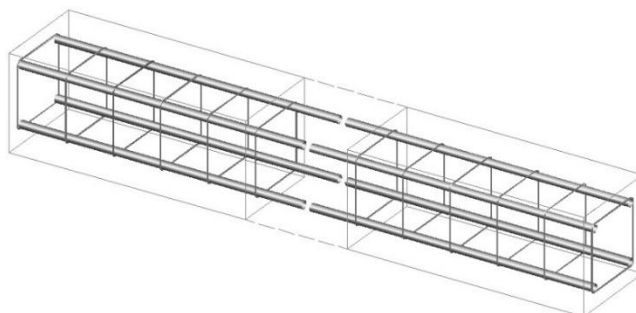


Figura 75 - Ligação Viga – Viga por betonagem *in situ*

✓ Chapas metálicas aparafusadas com betonagem *in situ*:

Esta forma de ligação é executada por meio de chapas metálicas presentes nas extremidades das vigas que são posteriormente aparafusadas e esse local é por fim betonado.

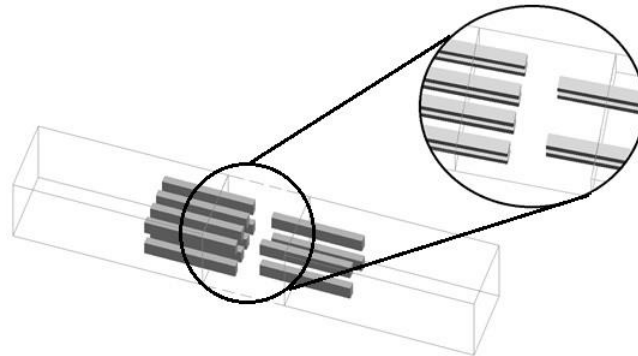


Figura 76 - Ligação Viga-Viga por chapas metálicas aparafusadas com betonagem *in situ*

✓ Pré-esforço:

Este tipo de ligação requer a colocação de cabos de pré-esforço aquando da fabricação das vigas que posteriormente é colocado em tensão.

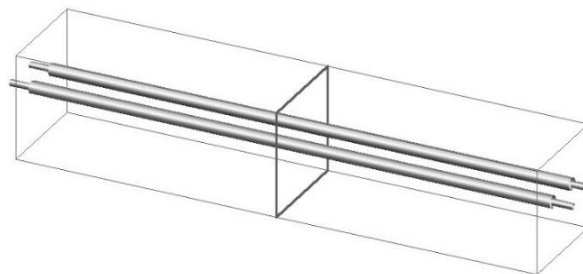


Figura 77 - Ligação Viga – Viga por pré-esforço

Por outro lado quando não se pretende assegurar a continuidade, a ligação pode ser realizada por meio de:

✓ Chapas metálicas verticais:

Neste tipo de ligação as faces laterais das vigas dispõem de chapas metálicas colocadas verticalmente que são conectadas finalizando a ligação.

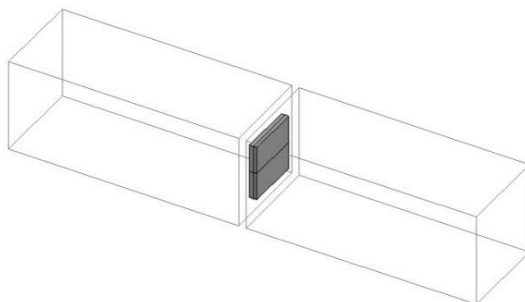


Figura 78 - Ligação Viga – Viga por chapas metálicas verticais

✓ Juntas em dente:

Este tipo de ligação é possível quando as vigas possuem juntas que permitam o encaixe dos diferentes troços de viga.

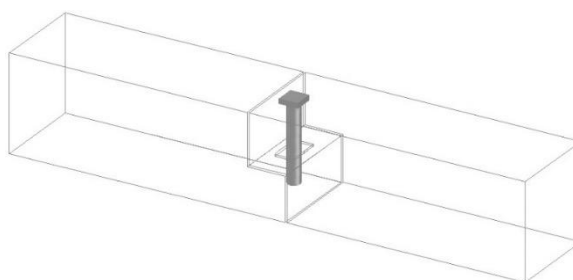


Figura 79 - Ligação Viga – Viga por juntas em dente

#### 4.2.1.4.2 Ligação entre Vigas Principais e Secundárias

Para a execução de ligações entre vigas principais e secundárias é importante garantir que a secção transversal da viga principal seja maior ou igual à da viga secundária uma vez que vai servir de apoio a esta.

À semelhança do que acontece com a ligação entre vigas coaxiais, a ligação entre vigas principais e secundárias também pode ser executada com ou sem transmissão de momento fletor.

De seguida são apresentados alguns exemplos de ligação executadas com e sem continuidade.

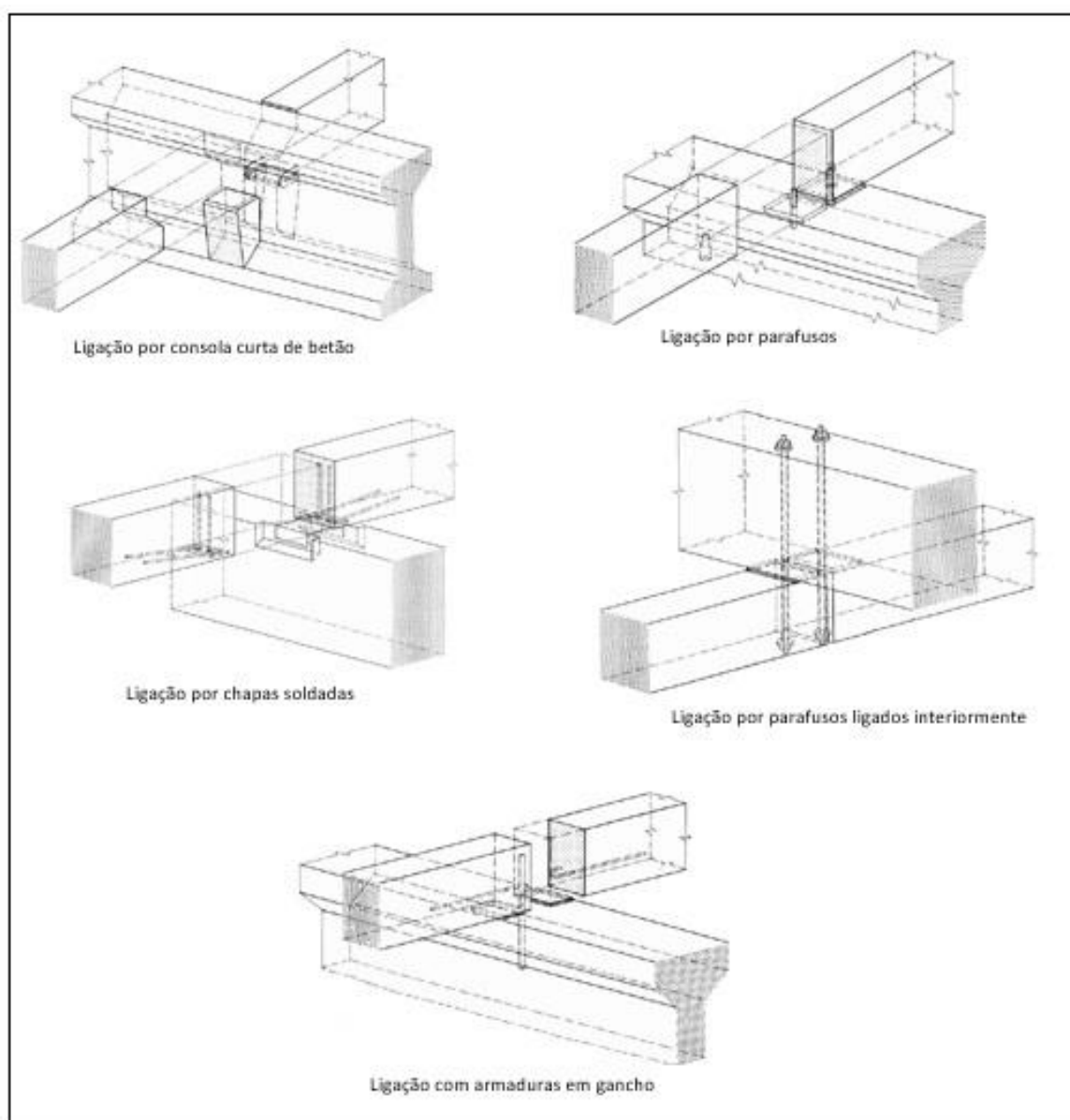


Figura 80 - Exemplos de ligação entre vigas principais e secundárias sem continuidade [adaptado de 46]

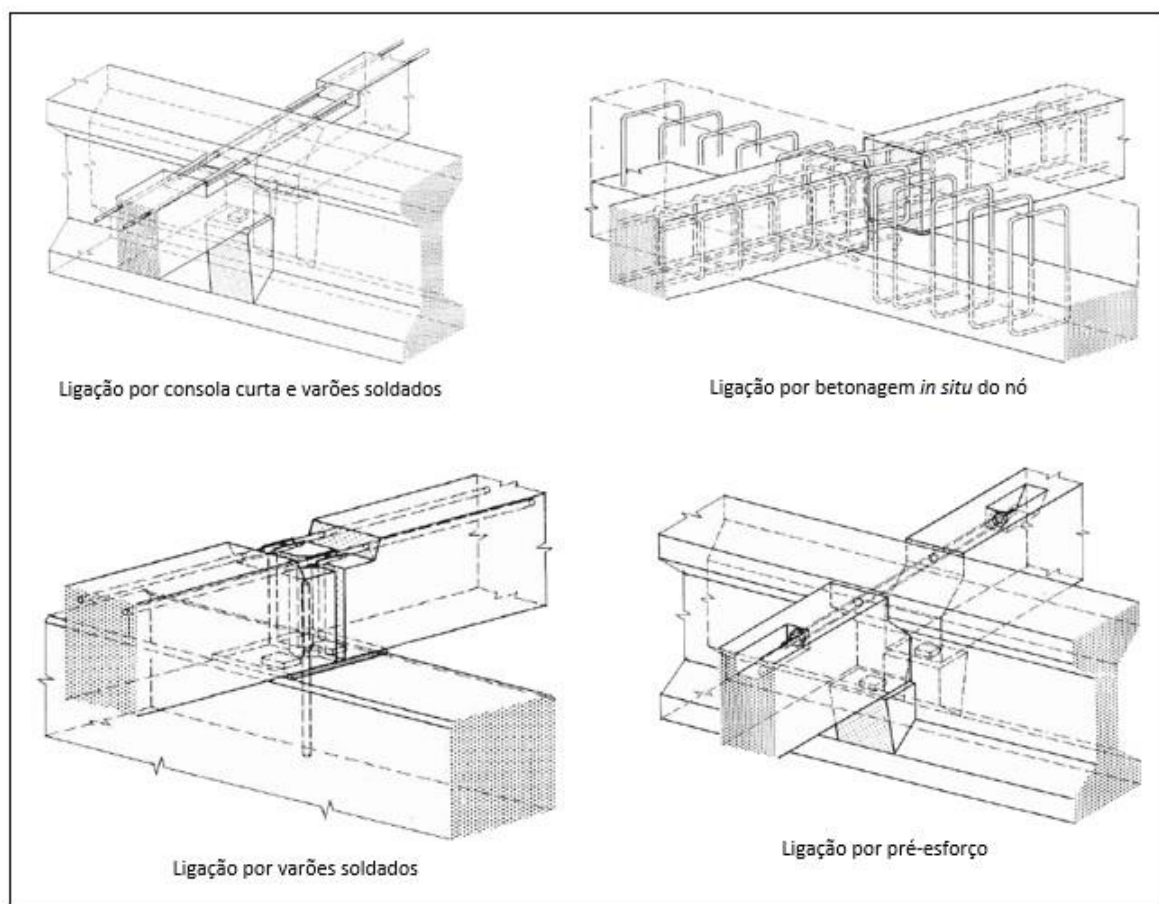


Figura 81 - Exemplos de ligação entre vigas principais e secundárias com continuidade [adaptado de 46]

#### 4.2.1.5 Laje – Viga

As ligações laje – viga realizam-se entre as extremidades das lajes e o topo das vigas.

Uma vez que a viga irá servir de suporte à laje, terá que ter capacidade de resistir a cargas exercidas pela laje assim como aquelas que possam vir a ser exercidas sobre a laje.

Este tipo de ligação, de acordo com a posição da viga, pode ser executada entre laje e viga de extremidade ou laje e viga central.

##### 4.2.1.5.1 Ligação Laje – Viga de Extremidade

Nesta ligação a viga tem que ser capaz de resistir a esforços de torção devido à flexão da laje.

Neste caso a laje pode ser ligada à viga por meio de:

✓ Ligação com amarração:

Esta forma de ligação é realizada através de amarração feita perpendicularmente à laje alveolar, sendo por fim betonado em obra esse local de amarração.

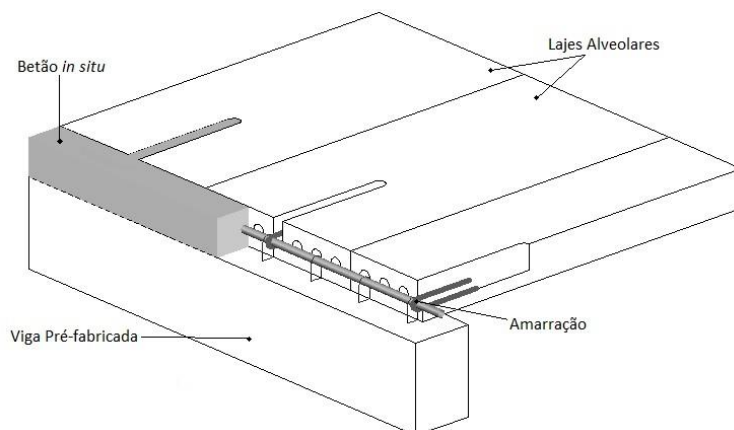


Figura 82 - Ligação Laje – Viga de extremidade com amarração

✓ Ligação com chapas metálicas aparafusadas

Neste tipo de ligação, a laje é apoiada em placas de neoprene existentes sobre a viga de modo a impedir o contacto entre os dois elementos sendo por fim são aparafusadas chapas metálicas no topo da laje e na face interior da viga.

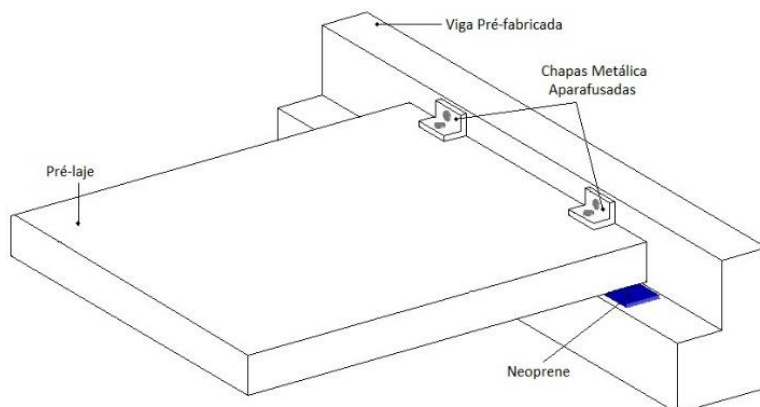


Figura 83 - Ligação Laje – Viga de extremidade com chapas metálicas aparafusadas

### ✓ Ligação com chapas soldadas:

Este tipo de ligação é semelhante à ligação com chapas aparafusadas, sendo também a laje assente em pacas de neoprene existentes sobre a viga, procedendo-se à soldadura das chapas metálicas no topo da laje e na face interior da viga.

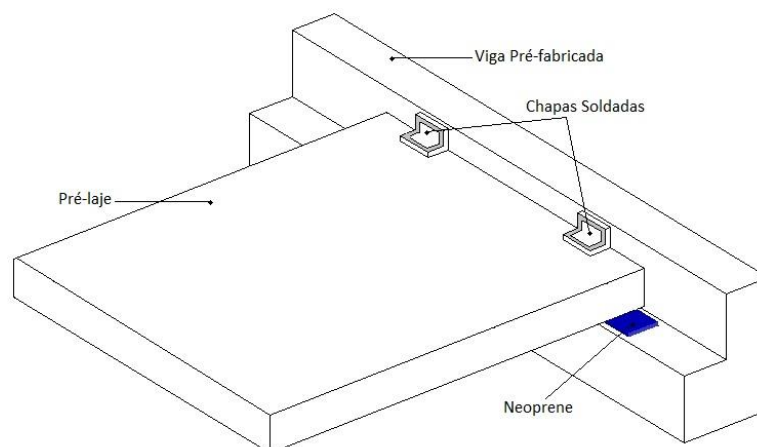


Figura 84 - Ligação Laje – Viga de extremidade com chapas soldadas

### ✓ Ligação simplesmente apoiada:

Neste tipo de ligação a laje é simplesmente apoiada sobre a viga, existindo placas de neoprene na superfície de contacto entre os dois elementos estruturais.

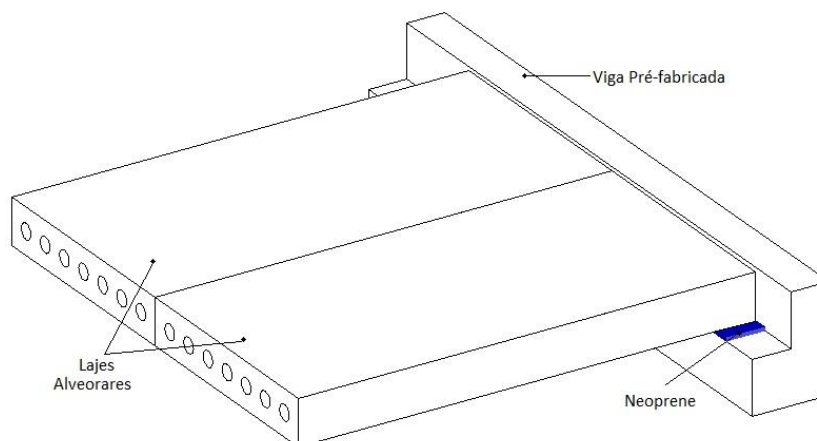


Figura 85 - Ligação Laje – Viga de extremidade simplesmente apoiada

#### 4.2.1.5.2 Ligação Laje – Viga Central

Neste tipo de ligação os problemas de torção da viga, ao contrário do caso anterior, podem não existir e, por essa razão, trata-se de uma ligação mais simples no que diz respeito aos esforços a

considerar. No entanto, na fase de montagem (fase provisória) quando a laje esta posicionada de uma só lado, a viga fica sujeita ao mesmo tipo de esforços da situação anterior (ligação laje – viga de extremidade).

A ligação entre laje e viga central apresenta como principais vantagens o facto de os esforços de flexão serem distribuídos de melhor forma, possibilitar um menor comprimento das ancoragens dos apoios e poderem ser aplicadas lajes com menor altura, o que reduz o custo final.

A ligação entre estes dois elementos pode ser efetuada das seguintes formas:

✓ Ligação com amarração:

Esta forma de ligação é realizada através de amarração feita paralelamente à laje alveolar, sendo por fim betonado *in situ* o local de amarração (Fig. 86). Em alternativa é possível ligar a laje à viga por meio de uma armadura colocada paralelamente à laje, que atravessa a viga (Fig. 87).

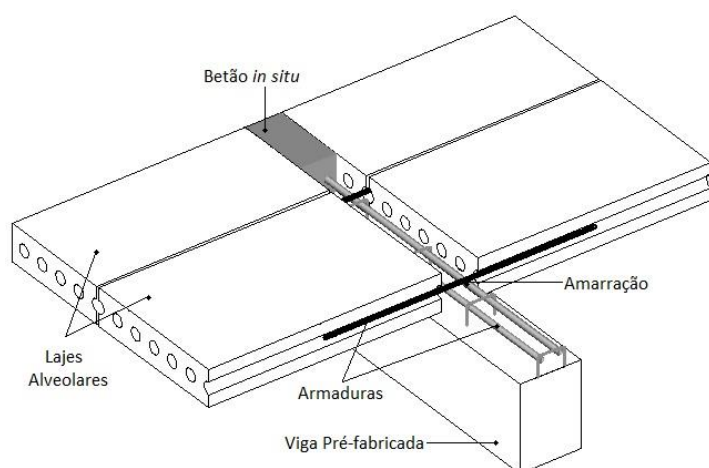


Figura 86 - Ligação Laje – Viga central com amarração com betonagem *in situ*

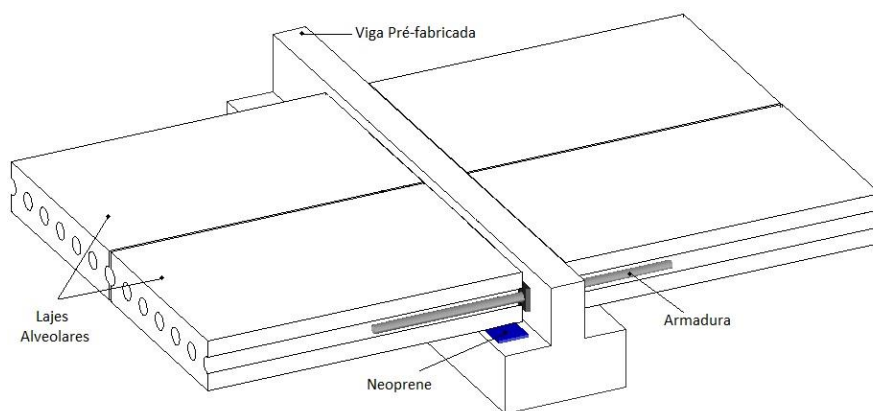


Figura 87 - - Ligação Laje – Viga central com amarração sem betonagem *in situ*

### ✓ Ligação com chapas metálicas aparafusadas:

Neste tipo de ligação, a laje é apoiada em placas de neoprene existentes sobre a viga onde por fim são aparafusadas chapas metálicas no topo da laje e no topo da viga, paralelamente à laje.

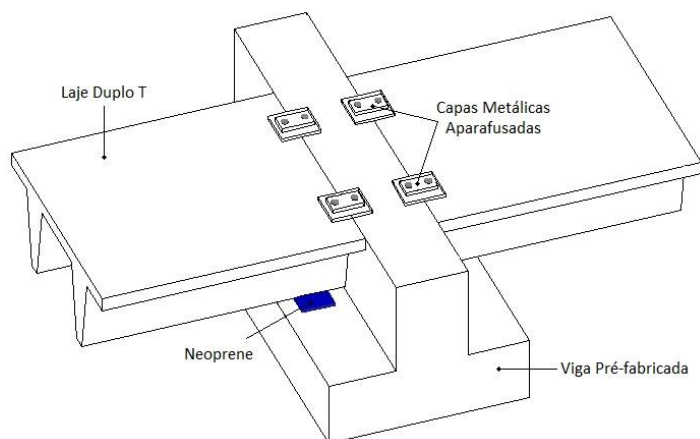


Figura 88 - Ligação Laje – Viga central com chapas metálicas aparafusadas

### ✓ Ligação com chapas soldadas:

Esta ligação realiza-se por meio de chapas localizadas quer no topo das lajes (no sentido das nervuras), quer no topo da viga que são posteriormente soldadas.

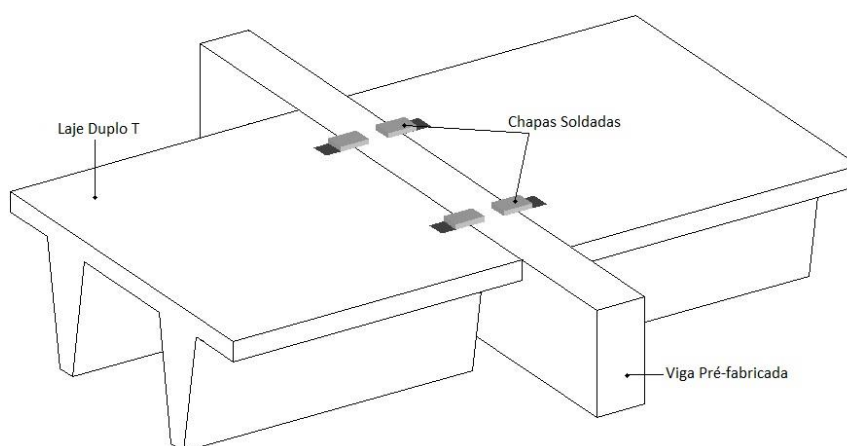


Figura 89 - Ligação Laje – Viga central com chapas soldadas

✓ Ligação por armadura ordinária:

Este tipo de ligação baseia-se na colocação de uma armadura paralelamente à laje e no topo desta, que une os diversos painéis. Para finalizar a ligação existe a necessidade de colocar uma camada de betão executado *in situ*, sendo este facto um inconveniente deste tipo de ligação.

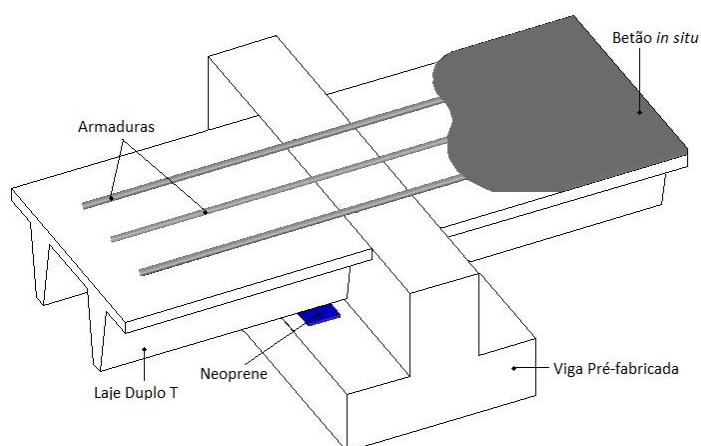


Figura 90 - Ligação Laje – Viga central com armadura ordinária

#### 4.2.1.6 Laje – Laje

A ligação laje – laje caracteriza-se pela união horizontal entre pranchas pré-fabricadas.

O tipo de ligação a adotar depende do tipo de lajes a ligar, podendo a ligação ser realizada entre:

- ✓ Lajes com vigotas;
- ✓ Lajes alveolares;
- ✓ Pré-lajes;
- ✓ Lajes duplo “T”;
- ✓ Lajes minos.

#### 4.2.1.6.1 Entre Lajes com Vigotas

Na utilização deste tipo de lajes, é possível optar por vários tipos de vigotas, constituídas por vigotas de betão comum, vigotas pré-esforçadas ou vigotas treliçadas.

Independentemente do tipo de vigota utilizado, a ligação entre lajes com vigotas inicia-se com a colocação dos blocos de cofragem (abobadilhas) e posteriormente executada uma armadura de solidarização do conjunto, sendo finalizada com uma betonagem complementar *in situ*.

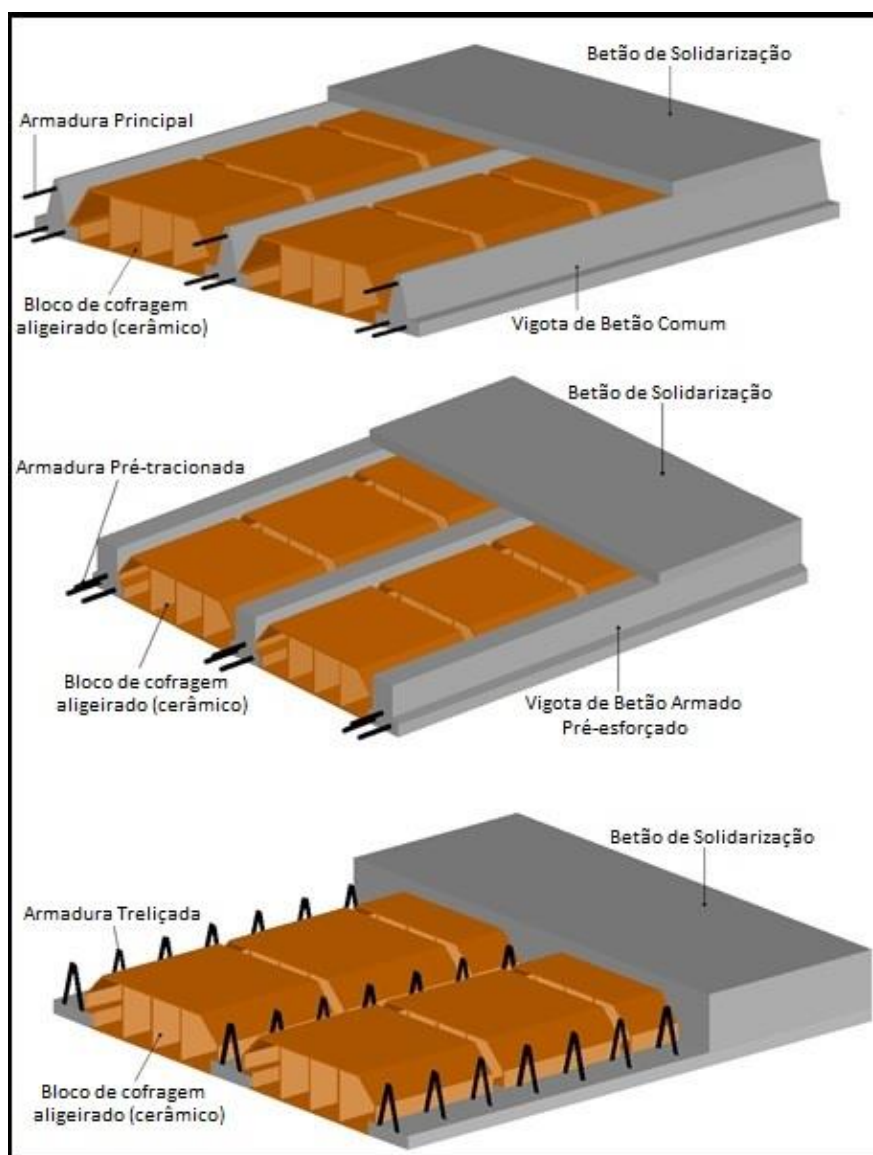


Figura 91 - Tipos de vigotas pré-fabricadas

#### 4.2.1.6.2 Entre Lajes Alveolares

Os pavimentos constituídos por lajes alveolares são compostos por pranchas pré-fabricadas dispostas lado a lado, formando um espaço vazio devido à geometria das lajes, que é preenchido *in situ* com betão, proporcionando a ligação, podendo ou não ser finalizado com uma camada de betão complementar, com um mínimo de 5 cm de espessura para solidarizar o conjunto.

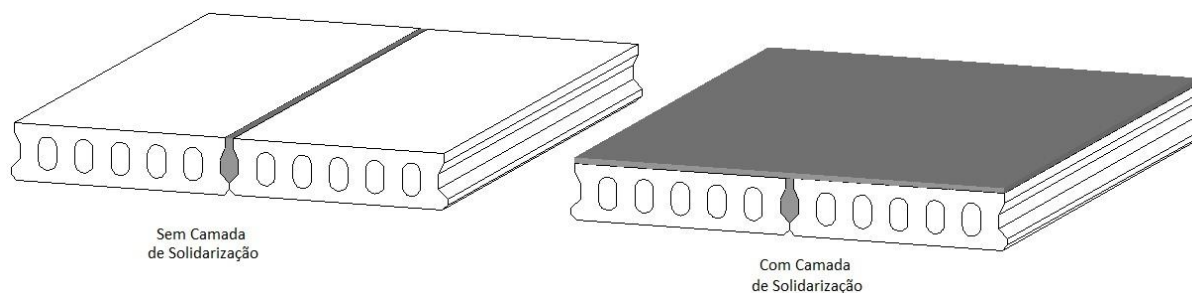


Figura 92 - Ligação entre lajes alveolares

A ligação entre lajes alveolares pode ainda ser feita com a colocação de armadura numa cavidade existente no centro da extremidade lateral da laje, que posteriormente é betonada *in situ*, concluindo a ligação.

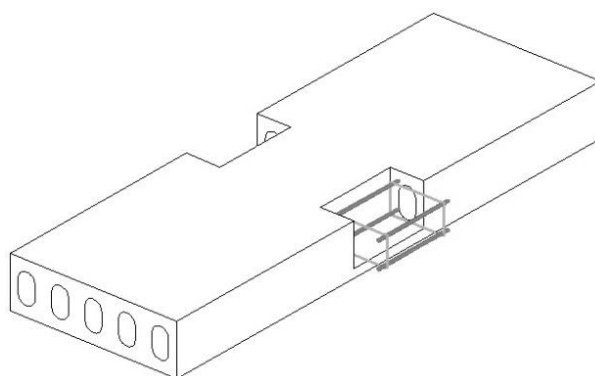


Figura 93 - Laje alveolar com armadura lateral

4.2.1.6.3 Entre Pré-lajes Maciças

A ligação entre pré-lajes maciças no sentido longitudinal dos elementos, pode ser feita através da soldagem de chapas metálicas (Fig. 94) ou através da colocação de armaduras transversais nos painéis (Fig. 95).

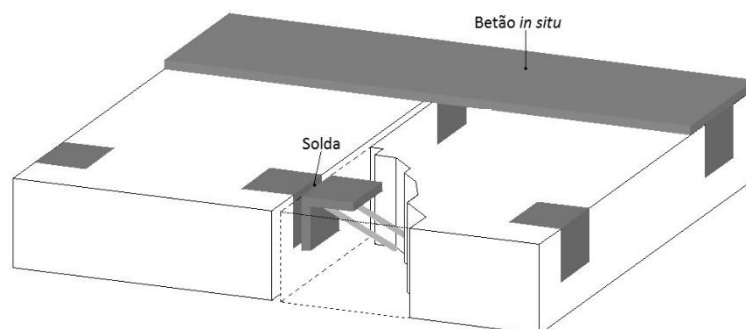


Figura 94 - Ligação entre pré-lajes maciças através de chapas soldadas

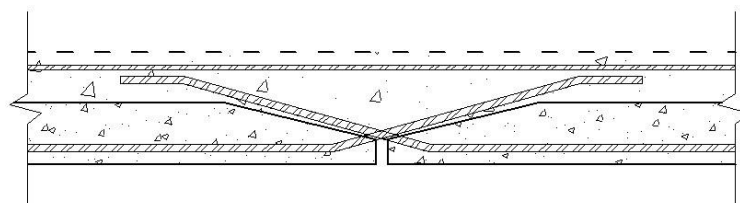


Figura 95 - Ligação entre pré-lajes maciças através da colocação de armaduras transversais [45]

#### 4.2.1.6.4 Entre Lajes Duplo T

Este tipo de laje pode ser ligado entre si por soldadura de placas colocadas nas extremidades laterais, placas essas que estão ancoradas às lajes por meio de armaduras ordinárias. Por fim é realizada uma camada de betão *in situ* sobre a superfície superior das lajes.

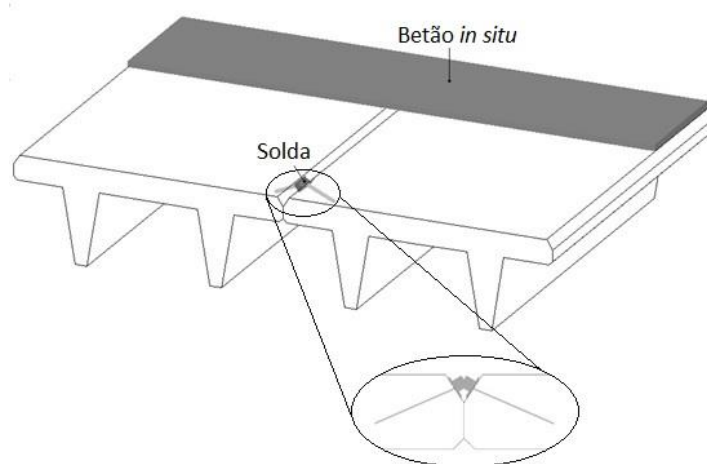


Figura 96 - Ligação entre lajes duplo T

#### 4.2.1.6.5 Entre Lajes Minos

A ligação entre lajes minos efetua-se com a colocação das pranchas pré-fabricadas lado a lado, sendo posteriormente colocada uma armadura de distribuição e por fim betonada *in situ* uma camada complementar.

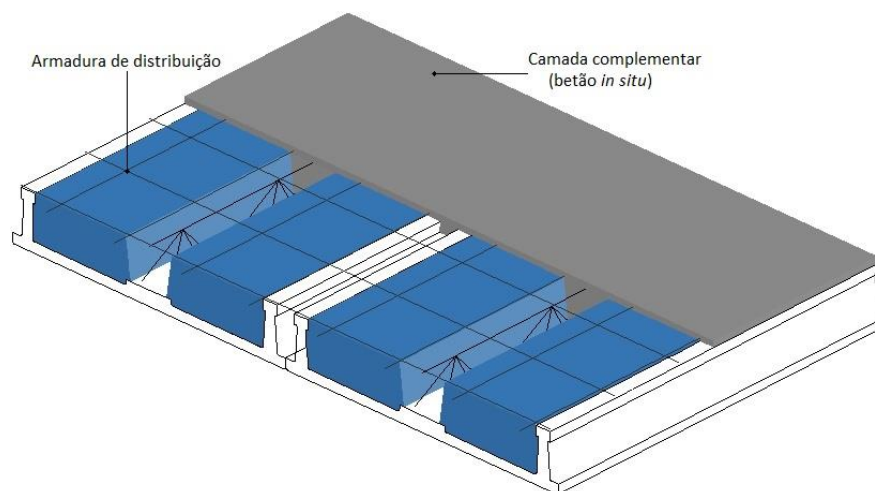


Figura 97 - Ligação entre lajes minos

#### 4.2.1.7 Laje – Parede

A ligação laje – parede resistente pode ser executada de duas formas distintas: pelo topo das lajes ou a meia altura da laje.

Quando a ligação é realizada pelo topo dos painéis de laje pode-se optar por uma ligação com betonagem *in situ* do nó, e nesse caso a parede é fabricada com interrupções que vão receber as lajes, permitindo a continuidade da armadura superior da laje, o que proporciona um melhor controlo na eventual abertura de fendas, traduzindo-se num melhor comportamento da solução em serviço.

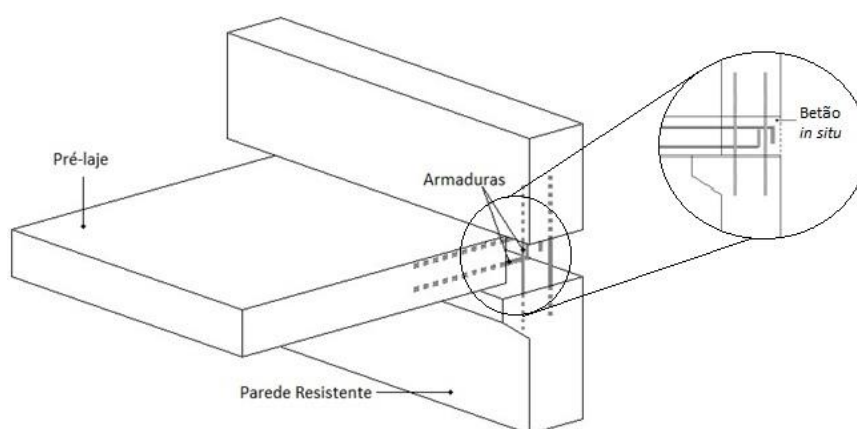


Figura 98 - Ligação Laje – Parede com betonagem *in situ* do nó

Caso se opte por uma ligação sem betonagem *in situ* do nó, são deixadas armaduras de espera na parede, que são posteriormente betonadas em conjunto com a camada de compressão da laje. Esta solução tem a vantagem de simplificar a execução das paredes resistentes uma vez que não é necessária a execução de negativos.

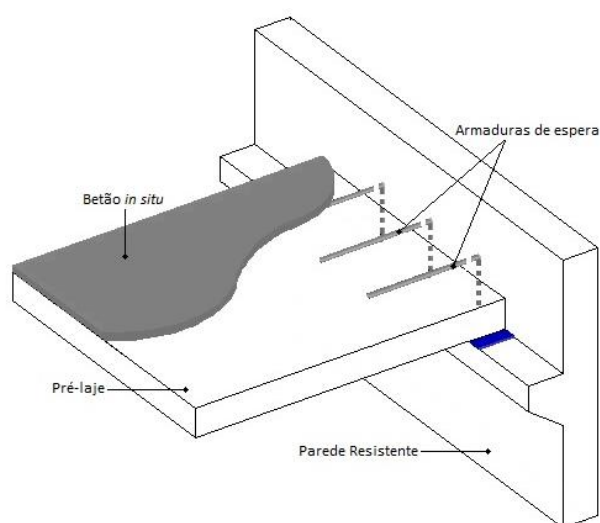


Figura 99 - Ligação Laje - Parede sem betonagem *in situ* do nó

## Capítulo 4

Se a ligação for executada a meia altura da laje, pode ser realizada por meio de armaduras de espera colocadas na parede com um certo afastamento, sendo por fim betonada a camada de compressão da laje.

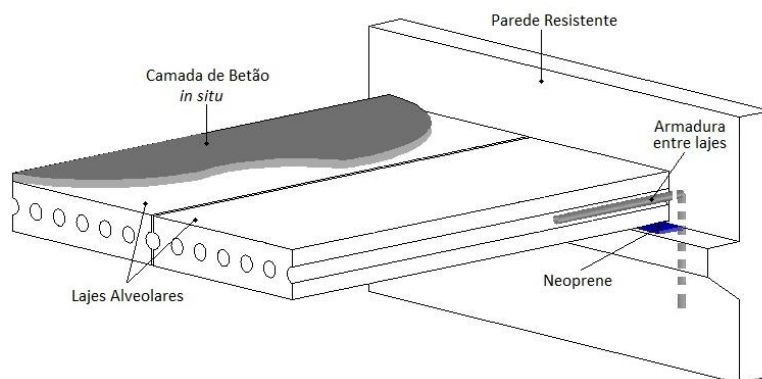


Figura 100 - Ligação Laje – Parede a meia altura da laje

A imagem do que foi dito anteriormente relativamente à ligação laje – viga, também a ligação entre lajes e paredes resistente pode ser proporcionada por chapas soldadas ou aparafusadas.

#### 4.2.1.8 Parede – Fundação

As ligações entre as paredes e a fundação são semelhantes às ligações dos pilares à fundação.

A ligação entre estes dois elementos pode ser executada por:

- ✓ Encaixe;
- ✓ Chapas Metálicas Soldadas;
- ✓ Chapas Metálicas Aparafusadas;
- ✓ Armaduras Salientes.

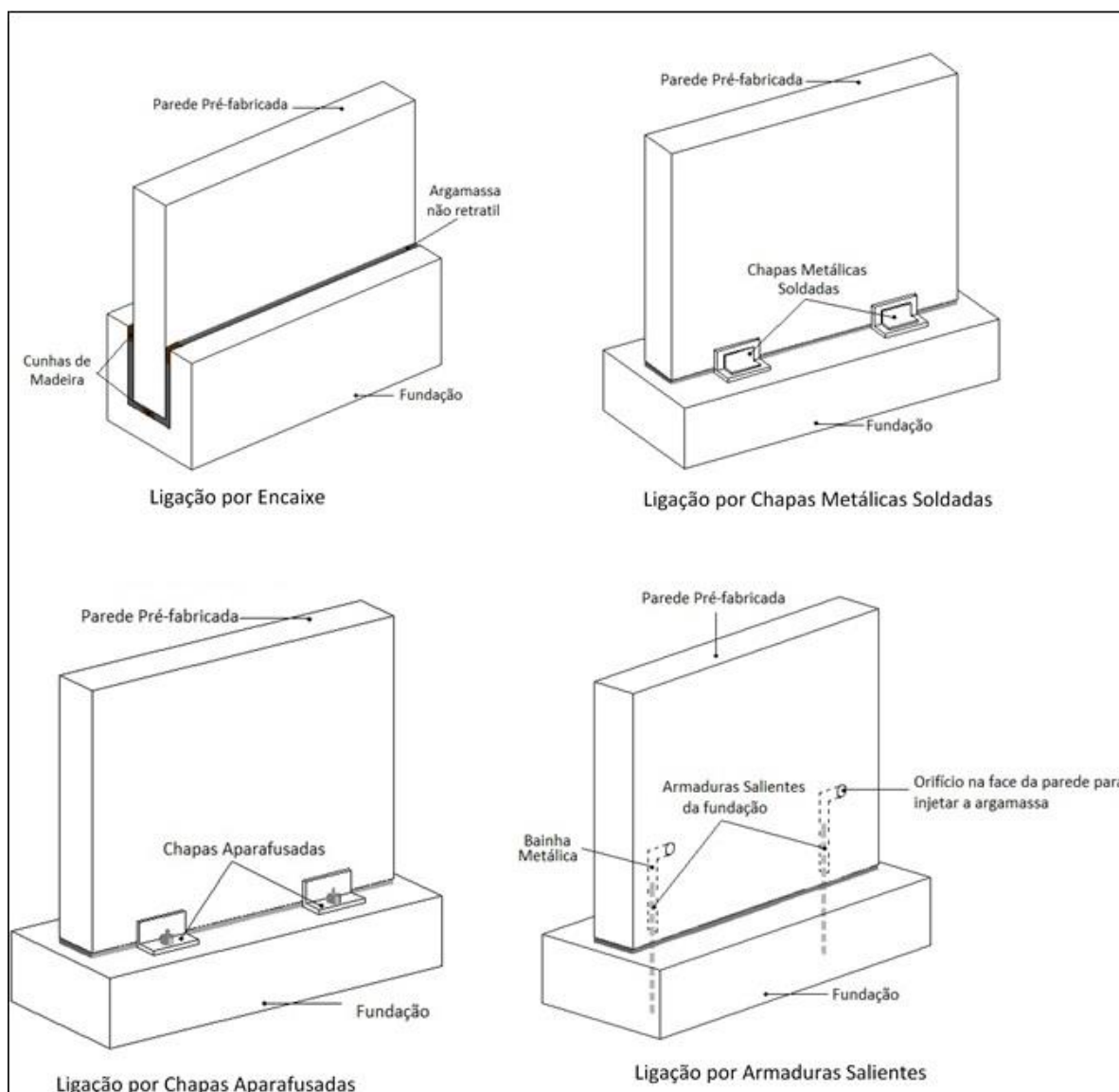


Figura 101 - Tipos de ligações Parede – Fundação

#### 4.2.1.9 Parede – Parede

Existem dois tipos principais de esforços que são transmitidos entre os painéis verticais, que são as forças de corte nas juntas horizontais e verticais e as forças de tração e compressão nas extremidades das juntas horizontais.

A ligação a adotar deve ser entre painéis com interface indentada, uma vez que mobilizam tensões de corte consideravelmente superiores às das ligações planas. [50]

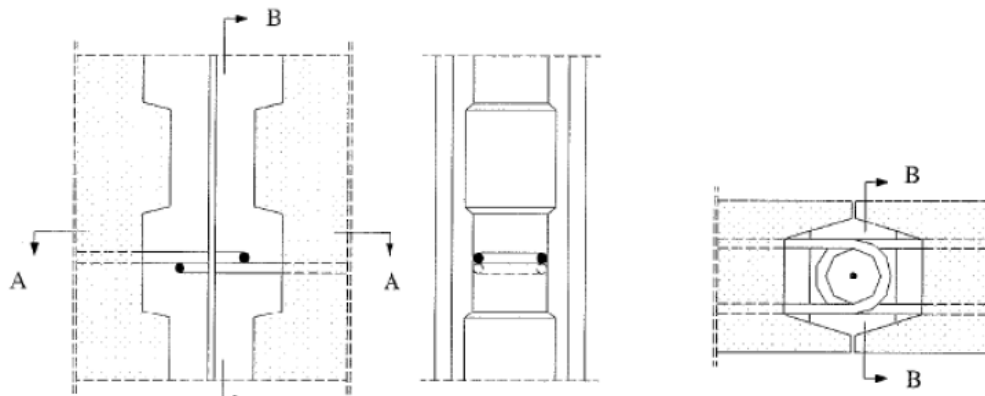


Figura 102 - Ligação indentada entre painéis de parede [45]

## 5 CASO DE ESTUDO

Neste capítulo será feita a descrição de um caso prático onde serão descritas as fases de construção de um edifício habitacional, construído por três metodologias distintas, sendo elas, de forma tradicional, replicando o mesmo edifício mas recorrendo a pré-fabricação e um último caso com elementos pré-fabricados montados em obra.

Serão apresentadas as principais conclusões relativas ao trabalho desenvolvido e feitas considerações acerca de desenvolvimentos que se considerem necessários com o objetivo de um melhor conhecimento e divulgação das soluções pré-fabricadas.

A comparação entre os diferentes métodos construtivos irá restringir-se ao cálculo estrutural de pilares, vigas e lajes, consoante as soluções a adotar para cada método construtivo.

### 5.1. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

Foi criado um edifício habitacional constituído por 4 pisos com uma área de implantação de 25,35 x 10,35 (m<sup>2</sup>) e uma altura de 15 m. Construído segundo um sistema reticulado composto por elementos lineares (vigas e pilares) de secção constante, o sistema será contraventado por um núcleo rígido (caixa de escadas e elevadores), uma vez que apresenta mais de 3 pisos.

Para a construção foi utilizado um betão C30/37 (valor de cálculo da resistência à compressão,  $f_{cd} = 20$  MPa) para vigas, pilares e lajes. Para as armaduras foi utilizado um aço A400NR (valor de cálculo da tensão de cedência de  $f_{yd} = 348$  MPa).

O edifício localiza-se na área metropolitana de Porto e tem uma classe estrutural S4, logo o tempo de vida útil do projeto é de 50 anos. A classe de exposição dos elementos é XC1 (corrosão induzida por carbonatação, em ambiente seco ou permanentemente húmido).

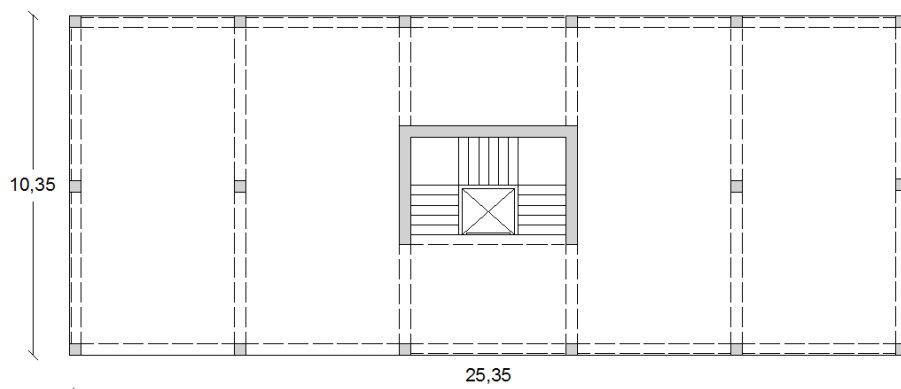


Figura 103 - Área de implantação do edifício

### 5.2. SISTEMA TRADICIONAL

Em estruturas realizadas segundo um sistema tradicional, a transmissão de esforços ocorre através dos elementos isolados (lajes, vigas, pilares e paredes), betonados *in situ* com auxílio de moldes também convencionais, montados manualmente no local onde será realizada a betonagem dos elementos.

#### 5.2.1. Processo Construtivo

Neste método o processo construtivo inicia-se com a execução dos elementos de fundação (sapatas) seguido da realização de vigas de fundação. A execução dos elementos verticais (pilares e paredes da caixa de escadas e elevadores) é a etapa seguinte, sendo depois realizados os elementos horizontais (vigas e lajes). Este ciclo (pilares, paredes, vigas e lajes) é feito para cada piso até a estrutura estar finalizada.

### 5.2.2. Pré-dimensionamento

✓ Lajes

O critério utilizado para pré-dimensionar as lajes foi a verificação do estado limite de deformação.

Este critério define que é necessário estabelecer valores limite tendo sempre em conta o sistema estrutural (EC2, capítulo 7.4.2). Segundo o quadro 7.4.N do EC2 para betão levemente solicitado, no caso de lajes armadas numa direção, o valor básico da relação entre vão/altura útil ( $l/d$ ) é de 30.

Assim sendo é possível obter a altura ( $h$ ) da laje da seguinte forma:

$$\frac{l}{d} \leq 30 \Leftrightarrow d \geq \frac{l}{30} \Leftrightarrow d \geq \frac{5,0}{30} \Leftrightarrow d \geq 0,17 \text{ m} \quad (1)$$

$$h = 0,17 + 0,03 = 0,20 \text{ m}$$

Optou-se por lajes de pavimento, armadas numa direção, com 5 m de vão e 0,20 m de altura.

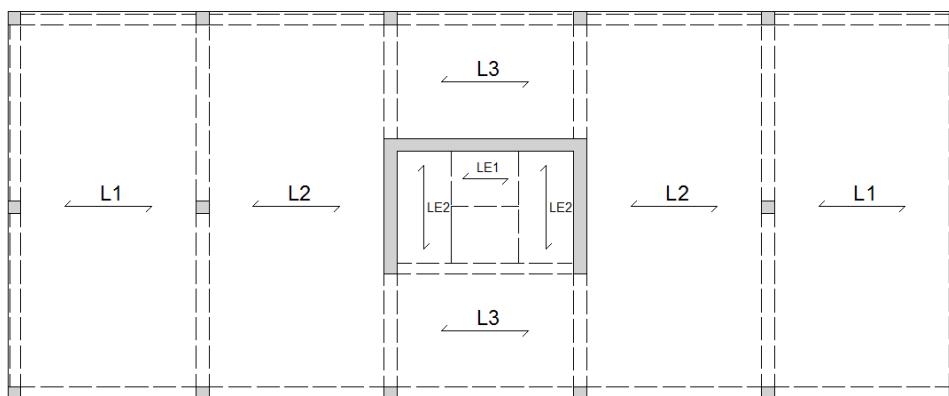


Figura 104 - Distribuição das lajes

## Capítulo 5

As lajes de habitação serão constituídas por pavimento flutuante ( $3 \text{ KN/m}^3$ ) na face superior da laje com  $0,03 \text{ m}$  de espessura, argamassa de regularização ( $21 \text{ KN/m}^3$ ) com  $0,05 \text{ m}$ , laje maciça ( $25 \text{ KN/m}^3$ ) de  $0,20 \text{ m}$  e reboco de gesso ( $12 \text{ KN/m}^3$ ) na face inferior da laje com  $0,03 \text{ m}$  de espessura. Enquanto que as paredes divisórias serão de tijolo furado de  $15$  ( $2,10 \text{ KN/m}^2$ ) e  $0,02 \text{ m}$  de reboco de gesso em cada face, com em pé-direito de  $2,50 \text{ m}$ .

Ações atuantes:

$$\text{Peso Próprio da Laje} = 0,20 \times 25 = 5,00 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Peso Próprio dos Revestimentos} = 0,03 \times 3 + 0,05 \times 21 + 0,03 \times 12 = 1,50 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Peso Próprio das Paredes divisórias} = 2,10 + 0,04 \times 12 = 2,58 \text{ KN/m}^2$$

Segundo o artigo 15º do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), no caso de compartimentos destinados a utilização de carácter privado (habitações), o peso próprio das paredes divisórias pode ser obtido por 40% do peso de uma faixa de parede com  $1 \text{ m}$  de comprimento e com altura igual à da parede. De forma a que peso das paredes interiores se assimile a uma carga uniformemente distribuída em todo o pavimento, com valor característico por metro quadrado.

$$\text{Peso Próprio das Paredes divisórias} = 2,81 \times 2,50 \times 0,40 = 2,58 \text{ KN/m}^2$$

$$G_k = 5,00 + 1,50 + 2,58 = 9,08 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Sobrecarga} \Rightarrow Q_k = 2,0 \text{ KN/m}^2$$

$$P_{ed} = 1,35 \times G_k + 1,50 \times Q_k \quad (2)$$

$$P_{ed} = 1,35 \times 9,08 + 1,50 \times 2,0 = 15,26 \text{ KN/m}^2$$

As paredes exteriores do edifício serão de alvenaria dupla (11+15) com um peso de  $3,0 \text{ KN/m}^2$ , rebocadas  $0,03 \text{ m}$  em ambas as faces e com isolamento térmico realizado através de placas de poliestireno extrudido ( $0,4 \text{ KN/m}^3$ ) com uma espessura de  $0,06 \text{ m}$ , ao longo de um pé-direito de  $2,80 \text{ m}$ .

$$\text{Peso Próprio das Paredes exteriores} = (3,0 + 2 \times 0,03 \times 12 + 0,06 \times 0,4) \times 2,8 = 10,47 \text{ KN/m}$$

## Caso de Estudo

As lajes de escadas serão maciças de 0,15 m e revestidas por pedra mármore (27 KN/m<sup>3</sup>) na face superior com 0,02 m de espessura, argamassa de regularização (21 KN/m<sup>3</sup>) com 0,03 m de espessura, e por reboco de gesso (12 KN/m<sup>3</sup>) na face inferior com 0,02 m de espessura.

Ações atuantes:

$$\text{Peso Próprio da Laje de escadas} = 0,15 \times 25 = 3,75 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Peso Próprio dos Revestimentos das escadas} = 0,02 \times 27 + 0,03 \times 21 + 0,02 \times 12 = 1,41 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Peso Próprio dos degraus} = \frac{16,7}{2} \times 25 = 2,08 \text{ KN/m}^2$$

Altura entre pisos = 3 m

Altura dos degraus = 0,167 m

$$n^{\circ} \text{ de degraus} = \frac{3}{0,167} = 18$$

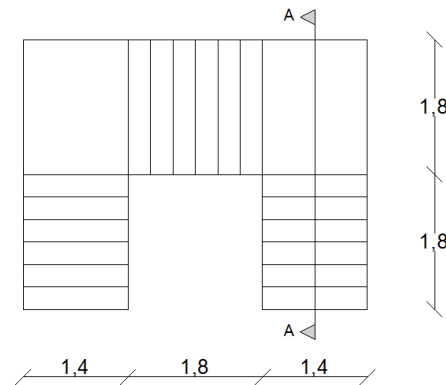


Figura 105 - Planta das escadas

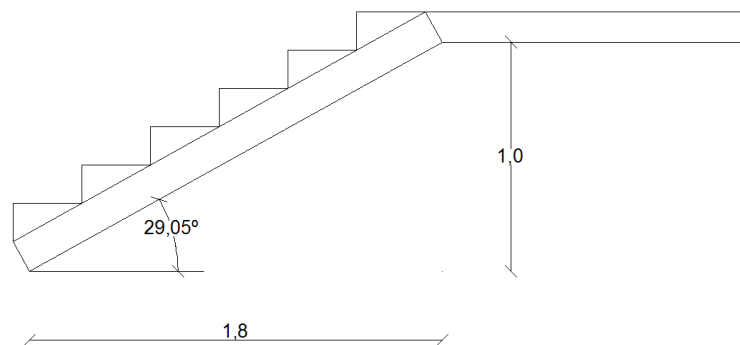


Figura 106 - Corte das escadas (corte A-A)

$$P_{ed} = 1,35 \times \left( \frac{3,75}{\cos(29,05)} + 1,41 + 2,08 \right) + 1,5 \times 3 = 15,00 \text{ KN/m}^2$$

## Capítulo 5

### ✓ Vigas

Para o pré-dimensionamento das vigas do caso 1 decidiu-se adotar inicialmente vigas de secção retangular com 0,35 m de largura e 0,40 m de altura, verificando posteriormente se estas dimensões cumpriam o  $\mu$  económico:

$$0,10 \leq \mu = \frac{M_{ed}}{b \times d^2 \times f_{cd}} \leq 0,25 \quad (3)$$

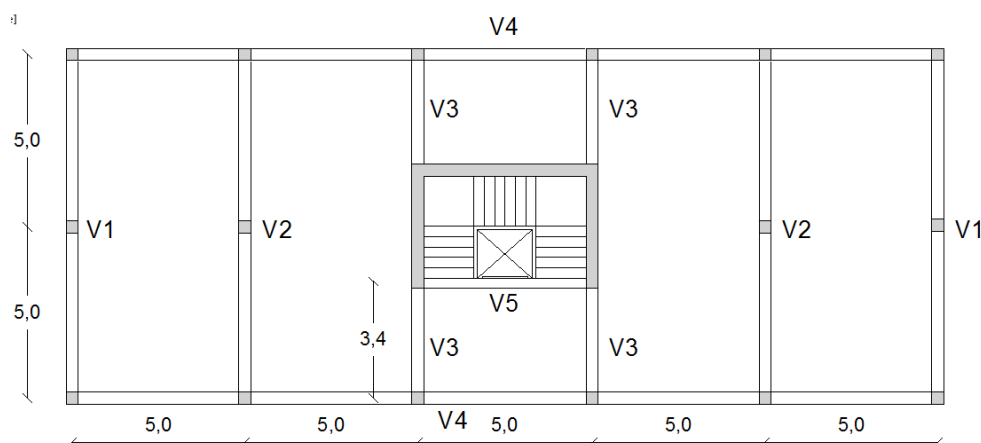


Figura 107 - Disposição e vãos das vigas

Tendo em conta as cargas exercidas sobre as vigas e as dimensões das mesmas, foi possível obter os diagramas de esforço transverso e momento fletor através do programa FTOOL e a partir daí chegar aos valores da tabela 11, tendo-se verificado a condição imposta ( $0,10 \leq \mu \leq 0,25$ ).

Tabela 11 - Pré-dimensionamento das vigas

| Viga | Secção (m <sup>2</sup> ) | Ped (KN/m) | M <sub>ed</sub> <sup>+</sup> (KN.m) | M <sub>ed</sub> <sup>-</sup> (KN.m) | $\mu^+$ | $\mu^-$ |
|------|--------------------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|---------|
| V1   | 0,35 x 0,40              | 57,01      | 100,2                               | 178,2                               | 0,10    | 0,19    |
| V2   |                          | 81,03      | 142,4                               | 253,2                               | 0,15    | 0,26    |
| V3   |                          | 81,03      | 117,1                               | ---                                 | 0,12    | ---     |
| V4   |                          | 26,49      | 51,6                                | 69,7                                | 0,05    | 0,07    |
| V5   | 0,20 x 0,40              | 40,06      | 10,32                               | 70,2                                | ---     | 0,13    |

A viga V4 não cumpre o  $\mu$  económico, uma vez que não é necessária para suportar os esforços exercidos pelas lajes, mas é importante no que diz respeito a deformações.

## Caso de Estudo

### ✓ Pilares

O pré-dimensionamento dos pilares foi realizado impondo a condição:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (4)$$

Em que:

$$N_{Ed} = P_{ed} \times n^{\circ} \text{ de pisos} \quad (5)$$

$$N_{Rd} = f_{cd} \times A_c + A_s \times f_{yd} \quad (6)$$

$$A_s = \rho \times A_c \quad \rho \cong 1\% \quad (7)$$

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} = f_{cd} \times A_c + 0,01 \times A_c \times f_{yd} \Leftrightarrow A_c \geq \frac{N_{Ed}}{f_{cd} + 0,01 \times f_{yd}} \quad (8)$$

Onde  $f_{cd}$  é o valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão,  $A_c$  a área de secção transversal do pilar,  $A_s$  a área da secção de aço,  $N_{Ed}$  o valor de cálculo do esforço axial atuante no pilar e  $P_{ed}$  o valor da reação provocada pelas vigas apoiadas no pilar e  $f_{yd}$  o valor de cálculo da tensão de cedência ou da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% à tração do aço das armaduras ordinárias.

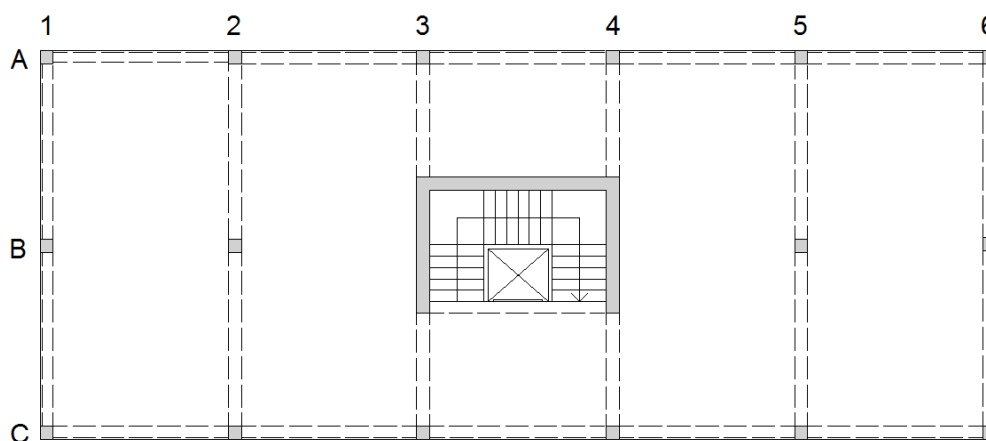


Figura 108 - Local de implantação dos pilares

Na tabela 12 estão as secções escolhidas para cada pilar tendo em conta o seu posicionamento e as cargas a atuar nos mesmos.

Tabela 12 - Pré-dimensionamento dos pilares

| Pilar | Ned (KN) | Ac (m <sup>2</sup> ) | Secção (m <sup>2</sup> ) |
|-------|----------|----------------------|--------------------------|
| A-1   | 796      | 0,034                | 0,20 x 0,20              |
| A-2   | 1504     | 0,064                | 0,30 x 0,30              |
| A-3   | 1333,5   | 0,057                | 0,25 x 0,25              |
| A-4   | 1333,5   | 0,057                | 0,25 x 0,25              |
| A-5   | 1504     | 0,064                | 0,30 x 0,30              |
| A-6   | 796      | 0,034                | 0,20 x 0,20              |
| B-1   | 1782     | 0,076                | 0,30 x 0,30              |
| B-2   | 2532     | 0,108                | 0,35 x 0,35              |
| B-5   | 2532     | 0,108                | 0,35 x 0,35              |
| B-6   | 1782     | 0,076                | 0,30 x 0,30              |
| C-1   | 796      | 0,034                | 0,20 x 0,20              |
| C-2   | 1504     | 0,064                | 0,30 x 0,30              |
| C-3   | 1333,5   | 0,057                | 0,25 x 0,25              |
| C-4   | 1333,5   | 0,057                | 0,25 x 0,25              |
| C-5   | 1504     | 0,064                | 0,30 x 0,30              |
| C-6   | 796      | 0,034                | 0,20 x 0,20              |

Uma vez que as vigas (V1, V2 V3 e V4) têm uma largura de 0,35 m, optou-se por pilares de secção quadrada 0,35 x 0,35 (m<sup>2</sup>) cumprindo assim a secção exigida por cada pilar de acordo com as cargas exercidas sobre os mesmos.

### 5.3. ESTRUTURA PRÉ-FABRICADA (RÉPLICA DA ESTRUTURA *IN SITU*)

Nas estruturas pré-fabricadas os elementos estruturais como pilares, vigas, lajes e outros são executados em fábrica adquirindo um certo nível de resistência antes do seu posicionamento definitivo na estrutura, eliminando assim algumas tarefas como betonagem dos elementos, reduzindo o número de etapas do processo construtivo, gerando uma produção mais rápida, segura, racionalizada e organizada.

#### 5.3.1. Processo Construtivo

Inicialmente procede-se ao transporte dos elementos estruturais pré-fabricados (blocos de fundação, pilares, vigas e lajes), desde a fábrica até ao estaleiro de obra, onde são armazenados para posteriormente serem montados.

A execução da estrutura inicia-se com o posicionamento dos elementos de fundação. De seguida os pilares são içados por meio de uma grua móvel e colocados nos blocos de fundação sendo a ligação entre eles (pilar – fundação) realizada por encaixe.

Nesta metodologia uma vez que o objetivo é tentar replicar uma construção tradicional, optou-se por pilares pré-fabricados com armaduras salientes que servirão não só para ligar os diferentes trocos de pilares como também para conectar as vigas aos mesmos, sendo esse nó de ligação betonado *in situ*.

Nas vigas, para além da existência de armaduras salientes nas extremidades laterais (desenho 9 do anexo II), também terão estribos salientes na face superior que servirão de ligação às pré-lajes maciças que depois da sua colocação serão alvo de uma betonagem complementar *in situ* para ligar o conjunto.

### 5.3.2. Pré-dimensionamento

#### ✓ Lajes

No pré-dimensionamento das pré-lajes maciças foi adotado também o critério da verificação do estado limite de deformação, à semelhança do que tinha sido feito anteriormente (1º caso).

Dai vem que:

$$d \geq 0,17 \text{ m}$$

$$h = 0,17 + 0,03 = 0,20 \text{ m}$$

A opção para as lajes de pavimento recaiu em lajes 5 m de vão e 0,07 m de altura com uma camada de betão executada *in situ* com 0,13 m de espessura.

Uma vez que o tipo de revestimento e as cargas exercidas pelas paredes interiores e exteriores são iguais ao caso 1, uma vez que o objetivo é replicar esse caso, vem que quer as dimensões das vigas, quer a dos pilares são idênticas ao sistema tradicional.

## 5.4. ESTRUTURA REALIZADA COM ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS MONTADOS EM OBRA

Neste caso a estrutura será realizada somente com elementos estruturais pré-fabricados em fábrica e posteriormente transportados e montados no local da obra onde ficaram em definitivo.

### 5.4.1. Processo Construtivo

As fundações serão em cálice, fazendo com que a ligação com os pilares se realize por encaixe.

Cada pilar será constituído por uma peça única em toda a altura do edifício, com perfiz metálicos que atravessaram o pilar em toda a sua secção e servirão de apoio às vigas uma vez que estas serão simplesmente apoiadas. Quanto às lajes a escolha recaiu sobre lajes alveolares, que serão simplesmente apoiadas sobre as vigas.

### 5.4.2. Pré-dimensionamento

✓ Lajes

Para as lajes alveolares o critério de dimensionamento foi idêntico ao utilizado para as lajes maciças betonadas *in situ* e pré-fabricadas.

Assim sendo foi possível obter a altura (d) da laje da seguinte forma:

$$\frac{l}{d} \leq 30 \Leftrightarrow d \geq \frac{l}{30} \Leftrightarrow d \geq \frac{5,0}{30} \Leftrightarrow d \geq 0,17 \text{ m}$$

Para o dimensionamento foi considerado o catálogo da PAVIPREL.

A laje alveolar escolhida foi a LA 20-2-R com 50 mm de lâmina de compressão, com uma altura total de 0,20 m.

## Caso de Estudo

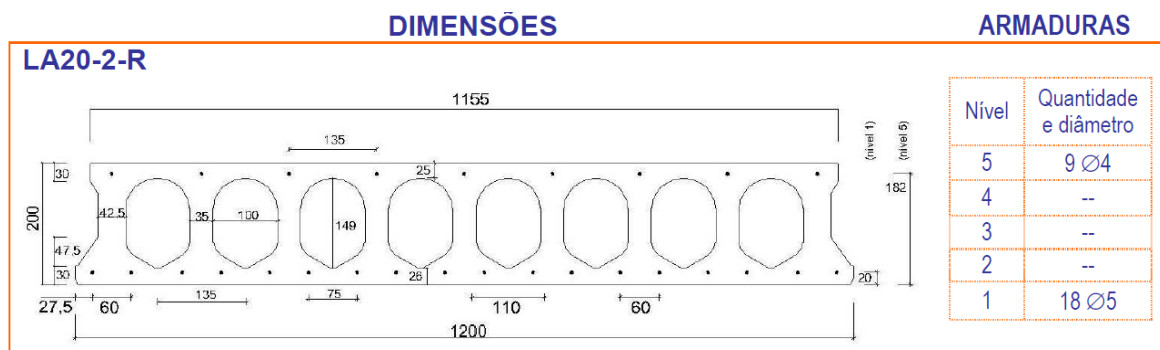


Figura 109 - Dimensões da laje alveolar [19]

| LA20-R    | Espessura lâmina comp. (mm) | Peso (kN/m <sup>2</sup> ) | M <sub>rd</sub> (kN.m/m) | V <sub>rd</sub> (kN/m) | M <sub>fctk</sub> (kN.m/m) | EI (kN.m <sup>2</sup> /m) |
|-----------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|
| LA 20-2-R | 0                           | 2.95                      | 82.20                    | 83.71                  | 42.25                      | 19138.42                  |
|           | 50                          | 4.15                      | 104.60                   | 101.47                 | 61.2                       | 38063.59                  |
|           | 80                          | 4.87                      | 122.51                   | 111.72                 | 74.25                      | 52269.93                  |
|           | 100                         | 5.35                      | 130.03                   | 118.38                 | 82.15                      | 63270.60                  |

Figura 110 - Tabela de dimensionamento da laje alveolar [19]

Os revestimentos serão idênticos aos casos anteriores e as paredes interiores serão formadas por duas placas de gesso cartonado com 0,10 m de espessura, com um peso volúmico de 10 KN/m<sup>3</sup>.

Ações atuantes:

$$\text{Peso Próprio da laje} = 4,15 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Revestimentos} = 1,5 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Paredes divisórias} = 0,10 \times 2 \times 10 = 2,0 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Paredes divisórias} = 2,0 \times 2,5 \times 0,40 = 2,0 \text{ KN/m}^2$$

$$G_k = 4,15 + 1,5 + 2,0 = 7,65 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Sobrecarga} \Rightarrow Q_k = 2,0 \text{ KN/m}^2$$

$$P_{ed} = 1,35 \times G_k + 1,50 \times Q_k$$

$$P_{ed} = 1,35 \times 7,65 + 1,50 \times 2,0 = 13,33 \text{ KN/m}^2$$

- ✓ Considerando a situação mais desfavorável da laje como simplesmente apoiada, vem:

Máximo esforço transversal atuante – junto aos apoios

$$V_{ed} = \frac{13,33 \times 5}{2} = 33,33 \text{ KN/m} < V_{rd} = 101,47 \text{ KN/m} \quad (10)$$

Máximo momento fletor positivo atuante – a meio vão

$$M_{ed} = \frac{13,33 \times 5^2}{8} = 41,66 \text{ KN} \cdot \text{m/m} < M_{rd} = 104,60 \text{ KN} \cdot \text{m/m} \quad (11)$$

Verificação da deformação:

$$\delta = \frac{5 \times 13,33 \times 5^4}{348 \times 38063,59} \times 2,5 = 0,008 \text{ m} < \frac{5}{500} = 0,01 \text{ m} \quad (12)$$

As paredes exteriores serão constituídas por painéis pré-fabricados formados por duas placas de GRC (betão armado com fibra de vidro), tendo o conjunto uma espessura de 0,10 m e uma densidade de 19 KN/m<sup>3</sup> e um pé-direito de 2,80 m.

Peso Próprio das Paredes exteriores = 0,10 × 19 × 2,80 = 5,32 KN/m

- ✓ Vigas

As vigas serão simplesmente apoiadas sobre os pilares, com vãos de 5 m (viga V1,V2, V4) e 3,40 m (viga V3).

Para o pré-dimensionamento das vigas decidiu-se adotar inicialmente vigas de secção quadrada com 0,40 m de largura e 0,40 m de altura, verificando posteriormente se estas dimensões cumpriam o  $\mu$  económico (como nos casos anteriores):

$$0,10 \leq \mu = \frac{M_{ed}}{b \times d^2 \times f_{cd}} \leq 0,25$$

Como as vigas estão simplesmente apoiadas o momento máximo é dado por:

$$M_{ed} = \frac{p \times l^2}{8} \quad (13)$$

## Caso de Estudo

Os valores do momento máximo e do correspondente  $\mu$  encontram-se na tabela seguinte sendo verificado o  $\mu$  económico para todas as vigas.

Tabela 13 - Pré-dimensionamento das vigas (2º caso)

| Viga | Secção (m <sup>2</sup> ) | Ped (KN/m) | M <sub>ed</sub> (KN.m) | $\mu$ |
|------|--------------------------|------------|------------------------|-------|
| V1   | 0,40 x 0,40              | 47,88      | 149,6                  | 0,14  |
| V2   |                          | 76,00      | 237,5                  | 0,22  |
| V3   |                          | 76,00      | 109,8                  | 0,10  |
| V4   |                          | 19,64      | 61,4                   | 0,06  |

### ✓ Pilares

Os pilares serão formados por uma peça única com altura igual a do edifício (15 m) e apresentam perfis metálicos encastrados, onde as vigas ficam simplesmente apoiadas (desenho 10 do anexo II).

Neste caso o fator determinante para o dimensionamento dos pilares serão os deslocamentos provocados na estrutura pelas ações horizontais. Segundo o E.C.2 a limitação do deslocamento entre pisos para edifícios com elementos não estruturais dúcteis deve satisfazer a seguinte condição:

$$d_r \nu \leq 0,0075h \quad (14)$$

$$d_r \times 0,5 \leq 0,0075 \times 15 = 0,225 \text{ m}$$

Com recurso ao programa Autodesk ROBOT Structural Analysis foi possível constatar que para satisfazer um  $d_{r,\text{máx}}$  de 22,5 cm, os pilares necessitam ter uma secção quadrada de 0,60 x 0,60 (m<sup>2</sup>).

## 5.5. ARMADURAS

As armaduras das lajes e vigas são idênticas quer na solução betonada *in situ*, quer naquela que tenta replicar a mesma solução mas recorrendo a pré-fabricação.

O cálculo das armaduras das lajes e da armadura longitudinal das vigas foi efetuado da seguinte forma:

- ✓ 1º Determinou-se  $\mu$ :

$$\mu = \frac{M_{ed}}{b \times d^2 \times f_{cd}}$$

- ✓ 2º Retirou-se o valor de  $w$  através da consulta das tabelas de flexão;
- ✓ 3º Obteve-se a área de armadura, sendo que:

$$\omega = \frac{A_s \times f_{yd}}{b \times d \times f_{cd}} \quad (15)$$

Para determinar as armaduras de esforço transverso necessárias colocar nas vigas:

- ✓ 1º Verificou-se a condição:

$$V_{ed} \leq V_{Rd,máx} \quad (16)$$

Em que:

$$V_{Rd,máx} = b_w \times z \times v \times f_{cd} \times \frac{1}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (17)$$

$$z = 0,9 \times d \quad (18)$$

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad (19)$$

$$v = 0,6 \times \left(1 - \frac{f_{cd}}{250}\right) \quad (20)$$

- ✓ 2º Obteve-se a armadura efetiva máxima de esforço transverso, verificado a condição:

$$V_{ed} \leq V_{Rd,s} \quad (21)$$

Em que:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \times z \times f_{yd} \times \cot \theta \quad (22)$$

- ✓ 3º Calculou-se a armadura mínima necessária colocar nas regiões menos esforçadas:

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{\min} = \rho_{w,\min} \times b_w \times \sin \alpha \quad (23)$$

Em que:

$$\rho_{w,\min} = 0,08 \times \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (24)$$

$$\sin \alpha = 1,0 \quad (25)$$

## Caso de Estudo

Nas tabelas seguintes estão apresentadas as armaduras das lajes e vigas respetivamente.

Tabela 14 - Armaduras das lajes do caso 1 e 2

| Elemento | Armadura inferior (cm <sup>2</sup> /m) |      |      |                |                     | Armadura superior (cm <sup>2</sup> /m) |      |      |                |                     |
|----------|--|------|------|----------------|---------------------|--|------|------|----------------|---------------------|
|          | M <sub>ed</sub>                        | μ    | w    | A <sub>s</sub> | Solução de armadura | M <sub>ed</sub>                        | μ    | w    | A <sub>s</sub> | Solução de armadura |
| L1 e L2  | 29,7                                   | 0,05 | 0,05 | 5,22           | Φ10//0,15           | 40,2                                   | 0,07 | 0,07 | 7,08           | Φ10//0,10           |
|          | 26,6                                   | 0,05 | 0,05 | 4,66           | Φ12//0,20           | 47,7                                   | 0,08 | 0,09 | 8,45           | Φ10//0,125          |
| L3       | 29,7                                   | 0,05 | 0,05 | 5,22           | Φ10//0,15           | 40,2                                   | 0,07 | 0,07 | 7,08           | Φ10//0,10           |
| LE1      | 6,1                                    | 0,02 | 0,02 | 1,48           | Φ10//0,15           | ---                                    | ---  | ---  | ---            | Φ8//0,15            |
| LE2      | 29,5                                   | 0,10 | 0,11 | 7,48           | Φ12//0,125          | ---                                    | ---  | ---  | ---            | Φ8//0,15            |

Tabela 15 - Armaduras longitudinais das vigas do caso 1 e 2

| Elemento | Armadura inferior (cm <sup>2</sup> ) |      |      |                |                     | Armadura superior (cm <sup>2</sup> ) |      |      |                |                     |
|----------|--------------------------------------|------|------|----------------|---------------------|--------------------------------------|------|------|----------------|---------------------|
|          | M <sub>ed</sub>                      | μ    | w    | A <sub>s</sub> | Solução de armadura | M <sub>ed</sub>                      | μ    | w    | A <sub>s</sub> | Solução de armadura |
| Viga 1   | 100,2                                | 0,11 | 0,11 | 8,23           | 8Φ12                | 178,2                                | 0,19 | 0,21 | 15,50          | 5Φ20                |
| Viga 2   | 142,4                                | 0,15 | 0,16 | 12,08          | 4Φ20                | 253,2                                | 0,26 | 0,32 | 23,44          | 5Φ25                |
| Viga 3   | 117,0                                | 0,12 | 0,13 | 9,72           | 5Φ16                | ---                                  | ---  | ---  | ---            | 2Φ10                |
| Viga 4   | 51,6                                 | 0,05 | 0,06 | 4,15           | 4Φ12                | 69,7                                 | 0,07 | 0,08 | 5,63           | 5Φ12                |
| Viga 5   | 70,2                                 | 0,13 | 0,14 | 5,86           | 3Φ16                | ---                                  | ---  | ---  | ---            | 2Φ10                |

Tabela 16 - Armaduras transversais das vigas do caso 1 e 2

| Elemento | V <sub>Rd,máx</sub> | V <sub>ed</sub> | Zona mais esforçada                        |          | Zona menos esforçada  |          |
|----------|---------------------|-----------------|--|----------|---|----------|
|          |                     |                 | $\frac{A_{sw}}{s}$<br>(cm <sup>2</sup> /m) | Estribos | $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min}$<br>(cm <sup>2</sup> /m) | Estribos |
|          |                     |                 | Viga 1                                     | 424,4    | 106,9   | 3,69     |
| Viga 2   | 424,4               | 151,9           | 5,24                                       | Φ6//0,10 | 3,29  | Φ6//0,15 |
| Viga 3   | 424,4               | 137,8           | 4,76                                       | Φ8//0,10 | 3,29  | Φ6//0,15 |
| Viga 4   | 424,4               | 52,3            | 3,29                                       | Φ6//0,15 | 3,29  | Φ6//0,15 |
| Viga 5   | 242,5               | 71,8            | 2,48                                       | Φ6//0,20 | 2,19  | Φ6//0,25 |

Devido ao facto de o edifício localizar-se no Porto, numa zona sísmica tipo I e num solo com depósitos profundos de areia compacta de seixo (cascalho) com uma espessura de várias dezenas de metros (solo tipo C), houve a necessidade de ter em conta as ações horizontais para o cálculo da armadura dos pilares uma vez que estes elementos são os mais afetados por este tipo de ações.

## Capítulo 5

Com o auxílio do programa Autodesk ROBOT Structural Analysis, foi possível obter os momentos fletores em cada direção (tab. 17) e com recurso ao programa FAGUS-6 obter as armaduras de cada pilar, descritas na tabela 18.

Tabela 17 - Esforços exercidos nos pilares do caso 1 e 2

| Elemento                 | Tramo               | N <sub>ed</sub><br>(kN) | F <sub>y</sub><br>(kN) | F <sub>z</sub><br>(kN) | M <sub>x</sub><br>(kN.m) | M <sub>y</sub><br>(kN.m) | M <sub>z</sub><br>(kN.m) |
|--------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| A-1<br>A-6<br>C-1<br>C-6 | r/c – 1º piso       | 883,18                  | 14,24                  | -15,21                 | 0,03                     | 15,47                    | 14,54                    |
|                          | 1º piso – 2º piso   | 701,69                  | 28,43                  | -28,23                 | 0,01                     | 42,86                    | 43,47                    |
|                          | 2º piso – 3º piso   | 511,88                  | 29,05                  | -28,47                 | 0                        | 42,12                    | 43,24                    |
|                          | 3º piso – 4º piso   | 318,49                  | 30,19                  | -29,21                 | 0,01                     | 44,08                    | 45,53                    |
|                          | 4º piso – cobertura | 121,38                  | 35,14                  | -34,62                 | 0,03                     | 48,94                    | 49,98                    |
| A-2<br>A-5<br>C-2<br>C-5 | r/c – 1º piso       | 1431,38                 | 18,02                  | 2,07                   | 0,03                     | -1,83                    | 18,44                    |
|                          | 1º piso – 2º piso   | 1131,56                 | 35,24                  | 4,61                   | 0,01                     | -7,19                    | 53,83                    |
|                          | 2º piso – 3º piso   | 830,21                  | 35,48                  | 4,32                   | 0                        | -6,35                    | 52,89                    |
|                          | 3º piso – 4º piso   | 528,44                  | 36,05                  | 4,19                   | 0                        | -6,43                    | 54,62                    |
|                          | 4º piso – cobertura | 225,56                  | 45,88                  | 5,69                   | 0,04                     | -7,54                    | 63,45                    |
| A-3<br>A-4<br>C-3<br>C-4 | r/c – 1º piso       | 1000,24                 | 5,97                   | 1                      | 0,03                     | -0,76                    | 6,59                     |
|                          | 1º piso – 2º piso   | 780,67                  | 9,59                   | 3,46                   | 0                        | -4,97                    | 15,77                    |
|                          | 2º piso – 3º piso   | 564                     | 7,01                   | 4,36                   | 0                        | -6,32                    | 11,15                    |
|                          | 3º piso – 4º piso   | 351,2                   | 5,59                   | 4,95                   | 0                        | -7,31                    | 8,97                     |
|                          | 4º piso – cobertura | 139,34                  | 7,49                   | 6,21                   | 0,05                     | -8,67                    | 10,06                    |
| B-1<br>B-6               | r/c – 1º piso       | 1421,95                 | 0,17                   | -17,6                  | 0,03                     | 17,72                    | 0,44                     |
|                          | 1º piso – 2º piso   | 1121,04                 | 1,71                   | -32,27                 | 0,01                     | 49,53                    | 2,77                     |
|                          | 2º piso – 3º piso   | 822,91                  | 2,53                   | -31,6                  | 0                        | 46,67                    | 3,92                     |
|                          | 3º piso – 4º piso   | 525,19                  | 3,04                   | -30,85                 | 0,01                     | 47,43                    | 4,64                     |
|                          | 4º piso – cobertura | 227,74                  | 3,62                   | -43,78                 | 0,02                     | 57,88                    | 5,17                     |
| B-2<br>B-5               | r/c – 1º piso       | 2068,05                 | 0,46                   | 4,2                    | 0,03                     | -4,14                    | 0,85                     |
|                          | 1º piso – 2º piso   | 1619,83                 | 1,88                   | 9                      | 0,01                     | -13,4                    | 3,01                     |
|                          | 2º piso – 3º piso   | 1200,89                 | 2,71                   | 10,13                  | 0                        | -14,71                   | 4,2                      |
|                          | 3º piso – 4º piso   | 797,57                  | 3,27                   | 10,7                   | 0,01                     | -16,24                   | 4,99                     |
|                          | 4º piso – cobertura | 410,23                  | 3,96                   | 15,15                  | 0,02                     | -20,29                   | 5,72                     |

## Caso de Estudo

Tabela 18 - Armaduras dos pilares do caso 1 e 2

| Elemento   | Tramo               | Armadura longitudinal      | Estribos       |
|------------|---------------------|----------------------------|----------------|
| A-1<br>A-6 | r/c – 2º piso       | 4 $\phi$ 20                | $\phi$ 8//0,25 |
| C-1<br>C-6 | 2º piso – cobertura | 6 $\phi$ 20<br>2 $\phi$ 16 | $\phi$ 8//0,20 |
| A-2<br>A-5 | r/c – 2º piso       | 4 $\phi$ 20                | $\phi$ 8//0,25 |
| C-2<br>C-5 | 2º piso – cobertura | 6 $\phi$ 20                | $\phi$ 8//0,25 |
| A-3<br>A-4 | r/c – 2º piso       | 4 $\phi$ 20                | $\phi$ 8//0,25 |
| C-3<br>C-4 | 2º piso – cobertura | 4 $\phi$ 20                | $\phi$ 8//0,25 |
| B-1<br>B-6 | r/c – 2º piso       | 4 $\phi$ 20                | $\phi$ 8//0,25 |
|            | 2º piso – cobertura | 4 $\phi$ 20                | $\phi$ 8//0,25 |
| B-2<br>B-5 | r/c – 2º piso       | 4 $\phi$ 20                | $\phi$ 8//0,25 |
|            | 2º piso – cobertura | 4 $\phi$ 20                | $\phi$ 8//0,25 |

Para a solução inteiramente pré-fabricada, a armadura das lajes alveolares é apresentada na tabela seguinte, possuindo também uma armadura superior ( $\phi$ 10//0,225) e de distribuição ( $\phi$ 8//0,125) retirada do catálogo da PAVIPREL conforme a tabela 20.

Tabela 19 - Armaduras das lajes alveolares do caso 3

| Elemento      | Armadura (cm <sup>2</sup> /m) |       |      |                | Solução de armadura |
|---------------|-------------------------------|-------|------|----------------|---------------------|
|               | M <sub>ed</sub>               | $\mu$ | w    | A <sub>s</sub> |                     |
| Laje alveolar | 41,66                         | 0,07  | 0,08 | 7,34           | $\phi$ 10//0,10     |

Tabela 20 - Armadura de distribuição das lajes alveolares

| Prancha<br>L20-R | ARMADURA DE DISTRIBUIÇÃO<br>(mm <sup>2</sup> /m) |      |      |
|------------------|--|------|------|
|                  | A235   | A400 | A500 |
| LA 20-2-R        | 667  | 392  | 313  |

## Capítulo 5

Em relação as vigas, alguns elementos possuem consolas curtas (vigas 2 e 3), sendo calculadas da seguinte forma:

$$H_{sd} \geq 0,2 \times P_{sd} \quad (26)$$

$$F_s = P_{sd} \times \frac{a_c}{z} + H_{sd} \quad (27)$$

$$z = 0,8 \times d \quad (28)$$

$$A_s = \frac{F_s}{f_{syd}} \quad (29)$$

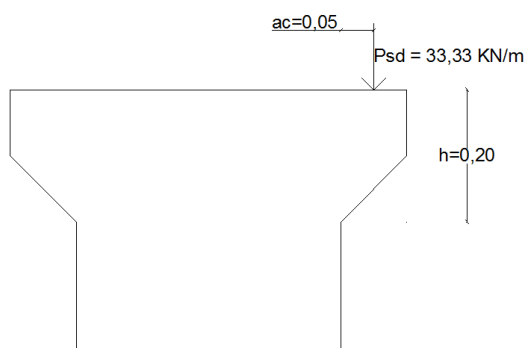


Figura 111 - Viga com consola curta

Nas tabelas seguintes estão descritas as armaduras necessárias colocar nas vigas pré-fabricadas.

Tabela 21 - Armaduras longitudinais das vigas do caso 3

| Elemento | Armadura longitudinal (cm <sup>2</sup> ) |      |      |                |                     | Armadura da consola curta |                       |                                   |                     |
|----------|--|------|------|----------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|
|          | M <sub>ed</sub>                          | μ    | w    | A <sub>s</sub> | Solução de armadura | H <sub>sd</sub> (KN/m)    | F <sub>s</sub> (KN/m) | A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> ) | Solução de armadura |
| Viga 1   | 143,5                                    | 0,13 | 0,14 | 12,01          | 6Φ16                | ---                       | ---                   | ---                               | ---                 |
| Viga 2   | 225,2                                    | 0,21 | 0,23 | 19,88          | 7Φ20                | 6,67                      | 18,92                 | 0,54                              | 2Φ6                 |
| Viga 3   | 104,1                                    | 0,10 | 0,10 | 8,51           | 8Φ12                | 6,67                      | 18,92                 | 0,54                              | 2Φ6                 |
| Viga 4   | 43,3                                     | 0,04 | 0,04 | 3,44           | 5Φ10                | ---                       | ---                   | ---                               | ---                 |

Tabela 22 - Armaduras transversais das vigas do caso 3

| Elemento | V <sub>Rd,máx</sub> | V <sub>ed</sub> | Zona mais esforçada                     |           | Zona menos esforçada                                       |           |
|----------|---------------------|-----------------|---|-----------|--|-----------|
|          |                     |                 | $\frac{A_{sw}}{s}$ (cm <sup>2</sup> /m) | Estribos  | $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min}$ (cm <sup>2</sup> /m) | Estribos  |
| Viga 1   | 485,0               | 114,8           | 4,38                                    | Φ8//0,225 | 4,38   | Φ8//0,225 |
| Viga 2   | 485,0               | 180,2           | 6,22                                    | Φ8//0,15  | 4,38   | Φ8//0,225 |
| Viga 3   | 485,0               | 122,5           | 4,38                                    | Φ8//0,225 | 4,38   | Φ8//0,225 |
| Viga 4   | 485,0               | 34,6            | 4,38                                    | Φ8//0,225 | 4,38   | Φ8//0,225 |

## Caso de Estudo

À semelhança do que foi feito para os pilares do 1º e 2º caso, na solução totalmente pré-fabricada a armadura dos pilares também foi calculada tendo em conta a ação sísmica. Tendo-se chegado aos valores das tabelas 22 e 23.

Tabela 23 - Esforços exercidos nos pilares do caso 3

| Elemento |     |     |     | N <sub>ed</sub><br>(kN) | F <sub>y</sub><br>(kN) | F <sub>z</sub><br>(kN) | M <sub>x</sub> (kN.m) | M <sub>y</sub> (kN.m) | M <sub>z</sub> (kN.m) |
|----------|-----|-----|-----|-------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| A-1      | A-6 | C-1 | C-6 | 697,17                  | 30,21                  | -10,01                 | 0                     | 113,29                | 340,49                |
| A-2      | A-5 | C-2 | C-5 | 1003,42                 | 53,37                  | -10,02                 | 0                     | 113,29                | 618,18                |
| A-3      | A-4 | C-3 | C-4 | 797,76                  | 2,01                   | -10,02                 | 0                     | 113,29                | 8,87                  |
| B-1      |     | B-6 |     | 954,36                  | 30,21                  | -12,64                 | 0                     | 144,06                | 340,49                |
| B-2      |     | B-5 |     | 1259,33                 | 53,37                  | -21,14                 | 0                     | 249,73                | 618,19                |

Tabela 24 - Armaduras dos pilares do caso 3

| Elemento |     |     |     | Armadura longitudinal | Estribos |
|----------|-----|-----|-----|-----------------------|----------|
| A-1      | A-6 | C-1 | C-6 | 16φ16                 | Φ8//0,20 |
| A-2      | A-5 | C-2 | C-5 | 10φ25<br>6φ16         | Φ8//0,20 |
| A-3      | A-4 | C-3 | C-4 | 10φ16<br>6φ12         | Φ8//0,20 |
| B-1      |     | B-6 |     | 10φ20<br>6φ12         | Φ8//0,20 |
| B-2      |     | B-5 |     | 16φ25                 | Φ8//0,20 |

## 5.6. ANÁLISE DE CUSTOS E PRAZOS

Neste capítulo o principal objetivo foi determinar qual a solução mais vantajosa entre uma construção tradicional, uma construção pré-fabricada replicando a construção tradicional e uma construção totalmente pré-fabricada. Para chegar a essa conclusão os melhores parâmetros a análise foram os custos e os prazos, associados a cada tipo de metodologia construtiva.

### 5.6.1. Medições

Para determinar os custos e os prazos de uma obra é necessário em primeiro lugar realizar as medições, ou seja, determinar a quantidade de betão, armadura e cofragem.

## Capítulo 5

Foram realizadas medições dos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares) dos 3 métodos construtivos abordados neste trabalho.

As medições efetuadas para determinar a quantidade necessária de betão dos elementos baseou-se nas formas geométricas que estes adquirem. Assim sendo, numa forma generalista, no cálculo das medições da quantidade de betão foi usada a fórmula: largura x comprimento x altura.

A medição das armaduras foram realizada em quilogramas (Kg), onde os comprimentos foram determinados em metros e convertidos em Kg, de acordo com a massa nominal dos varões.

O cálculo das cofragens necessárias foi obtido considerando todas as superfícies de betão que necessitaram de ser moldadas, sendo feita a medição em metros quadrados (largura x comprimento).

Na tabela seguinte encontram-se os resultados das medições realizadas nos 3 casos. As folhas com as medições pormenorizadas encontram-se no anexo 1.

Tabela 25 – Quantidade necessária de material

| Material | Tradicional         | Pré-fabricada (replica da tradicional) | Totalmente Pré-fabricada |
|----------|---------------------|--|--------------------------|
| Cofragem | 2053 m <sup>2</sup> | 30 m <sup>2</sup>                      | ---                      |
| Armadura | 12121 Kg            | 12121 Kg                               | 18145 Kg                 |
| Betão    | 349 m <sup>3</sup>  | 349 m <sup>3</sup>                     | 484 m <sup>3</sup>       |

### 5.6.2. Duração das tarefas

Para uma estimativa do tempo de construção foi preciso definir o número de operários necessários em cada método construtivo. Tendo em conta o número de operários e o conhecimento e experiência de engenheiros entendidos na matéria, foi possível estimar o tempo de construção de cada metodologia.

Tabela 26 - Prazos de execução

| Metodologia                            | Nº de operários | Duração (dias) |
|--|-----------------|----------------|
| Tradicional                            | 10              | 35             |
| Pré-fabricada (replica da tradicional) | 6               | 20             |
| Totalmente Pré-fabricada               | 4               | 10             |

### 5.6.3. Custos

Com base nas quantidades definidas de material foi possível determinar o custo necessário de casa caso, tendo em conta o valor unitário de cada material, o valor referente a mão-de-obra, ou seja, valor despendido no pagamento dos operários tendo em conta o número dos mesmos e o tempo de trabalho.

Tabela 27 - Custos associados a material

| Metodologia                            | Cofragem                           |        | Armadura              |        | Betão                              |        | Custo Total |
|--|------------------------------------|--------|-----------------------|--------|------------------------------------|--------|-------------|
|  | Preço unitário (€/m <sup>2</sup> ) | Custo  | Preço unitário (€/Kg) | Custo  | Preço unitário (€/m <sup>3</sup> ) | Custo  |             |
| Tradicional                            | 10                                 | 20 530 | 0,80                  | 9 697  | 70                                 | 24 430 | 54 657 €    |
| Pré-fabricada (replica da tradicional) | 10                                 | 300    | 0,80                  | 9 697  | 70                                 | 24 430 | 34 427 €    |
| Totalmente Pré-fabricada               | ---                                | ---    | 0,80                  | 14 516 | 70                                 | 33 880 | 48 396 €    |

A despesa referente a mão-de-obra depende do número de operários e da duração da obra. Foi considerado que o vencimento mensal de cada operário seria 1000€/mês e tendo em conta a informação referida anteriormente (subcapítulo 5.6.2.) foi possível estimar o valor despendido da seguinte forma:

$$\text{Valor} = \text{Duração da obra} \times \text{N}^{\circ} \text{ de operarios} \times \text{Vencimento} \quad (30)$$

➤ Tradicional:

$$\text{Valor} = 35 \times 10 \times \frac{1000}{30} = 11\,667\text{€}$$

➤ Pré-fabricada (replica da tradicional):

$$\text{Valor} = 20 \times 6 \times \frac{1000}{30} = 4\,000\text{€}$$

➤ Totalmente Pré-fabricada:

$$\text{Valor} = 10 \times 4 \times \frac{1000}{30} = 1\,333\text{€}$$

## Capítulo 5

Em pré-fabricação uma das tarefas mais dispendiosas é o transporte dos elementos que depende de diversos fatores, como por exemplo das dimensões e pesos das peças, distância da fábrica até a obra e condições das estradas, tornando incerto estimar o custo relacionado com esta atividade, o mesmos sucedendo com a montagem dos elementos.

Com base em diversas empresas de pré-fabricação, o custo relacionado com o transporte e montagem de elementos pré-fabricados, é em média um valor em torno de 200 € por volume de betão.

Uma vez que na construção pré-fabricada que tenta replicar a tradicional, o volume de betão pré-fabricado é 193 m<sup>3</sup> (não contabilizando a quantidade de betão de preenchimento dos nós de ligação viga – pilar e da camada de regularização sobre as pré-lajes), este valor conduz a um custo de transporte e montagem igual a 38 600 €.

Enquanto que na construção totalmente pré-fabricada, uma vez que todo o betão utilizado é pré-fabricado (484 m<sup>3</sup>), a despesa associada as operações de transporte e montagem é 96 800 €.

O custo total de cada metodologia tendo em conta os aspetos referidos, encontra-se descrito na tabela seguinte.

Tabela 28 - Custo total de cada metodologia

| Metodologia                            | Custo    |             |                       | Custo Total |
|--|----------|-------------|-----------------------|-------------|
|  | Material | Mão-de-obra | Transporte e Montagem |             |
| Tradicional                            | 54 657   | 11 667      | ---                   | 66 324 €    |
| Pré-fabricada (replica da tradicional) | 34 427   | 4 000       | 38 600                | 77 027 €    |
| Totalmente Pré-fabricada               | 48 396   | 1 333       | 96 800                | 146 529 €   |

## CONCLUSÃO

Com a realização deste documento foi possível constatar que à medida que o sector da pré-fabricação foi evoluindo deixou bem claro quais as suas vantagens e inconvenientes, tornando-se numa técnica com mais vantagens que desvantagens. Atualmente é possível apresentar estruturas pré-fabricadas em betão armado com elevada eficiência estrutural, versatilidade e economicamente viáveis, capazes de competir com construções realizadas *in situ*.

Pré-fabricação não é uma simples variação da técnica de construção tradicional. Como foi possível observar no 5º capítulo, para se extrair todos os benefícios da pré-fabricação, o ideal é que esta esteja presente desde a conceção do edifício.

A inércia à mudança, por parte de utilizadores e empresas, constitui um dos principais impedimentos no desenvolvimento e propagação da construção pré-fabricada. Esta situação é resultado essencialmente da falta de informação e formação no âmbito deste tema.

Uma das principais dificuldades na construção pré-fabricada é a escolha adequada do modelo estrutural, tendo repercussões no dimensionamento dos elementos e nas suas ligações. Esta condição, juntamente com a necessidade de um projeto mais rigoroso e pormenorizado, exige um maior esforço da parte dos projetistas.

No presente trabalho foram apresentadas as soluções mais correntes para pilares, vigas e lajes, sendo feito um estudo pormenorizado sobre os tipos de ligações entre estes elementos.

Com a informação recolhida através do estudo comparativo efetuado, entre as três metodologias de construção, foi possível concluir que com a eliminação do uso de cofragens e escoramentos, juntamente com fatores comuns em todas as construções pré-fabricadas com sendo maior controlo da qualidade, redução de mão-de-obra e prazos necessários para a execução, os edifícios construídos com elementos pré-fabricados mostram ser uma solução capaz de rivalizar com os edifícios construídos de forma tradicional.

Porém, como foi referido na parte final do capítulo 5, embora em termos de material e mão-de-obra as construções recorrendo a pré-fabricação apresentem menores custos, existem duas fases nomeadamente o transporte e a montagem que fazem aumentar de forma significativa o valor despendido na construção da estrutura.

## Conclusão

Este fator pode ser colmatado com o facto de o empreendimento ser construído num menor período de tempo, o que faz com que em termos comerciais o retorno do investimento possa ser antecipado e dessa forma, conseguir compensar o aumento do custo da estrutura; exemplo disso são as superfícies comerciais, os edifícios de escritórios e as vias de comunicação (passagens superiores e inferiores) que pelo simples facto de terem uma inauguração antecipada, dão a possibilidade de uma prestação de serviços também ela antecipada e consequentemente obtenção de valor.

Existem outras vantagens, nomeadamente em gastos que não dizem respeito a parte estrutural como sendo acabamentos e gestão do estaleiro que se verificam ser menores.

O facto de grande parte do volume de trabalho ser executado em fábrica, ou seja, em ambiente controlado, faz com que os acidentes tenham uma menor probabilidade de acontecer e a qualidade do produto final seja superior, valorizando o mesmo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vaz Branco, L., “Projeto de Edifício de Escritório em Estrutura Pré-fabricada”, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2008.
- [2] Baptista Gonçalves, A., “Pré-fabricação de Edifícios com solução em Lajes de Vigotas Treliçadas Pré-fabricadas”, Universidade Jean Piaget de Cabo Verde, 2010.
- [3] <http://dicasdefrances.blogspot.pt/2010/07/biarritz-aquitaine.html> (04/03/2015)
- [4] El Debs, M., “Concreto Pré-moldado: Fundamentos e Aplicações”. São Carlos: EESC-USP, 2000.
- [5] Rossi Boiça, S., “Desempenho de Estruturas em Concreto: Proposta de Modelo de Análise Comparativa entre Sistemas Construtivos”, Universidade Federal do Paraná, 2006.
- [6] <http://www.leonardi.com.br/> (04/03/2015)
- [7] <http://www.failedarchitecture.com/the-downfall-of-british-modernist-architecture/> (05/03/2015)
- [8] Saraiva, F., "Estruturas Pré-fabricadas em Betão," Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2012.
- [9] Faria, J. A., "Apontamentos de Apoio à Unidade Curricular de Tecnologias e Sistemas Construtivos," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- [10] Lopes, T. e Amado, M., “Pré-fabricação Aplicada ao Contexto da Reabilitação de Edifícios”, 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono.
- [11] Faria, J. A., “Divisórias Leves Prefabricadas”, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 1996.
- [12] Modern methods of construction in Germany – playing the off-site rule," Report of a DTI Global Watch Mission, 2004.
- [13] Precast Inc. Magazine, 2015.
- [14] Sousa, H., “Alvenarias em Portugal. Situação atual e perspectivas futuras”. Seminário sobre paredes de alvenaria. Porto, 2002.

## Referências Bibliográficas

- [15] Na, L., "Investigation of the Designers' and General Contractors' Perceptions of Offsite Construction Techniques in the United States Construction Industry," Dissertation Presented to the Graduate School of Clemson University, 2007.
- [16] "Current Practice and Potencial Uses of Prefabrication," DTI Construction Industry Directorate Project Report, 2003.
- [17] "Using Modern Methods of Construction to Build Homes More Quickly and Efficiently," Report by The National Audit Office, 2005.
- [18] "Using Modern Methods of Construction to Build Homes More Quickly and Efficiently," Report by The National Audit Office, 2005.
- [19] <http://www.paviprel.pt/> (01/08/2015)
- [20] <http://www.set.eesc.usp.br/2enpppcpm/> (09/03/2015)
- [21] Machado, R., Lopes, F., Brito, J., "Estruturas Pré-fabricadas de Edifícios", Apontamentos Académicos da Unidade de Processos de Construção do LEC, Instituto Superior Técnico.
- [22] REVEL, Maurice, "La Prefabricacion en la Construccion". Espartero: Ediciones URMO, 1975.
- [23] <http://seguranca-na-construcao.dashofer.pt/?s=modulos&v=capitulo&c=7683> (14/03/2015)
- [22] Costa, J., "Construção Prefabricada – Análise da Utilização da Prefabricação nas Várias Etapas do Processo Construtivo", Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2013.
- [23] Silva Resende, A., "Montagem de Vigas Pré-fabricadas em Betão em Obras de Arte Correntes e Especiais: Boas Práticas de Segurança e Saúde no Trabalho", Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2012.
- [24] Cunha, F., "Dimensionamento de Tabuleiros de Pontes com Vigas de Betão Pré-fabricado", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [25] Silva, A., "Ligações entre Elementos Pré-Fabricados de Betão", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 1998.

## Referências Bibliográficas

- [26] Lúcio, V., “Ligações Pré-fabricadas para Edifícios”, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2000.
- [27] FIP (2002). “Manual de Sistemas Pré-fabricados de Concreto”, Fédération Internationale de la Précontrainte. Traduzido: Marcelo de Araújo Ferreira.
- [28] FIB (2008). Bulletin 43: “Structural Connections for Precast Concrete Buildings”, Fédération Internationale du Béton, Laussane.
- [29] Simões de Oliveira, A., “Desenvolvimento de um Sistema de Ligação Viga-Pilar em Estrutura Pré-fabricada com Transmissão de Momento Flector”, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [30] FIP (2004), “Planning and Design Handbook on Precast Building Structures”, Fédération Internationale de la Précontrainte.
- [31] Reis Lagartixo, P., “Sistemas Estruturais de Edifícios Industriais Pré-fabricados em Betão”, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [32] Lança, P., “Processos de Construção de, Estruturas de Pisos”, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja.
- [33] <http://www.kilaje.com.br/servicos.php#3> (28/03/2015)
- [34] <http://www.abesc.org.br/pdf/manual.pdf> (29/03/2015)
- [35] <http://www.ufrgs.br/eso/content/?paged=5> (30/03/2015)
- [36] <http://emfil.com/slabs.html> (30/03/2015)
- [37] Carmo Cabral, J., Cavaleiro Júnior, N., “Estudo de Caso de Aplicação de Lajes Alveolares Protendidas Pré-fabricadas desde sua Fabricação até seu Destino Final na Obra”, Universidade da Amazônia, 2012.
- [38] Gonçalves de Sousa, B., “Abordagem Comparativa – Lajes Pré-esforçadas tipo TT”, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.

## Referências Bibliográficas

- [39] FIP (2008). "Planning and Design Handbook on Precast Building Structures", Fédération Internationale de la Précontrainte, Londres.
- [40] <http://www.gulfprecast.ae/> (29/03/2015)
- [41] <http://www.pacadar.es/> (29/03/2015)
- [42] <http://www.hpfengenharia.com/> (03/04/2015)
- [43] Catalogo Sika, "Soluções Sika para a Construção"
- [44] <http://construironline.dashofer.pt/?s=modulos&v=capitulo&c=545> (02/04/2015)
- [45] Albarran, E., "Construção com Elementos Pré-fabricados em Betão Armado", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [46] Society for Studies on the Use of Precast Concrete (Stupré). Structural Design Manual: "Precast Concrete Connection Details", 1981
- [47] Ferreira E., "Passadiços Prefabricados de Betão - Conceção e Projeto", Universidade do Minho, 2001.
- [48] Jacinto Tomás, Q., "Conceção e Projeto de um Edifício de Habitação com Estrutura em Betão Pré-Fabricado", Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [49] Hubert Mostert, L., "Design and Construction Preferences for Connections in the Precast Concrete Industry of South Africa", Faculty of Engineering at Stellenbosch University, 2014.
- [50] Reis, P., "Ligação Contínua Viga - Pilar em estruturas Pré-moldadas de betão", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2000.
- [51] Catálogo Pré-fabricados Castelo.

## **ANEXOS**

### **ANEXO I**

#### **TABELAS DE MEDIÇÕES DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS**

Tabelas de medições de elementos estruturais

Tabela 29 - Medição de cofragem do caso 1

| Elemento          | Dimensões (m <sup>2</sup> ) | Quantidade por piso | Área total de cofragem (m <sup>2</sup> ) |
|-------------------|-----------------------------|---------------------|--|
| Laje 1            | 50                          | 2                   | 100                                      |
| Laje 2            | 50                          | 2                   | 100                                      |
| Laje 3            | 17,00                       | 2                   | 34,00                                    |
| Laje E1           | 3,71                        | 1                   | 3,71                                     |
| Laje E2           | 5,40                        | 2                   | 10,81                                    |
| Viga 1            | 9,50                        | 2                   | 19,00                                    |
| Viga 2            | 7,50                        | 2                   | 15,00                                    |
| Viga 3            | 2,55                        | 4                   | 10,20                                    |
| Viga 4            | 23,75                       | 2                   | 47,50                                    |
| Viga 5            | 3,25                        | 1                   | 3,25                                     |
| Pilares           | 4,20                        | 16                  | 67,20                                    |
| Total por piso    |                             |                     | 411                                      |
| Total no edifício |                             |                     | 2053                                     |

Tabela 30 - Medição de betão dos casos 1 e 2

| Elemento          | Dimensões (m <sup>3</sup> ) | Quantidade por piso | Volume total de betão (m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|-----------------------------|---------------------|---|
| Laje 1            | 10                          | 2                   | 20                                      |
| Laje 2            | 10                          | 2                   | 20                                      |
| Laje 3            | 3,40                        | 2                   | 6,80                                    |
| Laje E1           | 0,56                        | 1                   | 0,56                                    |
| Laje E2           | 0,81                        | 2                   | 1,62                                    |
| Viga 1            | 1,40                        | 2                   | 2,80                                    |
| Viga 2            | 1,40                        | 2                   | 2,80                                    |
| Viga 3            | 0,48                        | 4                   | 1,90                                    |
| Viga 4            | 3,50                        | 2                   | 7,00                                    |
| Viga 5            | 0,40                        | 1                   | 0,40                                    |
| Pilares           | 0,37                        | 16                  | 5,88                                    |
| Total por piso    |                             |                     | 70                                      |
| Total no edifício |                             |                     | 349                                     |

## ANEXO I

Tabela 31 - Medição de armadura das lajes dos casos 1 e 2

| Elemento                          | Nº de partes iguais | Nº de varões iguais | Comprimento de cada varão (m) | Comprimento total dos varões (m)<br>Peso (Kg/m.l.) |       |       |       |       |       |       |    |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
|                                   |                     |                     |                               | φ6   | φ8    | φ10   | φ12   | φ16   | φ20   | φ25   |    |
|                                   |                     |                     |                               | 0,222  | 0,395 | 0,617 | 0,888 | 1,578 | 2,566 | 3,853 |    |
| <b>LAJES</b>                      |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |       |       |    |
| Armadura superior                 |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |       |       |    |
| Laje 1                            | 4                   | 34                  | 5                             |  |       | 680   |       |       |       |       |    |
|                                   | 2                   | 29                  | 5                             |  |       | 288   |       |       |       |       |    |
| Laje 2                            | 4                   | 34                  | 5                             |  |       | 680   |       |       |       |       |    |
|                                   | 2                   | 29                  | 5                             |  |       | 288   |       |       |       |       |    |
| Laje 3                            | 2                   | 34                  | 5                             |  |       | 340   |       |       |       |       |    |
| Laje E1                           | 1                   | 12                  | 2                             |  | 25    |       |       |       |       |       |    |
| Laje E2                           | 2                   | 9                   | 3                             |  | 52    |       |       |       |       |       |    |
| Armadura inferior                 |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |       |       |    |
| Laje 1                            | 4                   | 23                  | 5                             |  |       | 453   |       |       |       |       |    |
|                                   | 2                   | 18                  | 5                             |  |       |       | 180   |       |       |       |    |
| Laje 2                            | 4                   | 23                  | 5                             |  |       | 453   |       |       |       |       |    |
|                                   | 2                   | 18                  | 5                             |  |       |       | 180   |       |       |       |    |
| Laje 3                            | 2                   | 23                  | 5                             |  |       | 227   |       |       |       |       |    |
| Laje E1                           | 1                   | 12                  | 2                             |  |       | 25    |       |       |       | 25    |    |
| Laje E2                           | 2                   | 11                  | 3                             |  |       |       | 63    |       |       |       |    |
| Armadura de distribuição superior |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |       |       |    |
| Laje 1                            | 2                   | 25                  | 10                            |  | 500   |       |       |       |       |       |    |
| Laje 2                            | 2                   | 25                  | 10                            |  | 500   |       |       |       |       |       |    |
| Laje 3                            | 2                   | 25                  | 3,4                           |  | 170   |       |       |       |       |       |    |
| Laje E1                           | 1                   | 9                   | 2                             |  | 19    |       |       |       |       |       |    |
| Laje E2                           | 2                   | 7                   | 3                             |  | 39    |       |       |       |       |       |    |
| Armadura de distribuição inferior |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |       |       |    |
| Laje 1                            | 2                   | 25                  | 10                            |  | 500   |       |       |       |       |       |    |
| Laje 2                            | 2                   | 25                  | 10                            |  | 500   |       |       |       |       |       |    |
| Laje 3                            | 2                   | 25                  | 3,4                           |  | 170   |       |       |       |       |       |    |
| Laje E1                           | 1                   | 9                   | 2                             |  | 19    |       |       |       |       |       |    |
| Laje E2                           | 2                   | 7                   | 3                             |  | 39    |       |       |       |       |       |    |
| Total (m)                         |                     |                     |                               |  | 0     | 2532  | 3434  | 423   | 0     | 0     | 25 |
| Total (Kg)                        |                     |                     |                               |  | 0     | 1000  | 2119  | 375   | 0     | 0     | 95 |
| Total por piso                    |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |       | 3590  |    |
| Total no edifício                 |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |       | 17949 |    |

Tabelas de medições de elementos estruturais

Tabela 32 - Medição de armadura das vigas dos casos 1 e 2

| Elemento             | Nº de partes iguais | Nº de varões iguais | Comprimento de cada varão (m) | Comprimento total dos varões (m)<br>Peso (Kg/m.l.) |       |       |       |       |                   |       |      |
|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|------|
|                      |                     |                     |                               | φ6   | φ8    | φ10   | φ12   | φ16   | φ20               | φ25   |      |
|                      |                     |                     |                               | 0,222  | 0,395 | 0,617 | 0,888 | 1,578 | 2,566             | 3,853 |      |
| <b>VIGAS</b>         |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |      |
| Armadura superior    |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |      |
| Viga 1               | 4                   | 5                   | 5                             |  |       |       |       |       | 100               |       |      |
| Viga 2               | 4                   | 5                   | 5                             |  |       |       |       |       |                   | 100   |      |
| Viga 3               | 4                   | 2                   | 3                             |  |       | 27    |       |       |                   |       |      |
| Viga 4               | 10                  | 5                   | 5                             |  |       |       | 250   |       |                   |       |      |
| Viga 5               | 1                   | 2                   | 5                             |  |       | 10    |       |       |                   |       |      |
| Armadura inferior    |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |      |
| Viga 1               | 4                   | 8                   | 5                             |  |       |       | 160   |       |                   |       |      |
| Viga 2               | 4                   | 4                   | 5                             |  |       |       |       |       | 80                |       |      |
| Viga 3               | 4                   | 5                   | 3                             |  |       |       |       | 68    |                   |       |      |
| Viga 4               | 10                  | 4                   | 5                             |  |       |       | 200   |       |                   |       |      |
| Viga 5               | 1                   | 3                   | 5                             |  |       | 15    |       |       |                   |       |      |
| Armadura transversal |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |      |
| Viga 1               | 4                   | 33                  | 1,22                          | 163  |       |       |       |       |                   |       |      |
| Viga 2               | 4                   | 50                  | 1,22                          | 244  |       |       |       |       |                   |       |      |
| Viga 3               | 4                   | 17                  | 1,22                          |  | 82,96 |       |       |       |                   |       |      |
| Viga 4               | 10                  | 33                  | 1,22                          | 407  |       |       |       |       |                   |       |      |
| Viga 5               | 1                   | 25                  | 0,92                          | 23   |       |       |       |       |                   |       |      |
| Total (m)            |                     |                     |                               | 836  | 83    | 52    | 610   | 68    | 180               | 100   |      |
| Total (Kg)           |                     |                     |                               | 186  | 33    | 32    | 542   | 107   | 462               | 385   |      |
|                      |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Total por piso    |       | 1747 |
|                      |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Total no edifício |       | 8734 |

## ANEXO I

Tabela 33 - Medição de armadura dos pilares dos casos 1 e 2

| Elemento              | Nº de partes iguais | Nº de varões iguais | Comprimento de cada varão (m) | Comprimento total dos varões (m)<br>Peso (Kg/m.l.) |       |       |       |       |                            |       |       |
|-----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|
|                       |                     |                     |                               | φ6   | φ8    | φ10   | φ12   | φ16   | φ20                        | φ25   |       |
|                       |                     |                     |                               | 0,222  | 0,395 | 0,617 | 0,888 | 1,578 | 2,566                      | 3,853 |       |
| <b>PILARES</b>        |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                            |       |       |
| Armadura longitudinal |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                            |       |       |
| A-1 ; A-6 ; C-1 ; C-6 | 8                   | 4                   | 3                             |  |       |       |       |       | 96                         |       |       |
|                       | 12                  | 6                   | 3                             |  |       |       |       |       | 216                        |       |       |
|                       | 12                  | 2                   | 3                             |  |       |       |       | 72    |                            |       |       |
| A-2 ; A-5 ; C-2 ; C-5 | 8                   | 4                   | 3                             |  |       |       |       |       | 96                         |       |       |
|                       | 12                  | 6                   | 3                             |  |       |       |       |       | 216                        |       |       |
| A-3 ; A-4 ; C-3 ; C-4 | 8                   | 4                   | 3                             |  |       |       |       |       | 96                         |       |       |
|                       | 12                  | 4                   | 3                             |  |       |       |       |       | 144                        |       |       |
| B-1 ; B-6             | 4                   | 4                   | 3                             |  |       |       |       |       | 48                         |       |       |
|                       | 6                   | 4                   | 3                             |  |       |       |       |       | 72                         |       |       |
| B-2 ; B-5             | 4                   | 4                   | 3                             |  |       |       |       |       | 48                         |       |       |
|                       | 6                   | 4                   | 3                             |  |       |       |       |       | 72                         |       |       |
| Armadura transversal  |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                            |       |       |
| A-1 ; A-6 ; C-1 ; C-6 | 8                   | 12                  | 1,12                          |  | 108   |       |       |       |                            |       |       |
|                       | 12                  | 15                  | 1,12                          |  | 202   |       |       |       |                            |       |       |
| A-2 ; A-5 ; C-2 ; C-5 | 8                   | 12                  | 1,12                          |  | 108   |       |       |       |                            |       |       |
|                       | 12                  | 12                  | 1,12                          |  | 161   |       |       |       |                            |       |       |
| A-3 ; A-4 ; C-3 ; C-4 | 8                   | 12                  | 1,12                          |  | 108   |       |       |       |                            |       |       |
|                       | 12                  | 12                  | 1,12                          |  | 161   |       |       |       |                            |       |       |
| B-1 ; B-6             | 4                   | 12                  | 1,12                          |  | 54    |       |       |       |                            |       |       |
|                       | 6                   | 12                  | 1,12                          |  | 81    |       |       |       |                            |       |       |
| B-2 ; B-5             | 4                   | 12                  | 1,12                          |  | 54    |       |       |       |                            |       |       |
|                       | 6                   | 12                  | 1,12                          |  | 81    |       |       |       |                            |       |       |
| Total (m)             |                     |                     |                               | 0  | 1116  | 0     | 0     | 72    | 1104                       | 0     |       |
| Total (Kg)            |                     |                     |                               | 0  | 441   | 0     | 0     | 114   | 2833                       | 0     |       |
|                       |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Total no edifício          |       | 3387  |
|                       |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Armadura total no edifício |       | 12121 |

Tabelas de medições de elementos estruturais

Tabela 34 - Medição de betão do caso 3

| Elemento | Volume (m <sup>3</sup> ) | Nº de lajes alveolares | Quantidade por piso | Volume total de betão (m <sup>3</sup> ) |  |
|----------|--------------------------|------------------------|---------------------|---|--|
| Laje 1   | 2                        | 8                      | 2                   | 24                                      |  |
| Laje 2   | 2                        | 8                      | 2                   | 24                                      |  |
| Laje 3   | 1,50                     | 3                      | 2                   | 9                                       |  |
| Laje E1  | 0,56                     |                        | 1                   | 0,56                                    |  |
| Laje E2  | 1,56                     |                        | 2                   | 3,13                                    |  |
| Viga 1   | 0,80                     |                        | 4                   | 3,20                                    |  |
| Viga 2   | 0,95                     |                        | 4                   | 3,80                                    |  |
| Viga 3   | 0,69                     |                        | 4                   | 2,78                                    |  |
| Viga 4   | 0,80                     |                        | 10                  | 8,00                                    |  |
| Viga 5   | 0,40                     |                        | 1                   | 0,40                                    |  |
| Pilares  | 1,08                     |                        | 16                  | 17,28                                   |  |
|          |                          |                        | Total por piso      | 96                                      |  |
|          |                          |                        | Total no edifício   | 481                                     |  |

## ANEXO I

Tabela 35 - Medição de armadura das lajes do caso 3

| Elemento                          | Nº de partes iguais | Nº de varões iguais | Comprimento de cada varão (m) | Comprimento total dos varões (m)<br>Peso (Kg/m.l.) |       |       |       |       |                   |       |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|
|                                   |                     |                     |                               | φ6   | φ8    | φ10   | φ12   | φ16   | φ20               | φ25   |
|                                   |                     |                     |                               | 0,222  | 0,395 | 0,617 | 0,888 | 1,578 | 2,566             | 3,853 |
| <b>LAJES</b>                      |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Armadura superior                 |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Laje 1                            | 16                  | 5                   | 1,25                          |  |       | 107   |       |       |                   |       |
| Laje 2                            | 16                  | 5                   | 1,25                          |  |       | 107   |       |       |                   |       |
| Laje 3                            | 6                   | 5                   | 1,25                          |  |       | 40    |       |       |                   |       |
| Laje E1                           | 1                   | 12                  | 2                             |  | 25    |       |       |       |                   |       |
| Laje E2                           | 2                   | 9                   | 3                             |  | 52    |       |       |       |                   |       |
| Armadura inferior                 |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Laje 1                            | 16                  | 12                  | 5                             |  |       | 960   |       |       |                   |       |
| Laje 2                            | 16                  | 12                  | 5                             |  |       | 960   |       |       |                   |       |
| Laje 3                            | 6                   | 12                  | 5                             |  |       | 360   |       |       |                   |       |
| Laje E1                           | 1                   | 7                   | 2                             |  |       | 15    |       |       |                   |       |
| Laje E2                           | 2                   | 14                  | 3                             |  |       | 78    |       |       |                   |       |
| Armadura de distribuição superior |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Laje 1                            | 16                  | 9,6                 | 10                            |  | 1536  |       |       |       |                   |       |
| Laje 2                            | 16                  | 9,6                 | 10                            |  | 1536  |       |       |       |                   |       |
| Laje 3                            | 6                   | 9,6                 | 10                            |  | 576   |       |       |       |                   |       |
| Laje E1                           | 1                   | 9                   | 2                             |  | 19    |       |       |       |                   |       |
| Laje E2                           | 2                   | 7                   | 3                             |  | 39    |       |       |       |                   |       |
| Armadura de distribuição inferior |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Laje 1                            | 16                  | 9,6                 | 10                            |  | 1536  |       |       |       |                   |       |
| Laje 2                            | 16                  | 9,6                 | 10                            |  | 1536  |       |       |       |                   |       |
| Laje 3                            | 6                   | 9,6                 | 10                            |  | 576   |       |       |       |                   |       |
| Laje E1                           | 1                   | 9                   | 2                             |  | 19    |       |       |       |                   |       |
| Laje E2                           | 2                   | 7                   | 3                             |  | 39    |       |       |       |                   |       |
| Total (m)                         |                     |                     |                               | 0  | 7354  | 2373  | 0     | 0     | 0                 | 0     |
| Total (Kg)                        |                     |                     |                               | 0  | 2905  | 1464  | 0     | 0     | 0                 | 0     |
|                                   |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Total por piso    | 4369  |
|                                   |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Total no edifício | 21845 |

Tabelas de medições de elementos estruturais

Tabela 36 - Medição de armadura das vigas do caso 3

| Elemento             | Nº de partes iguais | Nº de varões iguais | Comprimento de cada varão (m) | Comprimento total dos varões (m)<br>Peso (Kg/m.l.) |       |       |       |       |                   |       |
|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|
|                      |                     |                     |                               | φ6   | φ8    | φ10   | φ12   | φ16   | φ20               | φ25   |
|                      |                     |                     |                               | 0,222  | 0,395 | 0,617 | 0,888 | 1,578 | 2,566             | 3,853 |
| <b>VIGAS</b>         |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Armadura superior    |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Viga 1               | 4                   | 2                   | 5                             |  |       |       |       |       | 40                |       |
| Viga 2               | 4                   | 2                   | 5                             |  |       |       |       |       | 40                |       |
| Viga 3               | 4                   | 2                   | 3,4                           |  |       |       |       |       | 27,2              |       |
| Viga 4               | 10                  | 2                   | 5                             |  |       |       |       |       | 100               |       |
| Viga 5               | 1                   | 2                   | 5                             |  |       |       |       |       | 10                |       |
| Armadura inferior    |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Viga 1               | 4                   | 6                   | 5                             |  |       |       |       | 120   |                   |       |
| Viga 2               | 4                   | 7                   | 5                             |  |       |       |       |       | 140               |       |
| Viga 3               | 4                   | 8                   | 3,4                           |  |       |       | 109   |       |                   |       |
| Viga 4               | 10                  | 5                   | 5                             |  |       | 250   |       |       |                   |       |
| Viga 5               | 1                   | 3                   | 5                             |  |       |       |       | 15    |                   |       |
| Armadura transversal |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Viga 1               | 4                   | 22                  | 1,32                          |  | 117   |       |       |       |                   |       |
| Viga 2               | 4                   | 33                  | 1,32                          |  | 176   |       |       |       |                   |       |
| Viga 3               | 4                   | 15                  | 1,32                          |  | 80    |       |       |       |                   |       |
| Viga 4               | 10                  | 20                  | 1,32                          |  | 264   |       |       |       |                   |       |
| Viga 5               | 1                   | 25                  | 0,92                          |  | 23    |       |       |       |                   |       |
| Consola curta        |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                   |       |
| Viga 2               | 4                   | 4                   | 5                             |  |       | 80    |       |       |                   |       |
| Viga 3               | 4                   | 4                   | 5                             |  |       | 80    |       |       |                   |       |
| Total (m)            |                     |                     |                               | 0  | 660   | 410   | 109   | 135   | 357               | 0     |
| Total (Kg)           |                     |                     |                               | 0  | 261   | 253   | 97    | 213   | 917               | 0     |
|                      |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Total por piso    | 1740  |
|                      |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Total no edifício | 8700  |

## ANEXO I

Tabela 37 - Medição de armadura dos pilares do caso 3

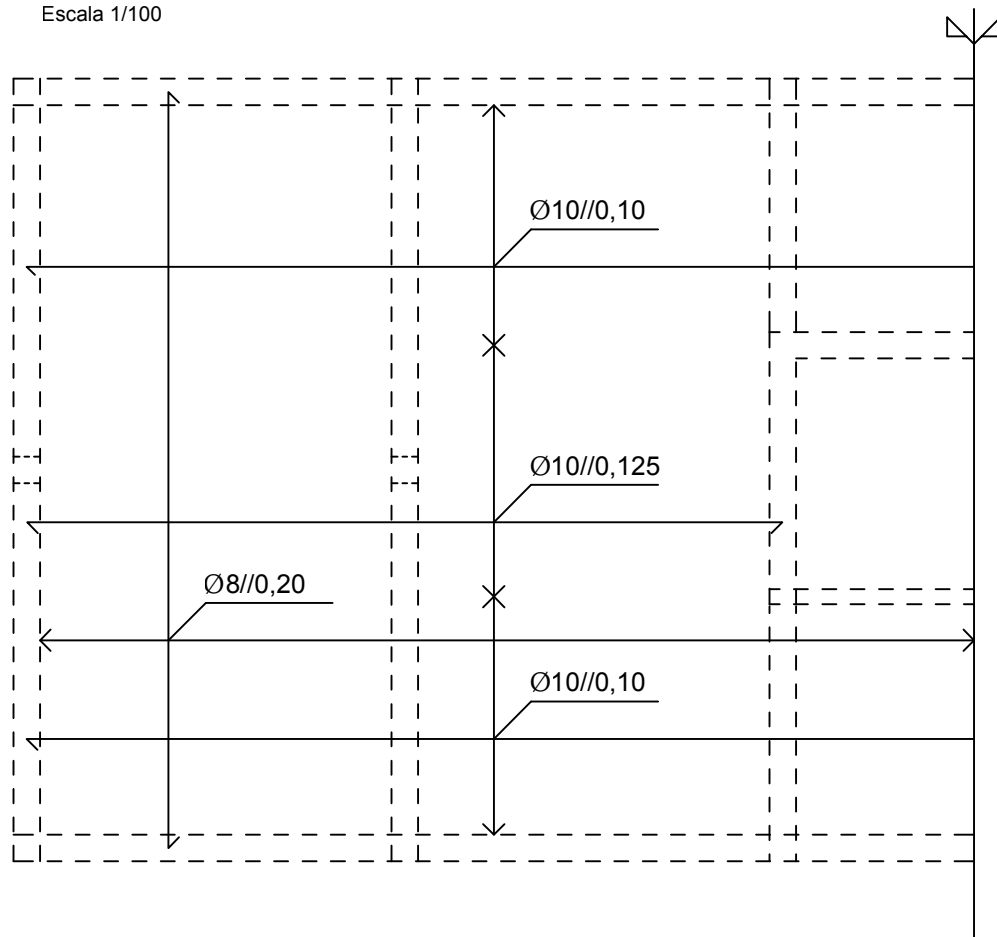
| Elemento              | Nº de partes iguais | Nº de varões iguais | Comprimento de cada varão (m) | Comprimento total dos varões (m)<br>Peso (Kg/m.l.) |       |       |       |       |                            |       |       |
|-----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|
|                       |                     |                     |                               | φ6   | φ8    | φ10   | φ12   | φ16   | φ20                        | φ25   |       |
|                       |                     |                     |                               | 0,222  | 0,395 | 0,617 | 0,888 | 1,578 | 2,566                      | 3,853 |       |
| <b>PILARES</b>        |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                            |       |       |
| Armadura longitudinal |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                            |       |       |
| A-1 ; A-6 ; C-1 ; C-6 | 4                   | 16                  | 15                            |  |       |       |       | 960   |                            |       |       |
| A-2 ; A-5 ; C-2 ; C-5 | 4                   | 10                  | 15                            |  |       |       |       |       |                            | 600   |       |
|                       | 4                   | 6                   | 15                            |  |       |       |       | 360   |                            |       |       |
| A-3 ; A-4 ; C-3 ; C-4 | 4                   | 10                  | 15                            |  |       |       |       | 600   |                            |       |       |
|                       | 4                   | 6                   | 15                            |  |       |       | 360   |       |                            |       |       |
| B-1 ; B-6             | 2                   | 10                  | 15                            |  |       |       |       |       | 300                        |       |       |
|                       | 2                   | 6                   | 15                            |  |       |       | 180   |       |                            |       |       |
| B-2 ; B-5             | 2                   | 16                  | 15                            |  |       |       |       |       |                            | 480   |       |
| Armadura transversal  |                     |                     |                               |  |       |       |       |       |                            |       |       |
| A-1 ; A-6 ; C-1 ; C-6 | 4                   | 75                  | 2,12                          |  | 636   |       |       |       |                            |       |       |
| A-2 ; A-5 ; C-2 ; C-5 | 4                   | 75                  | 2,12                          |  | 636   |       |       |       |                            |       |       |
| A-3 ; A-4 ; C-3 ; C-4 | 4                   | 75                  | 2,12                          |  | 636   |       |       |       |                            |       |       |
| B-1 ; B-6             | 2                   | 75                  | 2,12                          |  | 318   |       |       |       |                            |       |       |
| B-2 ; B-5             | 2                   | 75                  | 2,12                          |  | 318   |       |       |       |                            |       |       |
| Total (m)             |                     |                     |                               | 0  | 2544  | 0     | 540   | 1920  | 300                        | 1080  |       |
| Total (Kg)            |                     |                     |                               | 0  | 1005  | 0     | 480   | 3030  | 770                        | 4161  |       |
|                       |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Total no edifício          |       | 9445  |
|                       |                     |                     |                               |  |       |       |       |       | Armadura total no edifício |       | 18145 |



**ANEXO II**  
**PROJETO DE ESTABILIDADE**

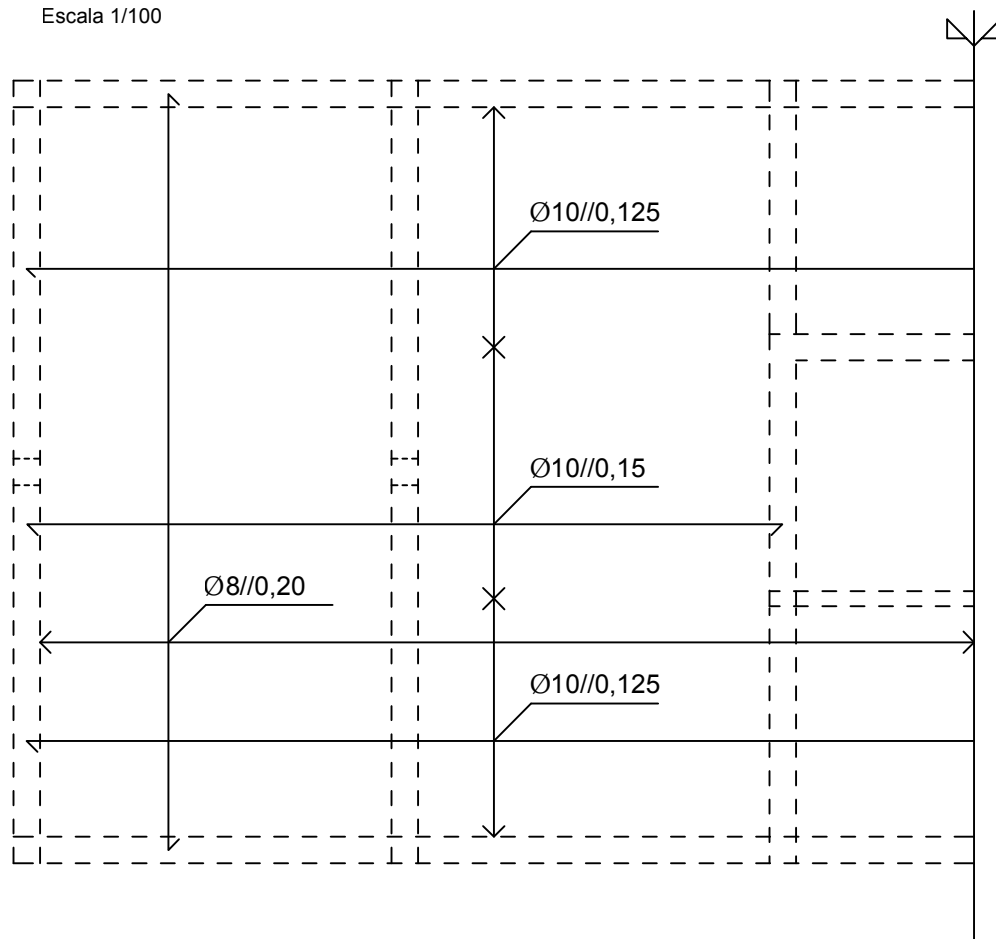
LAJE L1, L2 E L3  
ARMADURA SUPERIOR

Escala 1/100



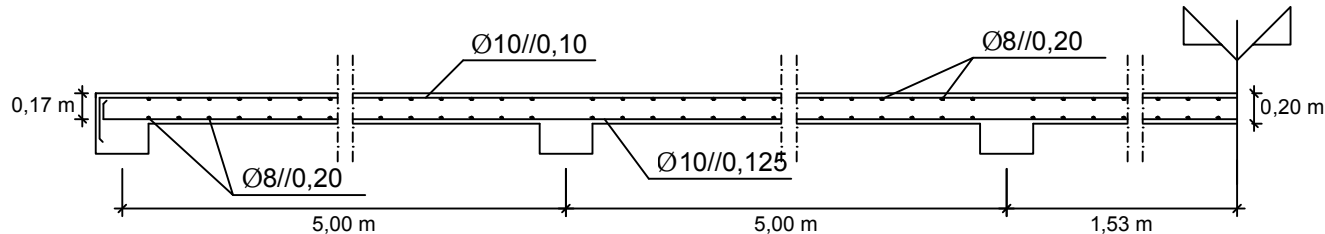
LAJE L1, L2 E L3  
ARMADURA INFERIOR

Escala 1/100



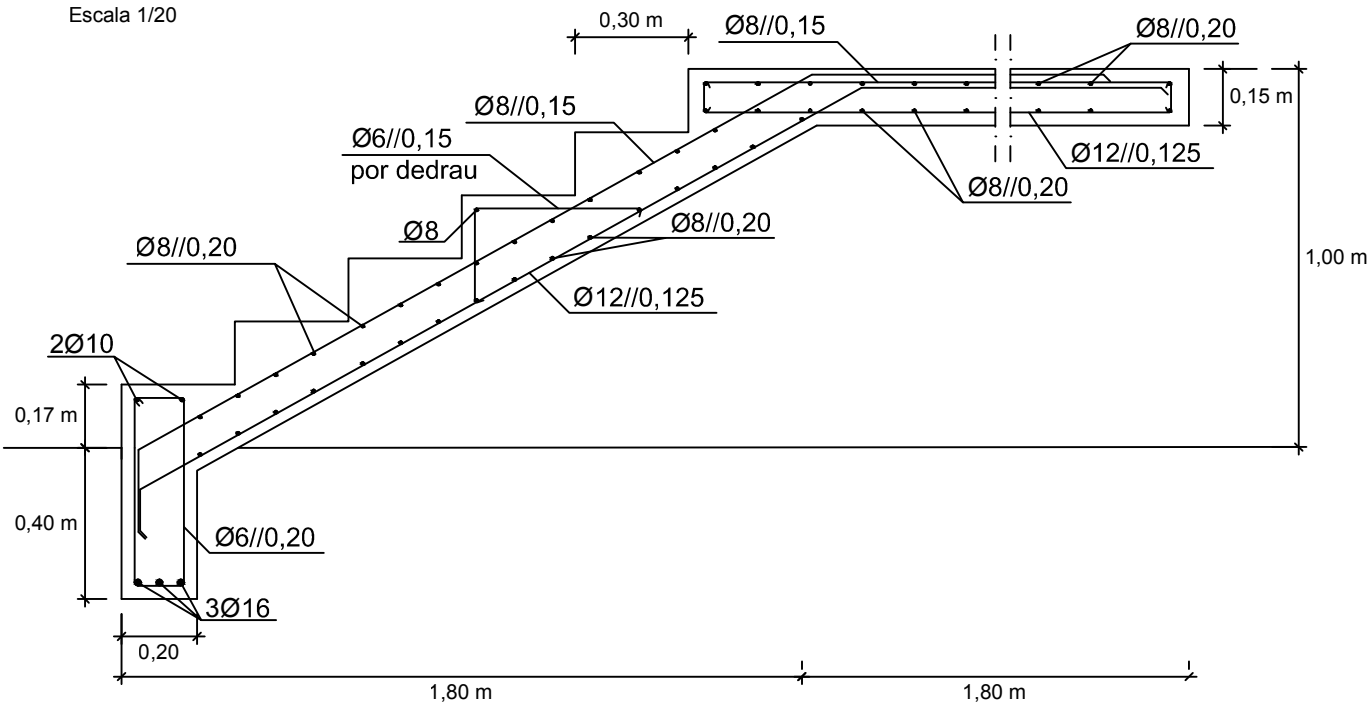
LAJE L1, L2 E L3  
CORTE TRANVERSAL

Escala 1/50



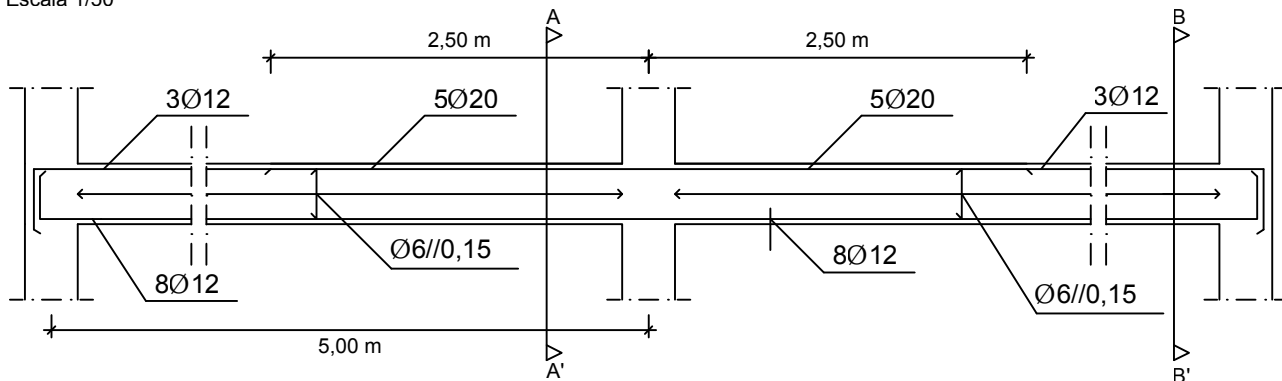
LAJE LE2  
CORTE TRANVERSAL

Escala 1/20



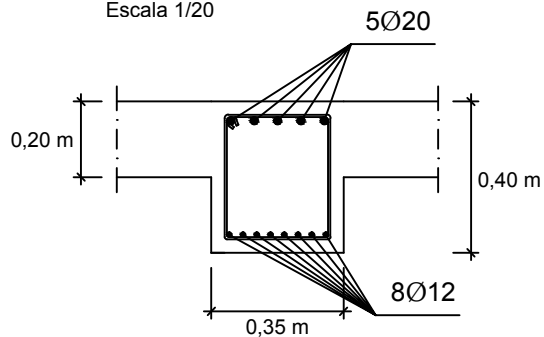
# ARMADURA VIGA 1

Escala 1/50



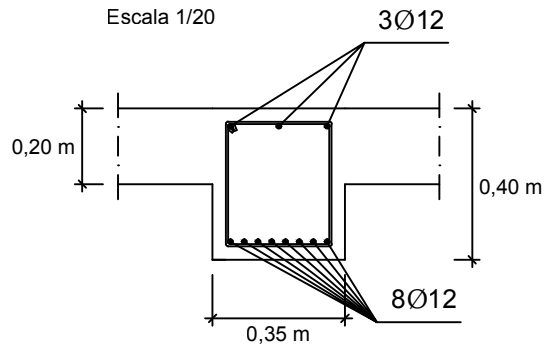
## Corte A-A'

Escala 1/20



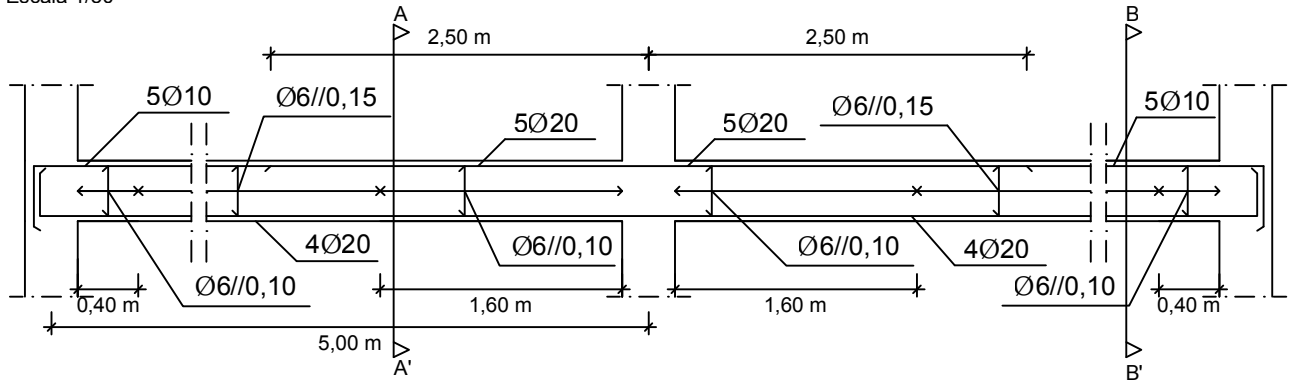
## Corte B-B'

Escala 1/20



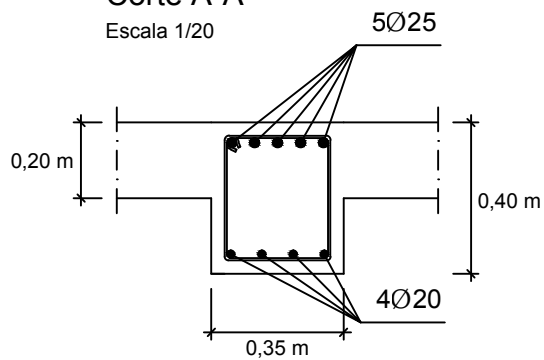
# ARMADURA VIGA 2

Escala 1/50



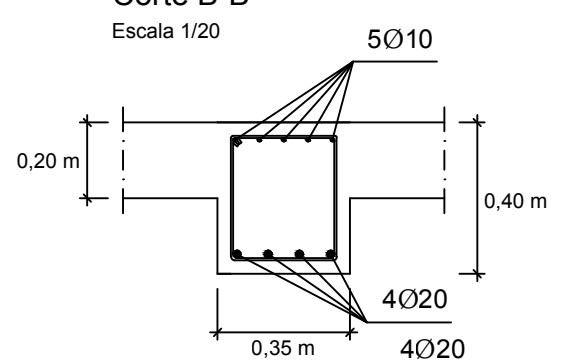
## Corte A-A'

Escala 1/20



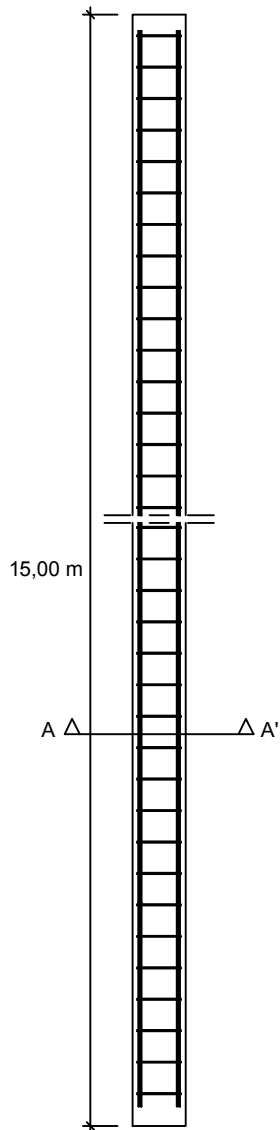
## Corte B-B'

Escala 1/20



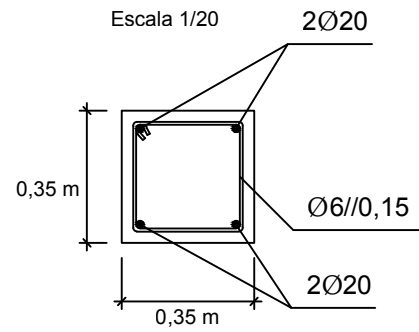
# ARMADURA PILAR B2

Escala 1/50



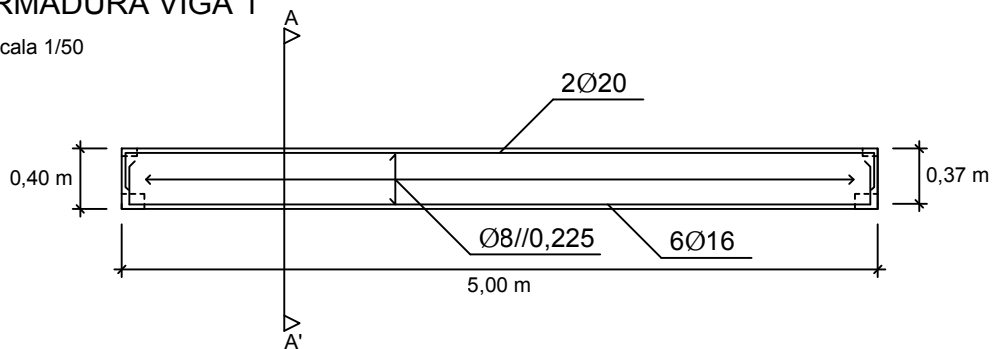
## Corte A-A'

Escala 1/20



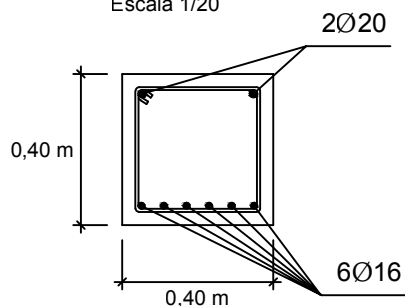
### ARMADURA VIGA 1

Escala 1/50



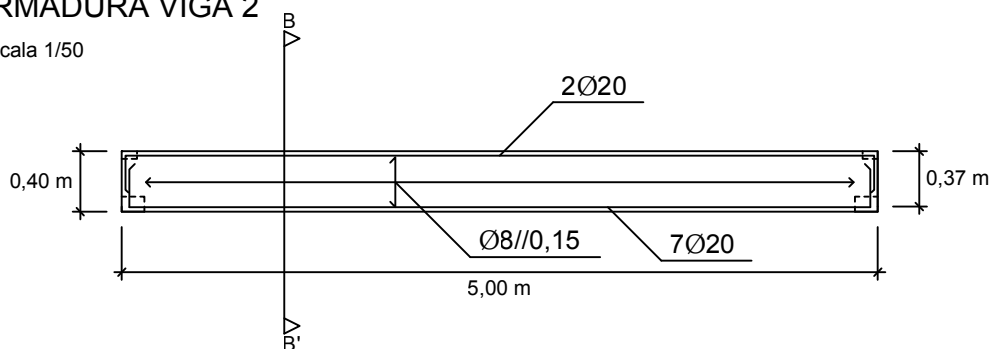
#### Corte A-A'

Escala 1/20



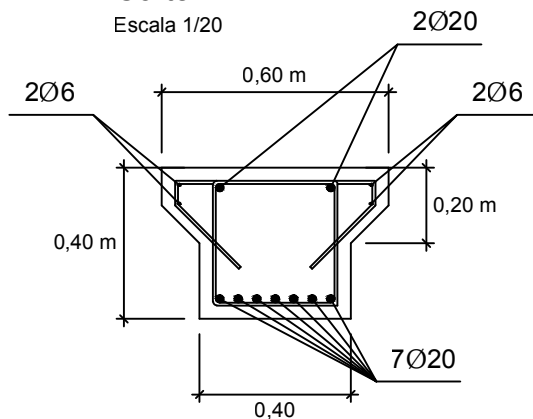
### ARMADURA VIGA 2

Escala 1/50



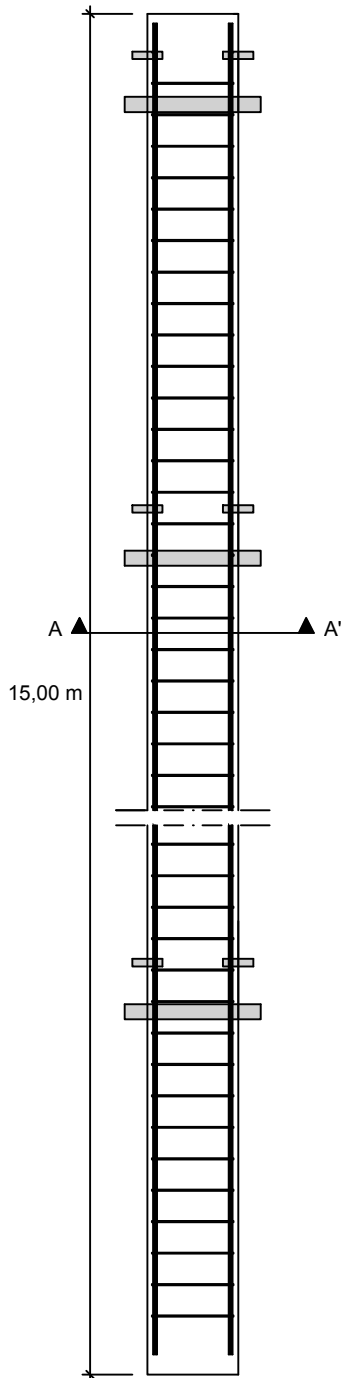
#### Corte B-B'

Escala 1/20



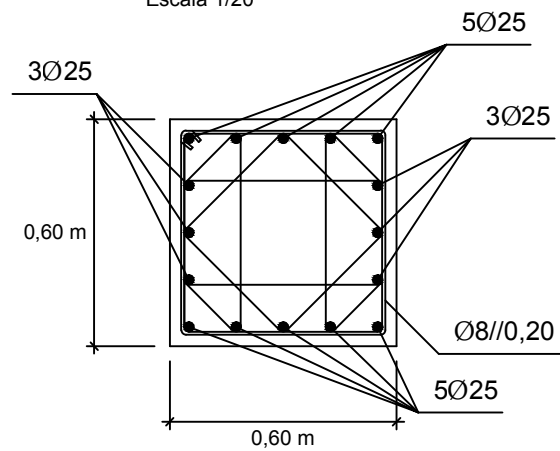
# ARMADURA PILAR B2

Escala 1/50



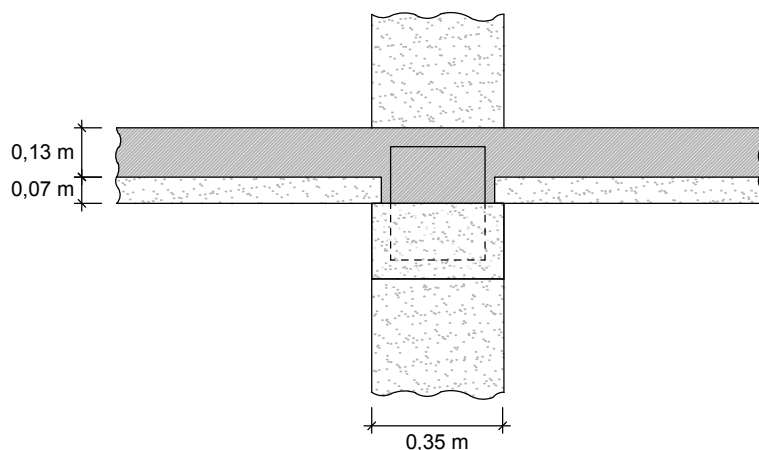
## Corte A-A'

Escala 1/20



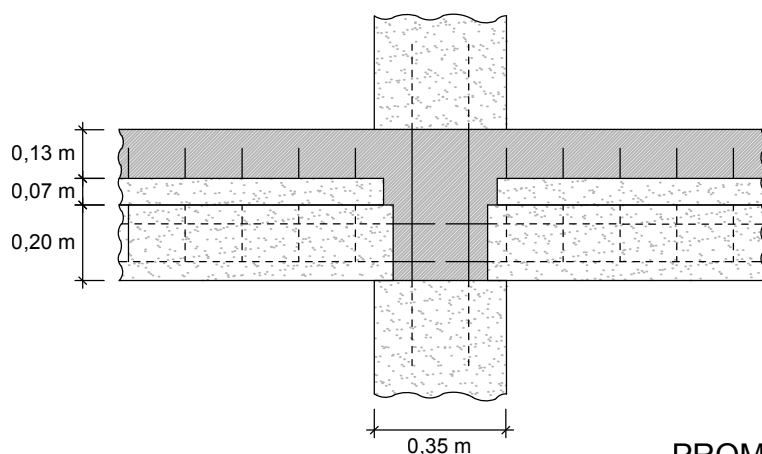
## PROMENOR DE LIGAÇÃO LAJE-VIGA

Escala 1/20



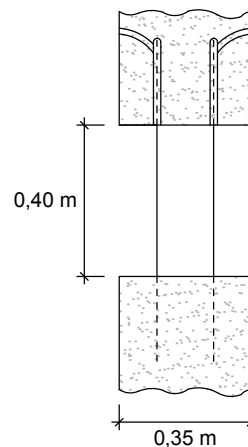
## PROMENOR DE LIGAÇÃO VIGA-PILAR



Escala 1/20



## PROMENOR DE LIGAÇÃO PILAR-PILAR

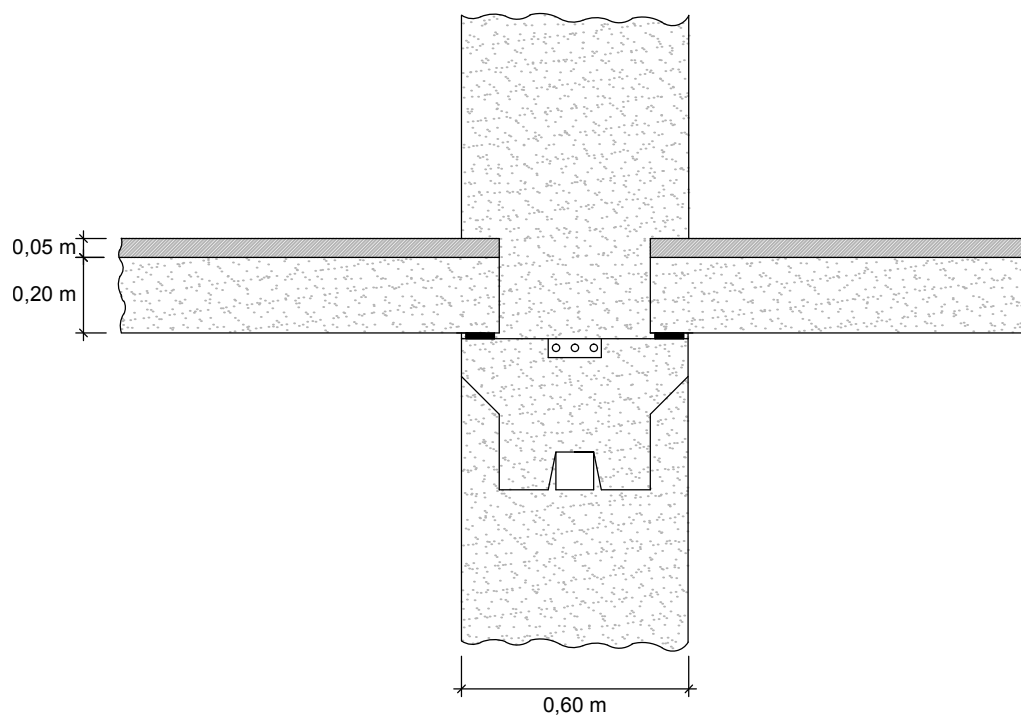
Escala 1/20



-  **Betão *in situ***
-  **Betão Pré-fabricado**

## PROMENOR DE LIGAÇÃO LAJE-VIGA

Escala 1/20



## PROMENOR DE LIGAÇÃO VIGA-PILAR

Escala 1/20

