

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO EMPREGO DE FACHADAS PREFABRICADAS EM EDIFÍCIOS EM PORTUGAL

JOÃO MIGUEL ALVITE PERES DA SILVA BASTOS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Hipólito José Campos de Sousa

Coorientador: Engenheiro Hugo Marques

MARÇO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais

Quanto mais difícil a vitória, maior a alegria de vencer.

Edson Arantes do Nascimento, “Pelé”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de fazer um agradecimento ao meu orientador, Professor Dr. Hipólito José Campos de Sousa, por toda a sua disponibilidade, paciência e objetividade na orientação e cuja perseverança e energia me motivaram ao longo desta dissertação, tendo-me auxiliado a chegar com sucesso ao final desta etapa.

Ao gabinete de projeto GEG, em especial ao meu coorientador, Eng. Hugo Marques, agradeço o facto de me ter acolhido e proporcionado trabalhar num projeto que visava a construção pré-fabricada da fachada de uma residência de estudantes, assim como a disponibilização de material, espaço de trabalho e, claro, voto de confiança, permitindo-me elevar o nível desta dissertação. Não queria deixar de agradecer a todos os parceiros que tiveram envolvidos neste projeto com a GEG, que mostraram todo o interesse em disponibilizar informação, nomeadamente: ao fabricante de pré-fabricados, SPRAL, ao responsável pelos vãos envidraçados, CAIXIAVE, onde tive oportunidade de visitar, ao gabinete de arquitetura, VENTURA + PARTNERS, e às empresas de engenharia, GONDOR e GEOPOLIEDRO.

Queria também deixar um forte agradecimento aos professores Miguel Chichorro Gonçalves, Ana Sofia Guimarães e Rui Calejo Rodrigues pela disponibilidade e atenção demonstrada numa altura em surgiram dúvidas importantes referentes a desempenhos funcionais.

Aos meus amigos e colegas de curso que, de forma mais ou menos relevante, fizeram parte do meu percurso académico nesta Faculdade e fizeram desta jornada dos melhores anos da minha vida, endereço igualmente um sincero agradecimento. Obrigado por estarem presentes quando precisei, por toda a partilha e apoio. Espero e faço votos que os nossos caminhos continuem a cruzar-se ao longo da vida.

Por fim o maior agradecimento de todos irá para a minha família, por me terem acompanhado e acreditado em mim durante todo este percurso académico, em particular nesta última etapa por eles tão aguardada. Após os meus dois primeiros anos difíceis de faculdade foram o apoio e a crença por parte da minha família que me fizeram chegar onde cheguei. Com a noção do enriquecimento que todos trouxeram ao meu caminho, reitero aqui o meu obrigado sentido.

RESUMO

A construção é uma atividade industrial muito importante que carece de mudanças urgentes nos seus processos, visando aproximar-se das indústrias mais modernas, atrair profissionais mais qualificados e sobretudo reduzir custos de construção sem perda de qualidade, se possível com soluções mais sustentáveis.

Depois de algumas experiências tímidas, a pré-fabricação é hoje referida como uma das grandes apostas para esta transformação, naquilo que se designa por construção “off-site”.

Em Portugal, onde a construção é ainda normalmente pesada, a pré-fabricação que tem tido alguma expressão é a base de betão. Como se sabe um dos custos expressivos da construção é a envolvente, que para além da sua importância funcional, é também o “rosto” dos edifícios. Habitualmente a envolvente é feita em soluções de alvenaria de diferentes tipos.

Neste trabalho além do enquadramento do setor e da pré-fabricação, analisou-se detalhadamente a pré-fabricação de fachadas discutindo-se aspetos: tecnológicos, económicos, de montagem e de sustentabilidade.

O problema é analisado de forma mais aplicada no contexto dum caso concreto disponibilizado pela empresa de acolhimento a esta dissertação, a GEG.

PALAVRAS-CHAVE: Pré-fabricação, Módulo de fachada, Standardização, Análise técnico-económica, Produtividade, Sustentabilidade

ABSTRACT

Construction is a very significant industrial activity that requires urgent changes to its processes to gain access to more modern industries, attract more qualified professionals, and, above all, reduce construction costs without compromising quality, if possible by employing more sustainable approaches.

A few timid experiments have resulted in prefabrication being seen as one of the best bets for this transformation, in what is known as "off-site" construction.

In Portugal, where construction is typically heavy, prefabrication has been expressed in concrete bases. A well-known fact is that in addition to its functionality, the envelope represents a significant portion of construction costs. In most cases, the envelope is constructed from different types of masonry.

In this work, in addition to the sector and prefabrication framework, the prefabrication of facades was analyzed in detail. This was discussed in aspects such as technical, economics, assembly, and sustainability.

The problem is analyzed in a more applied way in the context of a real case made available by the host company for this thesis, GEG.

KEYWORDS: Off-site construction, Precaste concrete façade modules, On-site labour time, Total project construction cost, Logistics, Sustainability

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 PRÉ-FABRICAÇÃO	5
2.1. CONTEXTO HISTÓRICO DA PRÉ-FABRICAÇÃO	5
2.2. CONCEITO DE PRÉ-FABRICAÇÃO	7
2.2.1. SISTEMAS DE PRÉ-FABRICAÇÃO	8
2.2.2. MÓDULO	8
2.2.3. REPETIÇÃO	9
2.2.4. TOLERÂNCIA DIMENSIONAL	9
2.3. PRÉ-FABRICAÇÃO LEVE E PESADA	9
2.4. MÉTODOS MODERNOS DE CONSTRUÇÃO (MMC)	10
2.5. ASPETO ECONÓMICO DA CONSTRUÇÃO “OFF-SITE”	16
2.6. QUALIDADE DA CONSTRUÇÃO “OFF-SITE”	17
2.6.1. DURABILIDADE:	17
2.6.2. CUSTO CICLO DE VIDA OU LYFE CYCLE COST (“LCC”):	18
2.6.3. DESEMPENHO:	18
2.7. SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO “OFF-SITE”	19
2.7.1. VANTAGENS NA PERSPETIVA DA SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO OFF-SITE	19
2.7.2. IMPORTÂNCIA DE UMA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL NO MUNDO ATUAL	21
2.7.3. AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DUM EDIFÍCIO	22

2.7.3.1. BREEAM	22
2.7.3.2. LEED	24
2.8. EXEMPLO DAS PRÁTICAS NA SUÉCIA	26
2.8.1. PRINCIPAIS MOTIVOS PARA EXISTIR UMA GRANDE PERCENTAGEM DE CASAS PRÉ-FABRICADAS NA SUÉCIA	26
2.8.2. CONTEXTO HISTÓRICO E ATUAL DA PRÉ-FABRICAÇÃO NA SUÉCIA	27

3 FACHADAS PRÉ-FABRICADAS – EXIGÊNCIAS E SOLUÇÕES	31
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	31
3.2. SEGURANÇA ESTRUTURAL.....	32
3.2.1. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL.....	32
3.2.2. LIGAÇÕES ENTRE CAMADAS	33
3.2.3. FIXAÇÕES À ESTRUTURA	36
3.2.4. COMPORTAMENTO DAS FACHADAS PRÉ-FABRICADAS ÀS AÇÕES SÍSMICAS.....	41
3.3. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO	42
3.4. HIGIENE, SAÚDE E AMBIENTE.....	44
3.4.1. BARREIRAS PERFEITAS E IMPERFEITAS	45
3.4.2. EFICIÊNCIA DAS JUNTAS	45
3.4.2.1. Tipos de Juntas	46
3.4.2.2. Localização das Juntas	49
3.4.3. FUNCIONALIDADE DO VÃO ENVIDRAÇADO	51
3.4.3.1. Considerações no projeto	51
3.4.3.2. Instalação do vão envidraçado:	53
3.5. SEGURANÇA E ACESSIBILIDADE NA UTILIZAÇÃO E CONSTRUÇÃO.....	55
3.5.1. ESTABILIDADE DO PAINEL	55
3.5.2. TRANSPORTE	56
3.5.3. MANUSEIO E MONTAGEM	56
3.5.4. DIMENSÕES E PESOS DOS PAINÉIS	59
3.5.4.1. Dimensões	59

3.5.4.2. Peso	60
3.6. PROTEÇÃO CONTRA O RUÍDO	61
3.7. ECONOMIA DE ENERGIA E ISOLAMENTO TÉRMICO	62
3.7.1. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	64
3.7.2. TRANSMISSÃO DE CALOR	64
3.7.3. PONTES TÉRMICAS	66
3.8. EXIGÊNCIAS DE ADEQUAÇÃO AO USO	67
 4 CASO DE ESTUDO – FACHADA DA RESIDÊNCIA DE ESTUDANTES “STUDYOU” NO PORTO	 69
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	69
4.2. APRESENTAÇÃO DO EMPREENDIMENTO “STUDYOU”	69
4.3. MOTIVO DA ESCOLHA DA FACHADA EM MÓDULOS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO	70
4.4. O PROJETO.....	70
4.4.1. SISTEMA E PAINÉIS	73
4.4.1.1. Sistema de Pré-fabricação	73
4.4.1.2. Painel Sanduíche	73
4.4.1.3. Painel Maciço	74
4.4.1.4. Dimensionamento e distribuição dos painéis.....	75
4.4.2. ASPETOS RELEVANTES NO DESEMPENHO DO PAINEL	79
4.4.2.1. Comportamento estrutural do painel.....	80
4.4.2.2. Estanqueidade das Juntas	81
4.4.2.3. Desempenho térmico:	83
4.4.2.4. Resistência ao fogo.....	85
4.4.2.5. Desempenho acústico.....	86
4.5. FORNECIMENTO E MONTAGEM	89
4.6. ANÁLISE DE CUSTOS	95
4.7. ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE	98

5 COMPARAÇÃO DA SOLUÇÃO PRÉ-FABRICADA ESTUDADA COM UMA SOLUÇÃO TRADICIONAL EM ALVENARIA	101
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	101
5.2. DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO EM ALVENARIA	101
5.3. COMPARAÇÃO COM A SOLUÇÃO PRÉ-FABRICADA	102
5.3.1. DESEMPENHO TÉRMICO	102
5.3.2. RESISTÊNCIA AO FOGO	103
5.3.3. DESEMPENHO ACÚSTICO	104
5.3.4. ESTANQUEIDADE À ÁGUA	104
5.3.5. PLANEAMENTO DE OBRA	104
5.3.6. ANÁLISE DE CUSTOS	106
5.3.7. SUSTENTABILIDADE	107
6 CONCLUSÕES	115
6.1. CONCLUSÕES GERAIS	115
6.2. RECOMENDAÇÕES FUTURAS	116
BIBLIOGRAFIA	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – "Levitt home", anos 50, New York.....	6
Fig. 2.2 – Casas BoKlok em Mosås, Örebro, Suécia.....	6
Fig. 2.3 – Um dos edifícios residenciais modulares mais alto do mundo em Brooklyn, Nova York	7
Fig. 2.4 – Sistemas de pré-fabricação	8
Fig. 2.5 – Vantagens e desvantagens de uma pré-fabricação leve.....	10
Fig. 2.6 – Vantagens e desvantagens de uma pré-fabricação pesada.....	10
Fig. 2.7 – Exemplos de casas tradicionais portuguesas: Costa nova, Aveiro (à esquerda) e aldeia do Fajaco, Viseu (à direita)	13
Fig. 2.8 – Exemplos de métodos construtivos pós-tradicionais: Construção em alvenaria (à esquerda) e construção em betão (à direita).....	13
Fig. 2.9 – Exemplo de um projeto de uma construção moderna, "UNStudio Project Van B Munich" ..	13
Fig. 2.10 – Comparação entre os períodos relativos às principais etapas do processo de construção de várias formas de métodos "OSM"	15
Fig. 2.11 – Intervalo percentual do custo de construção tradicional total e potencial lucro/prejuízo "off-site"	16
Fig. 2.12 – Requisitos de qualidade da construção "Off-site"	17
Fig. 2.13 – Materiais sustentáveis usados na construção, do mais leve ao mais pesado	19
Fig. 2.14 – Algumas características dos edifícios sustentáveis	21
Fig. 2.15 – Simbologia da Certificação BREEAM	22
Fig. 2.16 – Classificação BREEAM	24
Fig. 2.17 – Simbologia da Certificação LEED	25
Fig. 2.18 – Classificação LEED	26
Fig. 2.19 – Percentagem de casas pré-fabricadas na Suécia, Japão e EUA	27
Fig. 2.20 – "A Tind house prototype", desenhado pelo Claesson Koivisto Rune para uma empresa de pré-fabricação, Fiskarhedenvillan	28
Fig. 2.21 – "Archipelago House" desenhado pelos arquitetos Tham e Videgård Arkitekter, 2006	29
Fig. 3.1 – Esquema de marcação CE	31
Fig. 3.2 – Painel resistente (esquerda) e painel não resistente (direita).....	32
Fig. 3.3 – Princípio do sistema do painel sanduíche de betão pré-fabricado	33
Fig. 3.4 – Tipo de Conectores no painel sanduíche.....	34
Fig. 3.5 – Princípio do sistema do painel sanduíche de betão pré-fabricado	36
Fig. 3.6 – Distâncias entre os pontos de fixação e os espaçadores.....	36
Fig. 3.7– Localização típica das conexões nos painéis	38

Fig. 3.8 – Diferentes configurações dos painéis de fachada	38
Fig. 3.9 – Cargas no painel sujeito a forças do vento, sísmicas e de centro de gravidade.....	38
Fig. 3.10 – Fixações de apoio vertical em corte vertical	39
Fig. 3.11– Distâncias entre Fixações de apoio vertical em corte vertical	39
Fig. 3.12 – Fixação soldada de apoio lateral em corte horizontal.....	39
Fig. 3.13 – Dispositivos metálicos pré-ancorados.....	40
Fig. 3.14 – Dispositivos metálicos pré-ancorados.....	40
Fig. 3.15 – Dispositivos metálicos pré-ancorados.....	40
Fig. 3.16 – Dimensões da ancoragem mínima da fixação pré-ancorados, internos.....	41
Fig. 3.17 – Buchas de expansão mecânica	41
Fig. 3.18 – Condições impostas pela EC8	42
Fig. 3.19 – Cronologia da deflagração do incêndio na “Greenfell Tower” em Londres	44
Fig. 3.20 – Ilustrações sobre os conceitos de barreiras perfeitas e imperfeitas	45
Fig. 3.21 – Critérios a satisfazer pelas juntas	46
Fig. 3.22– Junta de um estágio	47
Fig. 3.23 – Corte vertical e horizontal de uma junta de dois estágios	48
Fig. 3.24 – Corte vertical de uma junta de dois estágios	48
Fig. 3.25 – Largura das juntas segundo a tabela 2 da norma DIN 18541-1	49
Fig. 3.26 – Juntas entre painéis mais comuns.....	50
Fig. 3.27 – Caminho percorrido pelas águas nas juntas.....	50
Fig. 3.28 – Distribuição desalinhada dos painéis de fachada	51
Fig. 3.29. – Painéis abertos ou fechados.....	52
Fig. 3.30 – Tipos de disposição da janela em relação ao painel: (a)-em perfil, (b)-em caixa, (c)- recuada.....	53
Fig. 3.31 – Instalação do vão envidraçado no painel.....	53
Fig. 3.32 – Tipos de fixações de caixilharias em painéis	54
Fig. 3.33 – Localização das ligações num: a) painel pendurado/suspenso, b) painel apoiado.....	55
Fig. 3.34 – Semi-reboque, transporte do painel de fachada	56
Fig. 3.35 – Elevação e rotação dos módulos	57
Fig. 3.37– Colocação do módulo do painel pré-fabricado de fachada.....	58
Fig. 3.38 – Representação gráfica das dimensões planas dos painéis	60
Fig. 3.39 – Construção dos painéis em termos de camadas	61
Fig. 3.40 – Edifício “550 Spencer” que contará com mais de 1.000 painéis solares na sua fachada. .	63

Fig. 3.41 – Exemplo ilustrativo de processos de transmissão de calor no caso duma envolvente vertical.	65
Fig. 3.42 – Resistências térmicas superficiais	66
Fig. 4.1 – Residência de estudantes Studyou, Asprela, Porto.....	70
Fig. 4.2 – Projeto de Execução da fachada do piso 5.....	71
Fig. 4.3 – Quantidade de cada tipo de painel usado para cada alçado.....	72
Fig. 4.4 – Modelo Ilustrativo do painel sanduíche.....	73
Fig. 4.5 – Modelo Ilustrativo do painel maciço	74
Fig. 4.6 – Ilustração dos diferentes tipos de fixação usados nos painéis do alçado Norte	76
Fig. 4.7– Ilustração dos diferentes tipos de fixação usados nos painéis do alçado Sul	77
Fig. 4.8 – Ilustração dos diferentes tipos de fixação usados nos painéis do alçado Este/ Oeste	78
Fig. 4.9 – Pormenor construtivo da fachada, (não está à escala)	79
Fig. 4.10 – Fixações do painel sanduíche.....	80
Fig. 4.11– Juntas do painel de fachada da residência de estudantes	81
Fig. 4.12– Corte ortogonal ao plano do painel, junta horizontal	82
Fig. 4.13 – Corte horizontal ao plano do painel, junta vertical	82
Fig. 4.14 – Aplicação da cola mástique em juntas de dilatação	83
Fig. 4.15 – Cordão Neopolene	83
Fig. 4.16 – Pormenor do painel sanduíche pré-fabricado.....	83
Fig. 4.17– Vão envidraçado do painel sanduíche	84
Fig. 4.18 – Dimensões do vão envidraçado	87
Fig. 4.20 – Equipa de montagem do painel	89
Fig. 4.19 – Elevação do painel na fachada	89
Fig. 4.21 – Elevação da grua telescópica para a zona de estaleiro posterior	90
Fig. 4.22 – Grua de 30ton. de capacidade a ser elevada pela grua de 100ton	90
Fig. 4.23 – Pormenor das ancoragens usada na parte superior do painel sanduíche	91
Fig. 4.24 – Pormenor das ancoragens usadas na parte inferior do painel sanduíche	92
Fig. 4.25 – Pormenor das ancoragens usada na parte superior do painel maciço	93
Fig. 4.26 – Colocação dos vãos envidraçados no alçado norte	94
Fig. 4.27– Esquema ilustrativo da logística associada ao módulo de fachada	94
Fig. 4.28 – Esquema ilustrativo do planeamento de obra da solução	95
Fig. 4.29– Gráfico percentual dos custos do painel de betão pré-fabricado	97
Fig. 4.30 – Gráfico do Peso (kg) e Volume (l) de resíduos gerados pela solução pré-fabricada	98
Fig. 4.31 – Gráfico percentual de resíduos gerados pelas embalagens	99

Fig. 4.32 – Gráfico percentual de resíduos gerados pelos materiais de construção	99
Fig. 4.33 – Percentagem correspondente ao peso cada parâmetro, no cálculo da avaliação da sustentabilidade associada a esta solução e o respetivo valor total de emissões de CO2 para atmosfera.....	100
Fig. 4.34 – Quantidade de emissões de CO2 emitidas para a atmosfera por cada parâmetro de avaliação	100
Fig. 5.1 – Corte ortogonal da solução ETICS (adaptado do ITE 50)	102
Fig. 5.3 – Esquema relativo à estimativa da duração das tarefas que envolvem o processo construtivo da fachada ETICS	105
Fig. 5.4 – Gráfico comparativo do número de semanas de trabalho das duas soluções	106
Fig. 5.5 – Gráfico comparativo da diferença de custos entre a solução ETICS e da solução em betão pré-fabricado	107
Fig. 5.6 – Gráfico do Peso (kg) e do Volume (l) de resíduos gerados pela solução ETICS	108
Fig. 5.7 – Gráfico percentual de resíduos gerados pelas embalagens, na solução ETICS	109
Fig. 5.8– Gráfico percentual de resíduos gerados pelos materiais de construção, na solução ETICS	109
Fig. 5.9 – Gráfico comparativo da diferença do Peso e Volume de resíduos gerados pelas soluções de acordo com o Gerador de Preços	110
Fig. 5.10 – Percentagem correspondente ao peso de cada parâmetro no cálculo da avaliação da sustentabilidade associada à solução ETICS e o respetivo valor total de emissões de CO2	111

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Comparação entre os métodos de construção	12
Quadro 2.2 – Classificação dos diferentes sistemas construtivos do "OSM"	14
Quadro 2.3– Exemplo de alguns benefícios sustentáveis na construção "off-site"	20
Quadro 3.1 – Conectores de suporte	34
Quadro 3.2 – Tipos de Espaçadores	35
Quadro 3.3 – Tipos de Fixações	39
Quadro 3.4 – Tipos de Fixações Aparafusadas	40
Quadro 3.5 – Limitações de transporte de elementos pré-fabricados	56
Quadro 3.6 – Tipos de ancoragens de elevação e transporte	59
Quadro 4.1 – Características Gerais do Painei Sanduíche em Betão Pré-Fabricado	74
Quadro 4.2 – Características Gerais do painei maciço em betão pré-Fabricado	75
Quadro 4.3 – Coeficiente de transmissão térmica da parte opaca	84
Quadro 4.4 – Coeficiente de transmissão térmica ente a laje e o painei	84
Quadro 4.5 – Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado	85
Quadro 4.6 – Classificação mínima do comportamento ao fogo dos painéis	86
Quadro 4.7 – Classificação mínima da reação ao fogo do vão envidraçado	86
Quadro 4.8 – Tipo e dimensões dos vidros	87
Quadro 4.9 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico	87
Quadro 4.10 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico	87
Quadro 4.11 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico	88
Quadro 4.12 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico	88
Quadro 4.13 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico	88
Quadro 4.14 - Duração por tarefas (construção da solução pré-fabricada)	95
Quadro 4.15 – Custo do painei sanduíche e maciço por área de fachada	96
Quadro 4.16 – Custo do aluguer de equipamento	96
Quadro 4.17 – Custo do vão envidraçado	96
Quadro 4.18 – Custo total do painei pré-fabricado c/ vão envidraçado	96
Quadro 4.19 – Custo das camadas adjacentes	97
Quadro 4.20 – Custo total da fachada	97
Quadro 4.21 – Resíduos gerados pela solução pré-fabricada	98
Quadro 5.1 – Comparação do desempenho térmico das duas soluções	103

Quadro 5.2 – Comparação da reação ao fogo das duas soluções.....	103
Quadro 5.3 – Comparação do comportamento ao fogo das duas soluções	103
Quadro 5.4 – Comparação do desempenho acústico das duas soluções	104
Quadro 5.5 – Cálculo da duração da construção do pano de alvenaria em blocos de betão	104
Quadro 5.6 – Cálculo da duração da construção do sistema ETICS	105
Quadro 5.7 – Cálculo da duração dos acabamentos interiores	105
Quadro 5.8 – Duração das tarefas da solução ETICS.....	105
Quadro 5.9 – Custo da solução ETICS	106
Quadro 5.10 – Custo total da solução ETICS	107
Quadro 5.11 – Custo da solução em painel de betão pré-fabricado	107
Quadro 5.12 – Resíduos gerados pela solução ETICS	108
Quadro 5.13 – Diferença da quantidade de resíduos gerados pelas duas soluções	110
Quadro 5.14 – Quadro síntese da análise comparativa	111

SÍMBOLOS

e – Espessura da camada [m]

b_j – Largura das juntas [m]

d_j – Profundidade do preenchimento das juntas [m]

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/m².°C]

R_{si} – Resistência térmica interior [m².°C/W]

R_{se} – Resistência térmica exterior [m².°C/W]

R_j – Resistência térmica da camada [m².°C/W]

λ – Coeficiente de condutibilidade térmica [W/m.°C]

U_w – Coeficiente térmico do vão envidraçado [W/m².°C]

U_g – coeficiente térmico do vidro [W/m².°C]

R_w – Índice de redução acústica [dB]

C_{tr} – Valor de adaptação do espectro dos ruídos normalizados de tráfego [dB]

€/m² – Preço em euros por metro quadrado

€/dia – Preço em euros por dia

R_{eq} – Rendimento da equipa [h/m²]

D – Duração da tarefa [h]

Q – Área de trabalho [m²]

D/40 – Cálculo do n.º de semanas, 40 equivale ao número de horas úteis por semana

ABREVIATURAS

MMC – Métodos modernos de construção ou “*Modern Methods of Construction*”

OSM – “*Off-site manufacturing*”, produção “off-site”

LCC – “*Lyfe Cycle Cost*”, custo do ciclo de vida

LED – “*Light Emitting Diodes*”, Diodo Emissor de Luz

GEE – Gases de efeito de estufa

VOC – “*Volatile organic compounds*” (VOC`S)

CO₂ – Dióxido de carbono

LEED e BREEAM – Certificação de sustentabilidade

RPC – Regulamento de Produtos de Construção

CE – Certificação Europeia

ETA – “*European Technical Approval*”, Aprovação Técnica Europeia

RSA – Regulamento de Segurança e Ações

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

PTP – Pontes Térmicas Planas

LCA – “*Lyfe Cycle Analysis*”, Análise do ciclo de vida

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A construção recente de edifícios em Portugal baseia-se no uso generalizado de estruturas reticuladas de betão armado feitas “in-situ”, preenchidas por alvenarias diversas, sem função estrutural, que materializam a envolvente opaca e a compartimentação. Estas alvenarias têm sido predominantemente realizadas “in situ”. Este paradigma está neste momento a ser questionado por diversas razões, donde sobressaem o acréscimo dos custos, falta de mão de obra e incumprimento de prazos, designadamente para trabalhos deste tipo, como as alvenarias, que requerem mão de obra intensiva. Além disso, a pressão para a adoção de soluções mais sustentáveis e que garantam uma maior produtividade em obra, começa a suscitar o interesse no emprego de soluções pré-fabricadas. Neste cenário começam a perspetivar-se duas tendências: o uso de soluções mais industrializadas de fachadas prefabricadas em diferentes materiais, no que se designa por construção “off-site”, e o recurso progressivo a soluções mais leves.

A construção “off-site” apresenta inúmeras vantagens, nomeadamente: maior velocidade de construção, uma produção mais rápida (em série), uma montagem fácil, prática e rápida que se traduz numa construção mais segura, menor deslocação de recursos humanos, maior reaproveitamento e diminuição do desperdício de materiais, etc. Ao mesmo tempo este tipo de construção tem como grande preocupação o conforto e bem-estar na utilização diária, não esquecendo as possibilidades arquitetónicas ilimitadas no design do projeto, assim como o seu impacto ambiental positivo. Apesar do quadro aparentar ser muito positivo há vários aspetos que têm de ser alvo de atenção como as juntas entre painéis fundamentais para assegurar a estanqueidade à água e ao ar, bem como os aspetos de isolamento térmico e acústico e a durabilidade. Se estes aspetos forem bem controlados e estudados, este tipo de construção preenche todos os requisitos para ser uma aposta de sucesso na construção atual em Portugal. É neste contexto que surge o tema desta tese, “*Análise da viabilidade do emprego de fachadas prefabricadas em edifícios em Portugal*”.

1.2. OBJETIVOS

Como referido em 1.1. a pré-fabricação é uma abordagem inquestionável para o futuro da construção, particularmente em Portugal que precisa urgentemente de novos processos que contribuam para a redução de custos, sem descurar dos aspetos de conforto e ambientais.

Este trabalho procurou explorar de uma forma abrangente de que forma a pré-fabricação sai a ganhar em relação a uma construção em alvenaria tradicional, com foco em parâmetros funcionais, de planeamento, económicos e de sustentabilidade.

O grande objetivo desta dissertação é, pois, a análise da viabilidade do emprego das fachadas prefabricadas de edifícios em Portugal, sobretudo enquanto solução de acabamentos de estruturas reticuladas feitas “in-situ”.

1.3. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em seis capítulos principais que se dividem em diversos pontos, abordando de forma mais específica cada temática:

1. Introdução;
2. Pré-fabricação;
3. Fachadas Pré-fabricadas – Exigências e Soluções;
4. Caso de Estudo;
5. Comparação da Solução Pré-fabricada Estudada com uma Solução Tradicional em Alvenaria;
6. Conclusão.

O presente capítulo apresenta um enquadramento geral da temática em estudo e explica de um modo geral o que se pretende obter com a elaboração desta dissertação definindo o seu objetivo principal.

No segundo capítulo, foi feita uma pesquisa geral sobre a pré-fabricação que engloba aspetos como a sua história, conceitos gerais, pontos favoráveis e desfavoráveis do método construtivo quando comparado com outros métodos tradicionais, e a sustentabilidade da construção “off-site”.

Ainda no âmbito do estado de arte, escreveu-se mais um capítulo sobre a pré-fabricação de fachadas, mais especificamente sobre painéis de fachada em betão pré-fabricado. Neste capítulo, foram exploradas questões de dimensionamento e logística associadas ao transporte e à montagem do painel de fachada, como também, as funcionalidades de desempenho referentes a este tipo de elemento construtivo, em linha com os parâmetros de construção ligados à segurança e conforto do ocupante.

O trabalho de pesquisa efetuado nos dois primeiros capítulos, serviu de base para o estudo de um caso real de painéis de fachadas pré-fabricados numa residência de estudantes no Porto, que se apresenta nos capítulos seguintes.

No capítulo quatro, começou-se por fazer uma pequena introdução e descrição ao projeto, a explicar os motivos reais que levaram o cliente desta obra a optar por uma solução pré-fabricada e de que maneira foi materializada a “standardização” do módulo do painel de fachada nessa ideia inicialmente definida. Posteriormente, procedeu-se à análise do painel de betão pré-fabricado, no que toca, em primeira instância, em perceber o seu dimensionamento, que quantidade de painéis e que variantes do módulo base foram produzidas e qual a posição dessas “peças” pré-fabricadas na fachada do edifício, numa segunda instância, foi analisado de que maneira este elemento construtivo respondia às exigências funcionais em termos de estanqueidade das juntas, de resistência ao fogo, de desempenho térmico e acústico, e na forma como foi feito o transporte e a montagem dos painéis, à medida que eram produzidos em fábrica, para permitir uma redução total da duração da obra. O capítulo quatro ficou colmatado com uma análise aos resíduos gerados em obra e à quantidade emissões de carbono emitidas para a atmosfera por esta solução.

No capítulo cinco, analisou-se a viabilidade da solução pré-fabricada do caso de estudos numa tentativa de comparação independente com uma solução convencional corrente em alvenaria com sistema ETICS, tendo em consideração os mesmos parâmetros estudados no capítulo anterior. Esta análise só foi possível com recurso à vasta e atualizada base de dados que o programa web “Gerador de Preços” possui sobre custos de materiais, custos de mão-de-obra, resíduos gerados, etc. para cada solução construtiva.

Por fim, no capítulo seis, são apresentadas as conclusões finais deste trabalho e enunciadas perspetivas futuras relacionadas com os temas abordados nesta dissertação.

2 PRÉ-FABRICAÇÃO

2.1. CONTEXTO HISTÓRICO DA PRÉ-FABRICAÇÃO

A pré-fabricação não é um conceito novo. De facto, no ano de 1624, existe um relato de uma casa de madeira construída com painéis transportados desde Inglaterra até Massachusetts, EUA. Nos quatro séculos seguintes, houve um aumento surpreendente do número de oportunidades para a pré-fabricação

Em 1837, edifícios agrícolas e bangalôs pré-fabricados começaram a tornar-se populares. Arquitetos, engenheiros e investigadores começaram a fazer experiências com ferro fundido, betão e outros materiais para explorar de que forma esta tecnologia poderia ser desenvolvida.

E graças a essas investigações, um marco importante é alcançado em 1889, quando a torre de Gustav Eiffel foi montada com elementos de ferro pré-fabricados em Paris. Como o pré-fabricado agrupa tarefas de construção semelhantes e aproveita as técnicas da linha de montagem, a Torre Eiffel foi construída muito rapidamente e reduziu significativamente o custo e a mão de obra necessários para construir a estrutura icônica.

Alguns anos depois, os primeiros blocos de apartamentos com painéis em betão pré-fabricado no mundo foram lançados em Liverpool e, logo depois, a “Sears, Roebuck and Company”, com sede em Chicago, montou uma operação em que embalou e enviou mais de 400 tipos diferentes de casas. De 1908 a 1940, a empresa vendeu cerca de 75.000 casas pré-fabricadas. Essa foi uma conquista significativa ao disponibilizar moradias acessíveis para qualquer pessoa, alimentada pela linha de montagem e pelas técnicas de fabricação desencadeadas na Revolução Industrial.

A construção pré-fabricada ajudou a resolver a escassez de moradias na Europa pós-Primeira Guerra Mundial. Os métodos de fabricação industrial que eram essenciais durante a guerra agora eram fundamentais na criação de casas pré-fabricadas [1].

No mesmo ano, Buckminster Fuller começou a desenvolver a sua visão para uma casa com cúpula de metal que pudesse ser facilmente desmontada e transportada. Seis anos depois, em 1935, outro clássico do design apareceu na forma do Airstream Clipper de Wally Byam. Os avanços tecnológicos continuaram e, inspirando-se no estilo de produção de linha de montagem de Henry Ford, um pioneiro chamado William Levitt criou sozinho Levittown, em Nova York, usando um processo de construção rápida. As casas de 70m² em Cape Cod poderiam ser construídas em um tempo recorde de 16 minutos [1].

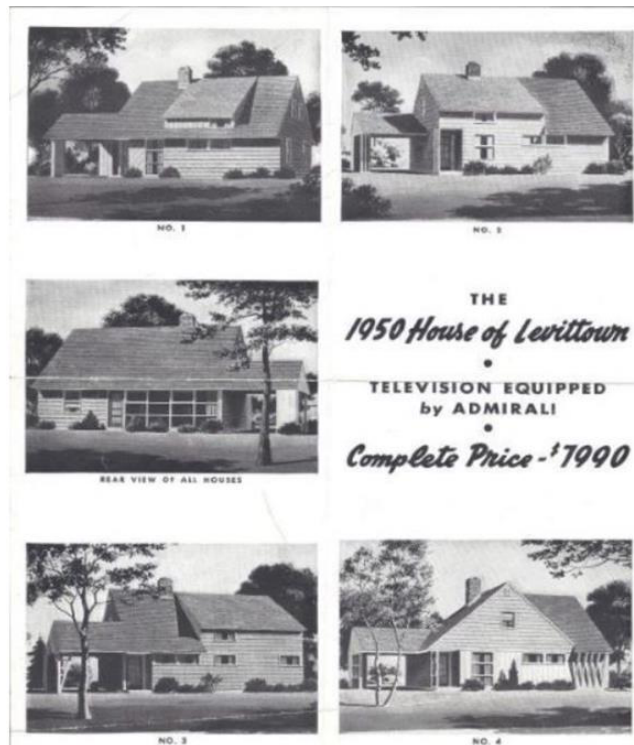


Fig. 2.1 – "Levitt home", anos 50, New York [2]

O significativo aumento de casas pré-fabricadas do pós-guerra significou que, em 1960, as casas móveis representavam 15% das moradias nos Estados Unidos. Em 1967, o Habitat 67 de Moshe Safdie foi apresentado na Expo Mundial. Alguns anos depois, o arquiteto Zvi Hecker ampliou ainda mais os limites da habitação pré-fabricada com o impressionante complexo residencial Ramot.

Em 1996, a IKEA e a construtora sueca Skanska uniram-se para criar casas BoKlok, com a finalidade de tornar as casas acessíveis para escandinavos com rendimentos modestos. No entanto, o que o pré-fabricado compensou em custo e eficiência de mão-de-obra, faltou em design. E ao longo da década de 1990, houve um declínio no interesse em casas pré-fabricadas devido ao estigma da padronização excessiva que se desenvolveu em torno das casas modulares [1].



Fig. 2.2 – Casas BoKlok em Mosås, Örebro, Suécia [3]

Na década de 2000, no entanto, houve um interesse renovado pela pré-fabricação. Em 2003, um protótipo de uma unidade residencial móvel foi apresentado pela LOT-EK. A unidade era um contentor de transporte convertido, que apresentava módulos extensíveis e desmontáveis. Outros avanços na impressão 3D possibilitaram fomentar a fabricação de componentes em módulos de construção, sejam casas, pontes ou arranha-céus.

Em 2010, a Broad Sustainable Building, especialista em edifícios de baixo custo resistentes a terremotos, concluiu o Ark Hotel de 57 andares em Changsha, China, em apenas 19 dias. E em 2016, o edifício mais alto do mundo feito com construção modular até à data apareceu no horizonte de Nova York [1].



Fig. 2.3 – Um dos edifícios residenciais modulares mais alto do mundo em Brooklyn, Nova York [44]

Um ano depois, a KEF Infra aproveitou o poder da modularidade na construção e um software de design 3D para construir um hospital modular de 500 unidades em Calicut, que tinha um quarto do custo por unidade, comparando com as infraestruturas hospitalares padrão dos EUA.

Em 2018, abriu as portas a Factory_OS, empresa que fornece apartamentos pré-fabricados a preços acessíveis para a área da baía de São Francisco. Hoje, arquitetos e designers continuam a explorar como a pré-fabricação pode mudar o mundo. A chegada do BIM, impressão 3D e automação despertaram ainda mais essas possibilidades. Com mais inovações tecnológicas, a criação de infraestrutura sustentável em países em desenvolvimento e a produção em massa de moradias acessíveis, a indústria AEC está a lançar as bases para o futuro da construção [1].

2.2. CONCEITO DE PRÉ-FABRICAÇÃO

A construção prefabricada, consiste basicamente nas seguintes grandes etapas:

- 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 e montagem dos vários componentes, garantindo um comportamento, estrutural e de conforto, eficaz e de acordo com a regulamentação aplicável, com a finalidade de manter ou melhorar a qualidade em relação a uma construção tradicional [4].

2.2.1. SISTEMAS DE PRÉ-FABRICAÇÃO

O processo de pré-fabricação, geralmente é realizado numa fábrica especializada, na qual se unem vários materiais para formar uma componente de uma instalação final. Quando a percentagem de pré-fabricação na construção for elevada estamos perante um sistema de pré-fabricação total, em que o número de operações em obra é reduzido. Ora quando se fala apenas de uma parte da construção, (ex.: pavimentos, divisórias, tetos falsos, elementos de fachada, janelas, etc.) o sistema passa a ser de prefabricação parcial. Tal como os outros sistemas, este também produz componentes de catálogo, porém a sua facilidade de utilização permite resolver questões de fixações e de ligação de forma eficaz. Os componentes pré-fabricados geralmente envolvem o trabalho de um único profissional especializado, no entanto nem sempre é assim, pois depende do tipo de sistema/subsistema de pré-fabricação em causa. Diz-se que o sistema é aberto quando existem diversos produtores independentes de componentes, a partir dos quais se podem executar edifícios completos, ou seja, existe uma certa liberdade de escolha entre os diferentes produtores. Por outro lado, o sistema diz-se fechado quando os elementos de construção não são intermutáveis, sendo usados apenas por uma única organização produtora, eventualmente com diferentes unidades fabris e empresas licenciadas [4].

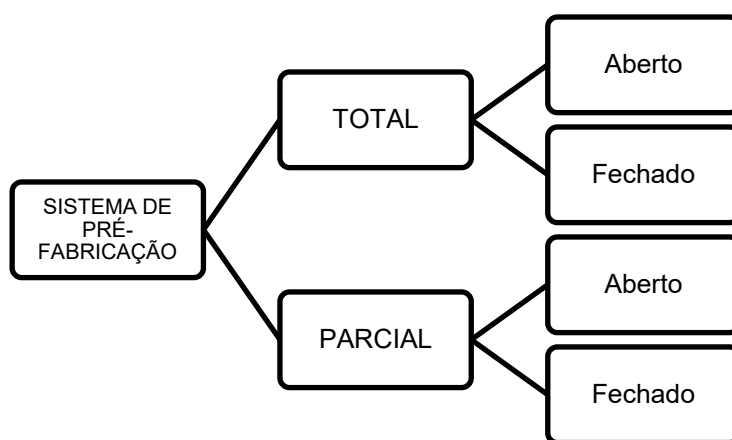


Fig. 2.4 – Sistemas de pré-fabricação [3]

2.2.2. MÓDULO

Quando se fala em módulo, refere-se a uma grandeza base que serve de referência para definir as dimensões dos componentes ou elementos da construção que deverão ser múltiplos desse módulo. Daí surge a Modulação, que corresponde a uma técnica que tem como objetivo promover a coordenação das dimensões dos elementos da construção em geral e em concreto de um determinado empreendimento, através da utilização de um módulo base. Designa-se então por construção modular aquela que foi

concebida e construída com recurso a elementos modulados, visando a utilização do módulo no estabelecimento das várias dimensões dos diversos componentes e para o edifício em geral [4].

2.2.3. REPETIÇÃO

Um elemento-chave para uma produção eficiente e económica que necessite de moldes, por exemplo para prefabricados de betão, é minimizar o número destes e maximizar a produção a partir de cada tipo molde. A eficiência produtiva e económica é alcançada ao possibilitar formas semelhantes, se não idênticas, a serem produzidas a partir do mesmo molde básico (principal) e ao minimizar o tempo necessário para desmontar um molde e montá-lo novamente para a fabricação da próxima peça.

Uma conceção cuidadosa é indispensável para alcançar uma boa repetição no projeto sem sacrificar a sua vertente criativa.

A atenção deve ser focada na geometria geral da estrutura, e não apenas na forma dos painéis. O custo de formas complexas torna-se económico por meio da pré-moldagem repetitiva, pois o investimento feito na fabricação de um molde complexo é amortizado pela elevada quantidade de peças fabricadas com esse molde.

O objetivo por trás do projeto de peças repetitivas é amortizar os custos de engenharia e modelação de forma eficaz. O maior número possível de peças deve ser projetado para ser fundido no mesmo molde e produzido a partir de um único desenho de fábrica. O que se traduz no cumprimento de prazos mais curtos, num melhor controlo de qualidade e numa redução nos gastos de transporte [5].

2.2.4. TOLERÂNCIA DIMENSIONAL

O termo Tolerância é utilizado para designar a variação que é admissível para uma determinada dimensão de um elemento ou componente que é parte integrante de um sistema construtivo. O conceito de Tolerância refere-se, portanto, à quantidade física da variação dimensional admissível. Designa-se por Amplitude de Tolerância o valor numérico, ou seja, valor absoluto, da diferença dimensional admissível.

Em qualquer tipo de construção se põe o problema de precisão das suas dimensões e, consequentemente, o das tolerâncias correspondentes. A questão assume particular importância quando se utiliza a coordenação dimensional e, mais ainda, quando se empregam componentes industrializadas [4].

2.3. PRÉ-FABRICAÇÃO LEVE E PESADA

A pré-fabricação também se distingue entre Leve e Pesada, embora não se conheça uma distinção clara numérica entre uma e outra.

Uma pré-fabricação leve consiste numa produção à base de materiais muito diversos: Aço em perfis e em chapa, alumínio em perfis e em chapa, madeira e derivados de madeira, chapa de vidro, fibrocimento, etc. [4].

VANTAGENS	DESvantagens
• Possibilidade de elevada racionalização e mecanização, com produtividade muito elevada; • Facilidade de armazenamento em obra, por ocupar pouco espaço e por se tratar de elementos leves; • Encargos com transportes pouco elevados e grande raio de ação; • Possibilidade de exportação, interessando mercados maiores; • Facilidade de se obter elevado isolamento térmico; • Facilidade de resolução das ligações;	• Sistemas, em regra, muito rígidos com pouca versatilidade; • Exige coordenação dimensional modular; • Reduzida inércia térmica; • Dificuldades em assegurar satisfatório isolamento sonoro; • Deficiente comportamento face ao fogo; • Problemas de durabilidade na maior parte das situações; • Baixa resistência mecânica por ações secundárias;

Fig. 2.5 – Vantagens e desvantagens de uma pré-fabricação leve [4]

Uma pré-fabricação pesada é fundamentalmente a prefabricação de betão. Sendo os materiais mais usados: o betão normal, armado e/ou pré-esforçado, betão leve, elementos cerâmicos de aligeiramento, os materiais incorporados para isolamento térmico aligeiramento, etc. [4].

VANTAGENS	DESvantagens
• Boa inércia térmica; • Possibilidade de elevada racionalização e mecanização, com produtividade muito elevada; • Facilidade em assegurar satisfatório isolamento sonoro; • Bom comportamento face ao fogo; • Boa durabilidade na maior parte das situações; • Boa resistência mecânica por ações secundárias;	• Dificuldade de armazenamento em obra, por ocupar algum espaço e por se tratar de elementos pesados; • Encargos com transportes algo elevados e com pouco raio de ação; • Dificuldade de resolução das ligações;

Fig. 2.6 – Vantagens e desvantagens de uma pré-fabricação pesada [4]

2.4. MÉTODOS MODERNOS DE CONSTRUÇÃO (MMC)

A atual proliferação de termos associados a 'Métodos modernos de construção' (MMC) e 'Off-site Manufacturing' (OSM) demonstram a necessidade de uma terminologia mais objetiva. 'Pré-fabricação', 'Pré-montagem', 'Modularização' e "Off-site Construction", são termos geralmente usados para cobrir a fabricação e montagem (geralmente fora do local) de edifícios e/ou seus componentes numa fase inicial àquela em que seriam tradicionalmente construídos (no local), assim como a sua posterior instalação final.

Os métodos de construção civil referem-se à forma como as unidades e componentes são produzidos e montados. A forma de organizar este processo difere de região para região e depende da dimensão do projeto, do nível de tecnologia e dos materiais disponíveis, sendo possível distinguir três diferentes 'Métodos Modernos de Construção' (MMC), ordenados por nível tecnológico ascendente e flexibilidade decrescente, (Quadro 2.1).

Além disso, como o edifício tem algum grau de repetição, o projeto de um edifício pode ser dividido numa série de unidades (também conhecidas como componentes ou módulos) adequadas à produção fabril, que podem ser específicas para aquele edifício ou, em alternativa, produzidas com maior grau de adaptabilidade e versatilidade.

Embora o aumento exponencial no pós-guerra da construção pré-fabricada em vários países tenha levado a uma perceção tendenciosa de que os edifícios pré-fabricados são pouco atraentes ou de menor qualidade, existe hoje um interesse renovado e crescente em sistemas de construção pré-fabricados, pois representam economia de tempo e materiais, bem como padrões mais elevados de qualidade em relação aos métodos de construção mais convencionais. Considerando esse aspeto, o quadro 2.2 apresenta uma proposta para a classificação unificada dos métodos OSM, organizada em quatro níveis diferentes correspondentes ao grau de pré-fabricação do sistema, o tamanho das componentes pré-fabricados, a complexidade da pré-montagem e o grau de especialização da mão de obra de construção no local, personalização e flexibilidade [6].

Quadro 2.1 – Comparação entre os métodos de construção [6]

	Métodos Tradicionais (Ver figuras 2.7)	Pós Métodos Tradicionais (“On-Site”) (Ver figuras 2.8)	“Off-Site Manufacturing” (OSM) (Ver figuras 2.9)
Tipo de Construção	Edifícios de pequena e média escala, projetados segundo os estilos e práticas locais.	Edifícios de pequena a grande escala, composto por muitos requisitos arquitetónicos individuais.	Edifícios de pequena a grande escala, que assentam em princípios como a pré-fabricação, a pré-montagem, etc.
Materiais, Componentes e Disponibilidade	Número limitado de materiais tradicionais locais. (ex: tijolo, pedra, madeira, toSCO)	Vasta gama de materiais tradicionais e novos, e componentes. (ex.: betão armado, aço, etc.)	Aumento da disponibilidade de novos sistemas comerciais, materiais e acabamentos. (ex.: betão pré-fabricado, painéis de fachada, etc.)
Local de construção	O fabrico e montagem são feitas no local.	A quantidade de trabalho “on-site” foi reduzida pela introdução de alguns componentes produzidos em fábrica.	A maior parte dos componentes dos edifícios são produzidos em fábrica, montados no local e por norma são relacionados com o tipo específico de edifício.
Equipamento necessário, Tempo de trabalho e Mão-de-Obra especializada	De uma forma geral requer apenas equipamentos tradicionais. Pessoal especializado e familiarizado no tipo de trabalho. Consome bastante tempo de atividade.	Requer equipamento dispendioso para diferentes trabalhos de obra. Necessita de equipas que façam trabalhos de carpintaria e alvenaria. Porém o tempo de trabalho é reduzido entre 5-15% quando comparado com os métodos tradicionais.	É provável que seja necessário o recurso a gruas e à manufatura especializada em “off-site”. O tempo de trabalho no local é reduzido entre 25-75% quando comparado com a construção tradicional, dependendo do nível de pré-fabricação.
Eficiência e Flexibilidade	Pouco eficiente e repetido. Flexibilidade máxima.	Precisa de organizar o processo construtivo de modo eficiente desde a fase de projeto. Flexibilidade média.	Produção de fábrica eficiente de muitos componentes similares de edifícios. Pouca flexibilidade, no que toca ao alto nível de assertividade que é requerido. A ocorrência de falhas compromete o processo de montagem.

Decréscimo de flexibilidade, aumento de mão-de-obra especializada, redução do tempo de trabalho “on-site”, aumento da eficiência, da disponibilidade de materiais e soluções.





Fig. 2.7 – Exemplos de casas tradicionais portuguesas: Costa nova, Aveiro (à esquerda) e aldeia do Fajã, Viseu (à direita) [7], [8]



Fig. 2.8 – Exemplos de métodos construtivos pós-tradicionais: Construção em alvenaria (à esquerda) e construção em betão (à direita) [9]



Fig. 2.9 – Exemplo de um projeto de uma construção moderna, "UNStudio Project Van B Munich" [45]

Quadro 2.2 – Classificação dos diferentes sistemas construtivos do "OSM" [6]

Nível e categoria	Sub-categoria	Definição	Exemplos	Esquema
1. Componentes e sub-montagens	Componentes pré-fabricados	Estes elementos, apesar de estarem predominantemente associados com métodos tradicionais, são produzidos numa fábrica para melhorar o processo construtivo "on-site". Estes itens não são sistemas de habitação completos e são por norma feitos em fábrica e ocasionalmente montados no local.	Construção em estacas (elementos lineares-1D). Sets de portas e janelas, mobiliário, etc.	
	Subsistemas		Instalação do betão pré-fabricado (fundações, escadas, colunas, vigas, etc.	
2. Sistemas de construção 2D	Revestimento de parede (sem função resistente)	Elementos de duas dimensões produzidos em fábrica, onde podem ser concluídos antes de serem transportados para o local para serem montados com o objetivo de formar uma estrutura 3D, ou encaixar na estrutura existente, criando/separando espaço.	Painéis de revestimento.	
	Painéis verticais (podem ser resistentes)		Painéis de fachada e divisórias.	
	Painéis não verticais (por norma resistente)		Lajes e painéis de cobertura.	
3. Sistemas de construção semi-volumétricos (1D+2D+3D)	Sistema de construção Híbrido	Uso conjunto de elementos lineares, painéis e módulos para formar uma estrutura 3D. O conceito de construção híbrida permite uma maior flexibilidade no desenvolvimento e uma redução no design uniformizado.	Espaços como cozinhas ou casa-de-banho são produzidas em unidades modulares, sendo o resto da construção feita por sistemas 2D.	
4. Sistemas de construção 3D	Sistemas construtivos volumétricos ("pods"; elementos não estruturais)	Pré-montagem de pequenas unidades 3D, que criam espaço útil e são por norma concluídas em fábrica.	Módulos de cozinha e casa de banho, "pods", etc.	
	Sistema modular construtivo (sistema completo construtivo)	Pré-montagem de grandes unidades 3D produzidas em fábricas. Usualmente já vêm totalmente equipadas antes de serem transportadas até ao local para serem instaladas e ligadas às fundações/estrutura e entre elas.	Design dos edifícios bastante uniforme: hotéis, residências de altura média, residência de estudantes, blocos de prisões, etc.	

Aumento do grau de pré-fabricação, tamanho dos componentes pré-fabricados e complexidade da pré-montagem.
Redução da mão-de-obra "on-site", da customização e da flexibilidade



A vantagem mais óbvia dos métodos OSM é a mudança das atividades do site para a fábrica, permitindo assim uma redução considerável de tempo através da padronização e industrialização do processo de fabricação. Essa mudança é ilustrada na figura 2.10, onde as diferenças relativas dos períodos de construção das principais etapas do processo de construção de várias formas de sistemas de construção OSM podem ser observadas. A economia de tempo correspondente foi quantificada por Lawson (Lawson et al., 2014) ao indicar a proporção de fabricação fora do local e a percentagem de redução no tempo de construção em relação ao 'Nível 0' – que representa métodos de construção totalmente baseados no local (como betão armado ou a alvenaria) – figura 2.10.). Apesar destes esforços, esta informação deve ser meramente indicativa dada a multiplicidade e complexidade de parâmetros e investimentos envolvidos, que diferem de edifício para edifício e de um sistema para outro. No artigo Lawson (2014) foi apresentado com mais detalhe os benefícios da construção “on-site” versus fabricação “off-site” em termos de fabricação, economia e sustentabilidade (principalmente com foco na construção modular), como a maior velocidade de construção, a poupança dos custos na fabricação e a reduzida quantidade de energia necessária durante as fases de construção e uso. Além disso, Gibb e Isack (2003), com base nos resultados de uma pesquisa de entrevistas com grandes clientes de construção sobre as suas expectativas e previsões para a pré-montagem nos seus projetos, afirmam que os benefícios deduzidos da fabricação fora do local foram, por ordem de importância, rapidez de construção, maior qualidade, menor custo, menor desperdício e maior durabilidade [6].

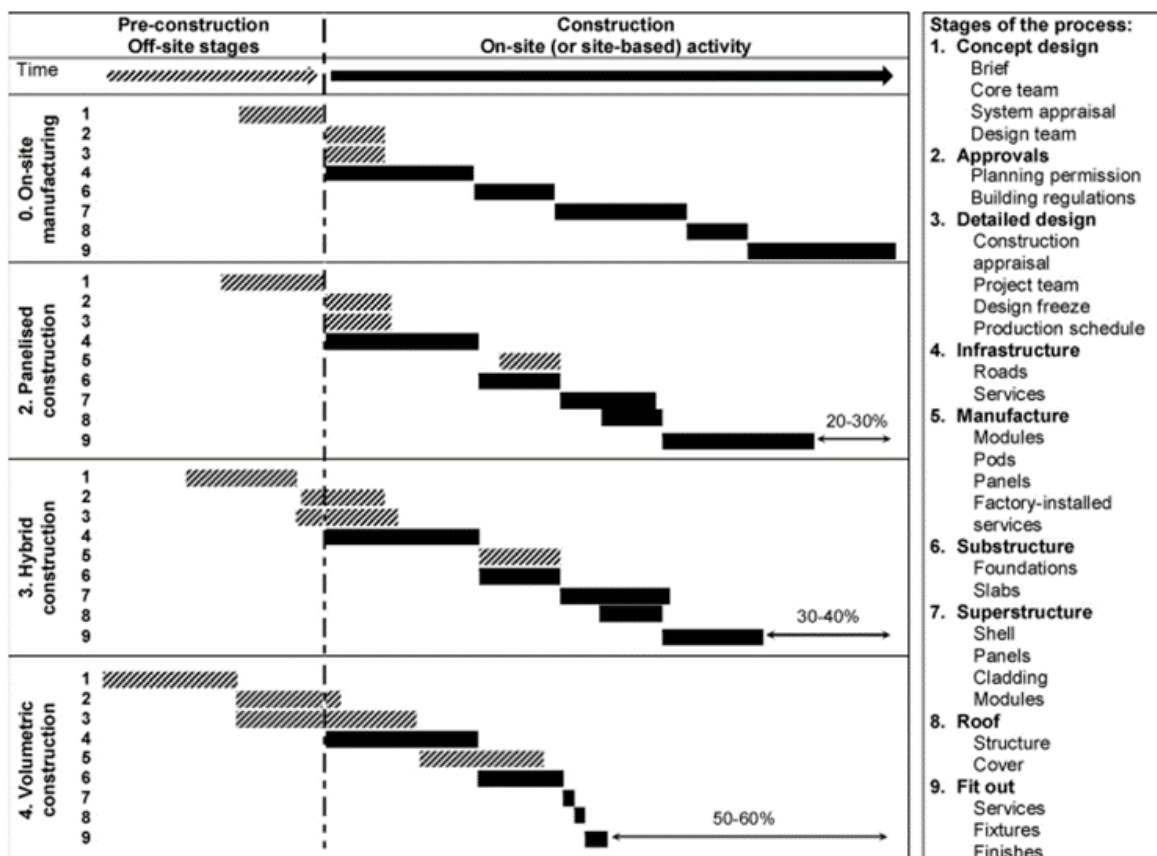


Fig. 2.10 – Comparação entre os períodos relativos às principais etapas do processo de construção de várias formas de métodos "OSM" [6]

2.5. ASPETO ECONÓMICO DA CONSTRUÇÃO “OFF-SITE”

A abordagem modular também tem o potencial de gerar poupanças de custos significativas, embora isso ainda seja mais exceção do que a norma hoje. À medida que os intervenientes da cadeia de fabricação vão adquirindo experiência e conhecimento, crê-se que os principais responsáveis do setor imobiliário estão preparados para fazer a mudança e otimizar processos, podendo obter mais de 20% em poupanças em custos de construção, com ganhos potenciais adicionais nos custos de vida útil (por exemplo, através da redução dos custos de funcionamento por meio de economia de energia e manutenção). De forma conservadora, o valor de mercado para construção modular somente na construção de novos imóveis pode chegar a 125 bilhões de euros na Europa e nos Estados Unidos até 2030 [10].

Contudo caso o custo de mão de obra vier a ser superado pelos custos de logística ou de materiais, a percentagem das poupanças na construção do projeto podem ser nulas ou até vir a dar prejuízo, (figura: 2.11), [10].

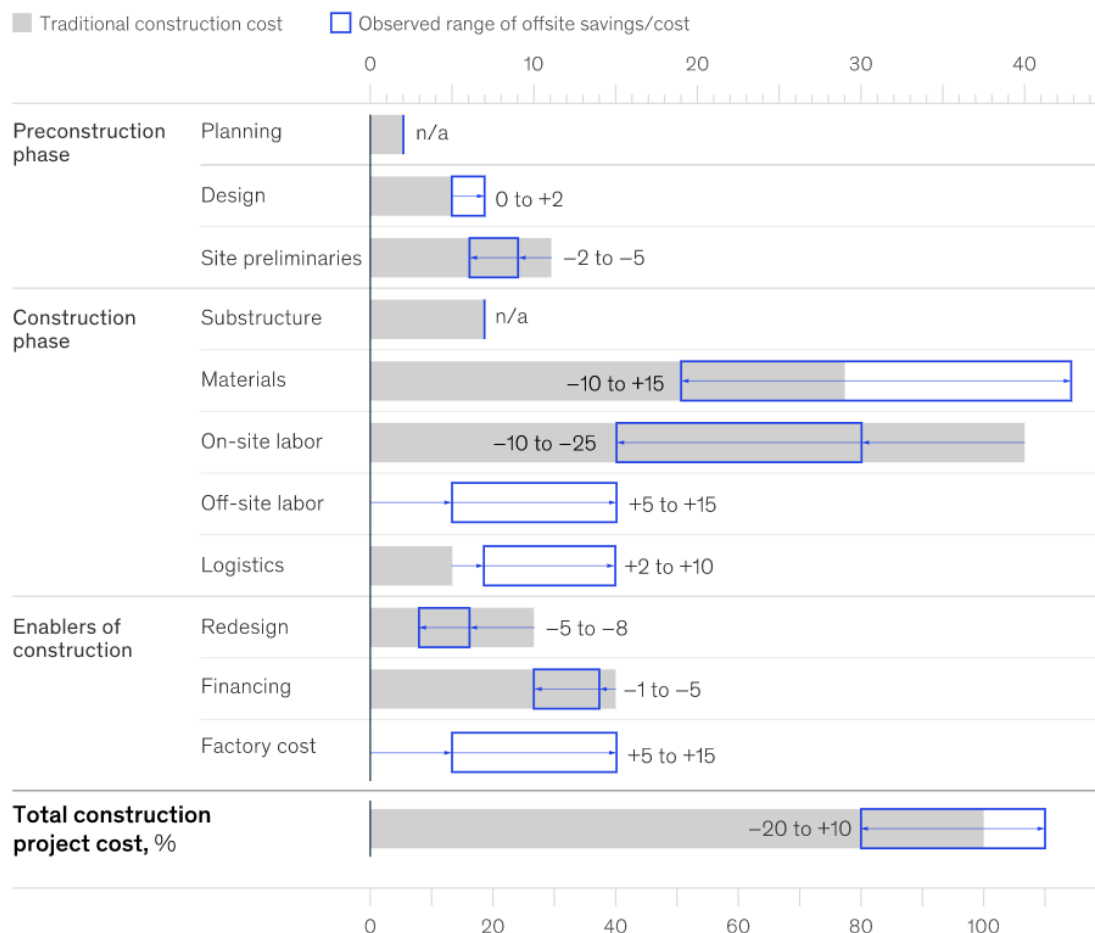


Fig. 2.11 – Intervalo percentual do custo de construção tradicional total e potencial lucro/prejuízo “off-site” [10]

2.6. QUALIDADE DA CONSTRUÇÃO “OFF-SITE”

A Construção Prefabricada pode trazer uma potencial vantagem em termos de qualidade, tendo em conta que os sistemas de controlo aplicados em fábrica podem ser mais rigorosos do que em estaleiro, o que poderá levar 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 estandardizadas e à apertada supervisão em fábrica, que permitem um maior controlo de qualidade, reduzindo a quantidade e a extensão de alterações. Em ambientes de fábrica, a qualidade do produto final é bastante mais simples de assegurar do que em estaleiro. Tecnologias informáticas avançadas ajudam a controlar o alinhamento e precisão das peças, permitindo também que cada produto na linha de fabrico seja diferente do anterior, possibilitando uma produção em massa personalizada, [11]. 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. É fundamental ter bastante atenção a este ponto, uma vez que constituiu um problema no passado da Prefabricação[12].

As três maiores questões que podem ser colocadas sobre qualquer casa construída com recurso a técnicas de Prefabricação, quando comparada com outra construída pelos métodos mais convencionais, são [13]:

- 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



Fig. 2.12 – Requisitos de qualidade da construção “Off-site” [13]

2.6.1. DURABILIDADE:

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. Em particular, todos os

componentes estruturais têm um período de vida útil estimado de 50 anos, o que corresponde ao período de vida útil estimado para os vários componentes prefabricados. Os sistemas com estrutura leve em aço foram avaliados como tendo um potencial período de vida útil de 200 anos. A Construção Prefabricada não pode por si só garantir uma maior durabilidade, no entanto a produção em fábrica deve reduzir os riscos de não conformidade relacionados com falhas prematuras e consequentes reparações, [13].

2.6.2. CUSTO CICLO DE VIDA OU LYFE CYCLE COST ("LCC"):

Não tem necessariamente de haver questões diferentes de manutenção subjacentes à estrutura das construções prefabricadas, pelas razões apontadas acima relativamente à durabilidade. Os materiais são semelhantes e com especificações idênticas, sendo assim apresentam a mesma durabilidade e o mesmo custo de ciclo de vida. Os regimes de manutenção para os componentes, tais como janelas, serão os mesmos, independentemente da metodologia construtiva utilizada, pois os requisitos a satisfazer pelos componentes são os mesmos [13].

Muitos dos edifícios prefabricados eram vistos no passado como sendo construções de fraca qualidade com períodos de vida útil mais baixos do que as construções tradicionais. A perceção da Prefabricação enquanto solução não permanente é uma das barreiras à sua implementação generalizada no setor da construção. No setor não habitacional a importância do período de vida útil é entendida de forma diferente. Alguns estabelecimentos comerciais são projetados para ter um período de vida útil relativamente limitado, dentro do qual o desempenho do edifício consegue ser mantido. A introdução do conceito de Custo de Ciclo de Vida para olhar para as diferentes estratégias de projeto pode ser aplicada à Prefabricação, permitindo ao cliente, no processo de escolha e estudo prévio, perceber quais as implicações financeiras de determinado edifício ao longo do seu período de vida útil. Este conceito é importante para o mercado da promoção imobiliária [12].

2.6.3. DESEMPENHO:

Atualmente já existe um conjunto de normas que tem 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 prefabricado difere substancialmente do verificado num edifício construído pelos métodos tradicionais. O faseamento construtivo deve ser considerado desde início no projeto. Os elementos prefabricados 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.

No caso da Construção Prefabricada, outro fator bastante importante a considerar são as ligações entre os componentes. Como se sabe, para garantir o comportamento funcional e também 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 são de grande importância no comportamento global da estrutura e, em particular, no caso de construções prefabricadas. Devem ser corretamente dimensionadas e especificadas em projeto e executadas em obra de forma rigorosa [14].

Quanto ao comportamento funcional, os novos edifícios são obrigados a aderir a padrões rigorosos de isolamento térmico, acústico e de estanqueidade ao ar e à água. Para atender a esses padrões, o projeto do edifício é submetido a vários testes antes e após a construção estar concluída. Após a sua construção o edifício é avaliado novamente, incluindo um teste de pressão física para garantir que as vedações estão conformes e de acordo com o projeto [15].

2.7. SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO “OFF-SITE”

A construção sustentável é a prática de criar um ambiente saudável baseado em princípios ecológicos. Segundo o professor Charles J. Kibert, a construção sustentável concentra-se em seis princípios: “conservar, reutilizar, reciclar/renovar, proteger a natureza, criar produtos não tóxicos e de alta qualidade”.

O objetivo é reduzir o impacto da indústria no meio ambiente, utilizando práticas de desenvolvimento sustentável, empregando eficiência energética e aproveitando a tecnologia verde.

Embora muitos setores empresariais estejam a fazer o possível para serem mais sustentáveis, o setor de construção é especial porque contribui significativamente na forma como essas práticas são aplicadas, devido à grande quantidade de materiais e energia que a indústria utiliza [16].

2.7.1. Vantagens na perspetiva da sustentabilidade da construção Off-site

a) Reduzir o desperdício na Construção:

Os métodos tradicionais de construção geram cerca de 56 milhões de toneladas de detritos todos os anos, enquanto a construção modular usa um planeamento e medições precisas para reduzir o risco de erros e desperdício de materiais. Múltiplos módulos também são criados simultaneamente durante este processo, de modo que qualquer material, que de outra forma seria descartado, pode ser reutilizado para outros projetos na mesma instalação. Tal como acontece com os restantes materiais construtivos, o maior controlo em fábrica permite também reduzir a quantidade de água necessária para a produção dos componentes. À semelhança o que sucede com a energia, a produção em fábrica permite uma melhor capacidade de gestão e reaproveitamento de recursos, nomeadamente da água.

b) Uso de materiais sustentáveis:

Os edifícios modulares usam uma variedade de materiais sustentáveis, muitos dos quais são reciclados. Materiais reaproveitados como madeira, aço e alumínio podem formar revestimentos, estruturas e telhados. Algumas empresas de construção modular também usam materiais inovadores, como “oriented strand board” (OSB), feitos de madeira de origem sustentável e de rápido crescimento. Cada vez mais os profissionais procuram incorporar materiais sustentáveis em suas construções. Por exemplo, as “Wikkelhouses” são 60% feitas de madeira reciclada e devem durar 100 anos.

Exemplos de materiais sustentáveis usados em construção “off-site”:

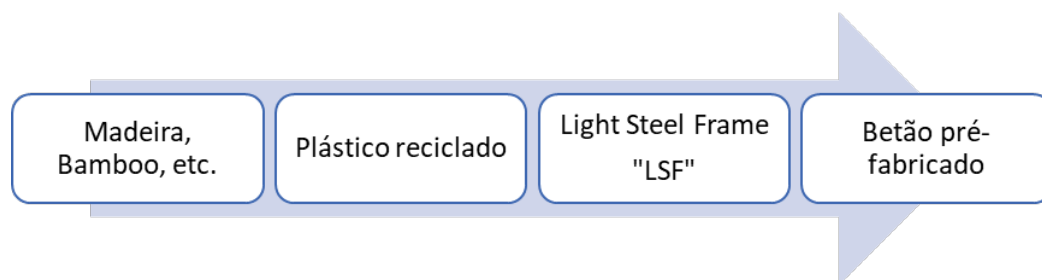


Fig. 2.13 – Materiais sustentáveis usados na construção, do mais leve ao mais pesado

c) Redução do consumo de energia:

Como a construção dos componentes pré-fabricados ocorre em ambiente de fábrica controlado, a produção de uma estrutura modular usa menos energia. Durante a montagem, o uso de energia pode ser otimizado, quer por melhores processos, quer através dos tempos de construção mais curtos.

d) Redução de Emissões e Poluição sonora:

Um relatório das Nações Unidas de 2017 constatou que 39% das emissões globais de carbono resultam da construção, muitos dos quais resultam do transporte ineficiente de materiais e mão de obra. Ao reduzir as viagens de e para o local de trabalho e otimizar a entrega do módulo, a construção modular pode reduzir as emissões no estaleiro. O recurso a painéis solares pode ajudar também a reduzir as emissões de carbono durante a vida útil do edifício. Uma simples configuração solar pode evitar 2,5 toneladas de emissões de carbono anualmente. A construção “off-site” também contribui para a redução da poluição sonora no local em mais de 50%, já que existe uma menor quantidade de trabalho em obra que por sua vez implica menos máquinas a trabalhar e ruído.

e) Acessórios e acabamentos com características ecológicas:

Os novos projetos incluem uma série de funcionalidades com foco nos objetivos ecológicos, como iluminação LED regulável, painéis fotovoltaicos, sensores de ocupação, baterias para armazenamento de energia, janelas com vidros triplos e garagem elétrica. Empresas inovadoras como a “Plant Prefab” colocam recursos ambientalmente sustentáveis em primeiro lugar, usando materiais sem “volatile organic compounds”, (VOCs) e tecnologia de fluxo de ar natural para criar projetos mais saudáveis para os seres humanos e o planeta.

f) Resiliência e reutilização:

Projetos de construção modulares e pré-fabricados podem ter uma vantagem distinta quando se trata de resiliência e prolongação da vida útil, mas isso também pode ser verdade para muitos edifícios tradicionais. Exclusivo dos edifícios modulares é a facilidade com que eles podem ser desmontados - para serem reutilizados em outros locais e configurados ou reciclados para novos projetos. Ao considerar a sustentabilidade a longo prazo, os edifícios modulares reutilizáveis ajudam a reduzir os detritos gerados pela demolição, que representam mais de 500 milhões de toneladas de resíduos por ano [17].

Quadro 2.3– Exemplo de alguns benefícios sustentáveis na construção “off-site”

Redução do desperdício na construção	Reduz as emissões de gases poluentes no transporte	Redução da energia utilizada na construção
Ajuda a eliminar 50 milhões de toneladas de resíduos em construção.	Reduz as emissões de gases poluentes devido ao corte de 90% em viagens de transporte.	Os projetos são concluídos em metade do tempo, reduzindo a energia consumida “on-site”.



Fig. 2.14 – Algumas características dos edifícios sustentáveis

2.7.2. Importância de uma construção sustentável no mundo atual

Apesar de existir uma certa resistência, há cada vez mais interesse de proprietários e investidores, públicos e privados, numa forma de construção mais ecológica e sustentável. Especialmente porque os efeitos das mudanças climáticas já estão a ser sentidos em todo o mundo.

A sustentabilidade é importante por uma variedade de razões, incluindo uma melhor qualidade de vida e qualidade ambiental. Para termos comunidades prósperas e saudáveis, precisamos de ar puro, recursos naturais e um ambiente não tóxico, e a indústria da construção pode ser chave e liderar o caminho para projetos mais ecológicos.

A construção sustentável evolui a cada dia, com maior exigência por espaços limpos e verdes. À medida que os efeitos das mudanças climáticas aumentam, a sustentabilidade assume um papel ainda mais importante. Embora existam desafios, os benefícios envolvidos com a construção sustentável podem criar um caminho para um futuro mais limpo [16].

2.7.3. Avaliação da sustentabilidade dum edifício

A construção civil envolve o uso de vários materiais como uma parte muito importante do processo. Antigamente, quando a tecnologia não era suficientemente avançada, materiais naturais como pedras, madeira, bambu e o próprio solo eram usados na sua forma mais simples e original para construir casas sem o uso do chamado combustível fóssil para sua extração. Por enquanto, a indústria da construção faz uso de vários materiais compósitos que muitas vezes são fabricados despendendo muita energia, em particular combustível fóssil. O uso de combustíveis fósseis está diretamente relacionado com as emissões de CO₂ na atmosfera. Em termos de fabricação de produtos de construção, a libertação de produtos químicos na atmosfera provenientes de processos de produção tem sido associada a danos à camada de ozono e a outros efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana.

Para além dos processos de carácter obrigatório, existem sistemas de gestão e certificação que são voluntários. Os primeiros surgiram na década de 90 e são atualmente os mais reconhecidos internacionalmente como símbolos de sustentabilidade.

Estes sistemas avaliam as ações realizadas com o intuito de as melhorar, com base na análise de vários aspetos de um edifício, tais como:

- Poupança de energia;
- Uso de água e as reduções de emissão de CO₂;
- Melhoria interna da qualidade ambiental;
- Gestão de recursos.

Nestes processos, o nível da pontuação está diretamente ligado ao nível de certificação.

Em Portugal, o LEED e o BREEAM são os sistemas mais conhecidos. Estes certificados são cada vez mais procurados no setor da construção, pois promovem uma construção mais sustentável, que resulta em benefícios económicos, ambientais e sociais para todas as pessoas vinculadas a um edifício (inquilinos, utilizadores, promotores, proprietários, gestores, entre outros).

O BREEAM considera os materiais num título separado intitulado de ‘Impactos Ciclo de vida’, para reconhecer e incentivar o uso de materiais de construção com baixo impacto ambiental [18], [19]

2.7.3.1. BREEAM

BREEAM é um método de avaliação ambiental criado pela instituição inglesa BRE (figura. 2.14) e constitui-se como um dos métodos mais conhecidos no Reino Unido, mas também em todo o mundo.



Fig. 2.15 – Simbologia da Certificação BREEAM [24]

O BRE é um centro de ciência de construção multidisciplinar líder no mundo, com a missão de melhorar o ambiente construído através da pesquisa e geração de conhecimento. Dada a utilização crescente pelo mundo fora foram sendo criadas diversas versões do método adaptadas a cada país, como por exemplo, na Noruega, Suécia, Holanda, Alemanha e Brasil.

Caracteriza-se por ser um método com uma larga abrangência desenvolvido para projetos a nível internacional podendo ser utilizado na indústria da construção. As avaliações BREEAM são fornecidas por organizações independentes, licenciadas pela BREEAM, recorrendo a especialistas reconhecidos e acreditados para avaliar da melhor maneira possível as fases do ciclo de vida de um edifício residencial, edifícios comerciais, etc.

A metodologia BREEAM baseia-se nas seguintes categorias:

- Energia e emissões de CO₂;
- Saúde e bem-estar;
- Inovação;
- Utilização do solo;
- Materiais;
- Ecologia e processos de gestão;
- Poluição;
- Transporte;
- Desperdício;
- Gestão da água.

O BREEAM define o padrão para as melhores práticas em projeto, construção e operação de edifícios sustentáveis e tornou-se uma das medidas mais abrangentes e amplamente reconhecidas do desempenho ambiental de um edifício. Uma avaliação BREEAM usa medidas de desempenho que são definidas em relação a referenciais estabelecidos, para avaliar a especificação, projeto, construção e uso de um edifício. As medidas utilizadas representam uma ampla gama de categorias e critérios de material, energia e até ecologia. Estes incluem aspetos relacionados com o uso de energia e água, meio ambiente interno (saúde e bem-estar), poluição, transporte, materiais, resíduos, processos de gestão, entre outros.

Uma avaliação certificada BREEAM (GreenBookLive) fornece aos clientes, e a todos os utilizadores:

- Reconhecimento do mercado para edificações de baixo impacto ambiental.
- Confiança de que práticas ambientais testadas e comprovadas são incorporadas ao edifício.
- Inspiração para encontrar soluções inovadoras que minimizem o impacto ambiental.
- Uma “benchmark” que é mais exigente que o regulamento.
- Um sistema para ajudar a reduzir os custos de funcionamento, melhorar os ambientes de trabalho e de vida.
- Um padrão que demonstra o progresso em direção aos objetivos ambientais corporativos e organizacionais.

A classificação BREEAM e o nível de desempenho são calculados através do número total de créditos que resultam da avaliação BREEAM, durante todo o projeto e construção, desde o desenvolvimento do conceito até a fase de conclusão.

Generalizando, este método aborda questões ambientais e de sustentabilidade abrangentes e permite a quem recorre a esta metodologia a possibilidade de certificar as suas construções com a marca BREEAM.

As suas principais vantagens são:

- Utilização de um sistema de pontuação simples, transparente e fácil de entender;
- Apresenta uma influência positiva ao nível do projeto, construção e gestão de edifícios;
- Estabelece e mantém um padrão técnico robusto com garantia de qualidade.

As classificações BREEAM (figura 2.15) são atribuídas recorrendo ao uso de estrelas que podem ir desde uma até seis apresentado as seguintes designações [20]:

- Aceitável – 1 estrela;
- Aprovado – 2 estrelas;
- Bom – 3 estrelas;
- Muito Bom – 4 estrelas;
- Ótimo – 5 estrelas;
- Excecional – 6 estrelas

BREEAM rating		% score
Outstanding	★★★★★★	≥85
Excellent	☆★★★★	≥70
Very good	☆☆★★★★	≥55
Good	☆☆☆★★	≥45
Pass	☆☆☆☆★	≥30
Unclassified	☆☆☆☆☆	<30

Fig. 2.16 – Classificação BREEAM

2.7.3.2. LEED

O “Leadership in Energy and Environmental Design” (LEED®) é um método de avaliação criado pelo “United States Green Building Council” (USGBC) que contribui para a mudança da nossa forma de pensar os edifícios, de os construir, de os manter e de os operar.

Designado em português por método Liderança em Energia e Design Ambiental, é um dos mais utilizados em todo o mundo, sendo mesmo o mais usado por terceiros que querem recorrer à certificação de edifícios verdes.

LEED é um programa de certificação que visa definir métodos de construção ecológicos de alta qualidade para edifícios mais saudáveis, ecológicos e lucrativos. O objetivo do sistema é fornecer aos proprietários e operadores de edifícios uma estrutura estruturada para identificar e implementar soluções práticas e mensuráveis para o projeto, construção, operação e manutenção de edifícios sustentáveis. É um programa de certificação que visa definir métodos de construção ecológicos de alta qualidade para edifícios mais saudáveis, ecológicos e rentáveis. O objetivo do sistema é fornecer aos proprietários e operadores de edifícios uma estrutura estruturada para identificar e implementar soluções práticas e mensuráveis para o projeto, construção, operação e manutenção de edifícios sustentáveis. Esta certificação cobre todos os aspetos ecológicos e socioculturais da sustentabilidade. Centra-se principalmente na eficiência energética e hídrica, na redução das emissões de CO₂, num clima interior saudável e confortável e na conservação dos recursos, avalia as operações do edifício, bem como a qualidade do local.

A certificação ambiental LEED apresenta diversas vantagens e benefícios ao nível da sustentabilidade nas áreas económicas e sociais, tais como:

- Custos de operação reduzidos;
- Redução de resíduos enviados para aterro;
- Conservação de energia e água;
- Saúde e segurança para os utilizadores;
- Redução de GEE;
- Qualificação para benefícios fiscais e licenças de urbanização.



Fig. 2.17 – Simbologia da Certificação LEED

A metodologia LEED foi desenvolvida, de um modo geral, para abordar uma vasta tipologia de edifícios em todas as localizações possíveis, independentemente da fase do ciclo de vida em que se encontram. Desde hospitais, espaços comerciais, hotéis ou mesmo edifícios históricos e englobando ainda aqueles que se encontram em fase de projeto, existe uma tipologia LEED para cada caso concreto (USGBC, 2022):

- Construção e Arquitetura do edifício: aplica-se a edifícios recém-construídos ou em fase de grande reabilitação e inclui, por exemplo, construção nova, escolas, centros de dados, armazéns, centros de distribuição, etc;
- Ambiente Interior e Construção: aplica-se a projetos idealizados, essencialmente, ao nível de espaços interiores, tais como espaços destinados à hotelaria e ao comércio;
- Operações de construção e manutenção: aplicam-se a edifícios existentes que estão a ser alvo de melhorias com construção reduzida ou nula; inclui edifícios existentes, escolas, hospitais, armazéns, etc;
- Desenvolvimento de áreas residenciais ou não residenciais: aplica-se a novos projetos de desenvolvimento contendo uso residencial, uso não residencial ou ambos; os projetos podem estar em qualquer fase do seu processo de desenvolvimento, desde o planeamento até à construção.

O LEED-NC – Sistema para avaliar a construção comercial – é uma das tipologias deste método que tem vindo a incentivar construtores a adotar práticas de construção ecológica, como por exemplo, o aumento da eficiência energética e a melhoria da qualidade do ar no interior dos edifícios.

O LEED-NC apresenta um efeito positivo no desenvolvimento de tendências de melhoria ao nível da sustentabilidade na revitalização de áreas urbanas, contribuindo para a diminuição do consumo de recursos, diminuição do fluxo rodoviário, melhoria da qualidade do ar, diminuição da poluição no escoamento de águas pluviais e construção de comunidades onde pessoas de diferentes classes sociais

Para obter a certificação LEED, um projeto ganha pontos ao aderir a pré-requisitos e créditos que abordam carbono, energia, água, resíduos, transporte, materiais, saúde e qualidade ambiental interna. Os projetos passam por um processo de verificação e revisão pelo GBCI e recebem pontos que correspondem a um nível de certificação LEED: Certified (40-49 pontos), Silver (50-59 pontos), Gold (60-79 pontos) e Platinum (80 ou + pontos).

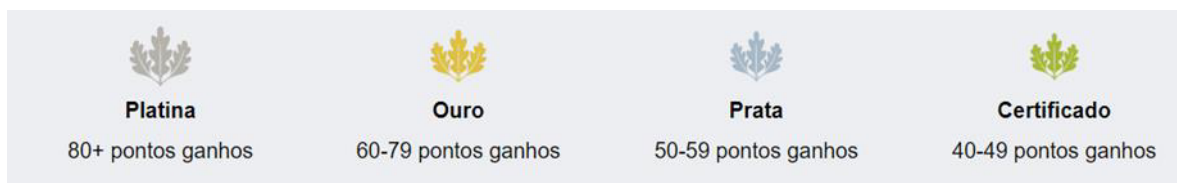


Fig. 2.18 – Classificação LEED

Atualmente, existe o LEED v4.1, a versão mais recente, inovadora e atualizada deste método.

O LEED v4.1 é mais inclusivo com padrões referenciados atualizados e permite que os projetos ganhem pontos LEED por meio da monitorização do desempenho da construção. Também continua a impulsionar o desempenho, integrando totalmente os resultados de desempenho suportados por novas metodologias e um caminho simples orientado por dados para medir o desempenho a toda a hora. As lições aprendidas com os utilizadores do LEED levaram a uma avaliação profunda dos edifícios existentes, projetos residenciais e cidades para desenvolver soluções que atendam a mercados exclusivos. [21]

2.8. Exemplo das práticas na Suécia

2.8.1. Principais motivos para existir uma grande percentagem de casas pré-fabricadas na Suécia

De um modo geral, o sucesso da Suécia em adotar tecnologias avançadas de construção é atribuído ao clima escandinavo exceccionalmente desafiador e à sensibilidade administrativa sueca que se foca na regeneração florestal e na gestão biológica, social e econômica sustentável. Os longos invernos da Suécia são caracterizados por curtas horas de luz do dia, neve e chuvas fortes e temperaturas frias. Essas duras condições climáticas persistem por mais de uma estação, o que limita drasticamente a produtividade e o lucro da construção ao usar práticas tradicionais no local. A construção externa permite que painéis e módulos sejam construídos o ano todo e protegidos contra intempéries num ambiente de fábrica controlado, ao mesmo tempo em que protegem os trabalhadores e os prazos do projeto contra condições climáticas perigosas e atrasos dispendiosos. Juntamente com vastos recursos madeireiros (quase 70% da cobertura da terra da Suécia é floresta e o crescimento supera a colheita), as empresas de construção suecas tinham motivos e recursos para investir em pré-fabricação. [22]

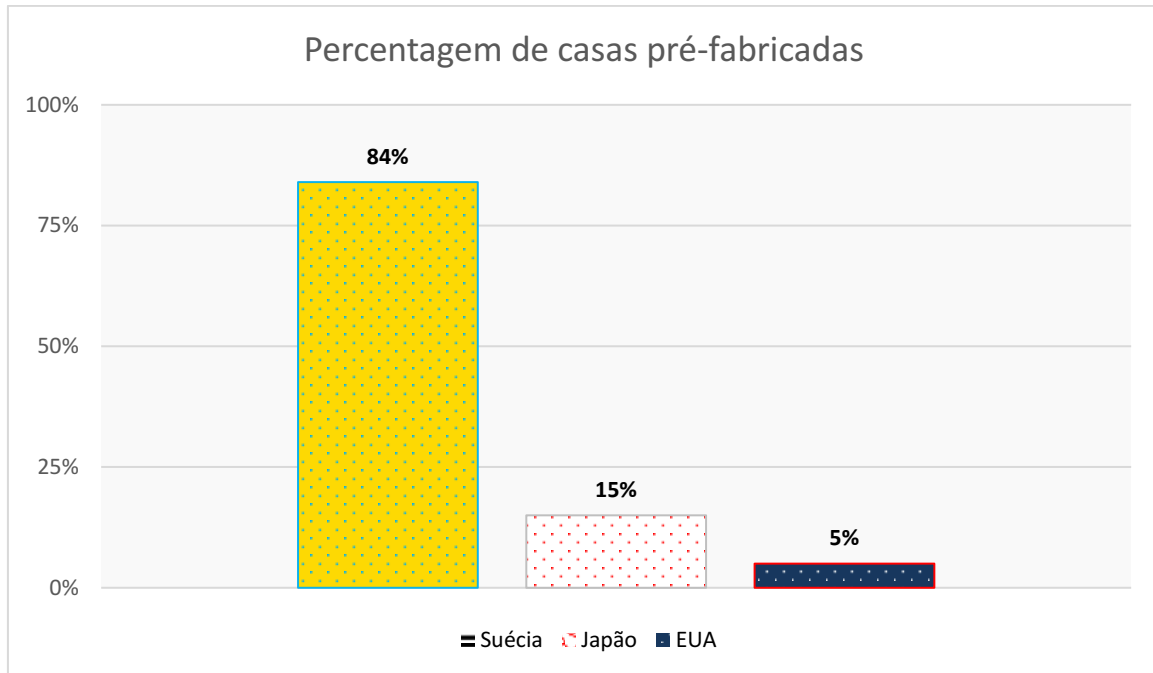


Fig. 2.19 – Percentagem de casas pré-fabricadas na Suécia, Japão e EUA [22]

A sustentabilidade também foi um grande impulsionador.

Tudo começou com a crise do petróleo na década de 1970, quando o país começou a virar-se para a eletricidade. Foi então, nos anos 80 e 90, que começaram a perguntar se a floresta seria capaz de sustentar o país aquele ritmo. A Suécia foi dos primeiros países a aceitar que havia uma crise climática. Está incutido no ADN do povo sueco a necessidade de economizar energia, economizar recursos e cuidar da mãe natureza. Esse comportamento está bem presente no código de construção dos países nórdicos, fornecendo um cálculo de pegada ecológica obrigatória para cada projeto. [23]

2.8.2. Contexto histórico e atual da pré-fabricação na Suécia

A Suécia não inventou a pré-fabricação. Na verdade, aproveitou [o conceito de] pré-fabricação dos Estados Unidos na década de 1920, segundo Helena Lidelöw, ex-estudante com doutoramento em engenharia de madeiras, que também é líder na indústria modular com 20 anos de experiência em pesquisa e desenvolvimento para o principal fabricante modular da Suécia, Lindbäcks Bygg.

A origem deste tipo de construção na Suécia teve origem numa crise imobiliária no país que durou 80 anos, de 1890 a 1970. Os EUA foram um bom modelo porque as empresas na Suécia começaram a oferecer casas de kit, casas de catálogo e casas de venda por correspondência no final do século 19, de acordo com o Serviço do Parque Nacional. No entanto, o pré-fabricado realmente não descolou na Suécia até ao período de recuperação pós-Segunda Guerra Mundial. Esse período contou com o apoio em massa do governo por intermédio do Programa “Million Homes” (iniciado em meados da década de 1960), durante o qual o país nórdico construiu um milhão de casas numa só década. Foi um feito notável para um país de apenas cinco milhões de pessoas.

Em 1996, a IKEA e a construtora sueca Skanska uniram-se para criar casas BoKlok, com a finalidade de tornar as casas acessíveis para escandinavos com renda modesta. No entanto, o que o pré-fabricado

compensou em custo e eficiência de mão-de-obra, faltou em design. E ao longo da década de 1990, houve um declínio no interesse em casas pré-fabricadas devido ao estigma da padronização excessiva que se desenvolveu em torno das casas modulares.

A relação amor-ódio da Suécia com o pré-fabricado continua até os dias atuais por razões que incluem escassez de mão de obra, regulamentações governamentais consistentes, aceitação cultural e educação, vínculos entre os setores bancário e de construção e até mesmo o clima. A capacidade de montar uma casa em menos de um mês é extremamente vantajosa num país com uma das temporadas de construção mais curtas do mundo.[23]

Lindbäcks, um dos principais fabricantes de pré-fabricados da Suécia, constrói componentes para cerca de 20 residências de vários andares (como acomodações para estudantes, apartamentos e casas de idosos) por semana. Os pré-fabricados da Suécia são principalmente feitos de madeira, o que significa que eles não são radicalmente diferentes da maioria das estruturas de nível médio em termos de design. No entanto, quando se trata de produção, o processo não poderia ser mais diferente do padrão atual da indústria de equipas que erguem peças de casas construídas com estacas de madeira. Em primeiro lugar, as medições e especificações são projetadas por via digital.

Aos poucos o conceito de pré-fabricação quer abandonar o estigma do design standard e explorar novos modelos arquitetónicos. Embora muitas das residências sejam mais tradicionais e padronizadas no que toca à sua aparência, há também uma forte corrente de casas pré-fabricadas modernas cuidadosamente projetadas por arquitetos que vão crescendo em popularidade, (figura 2.19 e 2.20). [24]



Fig. 2.20 – “A Tind house prototype”, desenhado pelo Claesson Koivisto Rune para uma empresa de pré-fabricação, Fiskarhedenvillan [46]

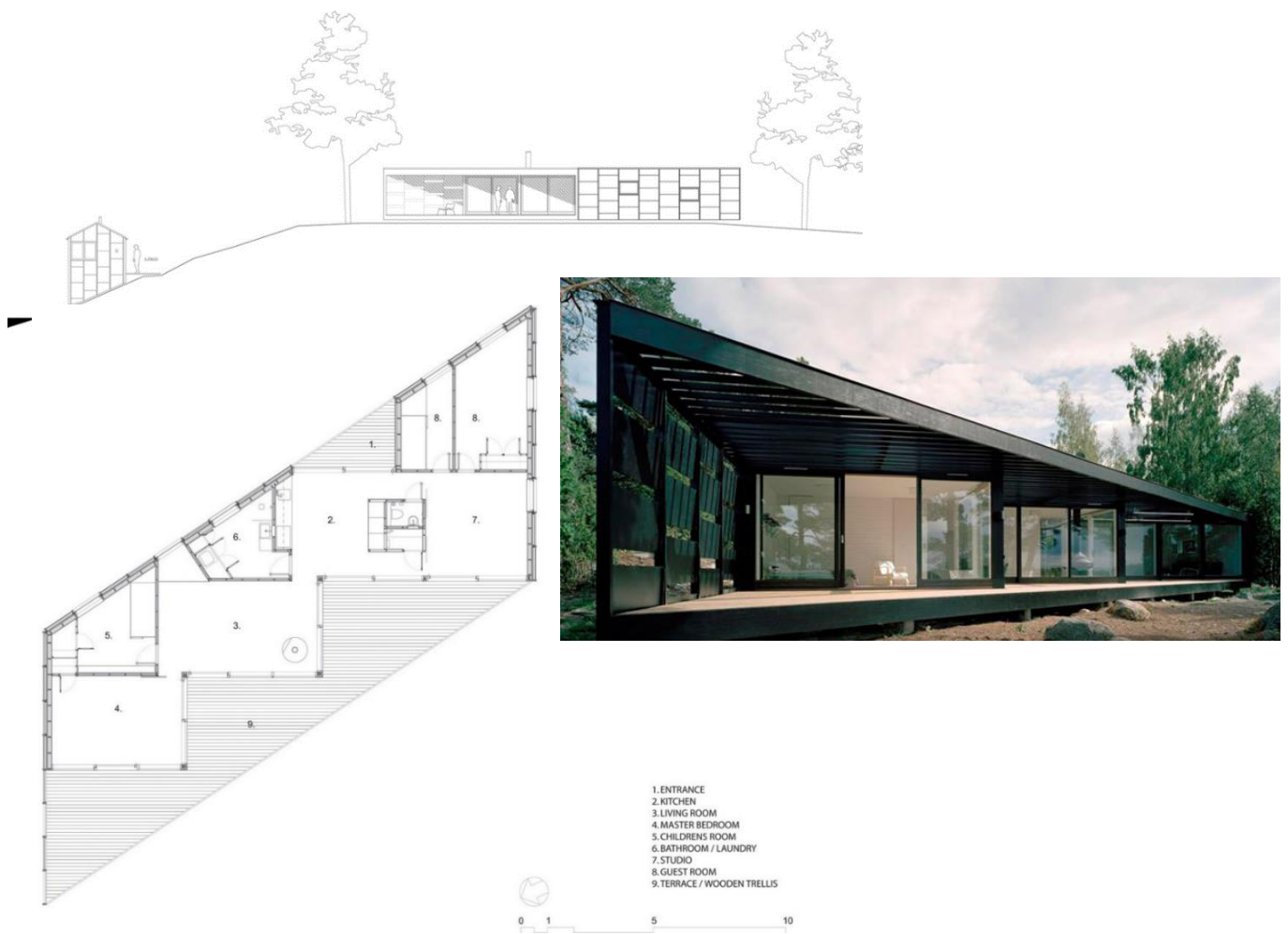


Fig. 2.21 – “Archipelago House” desenhado pelos arquitetos Tham e Videgård
Arkitekter, 2006 [46]

3

FACHADAS PRÉ-FABRICADAS – EXIGÊNCIAS E SOLUÇÕES

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo aborda-se as exigências em fachadas pré-fabricadas, tendo em conta os diferentes parâmetros definidos pelo Regulamento de Produtos de Construção (RPC):

- Segurança estrutural;
- Segurança contra incêndio;
- Higiene, saúde e ambiente;
- Segurança e acessibilidade na utilização;
- Proteção contra o ruído;
- Economia de energia e isolamento térmico;
- Aspetos de durabilidade, serviço e identificação;

O RPC baseia-se no Regulamento (EU) nº305/2011, o qual estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção e que revoga a Diretiva 89/106/CEE do Conselho (Instituto Português de Qualidade). O objetivo do RPC passa por estabelecer regras harmonizadas para expressar o desempenho dos produtos da construção e sobre a utilização da marcação CE nesses mesmos produtos. A marcação CE é uma prova que um produto está de acordo com as Diretivas Europeias que lhe são aplicadas. É, portanto, um símbolo de qualidade europeu, obrigatório para alguns produtos, que permite uma livre circulação entre os Estados-Membros. [25]



Fig. 3.1 – Esquema de marcação CE

3.2. SEGURANÇA ESTRUTURAL

3.2.1. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

A consideração da segurança estrutural visa evitar danos, deformações excessivas e desabamentos perante ações externas (vento, sismo, cargas pontuais...).

Normalização europeia:

- Regulamento dos Produtos da Construção (EU) n°305/2011
- Normalização para cálculo estrutural (Euro-códigos 6 e 8) [26].

Um elemento de betão pré-fabricado, eventualmente de carácter arquitetónico pode ser usado numa aplicação resistente ou não, devendo ser consideradas diversas forças no projeto de conexão. Em aplicações não resistentes, o painel deve resistir ao seu próprio peso e a todas as outras forças e cargas apropriadas, como sísmica, vento, neve, restrição de mudanças de volume e efeitos do movimento do sistema de suporte, cargas de construção, cargas de materiais adjacentes e quaisquer outras cargas especificadas. Essas cargas e forças são transferidas ao elemento de betão pré-fabricado por meio de conexões com a estrutura de suporte. Caso um painel seja resistente, além das forças referidas acima, algumas conexões também devem resistir e transferir ações permanentes e variáveis impostas pelas funções estruturais, designadamente por elementos da laje ou cobertura [5].

Painéis não resistentes do tipo sanduíche (com duas camadas de betão) são geralmente empregados em conjunto com estruturas reticuladas ou como paredes laterais para fachadas estruturais, enquanto os painéis maciços (com apenas uma camada de betão) são mais aplicados em revestimentos de pilares e em painéis tipo “spandrel”, [27].

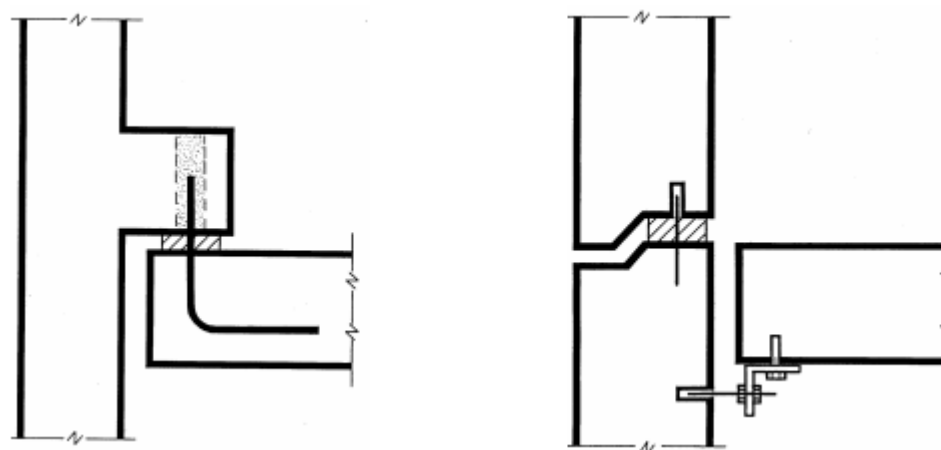


Fig. 3.2 – Painel resistente (esquerda) e painel não resistente (direita), ambas em corte vertical [27]

Uma grande vantagem da construção de betão pré-fabricado é a rápida instalação. Para aproveitar totalmente esse benefício e maximizar a economia, as ancoragens devem ser simples, repetitivas e fáceis de instalar. Os fornecedores e responsáveis pela montagem do betão pré-fabricado desenvolveram ao longo dos anos conexões preferenciais que atendem a uma produção e/ou técnicas de instalação.

As conexões devem estar em conformidade com os códigos de construção locais e atender aos requisitos funcionais e estéticos, como rebaixamento para pisos nivelados e/ou tetos expostos. Podem ser formulados conceitos gerais que regem o projeto, o desempenho e os requisitos de material das conexões. Para um projeto mais eficaz, juntamente com detalhes de conexão eficientes, recomenda-se que o projeto coordene os conceitos de conexão com um fabricante de betão pré-fabricado antes de finalizar os planos [28].

Os painéis sanduíche de betão são elementos de fachada que consistem em três folhas sendo normalmente: uma camada interior de betão resistente a cargas, uma camada de isolamento térmico e uma exterior em betão, mas com menos propriedades de resistência à carga, totalmente produzidos completamente na fábrica de pré-fabricados. Sendo que a camada de isolamento não é portante e encontra-se entre as duas camadas de betão armado e é fixada por meio de âncoras de aço inoxidável (Figura 3.2.). Excluindo os critérios mecânicos, as ligações entre lâminas devem cumprir uma série de requisitos em relação à resistência, ductilidade e durabilidade [28].

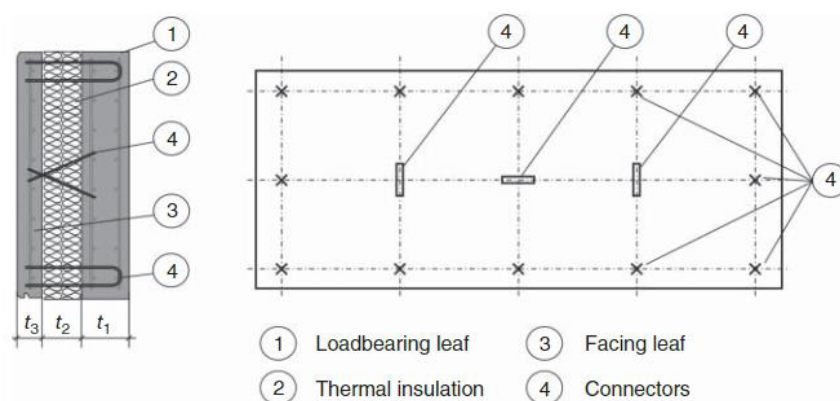


Fig. 3.3 – Princípio do sistema do painel sanduíche de betão pré-fabricado [28]

Com base no recobrimento de betão para uma única camada de armaduras de reforço, dependendo da classe de exposição, a espessura mínima lâmina exterior é t_3 , $\min=70$ mm de acordo com a EN 1992-1-1:2004. Quando as condições de exposição ambiental forem adversas, pode ser necessária uma folha mais espessa. Com um pequeno número de aberturas ($\leq 50\%$ da área da parede) e espessura constante, a espessura da folha portante t_1 deve ser 1,5 vezes a espessura da folha exterior t_3 ($t_1=1,5.t_3$), mas não inferior a t_1 , $\min=140$ mm. A espessura do isolamento térmico t_2 deve ser escolhida de acordo com os requisitos de desempenho térmico. Já os painéis maciços de betão pré-fabricado são apenas compostos por uma camada de betão armado sem qualquer tipo de isolamento integrado.

No dimensionamento para as ações horizontais o painel deve ser dimensionado para a ação do vento e ser dimensionado e pormenorizado como se de uma laje se tratasse.

No caso das ações verticais os painéis devem ser dimensionados para o seu peso próprio, tendo em consideração as condições de apoio [28].

3.2.2. LIGAÇÕES ENTRE CAMADAS

As camadas dos painéis sanduíche são unidas através de ligações. Os sistemas de ligações são constituídos por conectores especiais e armaduras diagonais entre as camadas.

Os sistemas de conectores são normalmente constituídos por espaçadores e conectores de apoio e torção. Os conectores de apoio, ilustrados nas figuras, têm como funcionalidade suportar a ação do vento e a

lâmina externa de betão. Os conectores de torção são utilizados, quando os conectores na direção transversal não contêm rigidez suficiente. Os espaçadores têm a função de oferecer resistência às ações horizontais e estabelecer a correta distância entre as duas lâminas de betão, sem colocar limitações aos movimentos laterais [27].

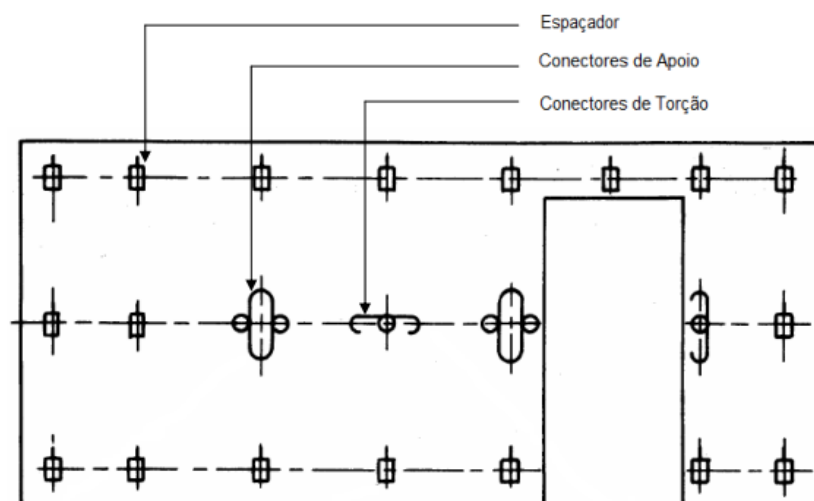


Fig. 3.4 – Tipo de Conectores no painel sanduíche [27]

Quadro 3.1 – Conectores de suporte [28]

Conectores de Suporte	
Barra ou cabo (Recomendável para o uso de conectores de torção ou horizontais)	
Chapa plana (Recomendável para o uso de conectores de torção ou horizontais)	
“Sleeve anchors” / ancoragens em manga	

Quadro 3.2 – Tipos de Espaçadores [28]

Espaçadores	
“Connector pin”	
“Connector Stirrup”	
“Clip-on Pin”	

Os conectores são por norma utilizados em painéis sanduíche em que as lâminas distam no máximo 100 mm. O fabricante de conectores e ligadores normalmente tem um catálogo com as diretrizes para projeto e aplicação em painéis do tipo sanduíche. A armadura diagonal entre lâminas de betão é normalmente utilizada para camadas de isolamento térmico com a espessura superior a 100 mm. As armaduras de estribos diagonais podem ser em fibra de vidro ou em aço inoxidável e são dispostas na posição vertical em intervalos retangulares de 600 até 1200 mm, em função do peso próprio da lâmina de betão e da resistência da armadura. Também podem ser utilizadas barras complementares em madeira ou alumínio, sendo a madeira bastante utilizada nos países nórdicos, funcionando como cofragem, colocadas no perímetro do painel, fortalecendo a ligação entre as duas lâminas de betão e garantindo um comportamento conjunto [27].

Ao posicionar os conectores devem existir pontos fixos que assegurem variações dimensionais diferenciais no comprimento das folhas, por ex. devido à mudança de temperatura, não sendo impedidos em nenhuma direção (figura 3.5). Os seguintes pontos são importantes ao projetar ancoragens de ligação suporte:

O ponto fixo de uma ancoragem de manga geralmente está no centro de gravidade do painel. Apenas uma “sleeve anchor” pode ser instalada por painel de betão sanduíche.

Será necessário adicionar ancoragens de torção para acomodar forças de torção, (figura 3.5. a).

O ponto fixo de uma placa plana ou ancoragem do tipo barra está na interseção dos eixos de ancoragem, transversalmente à direção de suporte de carga. Ao usar esses tipos, pelo menos três âncoras de suporte serão necessárias, (figura 3.5.b–f).

As ancoragens de suporte devem corresponder à métrica de fixação e ser posicionadas simetricamente em relação ao eixo do central. As ancoragens de suporte paralelas devem estar adjacentes umas às outras num eixo transversal.

As distâncias permitidas ao ponto fixo e as distâncias e espaçamentos permitidos ao bordo devem estar de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante das ancoragens. As de retenção também devem atender às distâncias permitidas ao ponto fixo e às distâncias e espaçamentos permitidos ao bordo conforme especificado pelo fabricante (figura 3.6), [28].

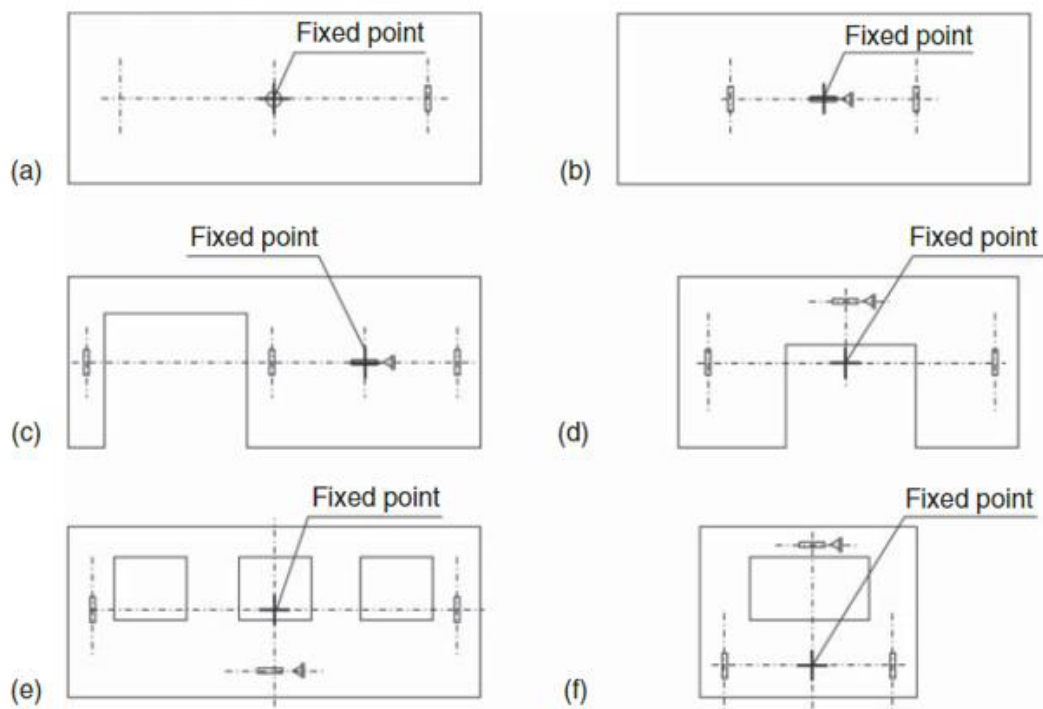


Fig. 3.5 – Princípio do sistema do painel sanduíche de betão pré-fabricado [28]

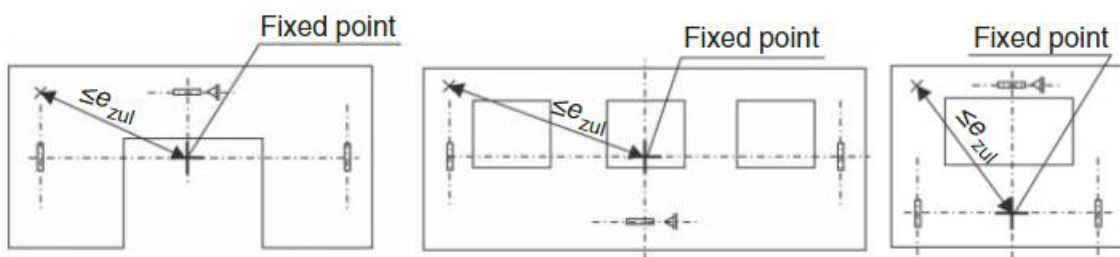


Fig. 3.6 – Distâncias entre os pontos de fixação e os espaçadores [28]

3.2.3. FIXAÇÕES À ESTRUTURA

Num projeto de painéis de betão pré-fabricado sanduíche, as ligações do painel à estrutura do edifício são dos aspetos mais importantes, tanto para o processo de produção, quanto para o comportamento em obra. Os fixadores são dispositivos que promovem a interação entre a estrutura e o painel e garantem a segurança estrutural. As fixações devem ser projetadas tendo em conta vários aspetos que condicionam o seu desempenho, como aspetos de construção, de segurança estrutural e de durabilidade. Os dispositivos de fixação têm como objetivo suportar forças horizontais devido ao vento e aos sismos, suportar o peso próprio do painel, e absorver algumas deformações e tolerâncias diferenciais. A finalidade das fixações é garantir a transferência de cargas do painel para a estrutura de suporte, absorvendo as deformações diferenciais entre a estrutura e os painéis, de forma a assegurar a estabilidade

do conjunto. Como tal, entende-se que os dispositivos de fixação devem garantir o seu desempenho nos seguintes pontos:

- Ductilidade: resistência à deformação plástica sem perda da sua resistência.
- Resistência mecânica: resistência às movimentações diferenciais painel - estrutura de suporte, força do vento, variações volumétricas do painel e peso próprio do painel.
- Resistência à corrosão: resistência à corrosão do material de fixação, de forma a garantir durabilidade.

Os materiais utilizados nos elementos de fixação são os metais, devido às suas propriedades de ductilidade e resistência mecânica. O mercado apresenta uma enorme variedade de metais, com algumas diferenças entre eles, nomeadamente a sua composição, sendo mais ou menos propícios à corrosão. Os materiais que podem ser utilizados são: aço inoxidável, o aço patinado e o aço carbono que pode ser revestido por galvanização ou eletrodeposição de metais como o zinco [27].

A figura 3.7 mostra algumas das muitas configurações de painéis possíveis para uma fachada. A figura 3.8 ilustra alguns arranjos de conexão comuns para diferentes tipos de painel. A figura 3.8(a) representa uma unidade típica de parede laje-laje. As Figuras 3.8(b) e (c) mostram possíveis pontos de conexão para uma unidade estreita, com um painel de coluna, e a Fig. 3.8(d) mostra uma unidade larga, como um painel de cobertura do bordo da viga ou testa da laje, “spandrel panel”. Conforme representado na figura 3.8, as conexões do painel geralmente consistem em duas fixações de suporte e um mínimo de quatro conexões de ligação “tieback”. Às vezes, as conexões de suporte e as conexões “tieback” são combinadas. A figura 3.8(d) também mostra as conexões de ligação “tieback” intermedias opcionais. O objetivo principal das fixações intermediárias é controlar as tensões de tração do betão devido à flexão exterior ao plano do painel. Essas conexões também podem ser usadas para resistir a forças sísmicas no plano, porque estas podem ser rígidas na direção paralela ao desenvolvimento do painel sem que restrinja o encurtamento do painel devido à temperatura ou retração.

O sistema de conexão não deve incluir mais de duas fixações de suporte para cada painel. Painéis de betão pré-moldado são muito rígidos e não permitem uma distribuição adequada das ações gravíticas por mais de dois pontos de apoio. As conexões de suporte para um determinado painel também devem estar localizadas na mesma linha, de modo que a flexão da estrutura de suporte não cause uma distribuição de cargas diferente do projetado [5].

Um painel pode ser submetido a cargas de gravíticas, cargas horizontais normais ao plano do painel e cargas laterais no plano do painel. Para carga vertical e carga fora do plano, a Fig. 3.8 ilustra como as forças se combinam e como as ligações “tieback” resistem aos efeitos das cargas. Estas fixações têm componentes de força diretamente das cargas fora do plano, além de estabilizar o painel quando a carga vertical é excêntrica do ponto de suporte vertical. Painéis e sistemas estruturais mover-se-ão devido a mudanças dependentes da vida útil nos materiais, efeitos ambientais, ou cargas. Embora as fixações devam ter resistência e rigidez nas direções em que as forças são aplicadas, o pormenor corrente da ligação permitirá movimentos noutras direções para evitar que se gerem grandes forças se esses movimentos forem restringidos. A permissão para movimento em conexões requer consideração de movimentos no plano, tanto horizontal quanto verticalmente. O movimento pode ser permitido por deslizamento, por exemplo, rolamentos deslizando em pilhas de calços ou parafusos deslizando em orifícios ranhurados, ou por flexão, onde um elemento de aço dúctil pode dobrar [5].

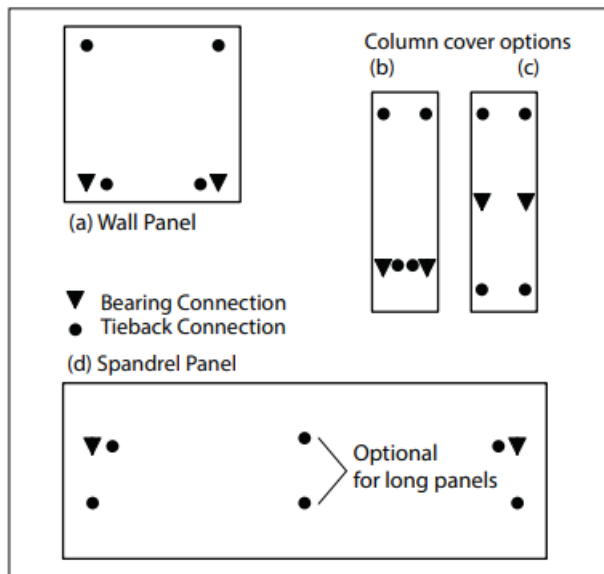


Fig. 3.8— Localização típica das conexões nos painéis [27]

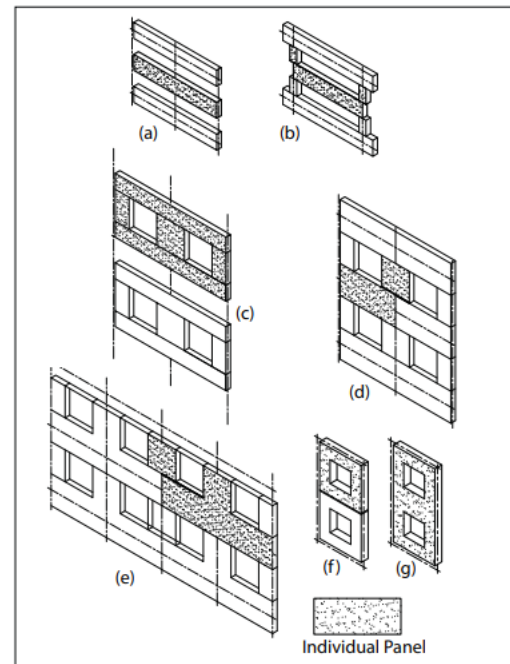


Fig. 3.7 – Diferentes configurações dos painéis de fachada [5]

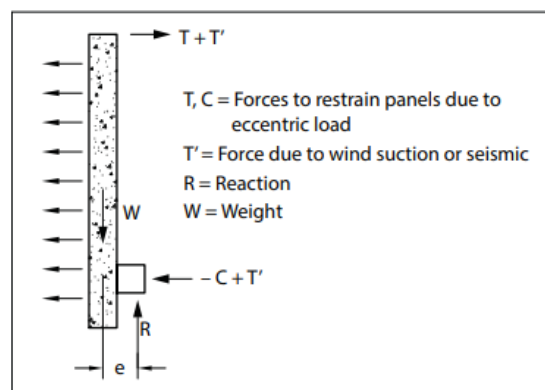


Fig. 3.9 – Cargas no painel sujeito a forças do vento, sísmicas e de centro de gravidade [5]

Quadro 3.3 – Tipos de Fixações [27]

Tipo de Fixação	Objetivo da Fixação	Forma de Fixação
Fixações de alinhamento	- Contribuir para o alinhamento do painel na montagem.	- Soldada
	- Impedir o deslocamento relativo, entre os painéis.	- Aparafusada
Fixações de apoio vertical	- Assegurar a transmissão do peso próprio para a estrutura de suporte.	- Soldada
	- Impedir o deslocamento relativo, entre os painéis.	- Aparafusada
Fixações de apoio lateral	- Assegurar a transmissão das forças horizontais devidas à ação do vento.	- Soldada
	- As fixações de apoio lateral, grande parte das vezes são projetadas para funcionarem como fixações de alinhamento.	- Aparafusada

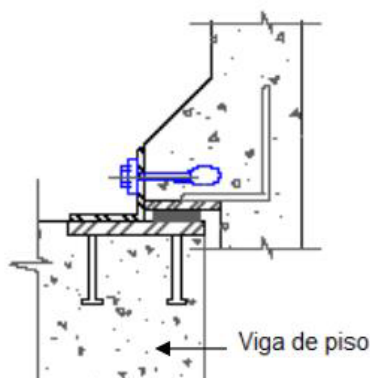


Fig. 3.10 – Fixações de apoio vertical em corte vertical [5]

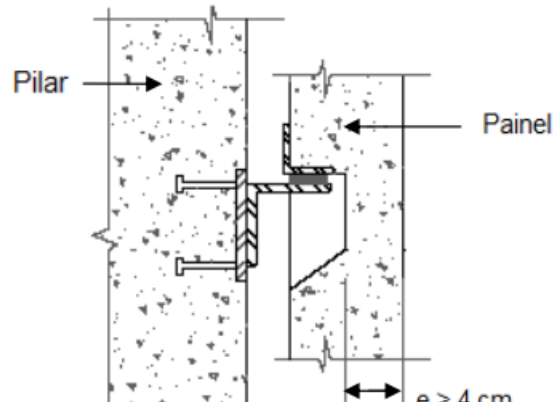


Fig. 3.11– Distâncias entre Fixações de apoio vertical em corte vertical [5]

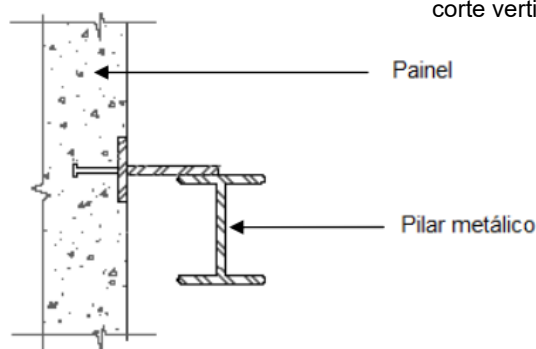


Fig. 3.12 – Fixação soldada de apoio lateral em corte horizontal [5]

As fixações aparafusadas, são dispositivos práticos e simples, a sua utilização tem como vantagem a rapidez de execução na montagem dos painéis. Vantagem esta, que advém do facto da fixação ser executada logo após a sua colocação no local definitivo. Outra vantagem, decorre de os alinhamentos e ajustes poderem ser realizados numa fase posterior, sem existirem preocupações com a mobilização das gruas de montagem [27].

Quadro 3.4 – Tipos de Fixações Aparafusadas [26]

Fixações Aparafusadas	
Pré-ancorados	Internos
	Externos
Pós-ancorados	

Assim sendo, o sistema de fixações aparafusadas, pode ser subdividido em dois grupos:

- Dispositivos pré-ancorados: são instalados nos painéis antes da betonagem.
- Dispositivos pós-ancorados: são inseridos nos painéis após a betonagem.

Neste sentido, dividimos os dispositivos pré-ancorados em dois tipos:

- Internos: são em forma de presilhas, abertas ou fechadas e são ancorados ao betão.
- Externos: são em forma de haste ou parafuso e serão aparafusados nessas presilhas [27].

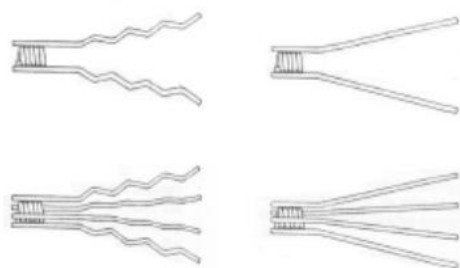


Fig. 3.14 – Dispositivos metálicos pré-ancorados [27]

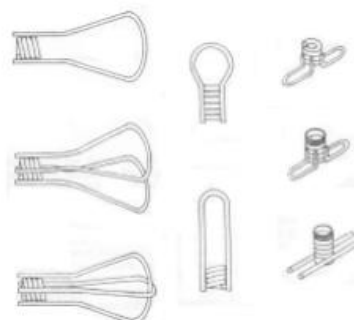


Fig. 3.13 – Dispositivos metálicos pré-ancorados [27]

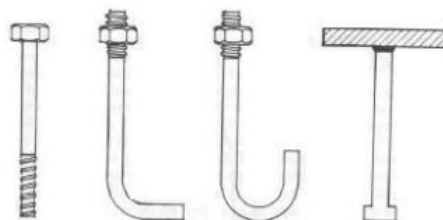


Fig. 3.15 – Dispositivos metálicos pré-ancorados [27]

Do ponto de vista construtivo, é recomendado que os meios de fixação pré-ancorados, internos, devam ter 75 mm no mínimo de afastamento ao bordo e uma profundidade de embebedimento mínima de 75 mm [29].

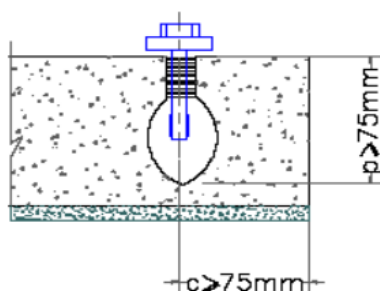


Fig. 3.16 – Dimensões da ancoragem mínima da fixação pré-ancorados, internos [28]

Os dispositivos pós-ancorados são inseridos nos furos realizados através de brocas. A estes meios de fixação dá-se o nome de buchas de expansão mecânica e servem para suportar forças de tração, acima de tudo de corte [27].

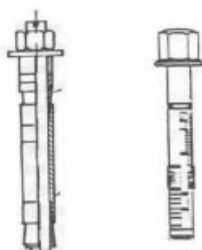


Fig. 3.17 – Buchas de expansão mecânica [26]

Os dispositivos de fixações soldadas têm como vantagens o seu fácil ajuste às diversas situações e a sua eficiência. Nestes meios de fixação, a durabilidade da soldadura e o desempenho estrutural depende da compatibilidade entre os materiais utilizados que serão soldados e da formação dos meios humanos. A soldadura é um fator de extrema importância, como tal, devem ser especificados e mencionados em projeto diversos critérios específicos, como: dimensões, localização, resistência, tipo de elétrodo, tipo de soldadura, aquecimento mínimo e, se crítico, a sequência de soldagem. A soldadura em obra é cara, difícil de executar e o seu controlo de qualidade é complicado, pelo que deve ser evitada [27].

3.2.4. COMPORTAMENTO DAS FACHADAS PRÉ-FABRICADAS ÀS AÇÕES SÍSMICAS

As estruturas pré-fabricadas são cada vez mais utilizadas em zonas de elevada sismicidade em todo o mundo, pois têm mostrado um comportamento adequado, desde que no seu dimensionamento seja tido em conta os princípios a que uma estrutura solicitada por ações horizontais devidas ao sismo deve obedecer.

A resistência a sismos deve ser determinada de acordo com as especificações técnicas, ou outras disposições, válidas no local de instalação.

Relativamente ao dimensionamento de estruturas resistentes às ações sísmicas, o Eurocódigo 8 constitui uma base de orientação, mais conservativa que o Regulamento de Segurança e Ações (RSA), apresentando na secção 5.11 regras específicas para estruturas pré-fabricadas em betão.

O EC8 estabelece um coeficiente de comportamento para as estruturas pré-fabricadas igual ao das estruturas moldadas no local caso as ligações se localizem fora das zonas críticas, ou se esta condição não se verificar, as ligações estejam sobredimensionadas ou capazes de dissipar a mesma energia que uma ligação monolítica de igual resistência. Nos restantes tipos de ligações, o coeficiente de comportamento deverá ser reduzido para metade do coeficiente apresentado para as estruturas moldadas no local [30].

Com o objetivo de reduzir os danos durante a ação sísmica, o EC8 propõe uma limitação do deslocamento entre pisos, que consiste [30]:

- a) para os edifícios com elementos não estruturais constituídos por materiais frágeis fixos à estrutura:

$$d_r \nu \leq 0,005 h \quad (2.1)$$

- b) para os edifícios com elementos não estruturais dúcteis:

$$d_r \nu \leq 0,0075 h \quad (2.2)$$

- c) para os edifícios com elementos não estruturais fixos de forma a não interferir com as deformações estruturais ou sem elementos não estruturais:

$$d_r \nu \leq 0,010 h \quad (2.3)$$

Em que:

d_r - valor de cálculo do deslocamento entre pisos;

h - altura entre pisos;

ν - coeficiente de redução que tem em conta o mais baixo período de retorno da ação sísmica associada ao requisito de limitação de danos.

Fig. 3.18 – Condições impostas pela EC8

3.3. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

Relativamente à segurança contra incêndios podemos destacar resistência ao fogo e reação ao fogo. Quanto à reação ao fogo o sistema tem de ser classificado e testado segundo a norma EN 13501-1 – “Fire Test to Building Material Classification” (CEN, 2007). A determinação das classes de resistência ao fogo (REI e EI) pode ser realizada através de ensaios (EN 13501-2) – “Fire classification of construction products and building elements” (CEN, 2007), ou estimada através de tabelas (EC6) através da espessura e materiais constituintes da parede. A “resistência ao fogo” avalia-se pelo tempo que decorre, desde o início de um processo térmico normalizado a que o elemento é submetido, até ao momento em que o elemento deixa de satisfazer determinadas exigências relacionadas com as referidas funções [25].

Na atual regulamentação a resistência ao fogo é classificada pelas através da conjugação de letras, sendo que as mais usadas são:

R – Resistência estrutural;

E – Estantiquidade a chamas e gases quentes;

I – Isolamento térmico, garantindo que na face não exposta no elemento não se atingem temperaturas críticas;

C – Elemento equipado com dispositivo de fecho (por exemplo mola);

O RT-SCIE posteriormente especifica os limites que devem ser impostos para o grau de reação ao fogo de revestimentos e materiais de construção consoante o tipo de revestimento e a altura do edifício. As classes de reação de produtos de construção são atribuídas usando os seguintes símbolos: A1, A2, B, C, D, E, F. a produção de fumos e queda de gotas ou partículas inflamadas é atribuída numa classificação adicional s1, s2, s3 e d0, d1, d2 respetivamente.

Descrição das classes:

A1: Produtos que não têm nenhuma contribuição para o fogo;

A2: Produtos que não contribuem significativamente para o fogo;

B: Produtos que contribuem para o fogo numa extensão muito limitada;

C: Produtos que contribuem para o fogo numa extensão limitada;

D: Produtos que contribuem para o fogo numa extensão aceitável;

E: Produtos cuja reação ao fogo é aceitável num período de exposição pequeno a uma chama pequena;

F: Produtos que não têm reação ao fogo determinada e que não podem ser classificados nas outras classes.

Não é atribuída nenhuma classificação adicional apenas às classes A1 e F.

Classificação complementar, são duas:

s1: A produção de fumo é muito reduzida;

s2: A produção de fumo é limitada;

s1: A produção de fumo não satisfaz as exigências das classes s1 e s2;

d0: Não ocorrem partículas ou gotículas inflamáveis;

d1: As partículas ou gotas inflamáveis extinguem-se rapidamente;

d2: A formação de partículas ou gotas inflamáveis não satisfaz as exigências das classes d0 e d1; [31]

A tragédia do edifício “Greenfell” em Londres, no ano de 2017, é um exemplo perfeito em que o uso de materiais inflamáveis no revestimento externo da fachada acelerou a deflagração do incêndio. Ao que tudo indica, a investigação do acidente apurou que a empresa de construção responsável pelo projeto optou por um revestimento mais barato e de menor qualidade (figura 3.18.), [32].

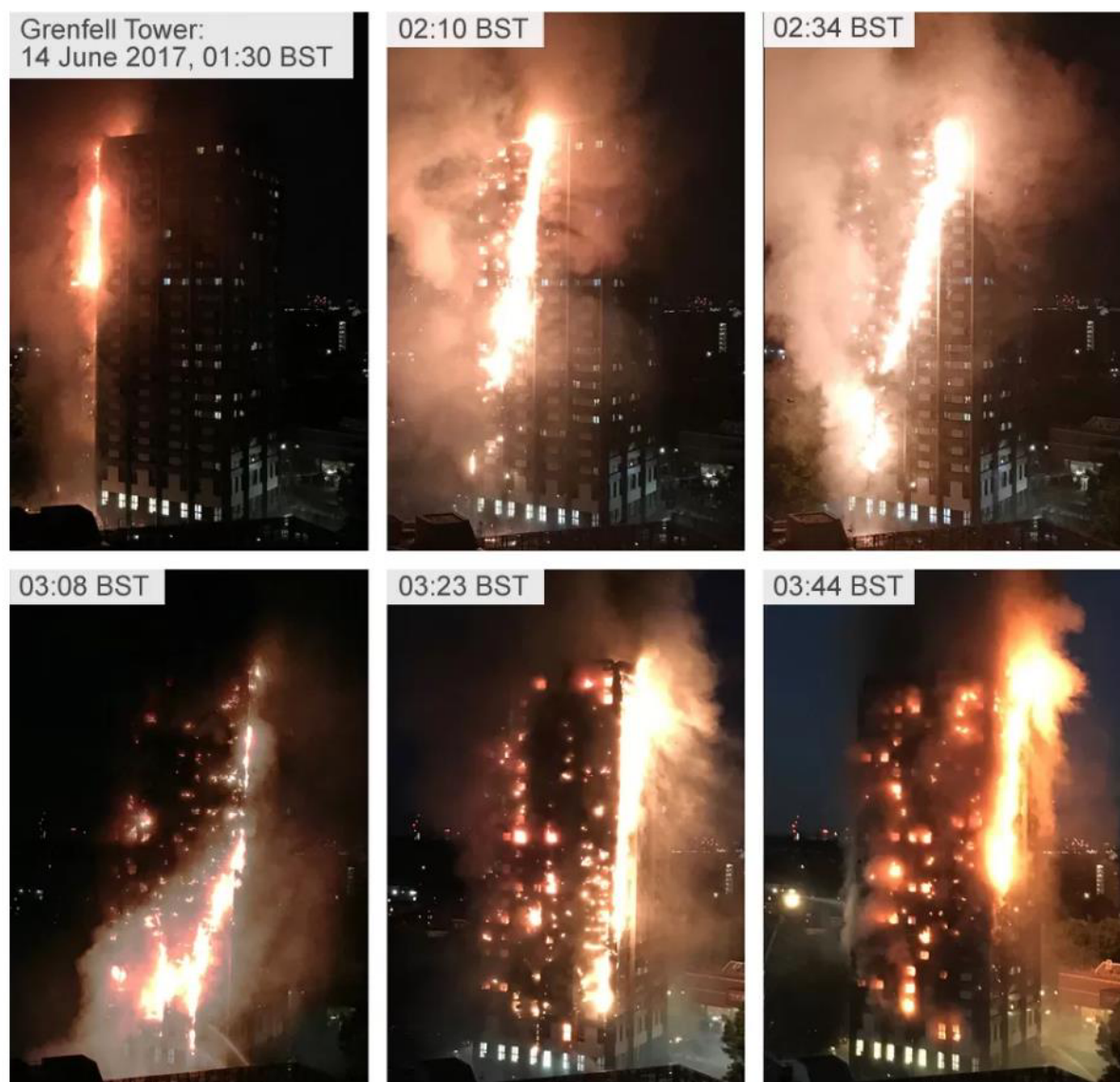


Fig. 3.19 – Cronologia da deflagração do incêndio na “Greenfell Tower” em Londres [32]

3.4. HIGIENE, SAÚDE E AMBIENTE

Os objetivos no que respeitam à exigência de higiene, saúde e ambiente consistem num tratamento adequado das soluções de fachada, incluindo outros sistemas aplicados, ao nível do projeto e da execução em obra que diminuam consideravelmente o risco de presença de água nos elementos de construção.

Garantir coeficientes de transmissão térmica inferiores aos limites máximos ou de referência regulamentares (RCCTE) e um adequado tratamento das pontes térmicas diminuem consideravelmente o risco de condensações nas paredes.

Duma forma geral os materiais constituintes mais correntes para fachadas pré-fabricadas não constituem perigo para o ambiente e utilizadores (ausência ou libertação de materiais nocivos), [33], [34].

3.4.1. Barreiras PERFEITAS E IMPERFEITAS

O grau de permeabilidade determina a qualidade do edifício e o conforto do interior, proporcionando maior proteção contra o efeito das intempéries (chuva, vento, neve, etc.). Quanto a este critério os painéis de pré-fabricação podem ser [35]:

- Barreiras perfeitas (também chamadas de “paredes de barreira”) pois impedem toda a penetração de água num único plano, tanto quanto uma barreira de ar perfeita impediria o fluxo de ar. Exemplos de paredes de barreira perfeitas são alguns caixilhos de janelas, EIFS (sistemas de isolamento e acabamento exterior) e metal e sistemas de parede de cortina de vidro. (Figura 3.18.)
- Barreiras imperfeitas: uma vez que é muito difícil construir e manter uma parede de barreira perfeita, a maioria das paredes são projetadas ou funcionam como sistemas de parede de barreira imperfeita, o que significa que se assume que a humidade se infiltrará em algum ponto dentro do sistema, (figura 3.18.) [36].

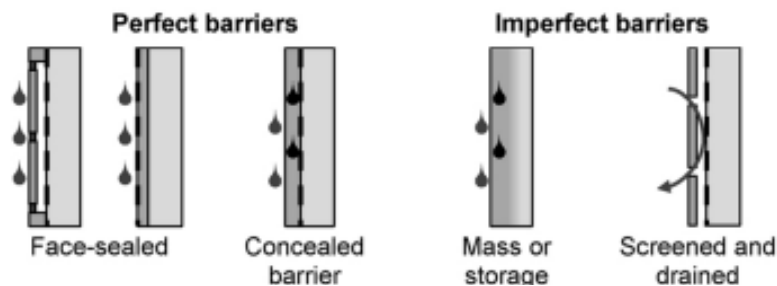


Fig. 3.20 – Ilustrações sobre os conceitos de barreiras perfeitas e imperfeitas [6]

Para garantir a estanqueidade do sistema de fachada modular, todo o perímetro da fachada é vedado por meio de uma série de perfis projetados para as vedações laterais, inferiores e superiores. Os vãos envidraçados já possuem um perímetro de vedação. Todas estas barreiras são projetadas para garantir a estanqueidade do sistema de fachada, mantendo o isolamento da fachada. Todos eles são compostos por diferentes peças de alumínio com uma camada de isolamento térmico no interior para evitar pontes térmicas no perímetro do sistema modular e juntas de vedação para impedir a entrada de água e ar [5].

3.4.2. EFICIÊNCIA DAS JUNTAS

O princípio da construção de painéis pré-fabricados, obriga à a união de várias peças, formando-se juntas entre estes elementos, que estabelecem a linha de divisão entre painéis.

As juntas, devem ser o mais estanques possível sem propagar as tensões provenientes de movimentações, tanto dos painéis como da própria estrutura de suporte para elementos adjacentes, evitando a introdução de tensões adicionais nos próprios painéis. O dimensionamento das juntas e a análise dos materiais selantes deve seguir, no sentido de estabelecer critérios que assegurem o desempenho funcional das juntas e a estanqueidade das fachadas, (ver figura 3.21), [28], [29].

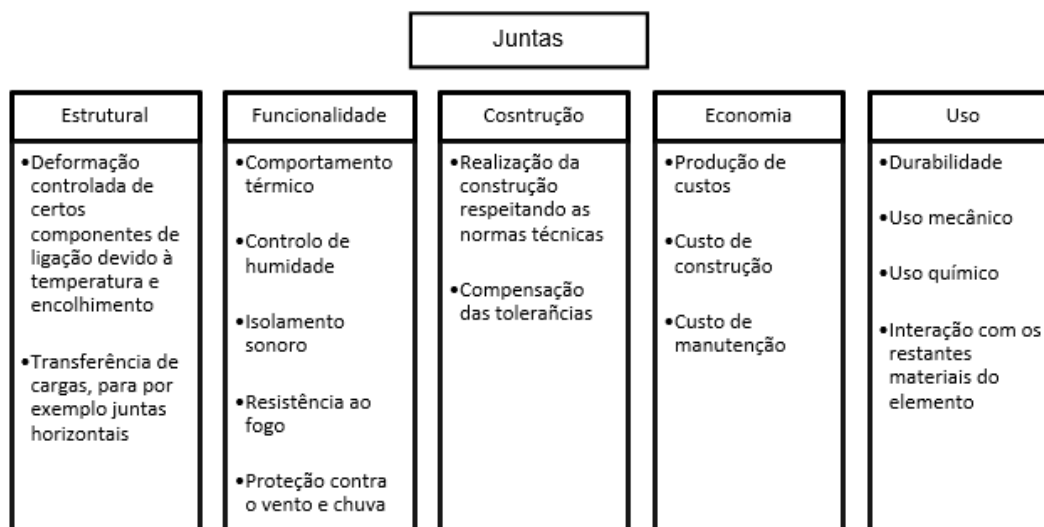


Fig. 3.21 – Critérios a satisfazer pelas juntas [28]

O bom desempenho da envolvente exterior de um edifício é frequentemente definido pela capacidade de manter a chuva e os agentes externos, longe dos ocupantes do edifício.

Os painéis de betão pré-fabricado são em certa medida impermeáveis à água. As juntas entre painéis de betão pré-fabricados ou entre painéis e outros materiais de construção devem ser consideradas para evitar a penetração da água e do ar pela envolvente do edifício. O projeto e a execução dessas juntas são, portanto, de extrema importância e devem ser realizados de maneira racional e económica. Para garantir que a junta e o selante assegurem o desempenho desejado, é necessário selecionar o produto certo, o projeto de junta apropriado e a técnica adequada de preparação e aplicação.

Os selantes de juntas estão totalmente expostos aos principais agentes de envelhecimento e deterioração - luz ultravioleta e ciclos térmicos. Selantes de alto desempenho com baixo módulo e alta capacidade de movimento devem ser usados para garantir um desempenho de qualidade a longo prazo.

As juntas são necessárias para acomodar alterações no painel de parede ou nas dimensões da estrutura provocadas por mudanças de temperatura, humidade, ou deformações provenientes de cargas aplicadas. As juntas entre os painéis são normalmente projetadas para acomodar movimentos locais da parede, em vez de movimentos cumulativos. Neste sentido, devem ser adotados alguns critérios pelos quais as juntas devem ser projetadas, atendendo a certos requisitos de desempenho em relação à capacidade de absorver deformações sem introduzir tensões extra nos elementos. A forma como se estabelecem esses critérios, está relacionada com a análise do tipo de juntas, a escolha dos materiais selantes e das dimensões mínimas estabelecidas para as juntas [5], [28].

3.4.2.1. Tipos de Juntas

As juntas podem-se dividir em três tipos diferentes: juntas de um estágio, de dois estágios, e de expansão.

- Juntas de um estágio: Como o próprio nome indica, a junta de um estágio possui uma única linha de defesa para impermeabilização. Estas fornecem um controlo adequado de

impermeabilização ao ar e à penetração de água na maioria dos climas, estando dependente do desempenho da qualidade dos materiais selantes, das condições das superfícies das juntas, da qualidade da instalação no local e do projeto geral da parede.

Como os selantes estão sujeitos à deterioração por intempéries e a exposição ultravioleta (UV), recomenda-se que o selante seja colocado de volta nas juntas usando juntas recuadas. Isso protege parcialmente o selante da chuva, vento e da luz ultravioleta. A aplicação deste selante faz-se com recurso a uma pistola-cola próximo à superfície externa do painel de batão pré-fabricado (Fig. 3.21.). As principais vantagens das juntas seladas são sua simplicidade, facilidade de instalação e adequação quase universal para juntas normais entre painéis de betão pré-moldado. Apesar das juntas de um estágio serem normalmente as mais econômicas em termos de custo inicial, ao longo do seu ciclo de vida a economia pode mudar quando os custos de manutenção são incluídos na avaliação [5].

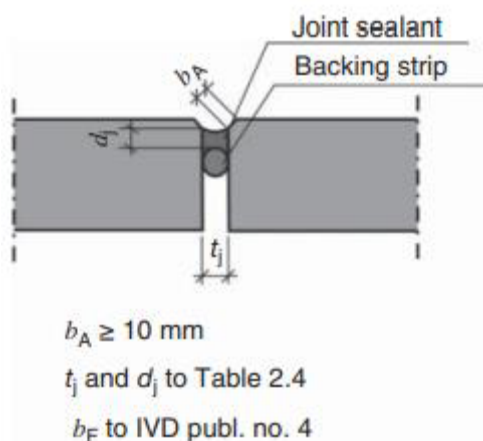


Fig. 3.22– Junta de um estágio [28]

- Juntas de dois estágios: A estanqueidade das juntas selantes pode ser melhorada com a instalação de uma segunda linha de defesa em cada junta. A vedação interna é colocada dentro da junta, geralmente do lado de fora, e recuada num mínimo de 50 a 63 mm do selante frontal; o suporte estará localizado, ou na parte traseira do isolamento de um painel de parede sanduíche (isolado). Essa camada proporciona redundância no sistema, pois é totalmente protegida das intempéries e da exposição aos raios UV pela camada externa de selante, que é instalada de maneira normal. Esta abordagem requer a instalação de 10 mm de aberturas na vedação externa para permitir que a água contida pela vedação interna saia da cavidade entre as vedações das juntas. Perto da junção das juntas horizontal e vertical, a vedação interna deve mudar de direção para o plano da vedação externa em intervalos regulares para forçar a saída de água da junta (figura 3.23). Este procedimento requer cuidados no projeto e na construção. A falha em fornecer essas aberturas de escoamento resulta em água presa dentro da junta, empoçando contra ambas as vedações, o que acelera a deterioração do material selante e dificulta sua adesão ao substrato. Aberturas na barreira de chuva permitem que o ar entre rapidamente até que a pressão dentro da câmara seja igual à pressão do vento atuando contra a parede externa, o que impede a entrada de água na câmara. A diferença de pressão na camada externa é essencialmente zero e a pressão do vento é transferida para a camada hermética interna. A chuva não penetra na câmara de ar e, posteriormente, no interior do edifício porque não há pressão do vento forçando-a

através da camada exterior. Qualquer humidade que entre na junta irá se agarrar às paredes desta e irá posteriormente ser drenada pela vedação transversal.

A estanqueidade do retardador de ar é crítica para controlar a velocidade na qual ocorre a equalização da pressão. A equalização de pressão deve ocorrer quase instantaneamente para que uma parede de tela de chuva seja eficaz. O tamanho da abertura de ventilação deve coincidir com o tamanho da junta para a pressão ser a mesma.

Detalhes típicos de juntas verticais de dois estágios estão representados nas figuras 3.23 e 3.24. Este sistema é especialmente usado em edifícios com muitos andares sujeitos a uma forte exposição climática. O ar quente e húmido que se move do interior do edifício para o exterior geralmente carrega humidade, o que pode causar condensação. O ar deve ser impedido de entrar em contato com superfícies frias na parede.

Fatores a serem considerados ao usar juntas de dois estágios são:

- Maior custo inicial devido à mão de obra e materiais necessários para sua aplicação com sucesso.
- Os selantes não são facilmente colocados na parte de trás da junta de dois estágios, a menos que sejam usadas juntas de 25 a 35 mm. Portanto, é necessária mão-de-obra especializada e supervisão intensiva durante todo o procedimento de instalação, já que as inspeções após concluída a instalação são difíceis.

As configurações do painel e as larguras das juntas devem permitir que um aplicador especializado instale com sucesso ambas as linhas de selante a partir do exterior. As ferramentas necessárias podem incluir uma extensão para o bocal da pistola de calafetagem e uma ferramenta mais longa para aplicar o selante interno [5].

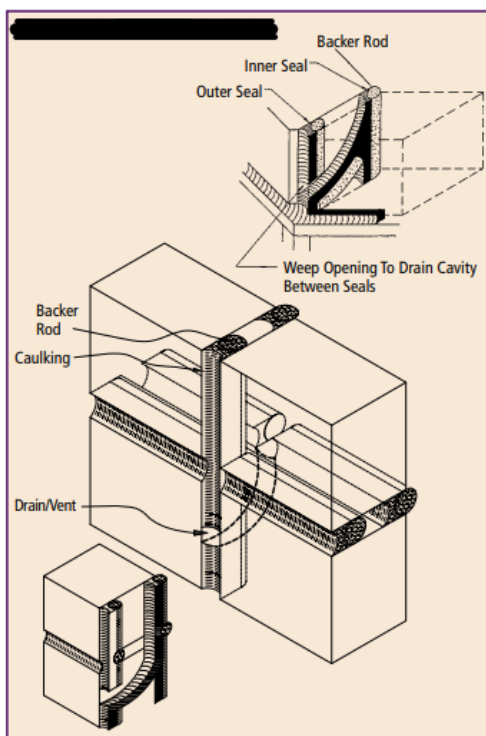


Fig. 3.23 – Corte vertical e horizontal de uma junta de dois estágios [5]

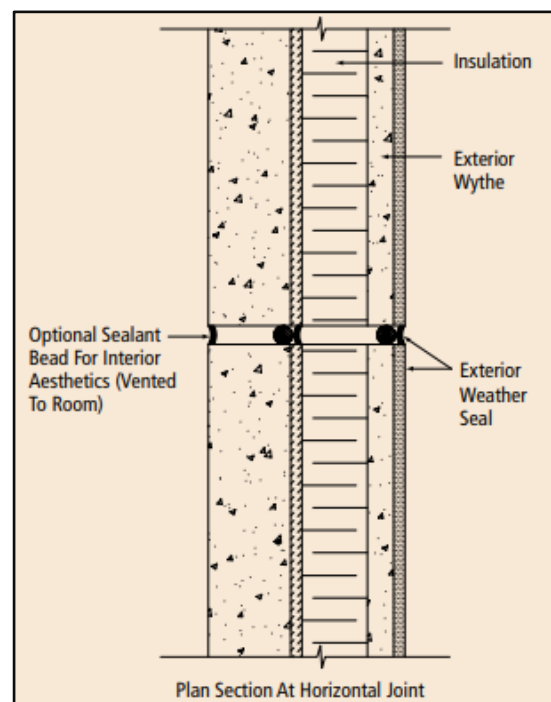


Fig. 3.24 – Corte vertical de uma junta de dois estágios [5]

- Juntas de expansão: Os movimentos cumulativos, bem como o movimento de expansão diferencial de materiais de parede adjacentes, são geralmente acomodados por juntas de expansão especialmente projetadas. Como uma junta de dilatação pode ter de acomodar movimentos consideráveis, esta deve ser projetada da forma mais simples possível.

Embora isso possa resultar numa aparência um pouco diferente de uma junta normal, o arquiteto é obrigado a tratá-la ou como uma característica arquitetónica ou simplesmente deixá-la como uma junta de dilatação diferente. As vedações sísmicas são um caso especial das juntas de dilatação.

Estas juntas são geralmente bastante grandes e são usadas entre edifícios novos e existentes para proteger a junta da humidade e permitir que as estruturas se movam por expansão térmica, movimentos associados, ou movimentos sísmicos sem danos. As juntas sísmicas são projetadas para acomodar movimentos verticais e horizontais e encontram-se disponíveis em tamanhos de 50 a 305 mm.

Os materiais para juntas de dilatação devem ser escolhidos pela capacidade de absorver movimentos apreciáveis enquanto desempenham a função principal de controlar o movimento da humidade e do ar. As juntas devem ser projetadas primeiro para a longevidade da proteção contra intempéries, depois para o movimento e, finalmente, para a aparência. Na maioria dos casos, isso requer o uso de materiais de vedação especiais, em vez de selantes. Caso contrário, os requisitos para juntas de dilatação seriam semelhantes aos listados para outras juntas [5].

Comprimento das juntas (m)	Largura da Junta, bj (mm)		Profundidade do selante, dj (mm) ^{c)}	
	Dimensão nominal ^{a)}	Dimensão mínima ^{b)}	Dimensão nominal	Tolerância
≤2	15	10	8	±2
>2 até ≤3,5	20	15	10	±2
>3,5 até ≤5	25	20	12	±2
>5 até ≤6,5	30	25	15	±3
>6,5 até ≤8	35	30	15	±3

a) Dimensões mais comuns na projeção.
 b) Dimensão mínima para a estanqueidade à água da junta.
 c) A mudança de volume do selante não pode ser desprezada.
 d) No caso de juntas com larguras maiores é recomendado consultar a informação do fabricante.

Fig. 3.25 – Largura das juntas segundo a tabela 2 da norma DIN 18541-1 [28]

3.4.2.2. Localização das Juntas

De realçar que a localização das juntas é um ponto que influencia a produtividade da mão-de-obra, estanqueidade, facilidade de preenchimento com material selante assim como a capacidade de absorver movimentações. Existe alguma facilidade de preenchimento das juntas no caso de estarem localizadas nas extremidades, tanto no comprimento como na altura do painel. Caso existam nervuras nos painéis é recomendado que as juntas se localizem perto dos bordos e das nervuras (PCI, 1989). Devem ser evitadas juntas no meio de vãos, assim como em superfícies inclinadas, devido à dificuldade de criar formas

geométricas, ao nível das juntas e do próprio painel, para que a água da chuva seja conduzida para fora da superfície da fachada.

Localizar e detalhar juntas (reais ou falsas) é um fator importante na criação de padrões de resistência a intempéries para um edifício. Nesse sentido as juntas devem ser largas e recuadas para limitar os efeitos inesperados (figura 3.26). As juntas embutidas protegem a junta da chuva, fornecendo um espaço de ar que reduz a pressão do ar na face do selante. Além disso, o perfil da junta canaliza o escoamento da chuva, ajudando a manter a fachada do edifício limpa de padrões desagradáveis de escoamento [5].

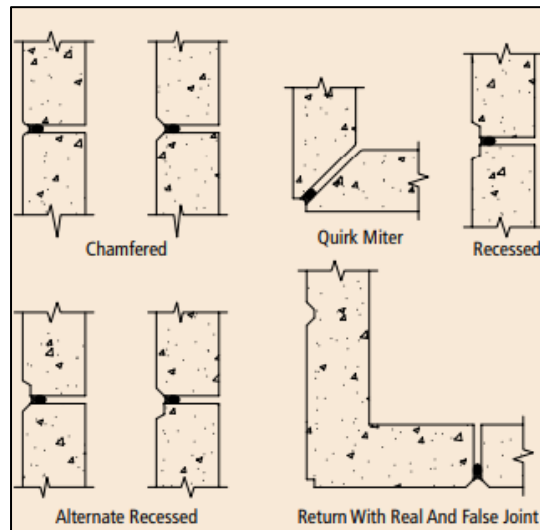


Fig. 3.26 – Juntas entre painéis mais comuns [5]

A figura seguinte mostra algumas das falsas juntas verticais, para onde a água é canalizada, em que a água é descarregada sobre uma superfície vertical de betão com menos juntas do que nos pisos superiores. Isso causa um efeito de lavagem acentuado no final da junta; a água deve ser direcionada até atingir o solo ou um sistema de drenagem [5].

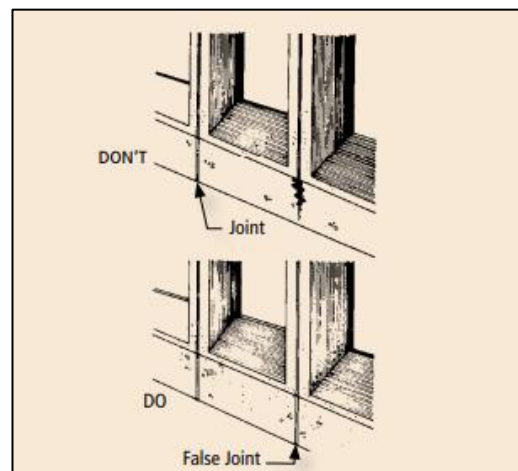


Fig. 3.27 – Caminho percorrido pelas águas nas juntas [5]

Todas as juntas devem estar alinhadas, em todo o seu comprimento (figura 3.28). Juntas não alinhadas sujeitam os selantes a forças de corte além das forças esperadas de compressão ou de expansão. A tensão adicional pode fazer com que os selantes falhem. Além disso, juntas não alinhadas forçam os painéis a moverem-se lateralmente uns em relação aos outros, induzindo altas forças de tração. Este tipo de distribuição desalinhada dos painéis origina também certas linhas de sombra que são esteticamente indesejáveis [5].

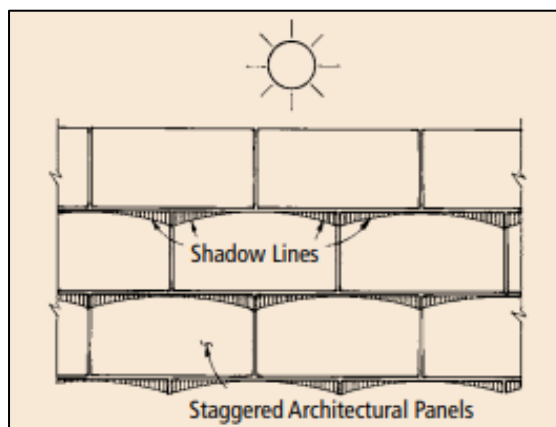


Fig. 3.28 – Distribuição desalinhada dos painéis de fachada [5]

3.4.3. FUNCIONALIDADE DO VÃO ENVIDRAÇADO

As janelas interrompem os sistemas de fachada e exigem uma atenção especial na sua interface com o sistema de revestimento opaco. O vão envidraçado encontra-se num lugar onde uma variedade de materiais diferentes precisam de interagir.

As janelas afetam o ambiente interior porque as suas características térmicas e óticas, tamanho, orientação, capacidade de abertura e comportamento com dispositivos de oclusão, têm impacto no conforto dos ocupantes e na operação dos sistemas mecânicos. Efeitos de brilho, superaquecimento e resfriamento, correntes de ar e ruído externo afetam o também o bem-estar dos seus ocupantes.

A quantidade de envidraçado, o tipo e a localização são considerações que devem ser tidas em conta nas avaliações das diferentes opções do projeto para satisfazer os seus ocupantes [5].

3.4.3.1. Considerações no projeto

A conexão da janela à abertura áspera numa parede de betão pré-fabricado deve ser projetada para resistir ao vento, a cargas sísmica, a sobrecargas verticais e cargas térmicas e para transferir cargas para a estrutura circundante.

A interface entre janelas e painéis é bastante simples no caso de uma disposição fechada, onde a janela é enquadrada num único painel. Neste caso, os detalhes das conexões e juntas são independentes das condições do local e as tolerâncias são regidas apenas pelas tolerâncias relacionadas à fabricação dos dois produtos (figura 3.29). No caso de uma disposição aberta, a interface das janelas na fachada deve permitir tolerâncias de construção do local um pouco maiores e mais incertas. Onde houver aberturas

de janela entre essas unidades, o envidraçamento pode ser mais bem acomodado por uma moldura de janela, que considere o tamanho apropriado e as tolerâncias de enquadramento da abertura. De preferência, as janelas devem estar localizadas inteiramente dentro de um único painel. Qualquer falha da junta onde a moldura da janela se cruze fará com que a água se infiltre. Um módulo de fachada em betão pré-fabricado que contenha na sua totalidade a abertura da janela torna a unidade de parede mais económica [5].

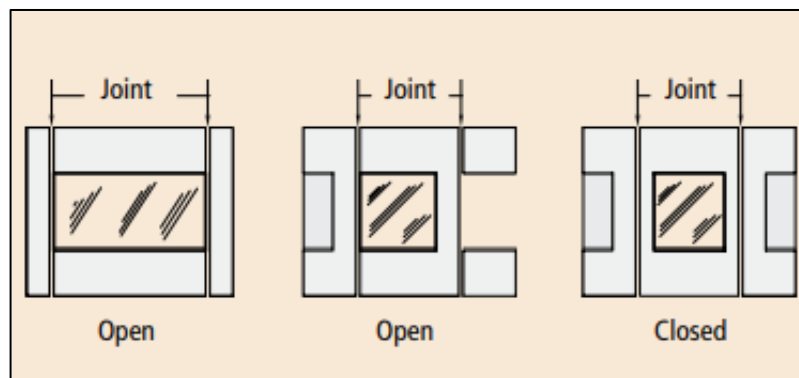


Fig. 3.29. – Painéis abertos ou fechados [5]

É importante que as ligações painel-janela para unidades abertas permitam movimentos menores dos painéis em relação à estrutura de suporte e nas juntas entre o betão e o caixilho da janela. Deve-se ter em conta o efeito da gravidade e as movimentações sísmicas. No caso de painéis fechados, os movimentos são acomodados nas juntas entre as unidades de betão.

Uma ou duas linhas de selante são usadas como forma de proporcionar uma junta estanque entre a janela e a parede de betão pré-fabricado [5].

As aberturas das janelas podem ser desenhadas em painéis arquitetónicos de betão pré-fabricado com facilidade, em qualquer formato ou tamanho desejado, oferecendo ao arquiteto total flexibilidade no projeto. Os painéis podem conter uma única abertura ou uma série de janelas. Estes podem ter um piso de altura e serem tão largos quanto possível ou moldados mais estreitos para se estenderem verticalmente por dois andares. No entanto, obter eficiência de design e custo requer uma configuração cuidadosa do sistema de painel. Em todos os casos, uma inclinação razoável deve ser mantida nas bordas das aberturas para garantir um escoamento suficiente. Os custos do molde estão diretamente relacionados com a complexidade da janela do painel de parede. Painéis planos perfurados adicionam custos moderados, enquanto os moldes para painéis fortemente esculpidos podem ser caros. Como sempre com o betão pré-fabricado, a repetição de componentes reduz os custos unitários.

As aberturas nas paredes que formam as janelas de um edifício ajudam a interromper grandes superfícies planas, contudo podem contribuir para problemas quando ocorrem intempéries. Janelas individuais num painel de betão pré-fabricado devem ser projetadas com dois princípios em mente: (1) conter o fluxo de água dentro da área da janela e (2) dispersá-lo na parte inferior da janela de maneira a não ficar concentrado.

Existem diversas maneiras de detalhar as janelas, dependendo em certa medida da sua forma e do modo como interrompem o fluxo de água (figura 3.30) [5].

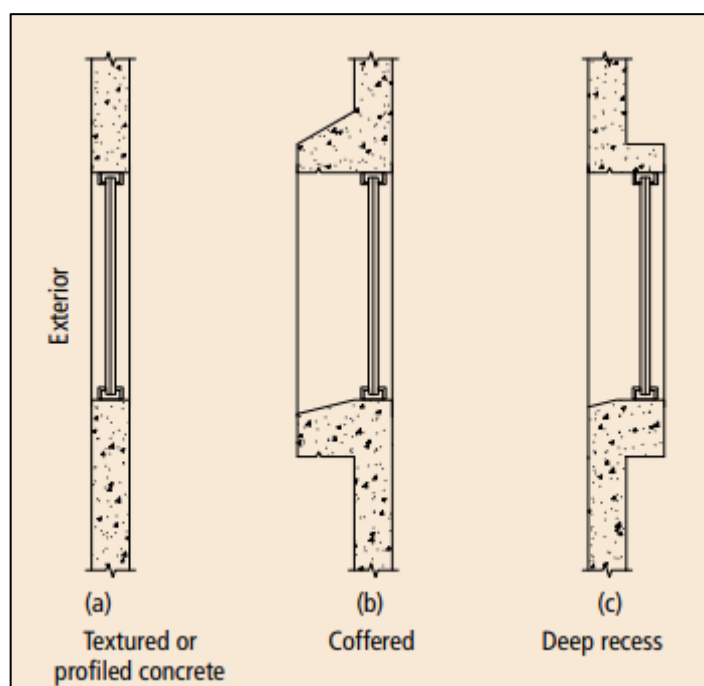


Fig. 3.30 – Tipos de disposição da janela em relação ao painel:
(a)-em perfil, (b)-em caixa, (c)-recuada [5]

3.4.3.2. Instalação do vão envidraçado:

Painéis de betão pré-fabricado ocasionalmente são pré-envidraçados em fábrica (figura 3.31). Na figura apresentada, o projetista do painel e a equipa subcontratada coordenaram as operações para instalar o vão envidraçado no painel. Após a produção dos painéis estes são reencaminhados para equipa especializada pela instalação do vão envidraçado. Assim que esse processo ficar concluído, os painéis são devolvidos ao estaleiro de obras para posteriormente serem fixados na fachada do edifício. A pré-montagem de vãos-envidraçados dos painéis oferece vantagens económicas e de planeamento significativas [5].



Fig. 3.31 – Instalação do vão envidraçado no painel [5]

No entanto, o método típico de fixação do caixilho da janela é a instalação no local da obra. Isso acontece por intermédio de ancoragens de expansão na borda ou na face vertical posterior do painel. A localização das fixações das janelas deve ser coordenada com o fabricante para evitar interferência com as armaduras de aço ou com os cabos de pré-esforço. Deve-se usar uma distância ao bordo adequada às ancoragens.

É comum haver vários métodos usados para associar janelas a painéis de concreto pré-moldado. Em painéis de parede sanduíche, o enquadramento da janela deve ser feito do lado interno, uma vez que o movimento desse lado é menor que o do lado externo. Os caixilhos das janelas devem ter barreiras térmicas entre o caixilho exterior e o caixilho interior. Uma parte substancial da perda total de calor através de uma janela pode ocorrer através de caixilharia. As janelas requerem uma atenção cuidadosa na sua interface com a parede. Deve-se ter em consideração:

- Conexão mecânica da caixilharia da janela ao painel de betão;
- Estimativa do movimento da junta para seleção adequada de materiais de vedação;
- Impermeabilidade;
- Hermeticidade;
- Rufos, defletores de chuva e drenagem de água infiltrada;
- Risco de condensação.

As figuras 3.32.(a) a (f) mostram vários exemplos de caixilharias em alumínio fixados em painéis de betão pré-fabricado [5].

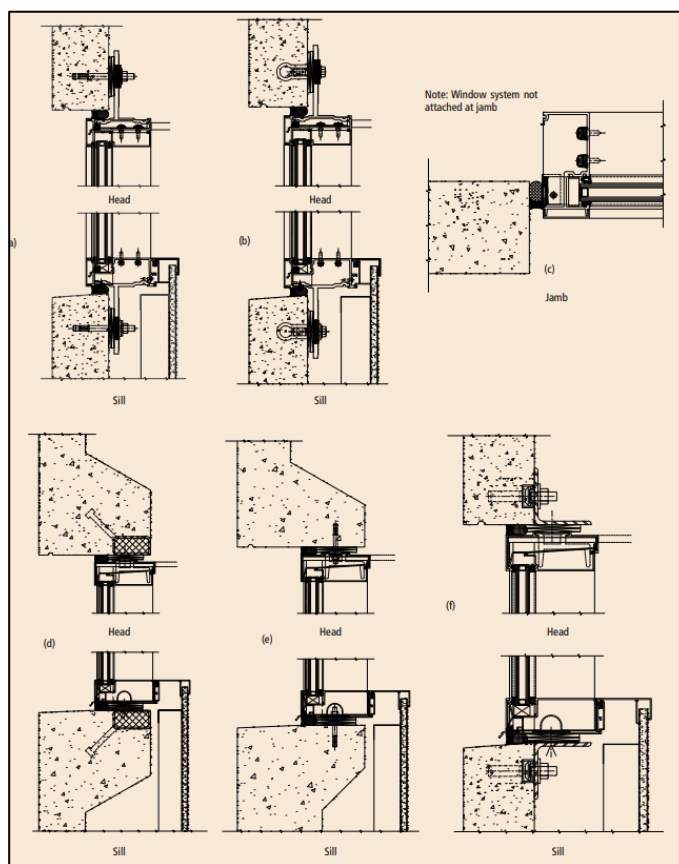


Fig. 3.32 – Tipos de fixações de caixilharias em painéis [5]

3.5. SEGURANÇA E ACESSIBILIDADE NA UTILIZAÇÃO E CONSTRUÇÃO

Os paramentos das paredes, incluindo os revestimentos e as instalações, devem ser executados de forma que não provoque lesões (segurança no contacto e na utilização) ou se danifiquem ou se destaquem perante o choque de objeto [6], [34].

3.5.1. ESTABILIDADE DO PAINEL

Painéis sem função resistente:

- Sendo uma solução pesada e rígida que normalmente se encontra ligada no seu contorno ao suporte, assegura uma adequada resistência ao choque de pessoas e objetos e à suspensão de cargas excêntricas moderadas (200 a 400kg).
- É aconselhável a verificação de estabilidade relativamente às ações do vento e eventuais ações induzidas pelo suporte.
- A verificação sísmica das paredes está prevista no EC8, incluindo os revestimentos aplicados e ligações ao suporte.

Quanto aos painéis de fachada resistente, estes normalmente suportam as cargas verticais provenientes dos pavimentos e dos painéis superiores, contribuindo desta forma para a estabilidade horizontal do edifício. Os painéis sanduíche são um exemplo típico deste tipo de painéis, sendo constituídos por dois panos de betão (por vezes, o pano exterior pode ser de outro material) e uma camada de isolamento entre eles. É o pano interior que realiza a função estrutural (painel com comportamento não compósito), podendo atuar independentemente do pano exterior ou estar solidarizado com este, formando um elemento único através de mecanismos que permitam a total transferência dos esforços de corte entre os dois panos (painéis com comportamento compósito).

Conforme a função a desempenhar no edifício, os painéis de fachada podem exercer funções não resistentes ou resistentes, e ser compostos por apenas um pano ou por dois panos (painéis sanduíche).

Habitualmente as ligações são posicionadas nos cantos dos painéis (permitindo uma melhor acessibilidade e melhor distribuição do binário de forças), aplicando-se a denominação de painel pendurado/suspenso quando as ligações de gravidade estão no topo e as ligações de contraventamento estão na base, e de painel apoiado no caso das ligações de gravidade se encontrarem na base e as ligações de contraventamento no topo, (figura 3.33), [30].

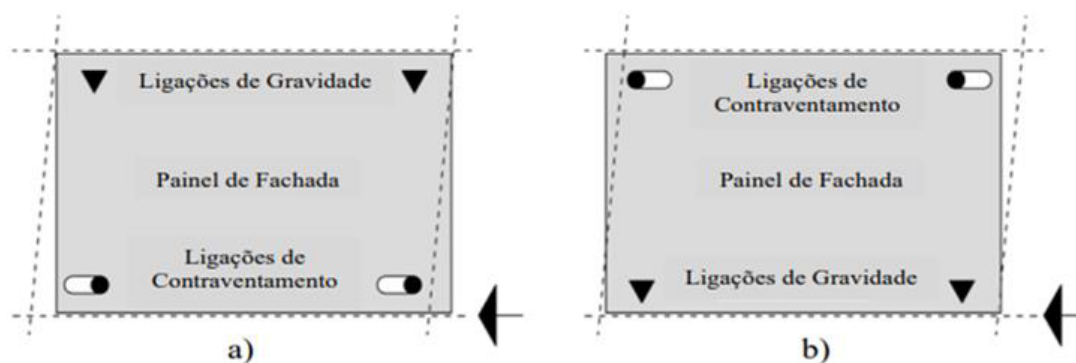


Fig. 3.33 – Localização das ligações num: a) painel pendurado/suspenso, b) painel apoiado [38]

3.5.2. TRANSPORTE

Os painéis prefabricados são transportados em direção ao estaleiro com a ajuda de semi-reboques onde são colocados na posição vertical ou horizontal e com uma certa inclinação. Antes de saírem da fábrica, todos os elementos são alvo do devido controlo, confirmando as condições gerais do material e identificados com o respetivo peso e referência, bem como o nome do cliente e da fábrica onde foi produzido. O próprio dimensionamento, peso, design e material do painel têm de ser sempre tidos em conta no seu transporte até ao local da obra, para esse efeito o painel deve ir num veículo capaz de transportar vários painéis de uma só vez com a devida proteção e suporte, garantindo a segurança na via pública e a total integridade do painel [5], [37], [38].

Quadro 3.5 – Limitações de transporte de elementos pré-fabricados [37]

Tipo de Transporte	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Peso (ton.)
Normal	Dentro dos limites do veículo	Dentro dos limites do veículo	4,20	40
Licença Anual	19	3,50	4,60	60
Carro Piloto	32,50	4,50	5,00	60
Carro Piloto e GNR	>32,50	>4,50	>5,00	>60



Fig. 3.34 – Semi-reboque, transporte do painel de fachada [28]

3.5.3. MANUSEIO E MONTAGEM

O equipamento para elevação dos componentes e a respetiva conexão com o painel devem suportar o equivalente a 4 vezes o peso do painel que está a elevar. É necessário fazer considerações relativamente às inclinações das forças de elevação a atuar. Ou seja, a operação de elevação do componente deve ser

pensada de modo que não exista o risco de o painel cair ou ser danificado devido a ligação deficiente entre este e o equipamento, ou por falta de capacidade do último, garantindo assim a segurança dos trabalhadores que manipulam o elemento e evitando danos que conduzam a problemas de estabilidade, durabilidade ou estéticos, (figura 3.35), [6].

Os métodos de elevação frequentemente usados são os seguintes:

- Vertical, ou seja, compartimento a compartimento em toda a altura do edifício (por exemplo, para barreiras acústicas ou módulos de um piso).
- Horizontal, ou seja, elementos posicionados andar por andar (por exemplo, para estruturas de vários andares).

O facto de serem elementos idênticos facilita o trabalho das equipas de montagem. Estes dois métodos de montagem devem ser adaptados às respetivas situações e podem ser combinados entre si.

O pré-fabricante é geralmente responsável pela produção de painéis relativamente ao controlo de tensões e à conceção dos detalhes de elevação. As unidades devem ser manuseadas de forma a evitar danos estruturais, fissuras prejudiciais, ou deficiências estéticas.

Os painéis de fachada devem ser elevados, sempre que possível, para o local de trabalho numa posição de maneira que não seja necessário a rotação do módulo. No entanto isso não é possível quando as unidades são de vários andares. Tais unidades podem ser armazenadas e expedidas no seu lado comprido e manuseadas no estaleiro, girando as unidades no ar a partir de rótulas de bloqueio (Fig. 3.34.). Deverão ser elevados por guias com capacidade adequada, utilizando para o efeito os pontos de fixação previamente colocados no próprio painel. A sua fixação à estrutura de apoio deverá ter sido previamente estudada [27], [28].

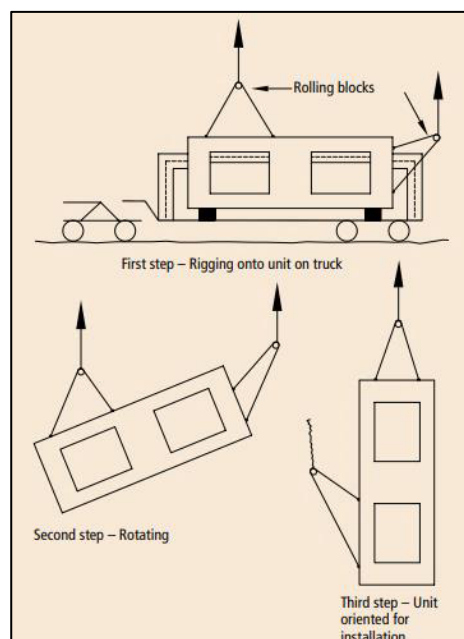


Fig. 3.35 – Elevação e rotação dos módulos [5]

Uma consideração importante na conceção para otimizar os custos de montagem, uma percentagem significativa do custo total de instalação, é fornecer um acesso adequado para camiões e equipamento móvel no local da obra, assim como espaço suficiente e proximidade da estrutura para permitir que a montagem prossiga nas melhores condições.

Os painéis devem ser montados e içados na estrutura perto de sua localização final e mantidos no lugar até serem fixados com segurança. O alinhamento final e as conexões de apoio e laterais podem ser feitas de uma só vez ou posteriormente por outra equipa de acompanhamento, dependendo do tipo de conexão. As conexões devem ser projetadas para permitir um ajuste fácil em todas as direções. Os painéis devem ser instalados piso a piso sempre que possível, para manter a carga aplicada à estrutura uniforme e não podem ser recolhidos por cima.

A estabilidade na elevação pode ser incluída no design dos elementos resistentes. Existe a possibilidade de desenhar as fundações e as ancoragens aparafusadas para suportar as forças geradas pelo vento ou por movimentos de construção. É vantajoso começar a montagem dos painéis a partir de uma zona lateral estável, como uma parede de esquina ou uma torre de escadas. As conexões de base para painéis de suporte de carga de edifícios de vários andares são normalmente obtidas por placas de soldadura ou apoios mecânicos betonados [5], [28].



Fig. 3.36– Colocação do módulo do painel pré-fabricado de fachada [43]

Quadro 3.6 – Tipos de ancoragens de elevação e transporte [38]

Ancoragens de Elevação e Transporte	Descrição	Ilustração
Casquilhos Roscados	Costumam ser utilizados normalmente para desmoldagem, transporte e colocação das peças de betão pré-fabricado. A utilização dos casquilhos é combinada com um elemento de elevação, como lingas ou ganchos.	
Lingas de Aço	As lingas são utilizadas no transporte e na elevação das peças com carga axial.	
Ganchos	Utiliza-se para elevação, transporte e rotação de peças de betão pré-fabricadas. Para cada tipo de ancoragem de transporte existe um gancho adequado, para se trabalhar com total segurança.	

3.5.4. DIMENSÕES E PESOS DOS PAINÉIS

3.5.4.1. Dimensões

O tamanho e complexidade de cada componente individual tem um grande efeito em facilitar a instalação de um sistema de painéis, condicionando assim parâmetros como o tempo e o custo, e ao mesmo tempo fatores responsáveis pela elevação de fachadas e possivelmente mais tarde o seu desmantelamento. Os painéis pré-fabricados maiores possuem menos conexões e requerem menos tempo “on-site”, no entanto são por norma mais pesados e mais incômodos, dificultando o transporte e a elevação. Painéis mais pequenos são constituídos por componentes menores e em maior quantidade, aumentando o grau de trabalho de construção “on-site”, contudo oferecem maior flexibilidade no planeamento.

Para além de que relativamente às proporções planares dos painéis de fachada pré-fabricados, estes podem ser divididos em três categorias:

- Painéis grandes ($H > 1 \text{ m}$ ou $W > 1 \text{ m}$);
- Painéis/placas/revestimentos verticais ou horizontais ($H \leq 0.30 \text{ m}$ e $W > 3 \times H$ ou $W \leq 0.30 \text{ m}$ e $H > 3 \times W$);
- Painéis pequenos ($H \leq 1 \text{ m}$ e $W \leq 1 \text{ m}$). [6]

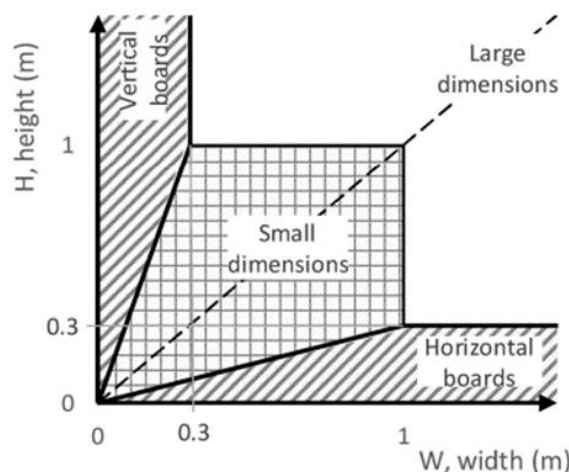


Fig. 3.37 – Representação gráfica das dimensões planas dos painéis [6]

A espessura de elementos de paredes maciças de betão armado varia entre 80 e 240 mm, dependendo dos requisitos de resistência e de isolamento acústico. Os elementos de painéis possuem a mesma altura que os pavimentos, com um máximo de 4.20 m, excecionalmente com 4.50 m. Este valor é geralmente determinado pelas condições de transporte. O comprimento dos painéis varia em torno de 2.40 a 14.00 m.

No que toca a painéis sanduíche, o comprimento e altura seguem a mesma regra dos painéis maciços, contudo a espessura varia já que existe uma camada de isolamento que separa as camadas de betão interna e externa. Regra geral a espessura deste tipo de painéis varia entre os 140 mm e os 300 mm [27].

3.5.4.2. Peso

A classificação em termos de peso é dependente do tamanho (altura, largura e espessura) e da constituição do material (ou seja, densidade) dos painéis, quantificada para cada elemento ou por unidade de área. Assim, os painéis de fachada pré-fabricados podem ser classificados em pesados ou leves, sendo, no entanto, a sua distinção não é consensual.

- Painéis pesados: estes painéis são mais pesados que 100 kg/m², usualmente exigindo equipamento especial de elevação/movimento. Aqui, quanto maior massa, maior é a inércia que retarda a resposta a mudanças ambientais (por exemplo, radiação solar, luz, temperatura, ventilação, etc.);
- Painéis leves: estes painéis são consideravelmente mais leves que 100 kg/m², e idealmente podem ser manuseados por um ou dois trabalhadores, dependendo do peso da unidade. Aqui, a massa térmica é incorporada, mas não mais do que o necessário para funções vitais do edifício [6].

Todas as dimensões dos painéis resistentes e não resistentes são governadas pela possibilidade de manuseio e transporte. Como regra geral, o peso dos elementos não deve ultrapassar as 10 toneladas [27].

3.6. PROTEÇÃO CONTRA O RUÍDO

A fachada deve ser concebida e construída de modo que o ruído captado pelos ocupantes ou pelas pessoas próximas se mantenha a níveis satisfatórios para a saúde e conforto durante a utilização do edifício.

Uma solução pesada, acaba por ser benéfica devido à sua capacidade de isolamento sonoro a sons aéreos, permitindo satisfazer facilmente os requisitos regulamentares mais exigentes de isolamento sonoro a sons aéreos em paredes exteriores (RRAE - $D_{2m,n,w} \geq 33$ dB).

Importante considerar que a capacidade de isolamento sonoro numa parede não depende só da parte opaca, mas também da quantidade, da qualidade construtiva (tratamento acústico) dos vãos de portas e janelas eventualmente existentes [34]:

Para testar o painel à proteção contra ruído são precisas as normas:

EN ISO 354 – “Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room”;

EN ISO 717-2 – “Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation”.

EN ISO 140-3 – “Measurement of sound insulation in buildings and of building elements”[25]

No caso dos painéis de fachada pré-fabricados podemos dizer de uma forma geral que um painel é constituído por mais que uma camada, (camadas múltiplas), em que os materiais e as espessuras das camadas individuais e /ou folhas podem ser otimizadas para corresponder às suas respetivas funções. Assim a definição da sequência das camadas é inicialmente controlada por aspetos funcionais e de performance e só depois por aspetos construtivos, de forma que a fachada se comporte de maneira eficiente e a evitar estragos. Dentro do contexto das camadas múltiplas existem duas em particular que favorecem o conforto acústico e não só:

- Construção em camadas, “Layered/ composite”: assenta na combinação de várias camadas de diferentes materiais (ou na intercalação de várias camadas num material anisotrópico) permitindo misturar e combinar várias propriedades e espessuras para obter o desempenho final desejado.
- Construção sanduíche, “trilayer”: os painéis sanduíche são uma forma específica de painéis compostos, que consistem em dois panos de alta resistência (ou revestimentos) coladas a um núcleo de isolamento. Estes não dependem de pinos internos para seu desempenho estrutural. Os revestimentos suportam as tensões de flexão e conferem à estrutura uma superfície resistente, enquanto o núcleo contribui para requisitos térmicos ou acústicos específicos [6].

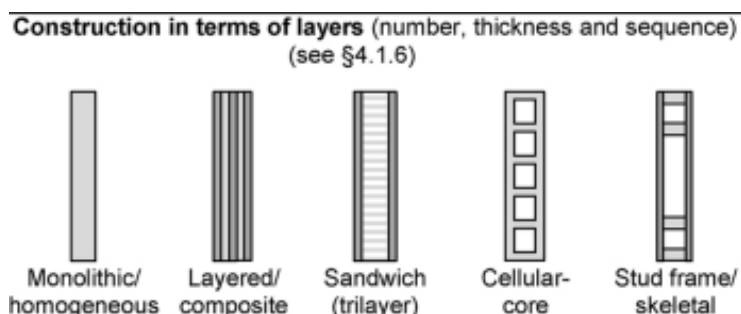


Fig. 3.38 – Construção dos painéis em termos de camadas [6]

3.7. ECONOMIA DE ENERGIA E ISOLAMENTO TÉRMICO

As exigências atuais de conforto higrotérmico, agregadas aos cuidados com o consumo de energia e proteção do ambiente, levaram à necessidade de proceder ao isolamento térmico dos edifícios, com o intuito de minimizar as trocas de calor com o exterior, com redução das necessidades de aquecimento/arrefecimento, assim como a diminuição dos riscos de ocorrência de condensações (Freitas, 2002). No panorama internacional, é consensual a necessidade de obter edifícios com melhor qualidade, reduzindo os consumos de energia e as emissões de gases que colaboram como efeito de estufa ou o aquecimento global. Neste sentido Portugal, quando subscreveu o Protocolo de Quioto, assumiu compromissos correspondentes à necessidade de redução das emissões realizadas pelos diversos sectores, entre eles, os edifícios (RCCTE, 2006). Atualmente existem inúmeras soluções de isolamento térmico no mercado que satisfazem as diversas exigências impostas pela regulamentação em vigor.

A constante preocupação com a eficiência energética e o conforto térmico obriga a recorrer a soluções de fachada cada vez mais isolantes/eficientes. Este aspeto motiva a utilização de soluções com desempenho/resistência térmica melhorada, através soluções com unidades otimizadas termicamente, complementadas ou não com revestimentos/ isolamentos térmicos.

A unidade pré-fabricada modular tem o potencial de integrar uma gama significativa de materiais de isolamento, montar unidades de fenestração e integrar várias tecnologias AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) e sistemas de distribuição de energia.

Para além do tipo de material, a inércia térmica de um painel pré-fabricado depende da quantidade, tipo e espessura das camadas, assim como do próprio peso. Quando se fala em camadas, tanto a construção de painéis por camada como a construção por painéis sanduíche favorecem a capacidade térmica.

No caso de o painel ser “pesado”, a maior massa térmica (ou inércia térmica) retarda a resposta às mudanças do ambiente externo (por exemplo, radiação solar, luz, temperatura, ventilação, etc.). No caso de painéis “leves”, (menos de 100kg/m²), a massa térmica é incorporada, mas não mais do que o necessário para funções vitais do edifício.

A presença ou ausência de uma camada ou conjunto de isolamento pode ser usada para categorizar os painéis:

- Se o sistema não incluir nem exigir um isolamento camada/conjunto;
- Se o sistema não incluir, mas exigir uma camada isolante (geralmente colocada externamente, por exemplo, SEIA, sistemas exteriores de isolamento e acabamento) ou um conjunto isolante;
- Caso o sistema venha completo com camada/conjunto de isolamento pré-instalado.

Os painéis pré-fabricados de fachada podem ser distinguidos de acordo com a forma como eles fazem uso de fontes externas de energia, especificamente a radiação solar:

- Nenhuma, se não se espera que o painel de parede aproveite qualquer tipo de fonte de energia externa;
- Calor, se a parede for projetada para desempenhar um papel passivo na estratégia energética de um edifício, coletando, armazenando e distribuindo energia solar na forma de calor no inverno e rejeitando o calor solar no verão;
- Eletricidade, se o painel de parede estiver equipado com recursos tecnológicos especiais (por exemplo, sistemas fotovoltaicos) transformando a fachada em uma valiosa fonte de geração de energia, aproveitando a radiação solar e calor, (figura 3.40) [6], [39].



Fig. 3.39 – Edifício “550 Spencer” que contará com mais de 1.000 painéis solares na sua fachada.

A resistência térmica do painel, e o seu correspondente valor de condutibilidade térmica, deve ser calculada com recurso aos valores de condutibilidade térmica dos materiais dispostos na norma EN 12524 – “Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values” (CEN, 2000). Alternativamente pode ser determinada com recurso a ensaio.

A avaliação da permeabilidade deve ter em conta os gastos energéticos, devido a fugas de ar, correntes de ar frio e condensação de vapor de água no interior do edifício.

A verificação da inércia térmica é feita segundo os valores que os principais constituintes dos edifícios apresentam. Estes podem ser consultados nas normas EN 12524 – “Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values (CEN, 2000)” e EN 1991-2-1 – “Basis of design and actions on structures. Actions on structures. Densities, self-weight and imposed loads” (CEN, 2002).

Para testar o painel quanto à eficiência energética e retenção de calor são precisas as normas:

EN ISO 8990 – “Determination of steady-state thermal transmission properties”;

EN 12114 – “Thermal performance of buildings. Air permeability of building components and building elements. Laboratory test methods”.

Para testar produtos relativamente à sua eficiência energética são precisas as normas:

EN 12664 – “Thermal performance of building materials and products”.

EN 12939 – “Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Thick products of high and medium thermal resistance”, [25].

3.7.1. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Os edifícios devem ser concebidos de forma a se obter um elevado desempenho ao nível do conforto higrotérmico, ou seja, o ambiente interno dos edifícios deve ser de forma, a que com vestuário adequado, os utentes possam realizar as suas atividades sem sensação de desconforto. As fachadas dos edifícios, tal como os restantes elementos da envolvente, contribuem para que as condições de conforto térmico no interior dos edifícios possam ser asseguradas sem dispêndio excessivo de energia, na medida em que o seu isolamento térmico reduz as trocas de calor com o ambiente exterior e a sua capacidade de armazenamento de calor contribui para a inércia térmica do edifício [40].

3.7.2. TRANSMISSÃO DE CALOR

Um edifício pode ser visto como um sistema sujeito a vários tipos de ações, com origem no seu interior e/ou no seu exterior, resultado da combinação de três processos distintos: a condução, a convecção e a radiação (Figura 3.40.).

A condução, corresponde a um fenómeno de transmissão de calor entre duas zonas com temperaturas diferentes, podendo ocorrer em corpos sólidos ou fluidos. A transmissão de calor é regida pela Lei de Fourier, expressa por:

$$Q_x = \lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

e que calcula a taxa de transferência de calor em função da condutibilidade térmica λ (W/(m.°C)), da área A (m²) e do gradiente de temperatura (dT/dx).

A convecção é o mecanismo de transmissão de calor típico dos fluidos, dado que ocorre na presença dos movimentos destes. A Lei de Newton determina que a taxa de transferência de calor é proporcional à área e à diferença de temperatura, isto é:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_S - T_F) \quad (2)$$

onde h representa a radiação não necessita de meio de transporte dado que todos os corpos emitem e recebem radiação em função da sua temperatura absoluta. A radiação emitida por um corpo negro (corpo radiante puro) é dada pela expressão:

$$Q = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (3)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, de valor $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$, A é a área em m^2 e T a temperatura absoluta do corpo negro, em Kelvin.

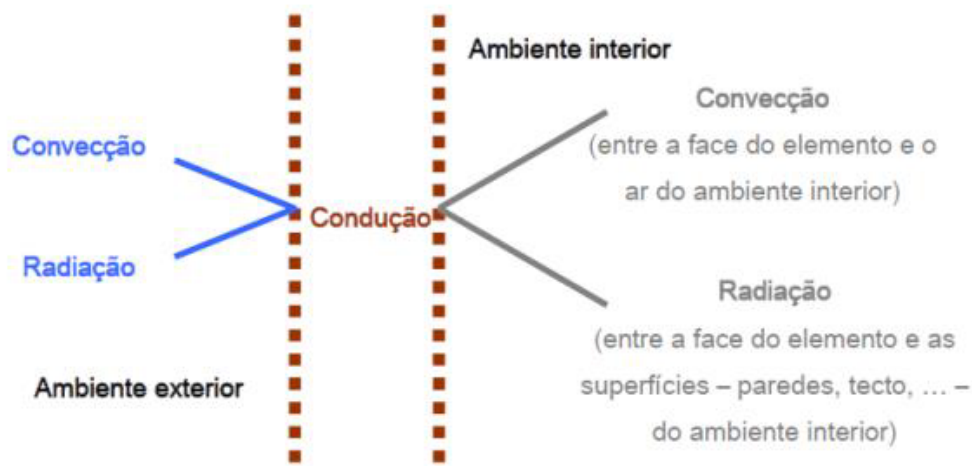


Fig. 3.40 – Exemplo ilustrativo de processos de transmissão de calor no caso duma envoltória vertical.

O desempenho energético dos edifícios depende em grande medida das características termofísicas dos elementos construtivos que constituem a envoltória sendo que os parâmetros mais importantes utilizados para efeitos dessa caracterização são o U e o R . O Coeficiente de Transmissão Térmica (U) de um elemento representa a quantidade de calor que o atravessa, por unidade de tempo e superfície, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre os ambientes que separa. [41]

Este parâmetro pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (4)$$

onde:

R_{si} ; R_{se} : Resistência térmica superficial interior e exterior, respetivamente [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$].

R_j : Resistência térmica da camada j [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$].

A resistência térmica superficial, representa o efeito da convecção e da radiação, sendo que o seu valor varia em função de diversos fatores, tais como rugosidade da superfície, velocidade do ar, posição da superfície, entre outros. Como tal, na prática são utilizados valores convencionais, conforme o indicado na figura. 3.42.

Sentido do fluxo de calor	Resistência Térmica Superficial [m ² .°C/W]		
	Exterior --- $\bar{R}_{se}$	Local não aquecido (3) R_{se}	Interior --- $\bar{R}_{si}$
(1) Horizontal	0,04	0,13	0,13
(2) Vertical ascendente	0,04	0,10	0,10
descendente	0,04	0,17	0,17

(1) Aplicável a paredes (até mais ou menos 30° com a vertical).

(2) Aplicável a coberturas e pavimentos.

(3) Os valores indicados traduzem o facto de, no caso do cálculo do coeficiente de transmissão de um elemento que separa um local não aquecido de um local aquecido, se adoptar $R_{se} = R_{si}$.

Fig. 3.41 – Resistências térmicas superficiais [41]

A resistência térmica de cada camada homogénea obtém-se através da seguinte expressão:

$$R_j = \frac{e_j}{\lambda_j} \quad (5)$$

onde:

e_j : Espessura da camada homogénea j . [m]

λ_j : Coeficiente de condutibilidade térmica da camada j [W/(m.°C)].

Os valores de coeficientes de condutibilidade térmica de camadas homogéneas ou não homogéneas podem ser obtidos através de consulta junto das empresas fabricantes de materiais detentoras de documentos de homologação ou através de bibliografia como por exemplo o ITE 50 do LNEC.

3.7.3. PONTES TÉRMICAS

Segundo a norma EN-ISO 10211 (2007), uma ponte térmica corresponde a qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada. Essa alteração pode ser causada pela existência localizada de materiais de diferentes condutibilidades térmicas e/ou por uma modificação na geometria da envolvente, como é o caso das ligações entre diferentes elementos construtivos. Em termos de fenómeno físico, nas zonas de pontes térmicas as linhas do fluxo de calor deixam de ser retilíneas, aspeto característico de um processo unidirecional e tomam as direções em que a resistência oferecida à passagem de calor, é menor. Esta particularidade transforma a transmissão de calor nessas

zonas num processo bidimensional ou mesmo tridimensional. Em termos práticos, as pontes térmicas têm como efeito um acréscimo das trocas de calor através da envolvente, relativamente a uma situação base que não contemple esse efeito, levando ao aumento dos consumos energéticos de um edifício e a uma distribuição heterogénea de temperaturas nos paramentos. As pontes térmicas resultam sempre duma heterogeneidade, quer seja de ordem geométrica quer seja de ordem estrutural. Os casos mais comuns são a transição entre materiais com diferentes condutibilidades térmicas, alterações na espessura de um elemento e diferenças entre áreas internas e externas, como é o caso que ocorre nos encontros entre paredes, ou seja, os cunhais, entre paredes e pavimentos e entre paredes e tetos. Em todos estes casos, o fluxo de calor segue a trajetória com menor dispêndio de energia, ou seja, procura o caminho em que a resistência térmica é menor. As pontes térmicas, devido às maiores taxas de perdas de calor induzidas, acusam uma temperatura superficial mais baixa do que a da zona corrente, originando heterogeneidades na distribuição das temperaturas faciais interiores dos elementos, que potenciam o risco de condensações e o consequente aparecimento de patologias construtivas e funcionais. Atualmente os edifícios possuem sempre isolamento térmico para fazer face às exigências regulamentares de limitação das necessidades energéticas de climatização. Em ambos os casos as pontes térmicas surgem quando o isolamento térmico não é homogéneo ao longo de toda a envolvente. Na zona das portas e janelas, é difícil garantir uma ligação eficaz do isolamento às caixilharias, o que dificilmente elimina a ponte térmica no enquadramento dos vãos. A correção das pontes térmicas deve ser efetuada em função do tipo de pormenor construtivo que a causa, procedendo ao reforço do isolamento térmico nessa zona de modo a minimizar o seu efeito. Outros problemas associados às pontes térmicas, além do aumento dos gastos energéticos, são as patologias construtivas e a redução dos níveis de conforto associados à ocorrência de fenómenos de condensação motivados pela diminuição da temperatura dos paramentos nas zonas de pontes térmicas. As humidades de condensação nos edifícios são muito problemáticas, originando gastos adicionais em manutenção, problemas de durabilidade dos materiais, redução do conforto e o aparecimento de fungos e bolores que podem levar à insalubridade do ar e do restante ambiente envolvente. A degradação dos edifícios devido à ação da humidade é o fator com maior peso na limitação da vida útil dos edifícios. A humidade nos edifícios pode ter várias origens, mas o fenómeno que surge associado às pontes térmicas é o da condensação. A humidade de condensação deve-se à saturação do ar pelo vapor de água em zonas onde a temperatura é inferior à temperatura de orvalho. Atendendo ao abaixamento das temperaturas superficiais nas zonas de pontes térmicas, percebe-se que estas são zonas potenciais de ocorrência de condensações, sobretudo no Inverno. Assim, uma das formas de prevenir a ocorrência de condensações nos locais, para além da que consiste em promover a sua ventilação, isto é, a prevenção de condensações por redução da quantidade de vapor de água presente no ar, é a de aumentar o isolamento térmico nas zonas de pontes térmicas, ou seja, a prevenção de condensações por aumento das temperaturas superficiais e, consequentemente, por afastamento destas da temperatura de orvalho [42].

3.8. EXIGÊNCIAS DE ADEQUAÇÃO AO USO

As exigências de adequação ao uso de paramentos opacos dividem-se em cinco tipos: durabilidade, manutenibilidade; flexibilidade e adaptabilidade; integração com o ambiente; economia e custos globais. Embora nenhuma destas exigências seja requisito essencial na Diretiva de Produtos de Construção, as exigências de durabilidade, manutenibilidade, economia e integração com ambiente, integram-se no objetivo de adequação ao uso desta diretiva. De acordo com esta diretiva, no anexo I, “os produtos devem permitir a realização de obras que (no seu todo e nas suas partes) estejam aptas para o uso a que se destinam, tendo em conta fatores de rentabilidade económica, e que, para tal, satisfaçam seis requisitos essenciais que devem, em condições normais de manutenção, ser satisfeitos durante o tempo

de vida economicamente razoável”. O período de vida economicamente razoável de um produto pressupõe a inclusão de todos os custos e aspetos ambientais durante o período durante o qual o desempenho das obras será garantido a um nível compatível com a satisfação das exigências essenciais [33].

No que toca à durabilidade podemos dividir este parâmetro em três, tendo em vista as condições do uso:

- Ataque “físico”: cargas mecânicas, abrasão, desgaste, instabilidade, incompatibilidade, humidade, temperatura, gelo/desgelo, radiação UV, etc.
- Ataque químico: chuva incidente e ventos fortes, corrosão, carbonatação, sais, contaminantes, poluentes, fragmentação, etc.
- Ataque biológico: bolor, plantas e animais [33].

O betão pré-fabricado é um material resistente ao desgaste que oferece desempenho estrutural duradouro sem a necessidade de acabamentos adicionais e pouca manutenção.

É particularmente útil para áreas vulneráveis a altos níveis de desgaste ou de difícil acesso. Este acabamento durável oferece economia adicional de custo do ciclo de vida por meio de uma redução na manutenção (e substituição) que seria necessária para outros acabamentos de "desgaste". O betão também pode ser projetado para um bom desempenho em terrenos agressivos e em condições ambientais adversas, como aplicações marítimas e costeiras.

A maior parte dos fixadores para painéis em betão pré-fabricado não pode ser inspecionada uma vez instalada. Portanto, além dos requisitos relativos à resistência mecânica e à ductilidade, os materiais dos fixadores devem apresentar uma boa resistência contra a deterioração física e química quando expostos aos agentes agressivos no meio ambiente.

A fachada deve ser concebida e construída de modo a satisfazer as necessidades dos utentes ao longo do tempo, resistindo aos ataques dos agentes acima referidos [6], [33].

Quanto à manutenibilidade a fachada deve ser concebida e construída de modo a garantir e permitir a realização de ações de limpeza, reparações localizadas, substituição durante a vida útil dos edifícios, através de estratégias de manutenção pró-ativas. No caso dos painéis de fachada, estes não constituem grandes entraves nas ações de manutenção, uma vez que são de fácil instalação e colocação.

Todos os aspetos acima referidos estão forçosamente interligados com o “Life Cycle Analysis” (LCA) de cada material pois aquando da sua escolha, preocupamo-nos em saber se este irá durar o máximo de tempo possível sem exigir um esforço financeiro astronómico juntamente com ações de reparação, manutenção ou substituição. Um exemplo prático de um material com um LCA alargado é o betão pré-fabricado em que excede em muito o regulamento estabelecido, atingindo mesmo 100 anos com toda a sua eficácia. O processo de produção deste material em massa garante um baixo custo de produção. Mas também é económico porque é um material reutilizável [43].

Por último a fachada deve ser concebida e construída de modo a limitar os custos globais, incluindo custos iniciais, custos de manutenção, demolição e reutilização.

4

CASO DE ESTUDO – FACHADA DA RESIDÊNCIA DE ESTUDANTES “STUDYOU” NO PORTO

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No presente capítulo irá ser feita uma descrição do sistema de pré-fabricação 2D, (segundo as categorias do sistema “OSM”), do projeto da residência de estudantes, que recai no sistema de fachada em painéis de betão pré-fabricado. Essa descrição irá ser baseada nos parâmetros abordados nos capítulos 2 e 3, de forma a ter uma ideia clara das condições impostas no projeto e o efeito que tiveram neste.

No capítulo 5 irá ser analisado a viabilidade das soluções apresentadas neste capítulo.

4.2. APRESENTAÇÃO DO EMPREENDIMENTO “STUDYOU”

O GEG foi o parceiro escolhido para concretizar a visão do gabinete de arquitetura “Ventura+Partners”.

Este projeto foi um marco de sucesso do desenvolvimento de projetos no GEG, cumprindo com sucesso os prazos e objetivos do cliente.

O edifício “Study you” é uma nova residência de estudantes do Porto, localizada no polo universitário da Asprela. Conta com uma área de implementação de 770 m², sete pisos e uma cave, composta por 200 suítes e várias zonas comuns, incluindo sala de estudo, cinema, bar e jardim.

O GEG acompanhou o desenrolar do projeto desde o seu início, de maneira a cumprir com os prazos e com o cunho de garantia de qualidade, contribuindo assim para a abertura de uma nova residência para os estudantes no Porto.



Fig. 4.1 – Residência de estudantes Studyou, Asprela, Porto [47]

4.3. MOTIVO DA ESCOLHA DA FACHADA EM MÓDULOS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO

A opção por painéis de fachadas em betão pré-fabricado deveu-se sobretudo a motivos de ordem financeira e à rapidez de montagem em obra. Existe uma vantagem em termos de custos e planeamento, quando comparado com a construção em alvenaria para a mesma área de fachada. Isto, sem nunca esquecer da importância do bem-estar do ocupante, da funcionalidade do elemento construtivo e do peso da pegada ecológica durante e após a execução do projeto.

A SPRAL, foi o parceiro escolhido para a elaboração e fabrico dos módulos de fachada pré-fabricada. Com sede em Ílhavo, Aveiro, o grupo dispõe de diversos serviços desde orçamentação, apoio técnico na conceção e elaboração de projetos, execução dos mais diversos elementos estruturais e respetivo transporte e montagem.

4.4. O PROJETO

De forma que o projeto cumprisse com todos os objetivos delineados foi importante definir desde cedo que tipo de painéis iriam ser usados, que quantidade, que dimensão teriam, onde e de que forma iriam ser colocados, que tempo iria demorar a sua montagem, etc.

A existência de apenas dois tipos de módulos permitiu seguir um padrão em termos dimensionais, arquitetónicos e funcionais que foi aplicado por toda a fachada do edifício. Relativamente ao fator económico e de planeamento foi possível estimar os custos e tempos de produção, de transporte, de montagem, de mão de obra especializada e de aluguer de equipamento. Resumindo por poucas palavras através da padronização dos painéis de fachada previu-se o cumprimento dos prazos estipulados e um melhor controlo de qualidade. Sendo estas umas das principais vantagens da construção “off-site”. A figura 4.3 representa o projeto de execução do piso 5, este desenho foi repetido desde o piso 0 até ao último piso, (piso 7).

A fachada do edifício é composta por 62 painéis maciços de betão pré-fabricado de 120 mm de espessura e 184 painéis sanduíche com 230 mm de espessura. Apesar de ambos painéis serem do tipo não resistente, a grande diferença entre ambos está nas suas propriedades funcionais, um contém uma camada isolante no meio de duas camadas de betão e outro contém apenas uma camada de betão maciço.

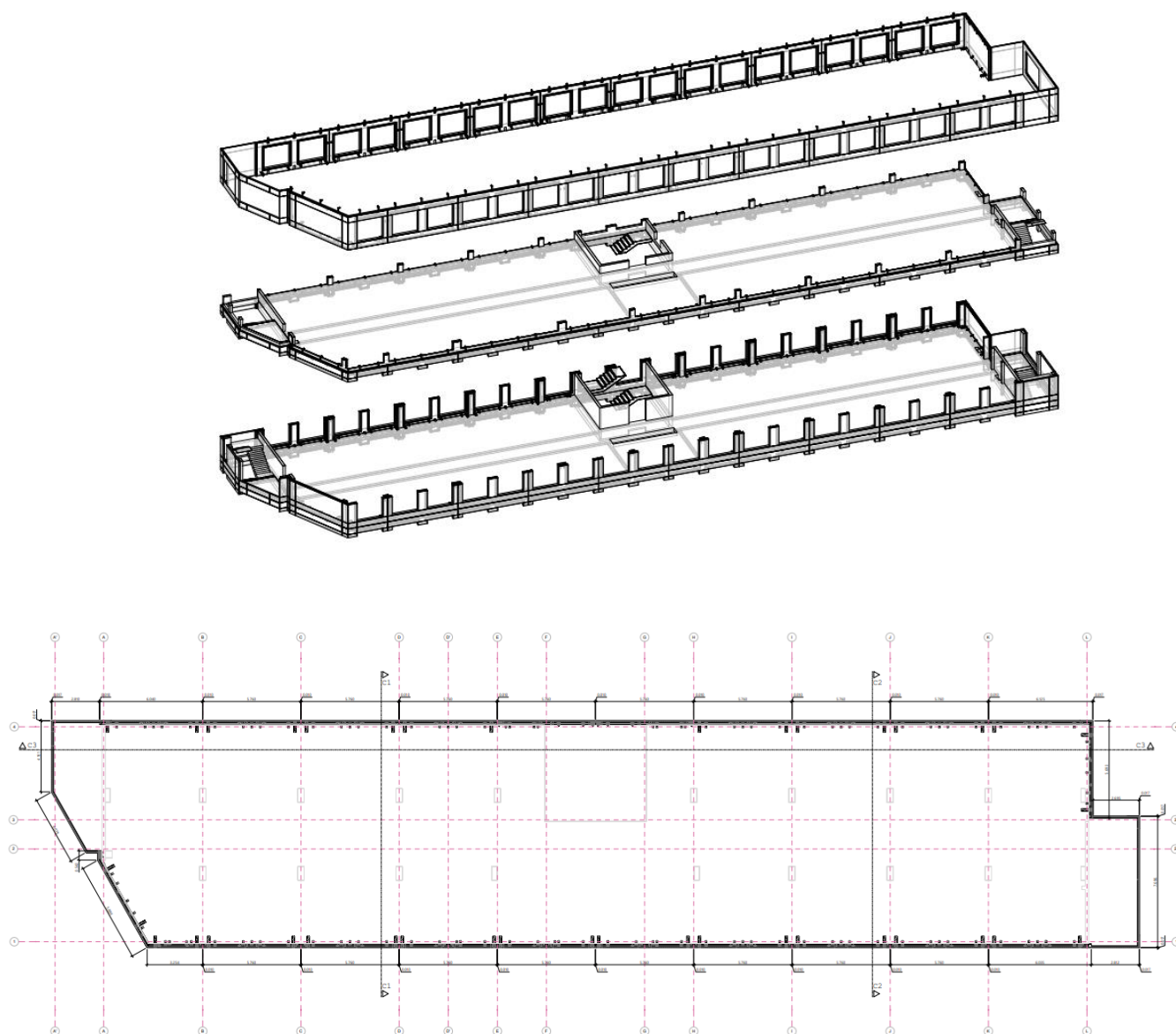


Fig. 4.2 – Projeto de Execução da fachada do piso 5 [47]

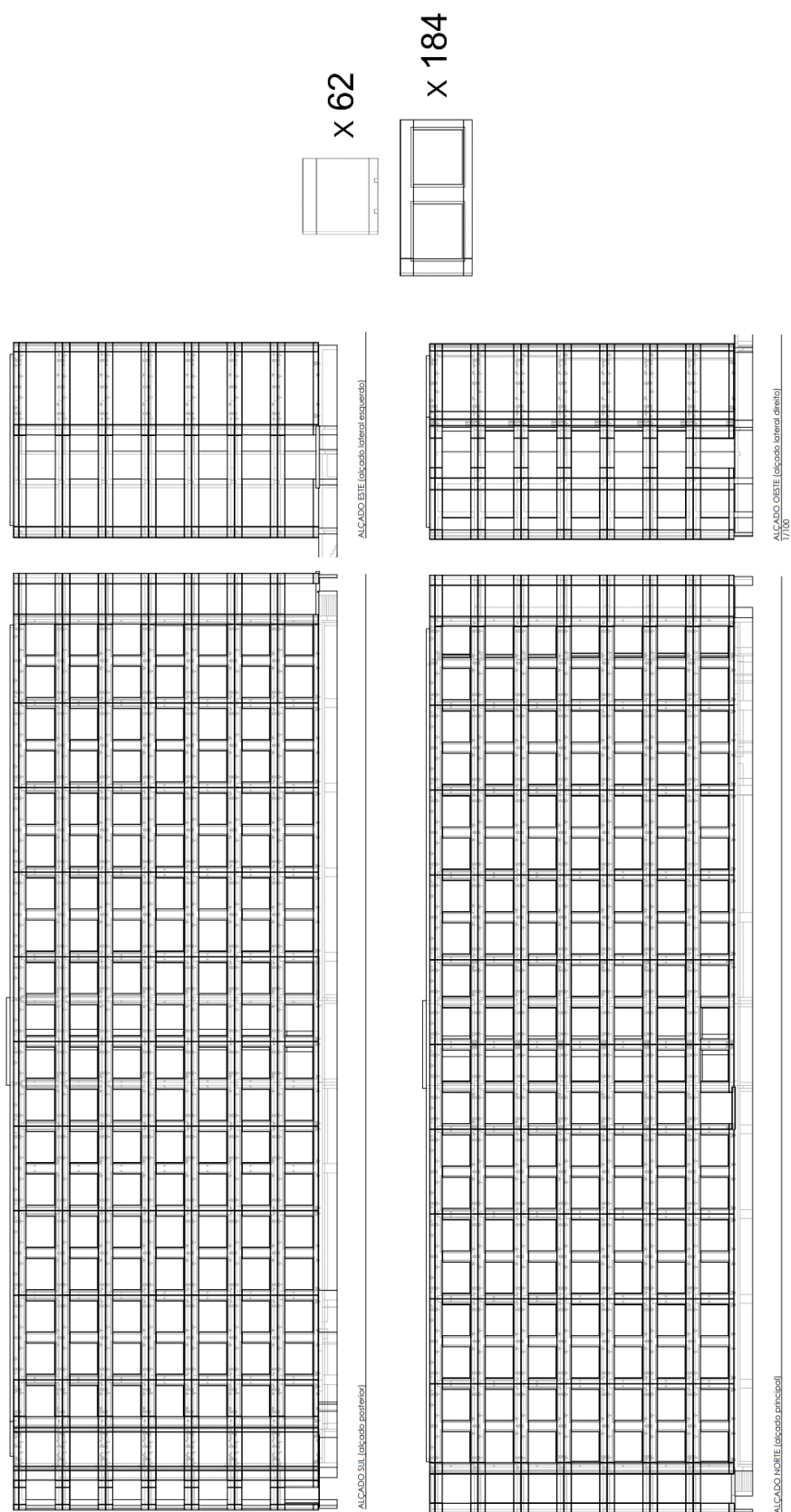


Fig. 4.3 – Quantidade de cada tipo de painel usado para cada alçado [47]

O painel sanduíche existe em maior quantidade devido às suas propriedades térmicas e acústicas que são essenciais para proporcionar um bom nível de conforto ao ocupante, e é por essa razão que é montado em zonas da fachada correspondentes às suites e salas comuns. De realçar que todos os painéis sanduíche possuem aberturas para a posterior instalação do vão envidraçado. Já o painel maciço é sobretudo usado para zonas de escadas de incêndio e onde não obriguem a grande conforto térmico e acústico.

4.4.1. SISTEMA E PAINÉIS

4.4.1.1. Sistema de Pré-fabricação

O sistema de pré-fabricação usado neste projeto foi o parcial fechado, já que apenas a parte referente ao painel em betão pré-fabricado de fachada foi produzido em “off-site”. Quanto ao resto foi maioritariamente produzido em obra. Fechado, já que foi a SPRAL a única responsável pelo seu fabrico totalmente “off-site”.

4.4.1.2. Painel Sanduíche

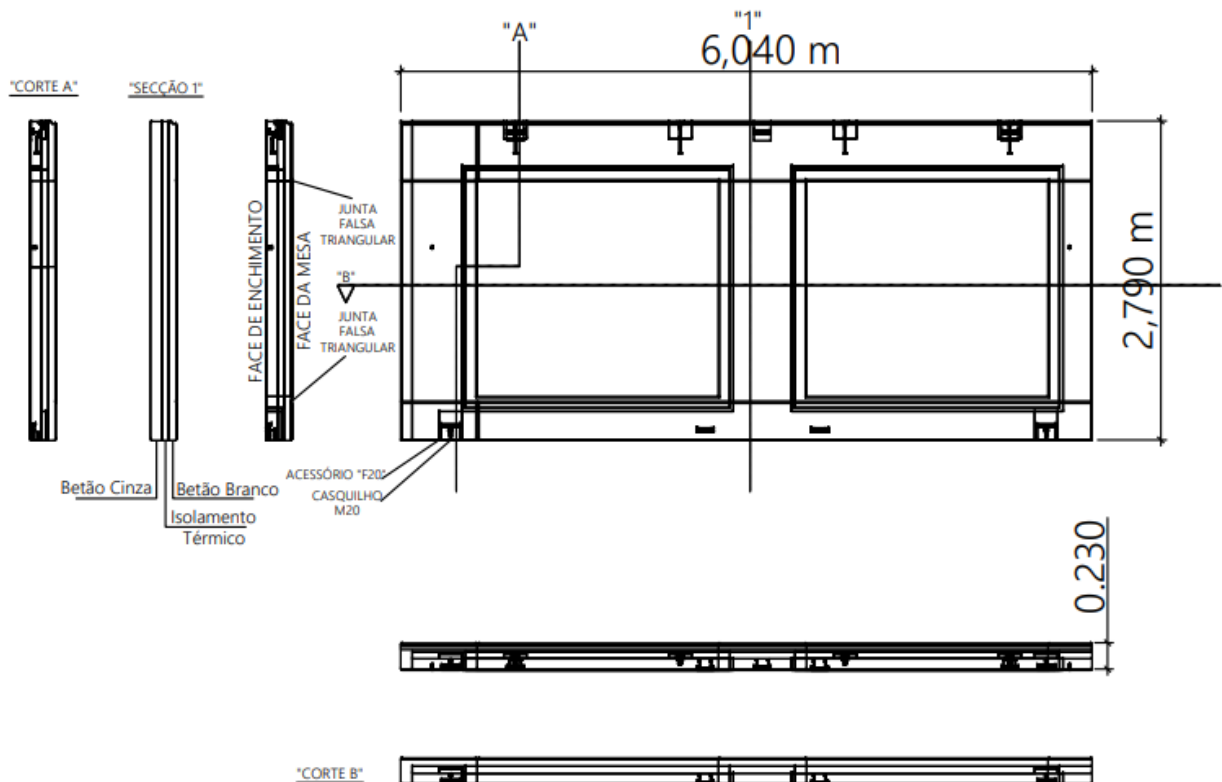


Fig. 4.4 – Modelo Ilustrativo do painel sanduíche [48]

Quadro 4.1 – Características Gerais do Painel Sanduíche em Betão Pré-Fabricado

Modelo base do painel sanduíche de Betão Pré-fabricado	
Espessura: (m)	0,230
Área opaca Tipo: (m ²)	9,12
Peso: (kg)	2318
Cor:	Branco
Textura:	Lisa
Vão envidraçado incluído: (S/N)	Não
Nº. Total de painéis:	184
Custo de fabricação: (€/m ²)	105

4.4.1.3. Painel Maciço

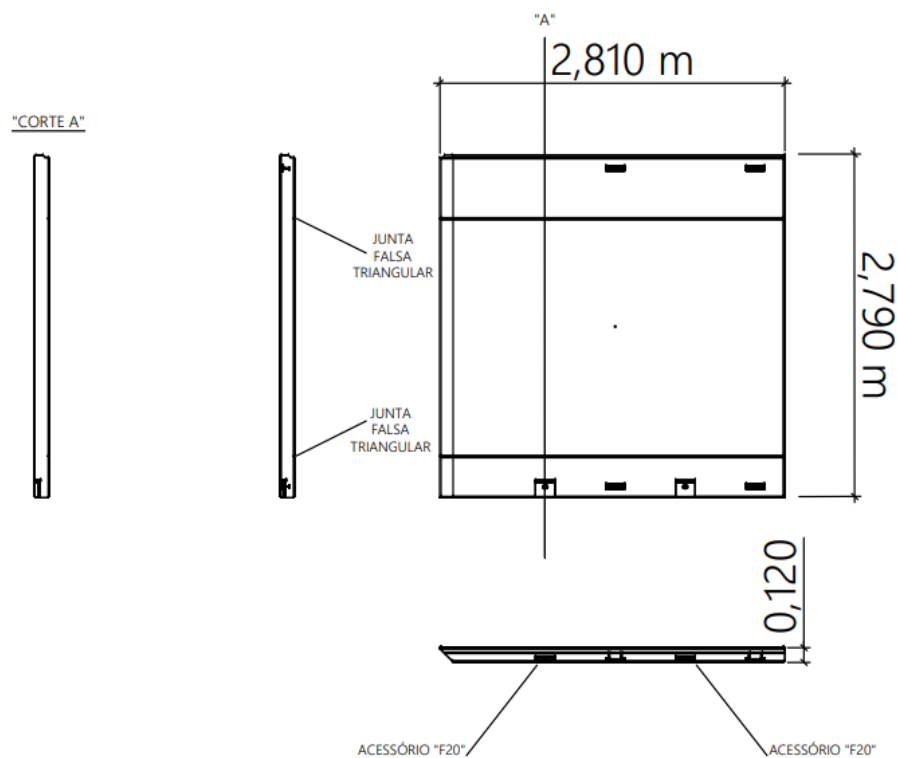


Fig. 4.5 – Modelo Ilustrativo do painel maciço [48]

Quadro 4.2 – Características Gerais do painel maciço em betão pré-Fabricado

Modelo base do painel base maciço de Betão Pré-fabricado	
Espessura: (m)	0,120
Área Tipo: (m ²)	7,9
Peso: (kg)	2295
Cor:	Branco
Textura:	Lisa
Nº. Total de painéis:	62
Custo de fabricação: (€/m ²)	55

4.4.1.4. Dimensionamento e distribuição dos painéis

O desempenho esperado pelo painel influenciou no seu dimensionamento e posteriormente na sua localização na fachada.

O fabricante tentou dentro do possível limitar o número de moldes com dimensões diferentes, de maneira a reduzir custos e tempos de fabricação/ montagem, visando uma repetição fácil e eficiente.

Como já foi referido anteriormente, neste projeto, os painéis de fachada dividem-se em dois tipos: sanduíche e maciços, o primeiro, (com 23 cm de espessura), é colocado em zonas onde o conforto do ocupante é imprescindível, já o segundo, (com 12 cm de espessura), é colocado em zonas exteriores (escadas de incêndio), onde essa preocupação deixa de ter tanto peso.

Apesar da existência de apenas dois tipos de painéis com espessura diferente, tanto o comprimento do painel sanduíche e maciço sofreram variações para que fosse possível um revestimento uniforme da fachada. Já a altura do molde manteve-se praticamente constante, nos 2,790 m, com exceção de dois casos no alçado Este e Oeste, ambos do tipo maciço.

No alçado Norte e Sul, o comprimento do painel sanduíche varia entre três medidas, sendo o mais repetido o molde com 5,670 m, que preenche a maior parte do alçado. Na zona onde o desempenho térmico e acústico não é tão importante, coloca-se um painel maciço com 2,830 m de comprimento.

No alçado Este, apenas existe um painel sanduíche, com 5,693m de comprimento, e três painéis maciços posicionados na zona de escada de incêndio, todos de dimensões diferentes, enquanto no alçado Oeste, a diferença depara-se pela existência de mais um painel sanduíche, ainda que com comprimentos diferentes.

Para além da espessura, comprimento e altura, é preciso ter em conta que tipo de fixações vão ser necessárias, para garantir uma boa segurança estrutural. Este último é influenciado pela ligação à estrutura do edifício, sendo ela uma laje ou um pilar.

No total o fabricante necessitou de produzir cerca de 101 painéis diferentes para o preenchimento total da fachada do edifício.

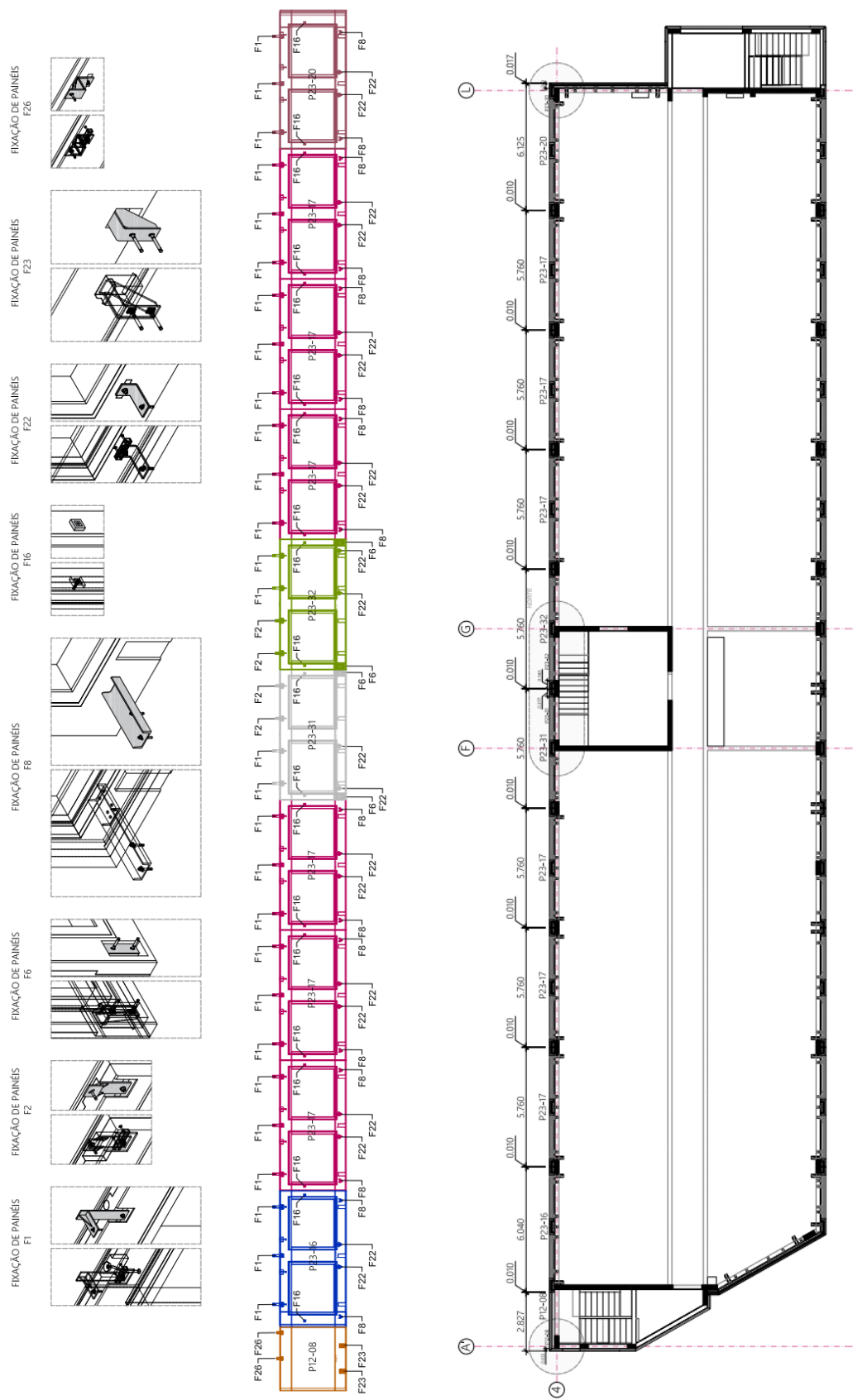


Fig. 4.6 – Ilustração dos diferentes tipos de fixação usados nos painéis do alçado Norte [47]

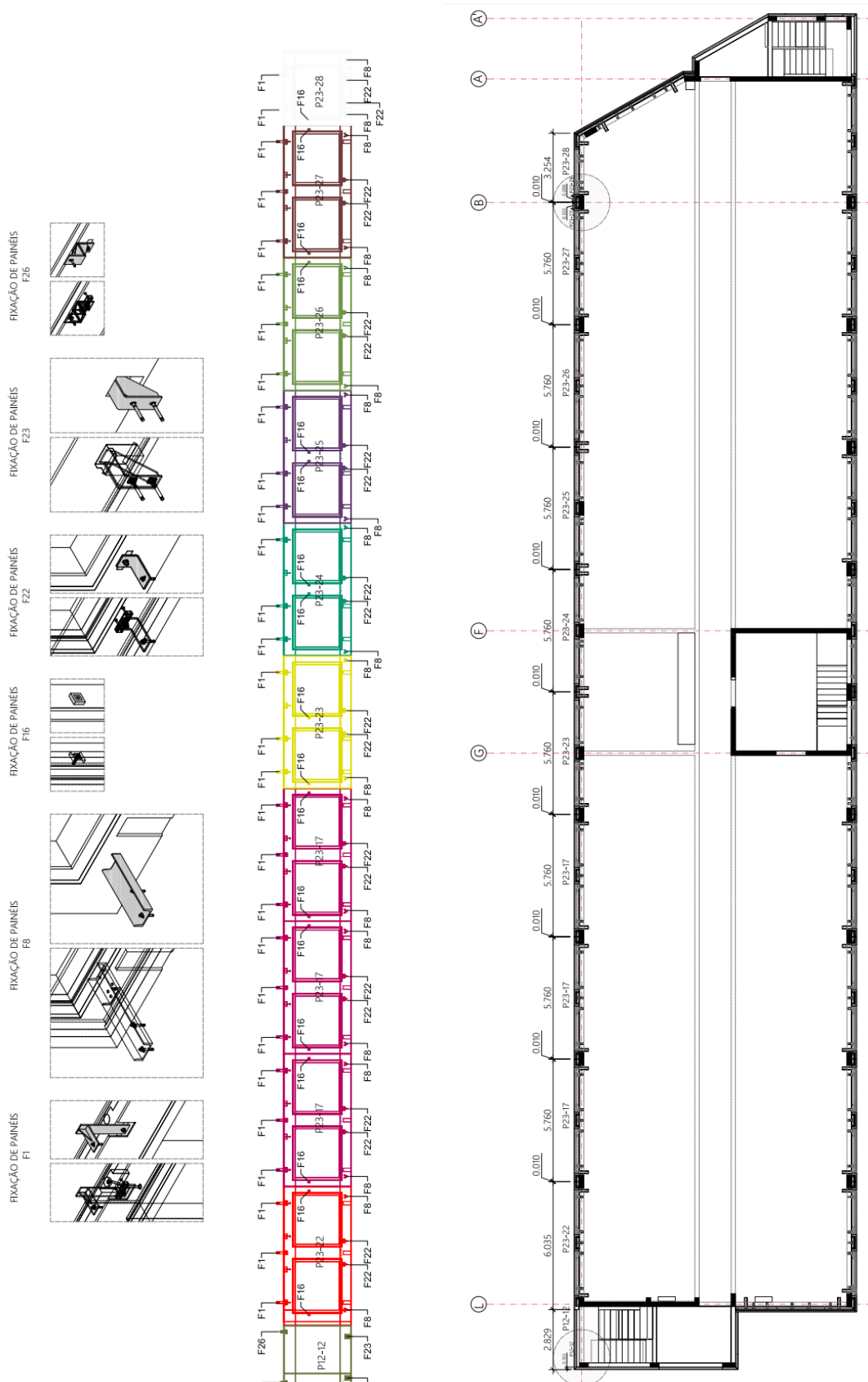


Fig. 4.7– Ilustração dos diferentes tipos de fixação usados nos painéis do alçado Sul

[47]

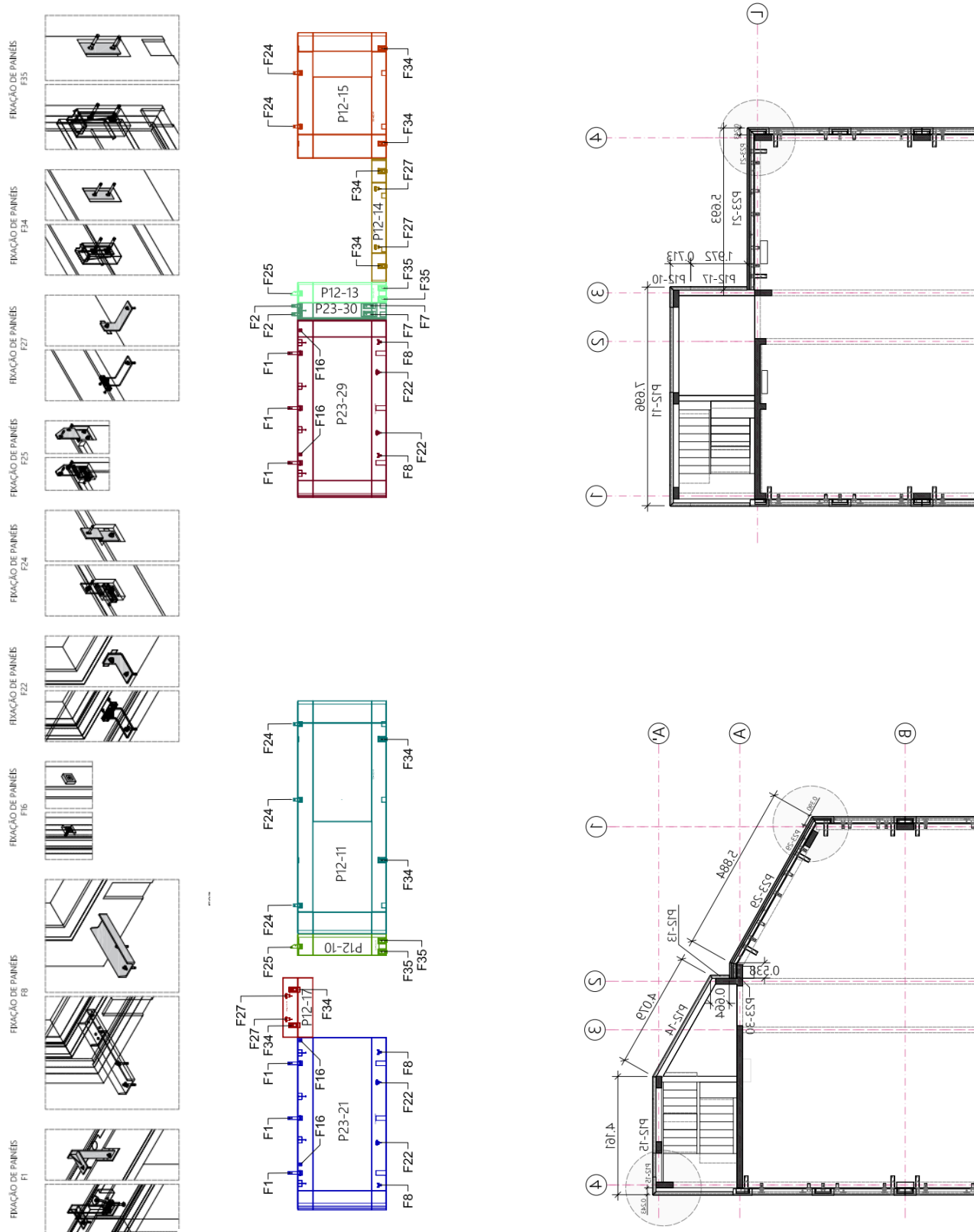


Fig. 4.8 – Ilustração dos diferentes tipos de fixação usados nos painéis do alçado Este/ Oeste

[47]

4.4.2. ASPETOS RELEVANTES NO DESEMPENHO DO PAINEL

Ambos os tipos de painéis apresentam um comportamento não estrutural, partilham funcionalidades em termos de fixação à estrutura, em termos de tolerâncias do betão (1 cm), em termos de material usado na sua composição (betão), em termos de cor e de textura das camadas.

No entanto o painel sanduíche diferencia-se do painel maciço no seu objetivo de responder às necessidades de conforto do ocupante em termos térmicos, acústicos e de ligação com o exterior.



Fig. 4.9 – Pormenor construtivo da fachada, (não está à escala) [48]

4.4.2.1. Comportamento estrutural do painel

Quanto ao comportamento estrutural ambos os painéis resistem ao seu próprio peso e a todas as outras forças e cargas apropriadas, como sísmica, vento, neve, restrição de mudanças de volume e efeitos do movimento do sistema de suporte.

No painel sanduíche usaram-se conetores de apoio (1,5x175x80 mm) para suportar a ação do vento e a lâmina externa. Para resistir às ações horizontais e estabelecer a correta distância entre as duas lâminas de betão, sem colocar limitações aos movimentos laterais usou-se os espaçadores. Ambos os conetores são da marca PHILIPP, em aço inoxidável, o que permite uma resistência duradoura à corrosão.

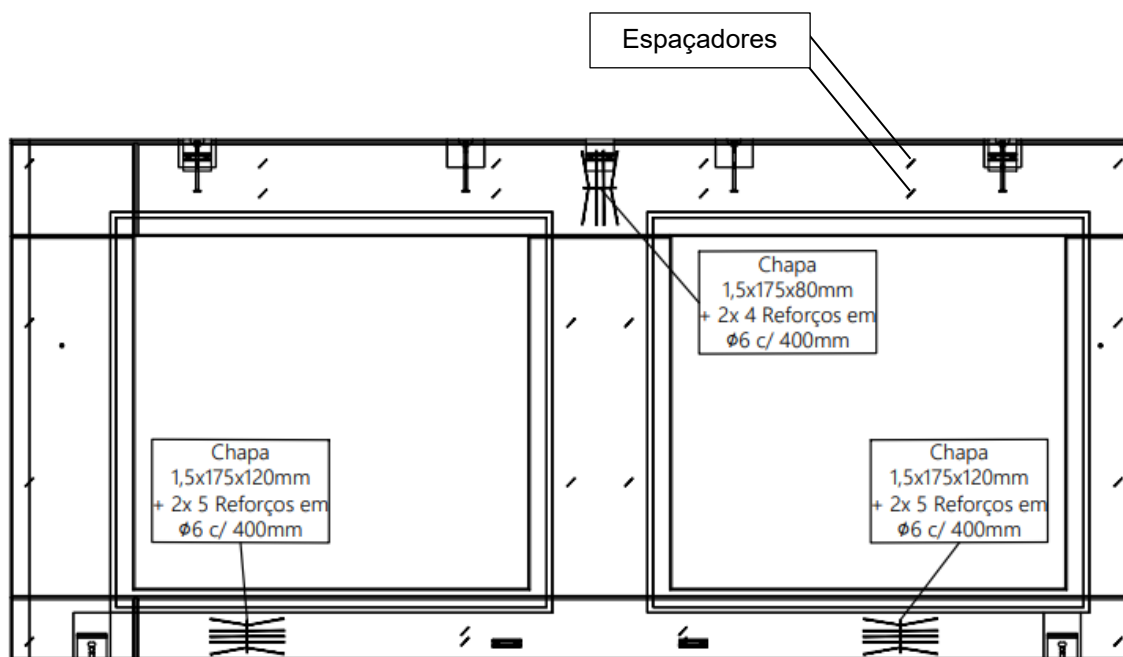


Fig. 4.10 – Fixações do painel sanduíche [48]

Quanto às chapas planas usaram-se três. Duas na parte inferior com o propósito de distribuir de igual forma cargas referentes ao peso próprio e a as cargas verticais. E uma na parte superior, numa posição horizontal que serve como ponto de suporte para a camada exterior em betão.

O painel maciço como só apresenta uma camada não possui qualquer ligação, a não ser a própria armadura que oferece a resistência/ consistência característica do betão armado.

No que toca às fixações dos painéis, estas são maioritariamente do tipo aparafusadas e dependem do posicionamento do painel na fachada, já que o elemento da estrutura a que vai fazer ligação influencia na escolha da fixação, sendo este na maioria dos casos, lajes. As fixações do painel situadas na parte superior possuem um comportamento estrutural face às cargas excêntricas, enquanto as fixações situadas na parte inferior do painel possuem sobretudo comportamento estrutural face a cargas do peso próprio e a movimentações horizontais.

4.4.2.2. Estanqueidade das Juntas

As juntas dos painéis em betão pré fabricado podem se dividir entre horizontais ou verticais, sobrepostas ou justapostas, de um ou dois estágios.



Fig. 4.11– Juntas do painel de fachada da residência de estudantes [47]

Neste caso de estudo as juntas são seladas, a estanquidade é garantida através de um material selante e por meio da sua geometria, ou seja, sobrepostas ou justapostas. Assim sendo, pode-se classificar em dois tipos: as de um estágio e as de dois estágios. Como tal, as juntas de um estágio, contêm apenas uma linha de defesa, devido ao seu formato geométrico simples, isto é, justapostas, em que o selante posiciona-se em apenas uma das bordas. Contudo as juntas usadas foram as de dois estágios, que funcionam através do princípio de criar uma defesa para a água de precipitação, por intermédio de sua própria geometria, isto é, estão sobrepostas e contam com a presença de selantes nas duas bordas ao apresentam duas linhas de defesa a favor da estanqueidade à água da chuva e ao ar, tal como ilustram as figuras 4.12 e 4.13.

Segundo a tabela 2 da norma DIN 18541-1, a junta horizontal com 6,010 m de comprimento, tem 25 mm de largura e o selante tem uma profundidade de 15 ± 3 mm. A junta vertical contém 2,790 m de comprimento, tem 15 mm de largura e o selante tem uma profundidade de 10 ± 2 mm.

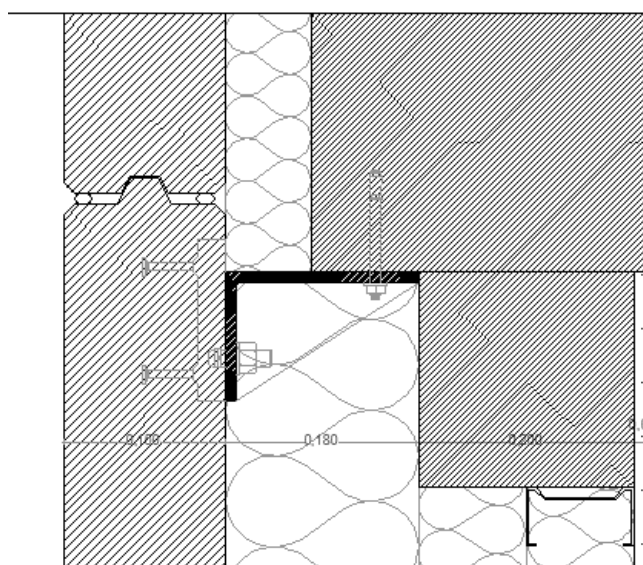


Fig. 4.12– Corte ortogonal ao plano do painel, junta horizontal [48]

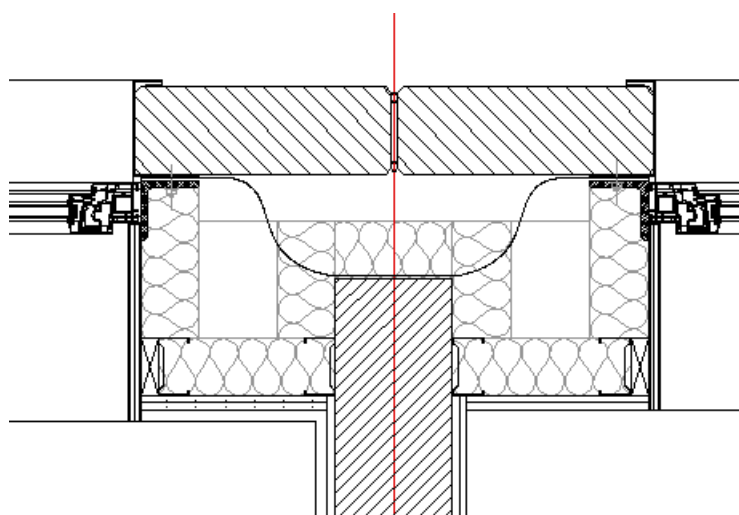


Fig. 4.13 – Corte horizontal ao plano do painel, junta vertical [48]

Relativamente à espuma de polietileno – cordão de neopolene de diâmetro variável consoante o comprimento da junta, encontra-se no mercado em perfil cilíndrico de célula fechada para preenchimento das juntas onde se irá aplicar posteriormente um material selante e está disponível em diversas dimensões, dependendo do fabricante, sendo este um material de preenchimento em juntas, sob qualquer mástique de aplicação a frio, controlando a espessura do cordão mástique e limitando a profundidade, promovendo um comportamento adequado do selante. Quanto ao mástique aplicado, foi utilizado um selante da marca Sika modelo Sikaflex 11FC purform (Catálogo Sika, 2022), que corresponde a um mástique de elevado desempenho para juntas de dilatação, este produto apresenta uma excelente resistência face a temperaturas e humidades elevadas como também a raios UV, estando disponível em diversas cores.



Fig. 4.15 – Cordão Neopolene



Fig. 4.14 – Aplicação da cola mástique em juntas de dilatação [49]

4.4.2.3. Desempenho térmico:

O desempenho térmico deve ser apenas considerado para o painel sanduíche uma vez que painel maciço não tem essa funcionalidade como objetivo.

Existe diversos aspetos a considerar quando se discute o comportamento térmico de um painel, tais como: número de camadas do painel, existência de camada isolante e respetiva espessura, material da camada isolante, existência ou não de pontes térmicas derivadas das ligações entre camadas e do caixilho do vão envidraçado, estanqueidade das juntas ao ar e à água, e posterior isolamento necessário pelo interior para garantir o conforto térmico adequado.

O cálculo dos coeficientes de transmissão térmica da parede de fachada e na zona de pontes térmicas planas, (PTP), foi feito com recurso ao anexo 1, do ITE50, (ver quadro 4.4.). Os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo que é regulamentado, segundo a tabela 1, da portaria n.º 138-I/2021, para a zona climática II, em que se localiza o edifício de habitação.

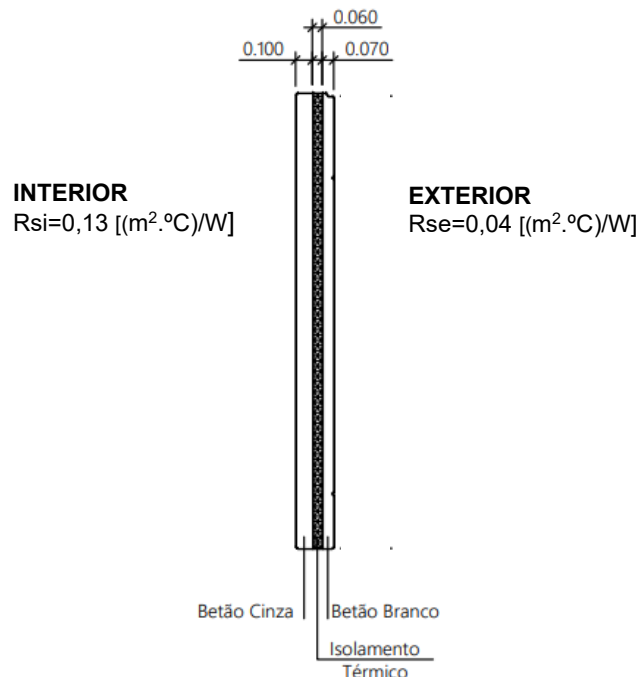


Fig. 4.16 – Pormenor do painel sanduíche pré-fabricado [48]

Quadro 4.3 – Coeficiente de transmissão térmica da parte opaca

Camadas	Material	Espessura (m)	Condutibilidade Térmica valor de cálculo λ [W/(m.°C)]	Coeficiente de Transmissão Térmica “U” [W/(m².°C)]
Painel sanduíche	Betão Exterior	Betão C30/37	0,070	0,21
	Isolante	Poliestireno Extrudido (XPS)	0,060	
	Betão Interior	Betão C30/37	0,100	
Caixa de ar	-	0,168	1/0,18	
Isolante	Poliestireno Extrudido (XPS)	0,100	0,037	
Revestimento	Placa dupla de gesso cartonado	0,025	0,25	

Segundo a ficha técnica do fabricante dos conetores entre camadas, PHILIPP, está assegurado um bom desempenho térmico do material de modo a garantir uma ponte térmica reduzida.

Relativamente à instalação do vão envidraçado, esta foi feita sobre o betão cinza, o que deixar querer a existência de uma ponte térmica nesse ponto de contacto entre o caixilho e o betão.

A janela é fixa, composta por dois vidros de área mais pequena, e um maior com melhor isolamento acústico, apesar terem todos a mesma espessura, 28 mm. O caixilho é em PVC com corte térmico.

O cálculo dos coeficientes de transmissão térmica do vão envidraçado foi feito com recurso ao anexo 3, do ITE50. Tal como os valores obtidos para a parte opaca, estes também estão de acordo com a regulamentação referente à tabela 6, da portaria n.º 138-I/2021.

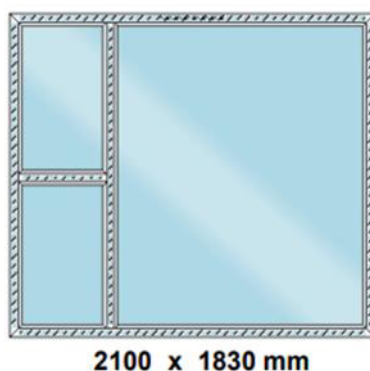


Fig. 4.17– Vão envidraçado do painel sanduíche

Quadro 4.4 – Coeficiente de transmissão térmica entre a laje e o painel

Camadas	Material	Espessura (m)	Condutibilidade Térmica valor de cálculo λ [W/(m.°C)]	Coeficiente de Transmissão Térmica "U" [W/(m².°C)]
Painel sanduíche	Betão Interior	Betão C30/37	0,100	0,38
	Isolante	Poliestireno Extrudido (XPS)	0,060	
	Betão Exterior	Betão C30/37	0,070	
Isolante	Lã rocha	0,030	0,040	

Quadro 4.5 – Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado

Elementos do Vão Envidraçado	
Elemento	Coeficiente de Transmissão Térmica "U" [W/(m².°C)]
Caixilharia em PVC c/ corte térmico lacada ral 5024	1,35*1
Vidro duplo temperado (6+16+8) mm ou (8+14+8) mm	1,10*2

*1: Uw

*2: Ug

4.4.2.4. Resistência ao fogo

O betão tem resistência inerente ao fogo - não queima e tem baixa condutividade térmica. Ao contrário de outros materiais, o betão não precisa de tratamentos adicionais para atingir os padrões de desempenho ao fogo. Este atinge a melhor classificação de incêndio possível de acordo com os padrões europeus de incêndio e mantém a capacidade estrutural por mais tempo do que outros materiais em caso de incêndio.

Para o caso do painel sanduíche, para além do próprio betão, é importante considerar a camada isolante no comportamento, contudo considera-se o painel como um todo na avaliação do comportamento e da reação ao fogo. Para tal, foi necessário recorrer ao EC2 parte 1.2 e à portaria n.º 135/2020, (Ver o quadro 4.6 e o quadro 4.7).

Quadro 4.6 – Classificação mínima do comportamento ao fogo dos painéis

Painel	Espessura (m)	Comportamento ao fogo ^{*3}	Reação ao fogo ^{*4}
Maciço	0,120	EI 90	≥ D-s3, d1
Sanduíche	0,230	EI 60/ 90	≥ D-s3, d1

Quadro 4.7 – Classificação mínima da reação ao fogo do vão envidraçado

Vão envidraçado	Reação ao fogo ^{*4}
Caixilharia	≥ D-s2, d1
Vidro	≥ C-s2, d0

^{*3} De acordo com o artigo 9 da portaria n.º 135/2020 foi possível determinar que a classe de resistência ao fogo mínima a cumprir para fachadas de edifícios com altura inferior a 28m é EI 60, no entanto, e de acordo com o EC2, a distribuição da armadura do betão maciço, assegura um bom comportamento face ao fogo com a categoria EI90. Já o painel sanduíche, constituído por duas camadas de betão separadas por uma camada de XPS, apresenta um comportamento face ao fogo bastante aceitável e dentro do parâmetro adequado, não terá um desempenho tão bom quanto o painel maciço, ainda que seja possível ser atribuída a mesma classe de resistência.

^{*4} Segundo o artigo 7 da portaria n.º 135/2020, o elemento terá de cumprir com uma classe igual ou superior a D-s3, d1, o que não será um problema devido às características do betão face ao fogo, ainda que não seja possível atribuir uma classe sem um ensaio em laboratório. A mesma classe terá de ser cumprida pelo painel sanduíche, mas de uma categoria inferior à atribuída ao painel maciço devido ao fraco desempenho face ao fogo da camada isolante. Quanto ao vão envidraçado, a classe de reação ao fogo mínima a cumprir pela caixilharia a ser D-s2, d1 e pelo vidro, C-s2, d0.

4.4.2.5. Desempenho acústico

O desempenho acústico do painel, é em muito semelhante ao térmico no que toca aos parâmetros a considerar, nomeadamente, o número de camadas que constituem o elemento, o material usado, a existência ou não do vão envidraço, etc. É um espelho do comportamento contra o fogo na forma como se avalia o elemento por inteiro e não camada a camada. Para determinar a redução acústica do painel sanduíche foi necessário recorrer a cálculos para determinar o R(médio) da solução heterogénea, este composto por dois tipos de vidro diferentes. O tipo e as dimensões do vão envidraçado foram fornecidos pelo fabricante, CAIXIAVE, assim como o coeficiente acústico, (caixilho + vidro). O primeiro cálculo do valor médio do R_w foi feito de acordo com a norma ISO 12354, em que o caixilho não foi tido em consideração por não prejudicar o isolamento acústico para os níveis testados. O segundo cálculo foi feito com recurso ao valor de R_w partilhado pelo fabricante.

Quadro 4.8 – Tipo e dimensões dos vidros

Vidro	Tipo	Área (m ²)
1	(RE) 33.1 Incolor/ 14 Argon / 6 Planitherm 4S	0,54
2	(RE) 33.1 Incolor/ 14 Argon / 6 Planitherm 4S	0,52
3	(RE) 44.1 Incolor/ 14 Argon / 6 Planitherm 4S	2,78

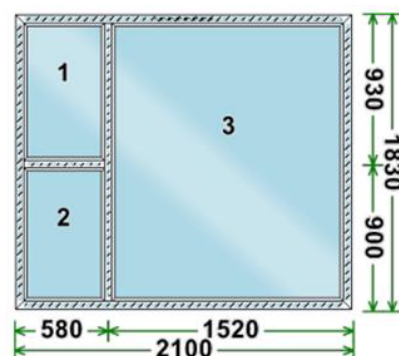


Fig. 4.18 – Dimensões do vão envidraçado

Quadro 4.9 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico

Painel sanduíche (Parte opaca)	Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000
	Redução sonora (dB)	43	47	45	47	54	62	54
	Rw	53						
	Ctr	-3						
	C	-1						

Quadro 4.10 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico

Vidro 1 & 2	Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000
	Redução sonora (dB)	22	23	24	36	44	46	50
	Rw	39						
	Ctr	-6						
	C	-2						

Quadro 4.11 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico

Vidro 3	Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000
	Redução sonora (dB)	23	24	25	37	45	47	51
	Rw	40						
	Ctr	-6						
	C	-2						

Quadro 4.12 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico

Painel sanduíche	Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000
	Redução sonora ponderada (dB) * ⁵	28	29	30	41	49	52	56
	Rw*	45						
	Ctr	-6						
	C	-2						

*⁵ Fixo c/ corte térmico, para testar níveis de isolamento, não prejudica o isolamento acústico.

Quadro 4.13 – Redução sonora em bandas de oitava 1/1 e respetivo coeficiente acústico

Painel	Espessura (m)	Coeficiente Acústico, Rw* ⁶ (dB)
Sanduíche	0,230	42

*⁶ Cálculo feito com recurso ao valor do coeficiente acústico da ficha técnica do fabricante do vão envidraçado (caixilho + vidros), (Rw=37 dB), juntamente com o valor do coeficiente acústico calculado para a parte opaca do painel sanduíche, (Rw=53 dB).

4.5. FORNECIMENTO E MONTAGEM

Os painéis, como já foi referido anteriormente, foram projetados, fabricados, transportados e montados por intermédio da fabricante SPRAL.

O processo iniciou-se na elaboração dos painéis, segundos as configurações e normas exigidas.

Depois dessa etapa estar concluída procedeu-se à fabricação dos módulos de fachada na fábrica da SPRAL em Ílhavo, Aveiro.

A fase seguinte visou assegurar a segurança dos módulos no transporte até ao local da obra, que fica a cerca de 84 km de distância do ponto de fabricação. Para tal, os painéis foram transportados, em total segurança num semi-reboque com capacidade para cinco a seis unidades. Ainda que, devido à regulamentação existente e ao facto dos painéis terem 2,8 m de altura, optou-se por um semi-reboque rebaixado de maneira a não exceder a altura regulamentada, 4,20 m.

No local de obra, o semi-reboque ficou posicionado a uma distância ótima de modo a facilitar a fase de manuseio e montagem. Tanto a localização do veículo como da grua telescópica estavam diretamente relacionados com o alçado que iria receber os painéis. Sendo que neste caso, a área de estaleiro disponível para o equipamento de elevação no alçado posterior não foi a suficiente, o que obrigou a que para além de grua telescópica de 30 ton se alugasse uma maior com capacidade de 100 ton para elevar essa grua menor para se posicionar de maneira ideal para a elevação seguir sem inconvenientes.

Os painéis foram elevados na vertical através dos cabos das guias, cabos esses que se prendem às ancoragens do módulo através de ganchos. Sem as ancoragens seria impossível garantir a estabilidade do módulo ao vento e a movimentações da construção. No painel sanduíche foram usadas quatro ancoragens na parte superior do painel, âncoras dobradas de cabeça esférica, e dois casquilhos roscados na parte inferior, ambos da PHILIPP. No painel maciço usaram-se dois casquilhos roscados na parte superior do painel, também da marca PHILIPP, juntamente com uma barra de reforço com 8 mm de diâmetro e 30 cm de comprimento, para contrariar a tensão diagonal a que é sujeito o casquilho.



Fig. 4.19 – Equipa de montagem do painel [47]



Fig. 4.20 – Elevação do painel na fachada [47]



Fig. 4.21 – Elevação da grua telescópica para a zona de estaleiro posterior [47]



Fig. 4.22 – Grua de 30ton. de capacidade a ser elevada pela grua de 100ton [47]

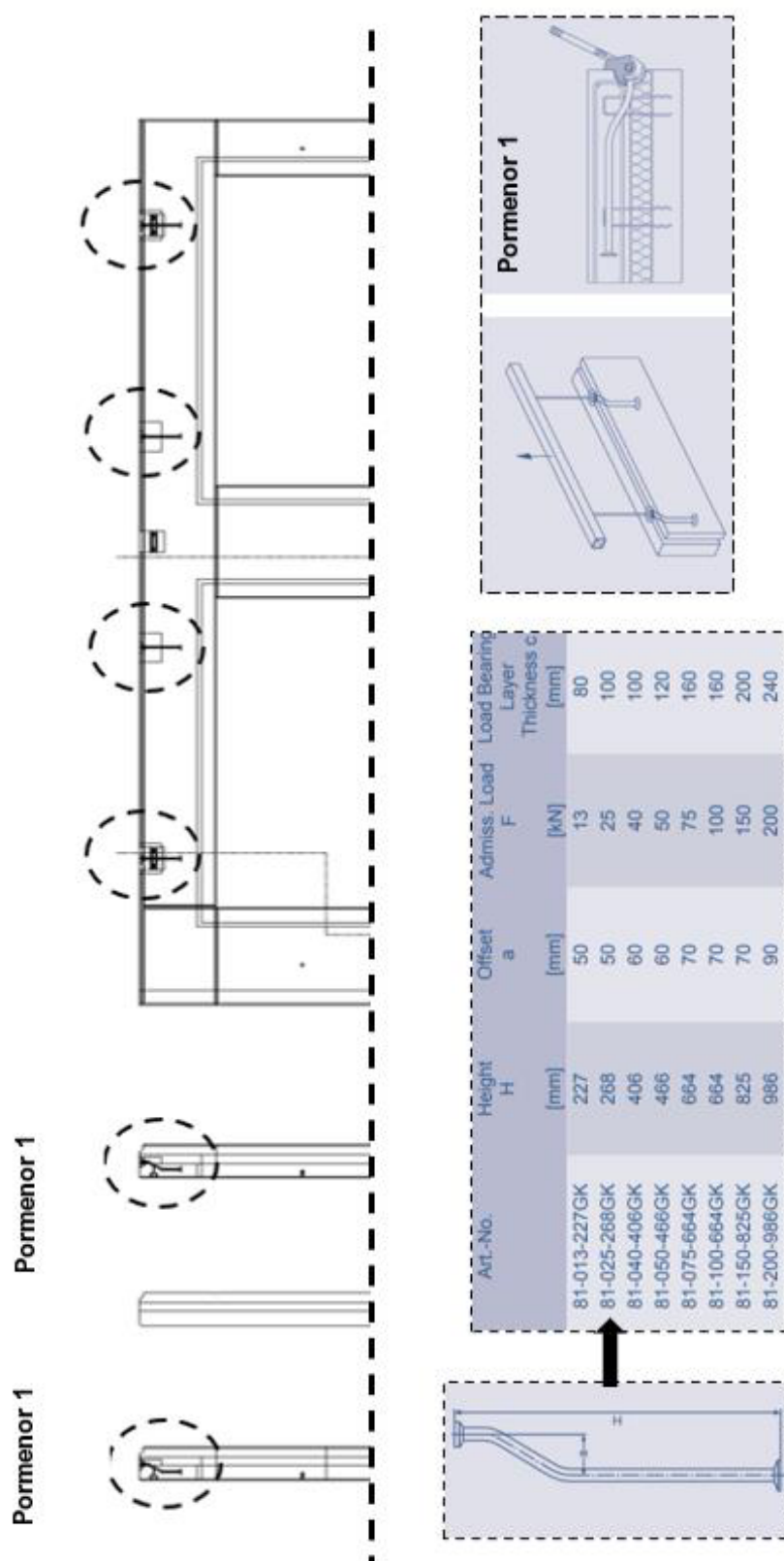


Fig. 4.23 – Pormenor das ancoragens usada na parte superior do painel sanduiche [48], [50]

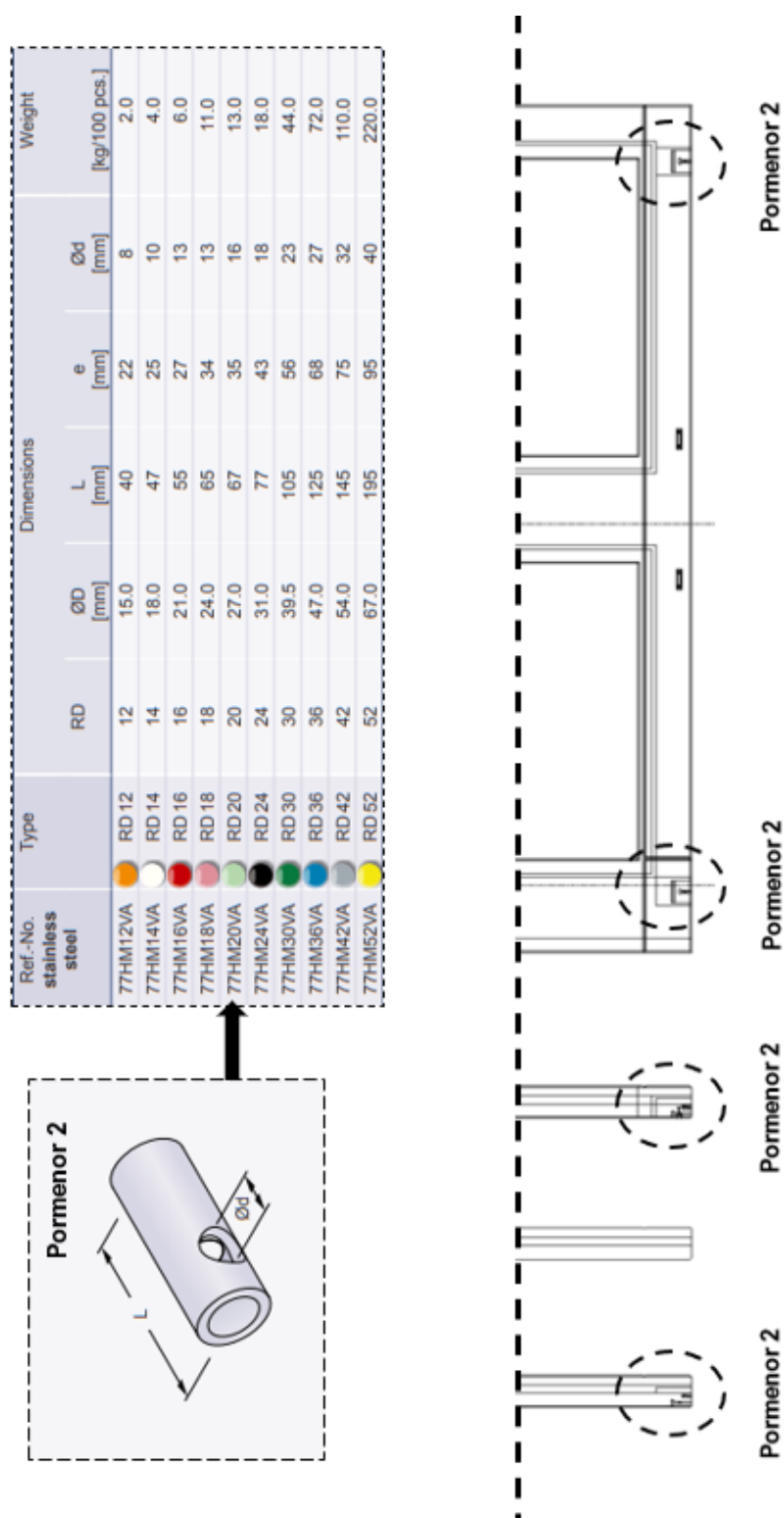


Fig. 4.24 – Pormenor das ancoragens usadas na parte inferior do painel sanduíche [48], [50]

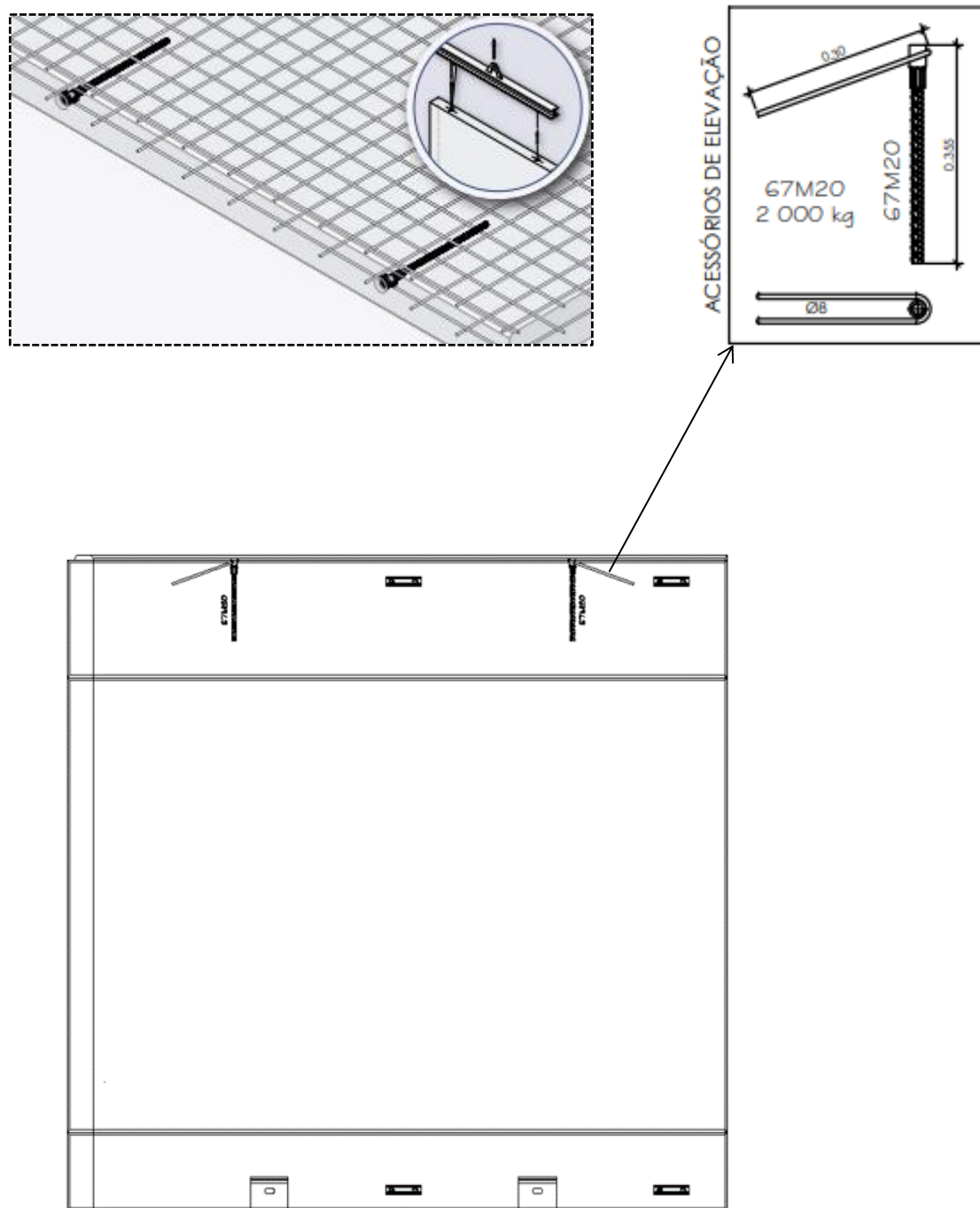


Fig. 4.25 – Pormenor das ancoragens usada na parte superior do painel maciço [48], [50]

Após a instalação dos módulos de forma cuidada na fachada, colocou-se uma camada de lã rocha e deu-se início à montagem do vão envidraçado, por intermédio de uma equipa especializada contratada pelo empreiteiro. A fixação do caixilho ao painel de betão fez-se por meio de buchas de 8mm e a fixação ao painel lacado através de cantoneiras metálicas. O facto de o vão ter sido transportado e montado em separado, deveu-se sobretudo ao cuidado em manter a sua integridade, de forma a evitar danos no caixilho e possíveis curvaturas no vidro. Desde a fase de projeto, a comunicação clara e objetiva entre o fabricante do painel e a CAIXIAVE foi essencial para que no final as dimensões acordadas fossem respeitadas e se traduzisse numa montagem fácil e sem ocorrência de inconvenientes.



Fig. 4.26 – Colocação dos vãos envidraçados no alçado norte [47]

Nas etapas seguintes colocou-se o resto das camadas de isolamento para reforçar o conforto interior e o processo ficou culminado com os trabalhos de acabamento.

De acordo com as informações disponibilizadas pela SPRAL, e pela GONDOR, empresa responsável pela fiscalização e planeamento de obra neste projeto, foram montados em média 4 a 5 painéis por dia e necessários cerca 60 dias úteis para que a totalidade da fachada fosse preenchida por painéis. O restante trabalho de acabamento interior ficou colmatado um mês depois de concluída a instalação de todos os painéis. Ao todo foram precisas 16 semanas de obra para a construção da fachada.

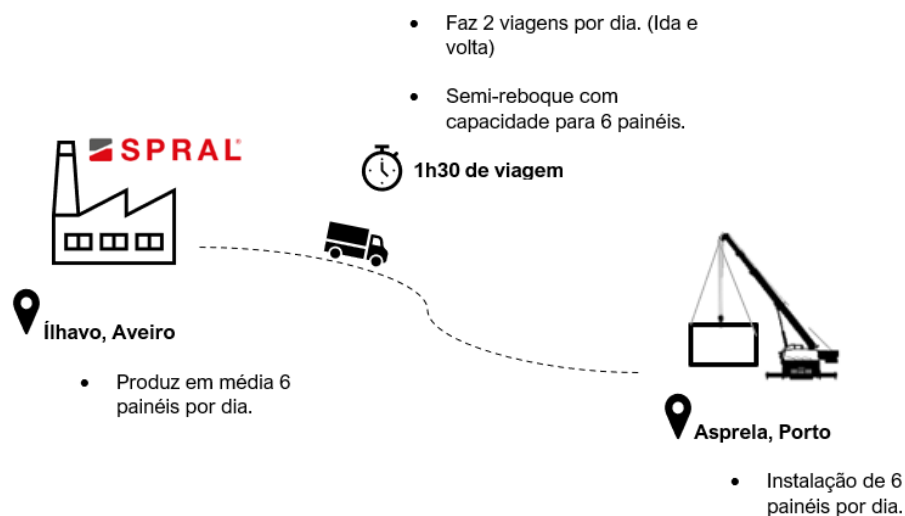


Fig. 4.27– Esquema ilustrativo da logística associada ao módulo de fachada

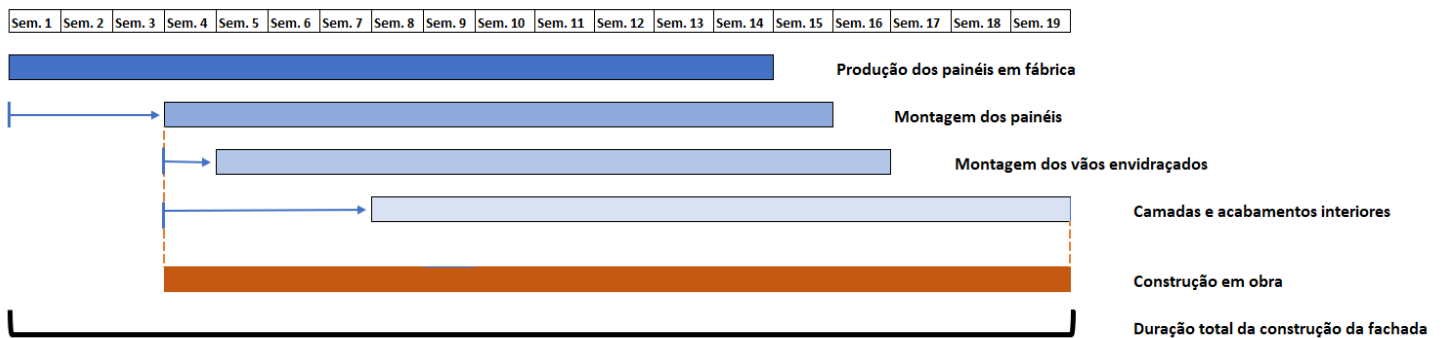


Fig. 4.28 – Esquema ilustrativo do planeamento de obra da solução

Quadro 4.14 - Duração por tarefas (construção da solução pré-fabricada)

Tarefas	Duração (Semanas)
Fabricação dos painéis	14
Montagem dos painéis	12
Camadas e acabamentos interiores	12
Construção em obra	16 ($\approx$ 4 meses)
Construção total da fachada	19 ($\approx$ 4,75 meses)

4.6. ANÁLISE DE CUSTOS

Em todos os projetos é necessário fazer uma análise aos custos. Neste caso foi feita uma análise económica ao processo construtivo da fachada, envolvendo o processo de fabrico, de transporte, de montagem, de aluguer de equipamentos e a todo o processo associado ao vão envidraçado. A informação referente ao custo de fabricação, montagem, transporte e equipamento foi disponibilizada pela SPRAL, responsável pelo processo construtivo do painel pré-fabricado. Quanto ao custo do vão envidraçado, esse foi partilhado pelo fabricante contratado, CAIXIAVE.

A fatia maior do custo global do painel de betão pré-fabricado recai no custo de fabricação, com cerca de 41% da totalidade do seu custo, a segunda maior fatia está associada ao custo do vão envidraçado, com 29%, a terceira, é referente ao custo de montagem, com uma influência de 21% e as duas últimas fatias, nomeadamente, o custo de aluguer de equipamento e o custo de transporte, com 7% e 2% respetivamente.

Quadro 4.15 – Custo do painel sanduíche e maciço por área de fachada

	Área total (m ²)	Custo de Fabricação (€/m ²)	Custo de Transporte (€/m ²)	Custo de Montagem (€/m ²) *7	Custo Total (€)
Painel Sanduíche	1 500,00	105,00	5,00	50,00	240 000,00
Painel Maciço	370,00	55,00	4,00	50,00	40 330,00

*7 O custo de mão de obra está incluído.

TOTAL = 280 330,00

Quadro 4.16 – Custo do aluguer de equipamento

Equipamento	Custo (€/dia)	Período de Aluguer (dias)	Custo do Aluguer (€)
Grua Telescópica (30 ton)	500,00	22	11 000,00
Grua Telescópica (100 ton)	800,00	20	16 000,00
Plataforma de Elevação	100,00	50	5 000,00
TOTAL =			32 000,00

Quadro 4.17 – Custo do vão envidraçado

Elemento	Custo (€/vão)	Nº de vãos	Custo Total (€)
Vão envidraçado	471,18	271	127 688,43

Quadro 4.18 – Custo total do painel pré-fabricado c/ vão envidraçado

Elemento	Custo de Fabricação (€)	Custo de Transporte (€)	Custo de Montagem (€)	Custo de Aluguer Equipamento (€)	Custo do Vão Envidraçado (€) *8	TOTAL (€)
Painel de Betão Pré-fabricado	177 850,00	8 980,00	93 500,00	32 000,00	127 688,00	440 018,00

*8 Os custos de montagem, transporte e mão-de-obra estão incluídos.

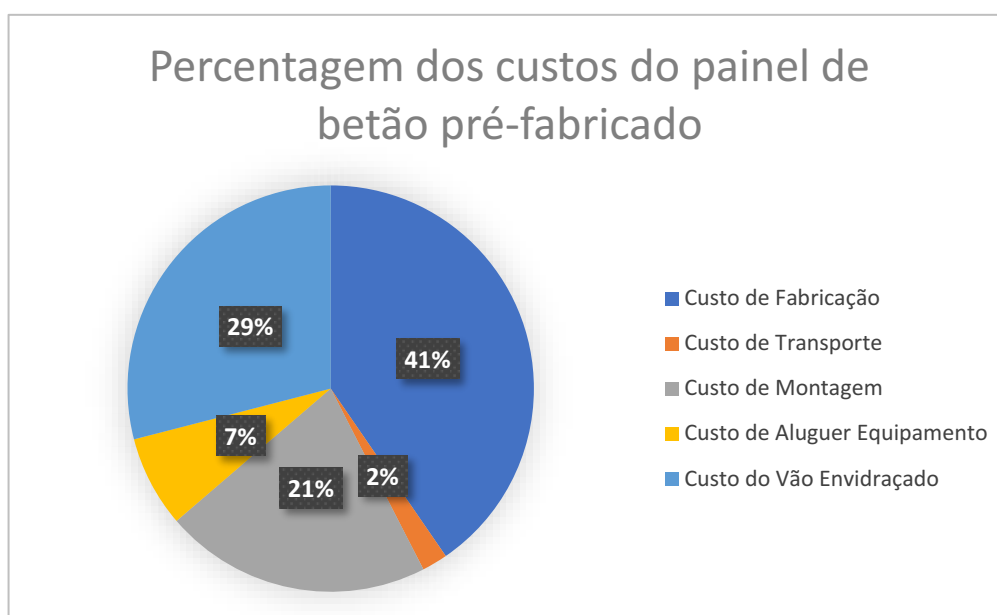


Fig. 4.29– Gráfico percentual dos custos do painel de betão pré-fabricado

Quadro 4.19 – Custo das camadas adjacentes

Camada	Área (m ²)	Custo (€/dia)	Custo (€)
Painel de lã rocha com 3 cm de espessura	425,00	16,33	6 940,25
Pladur	1 500,00	49,50	74 250,00
TOTAL =			81 190,00

Quadro 4.20 – Custo total da fachada

Elemento de fachada	Custo (€)
Painel pré-fabricado	440 018,00
Camadas adjacentes	81 190,00
TOTAL =	521 208,25

4.7. ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE

Uma das muitas vantagens da construção pré-fabricada é o seu contributo na redução da pegada de carbono bem como na redução dos resíduos gerados em construção.

Devido à ausência de informação dos resíduos gerados por esta solução em obra, foi necessário recorrer à aplicação “Gerador de Preços”, para fazer uma estimativa valores de peso e volume dos resíduos gerados por cada material que compõe o elemento construtivo da fachada. Esta aplicação contém uma base de dados diversificada sobre preços, tipo de material, equipamento, mão-de-obra, resíduos gerados, etc., para um número alargado de soluções construtivas.

Quadro 4.21 – Resíduos gerados pela solução pré-fabricada

		Peso (kg)/m ²	Volume (l)/m ²
Painel de Betão Pré-fabricado	Resíduos gerados	13,367	8,939
	Embalagens	0,964	1,115
Camada de lã rocha	Resíduos gerados	0,249	0,226
	Embalagens	0,187	0,263
Pladur	Resíduos gerados	1,102	1,043
	Embalagens	0,058	0,097
Totalidade dos resíduos gerados pela solução pré-fabricada =		23 890,5	17 524,5

Resíduos gerados pela solução pré-fabricada

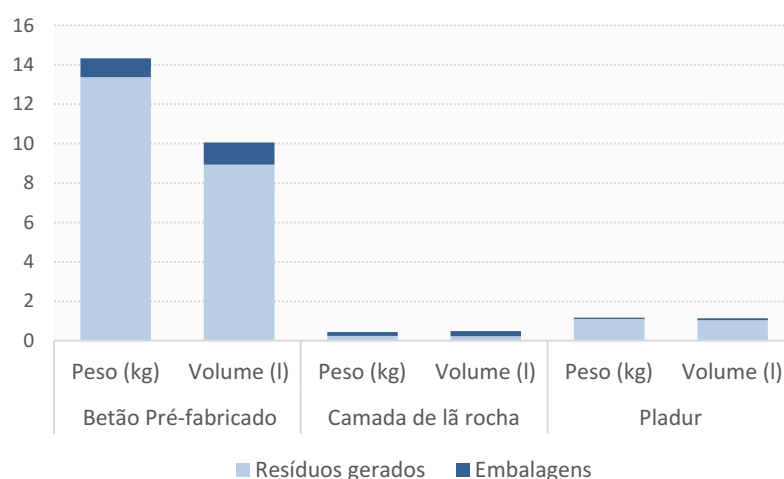


Fig. 4.30 – Gráfico do Peso (kg) e Volume (l) de resíduos gerados pela solução pré-fabricada

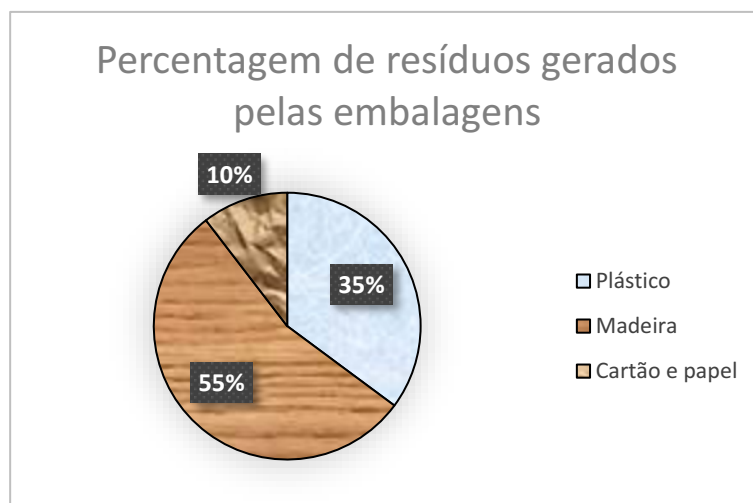


Fig. 4.31 – Gráfico percentual de resíduos gerados pelas embalagens

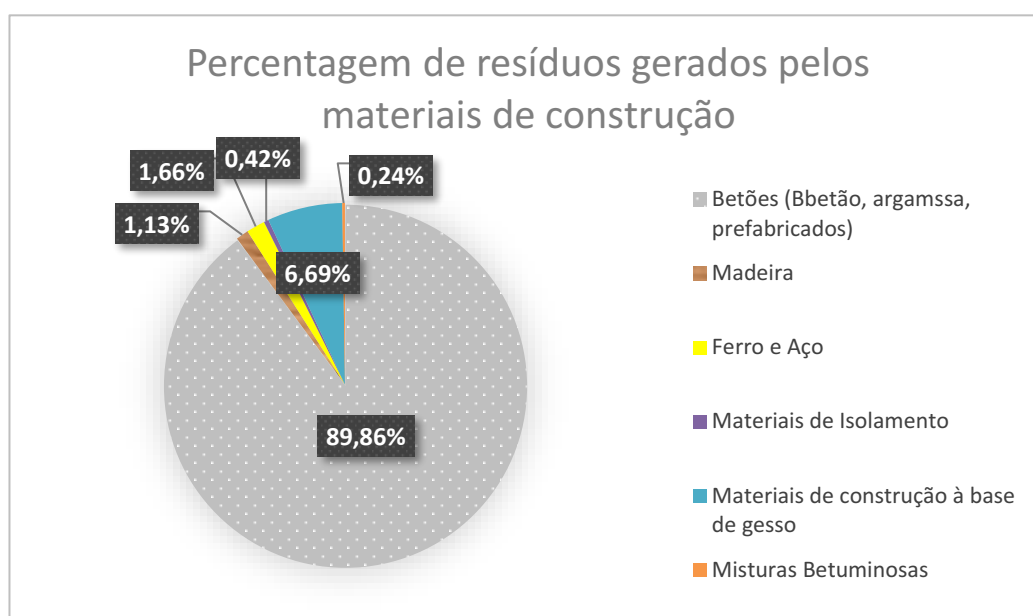


Fig. 4.32 – Gráfico percentual de resíduos gerados pelos materiais de construção

Com a ajuda da aplicação “*One click LCA*” foi possível calcular a quantidade de CO₂ libertado para a atmosfera durante todo o processo construtivo da fachada. Para tal foi necessário submeter dados sobre o tipo e quantidade de materiais usados, resíduos gerados em obra, distância do local de fabricação até ao estaleiro da obra e o meio transporte utilizado. Muito para além dessa informação, a aplicação tinha ao dispor do utilizador outros campos de preenchimento que por ausência de dados, foram assumidos valores meramente simbólicos, ainda que justos, que possibilitassem a obtenção de resultados.

Os resultados foram gerados segundo um critério de sustentabilidade da certificação BREEAM para a construção de edifícios, “*LCA, EN-15978' building LCA calculation tool*”, de acordo com a licença

disponibilizada pela equipa do “One Click LCA” para uso académico. Foram emitidos cerca 49 ton. de CO₂ para a atmosfera, equivalente a 1,05 kg de CO₂ por m² num ano.

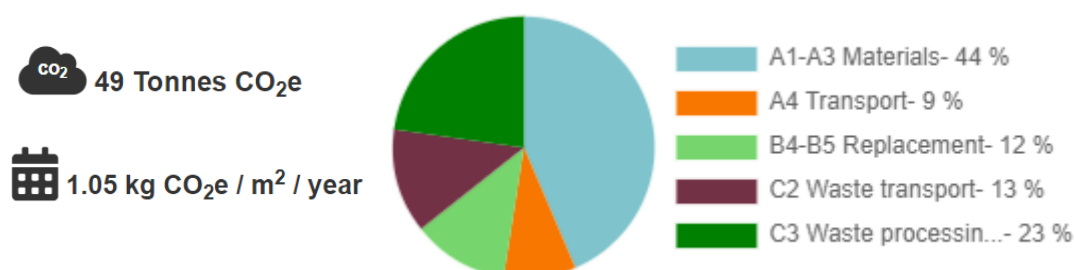


Fig. 4.33 – Percentagem correspondente ao peso de cada parâmetro, no cálculo da avaliação da sustentabilidade associada a esta solução e o respetivo valor total de emissões de CO₂ para atmosfera [51]

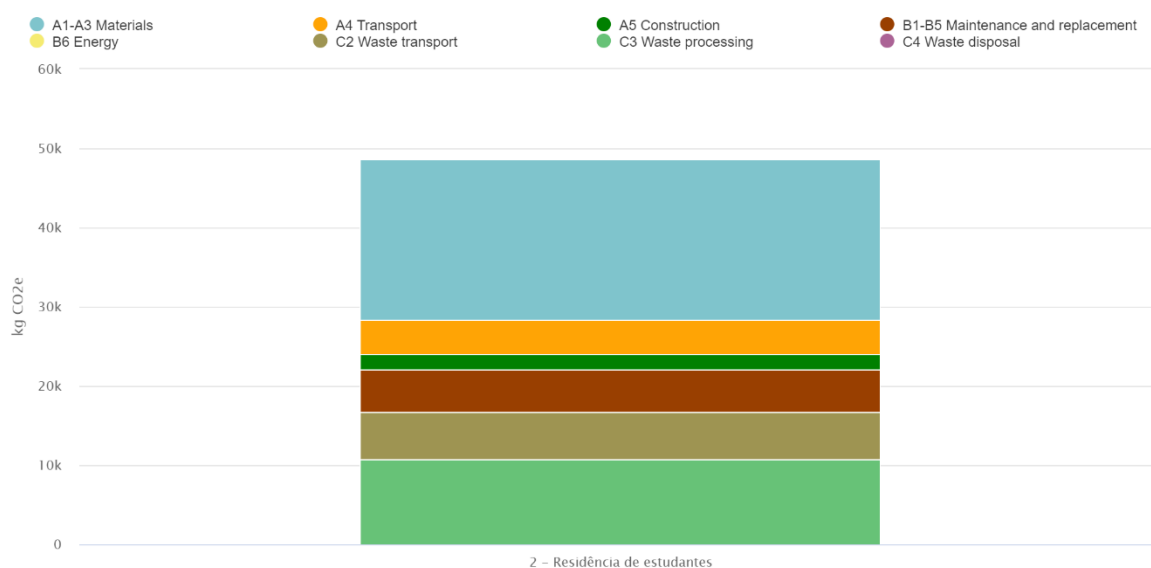


Fig. 4.34 – Quantidade de emissões de CO₂ emitidas para a atmosfera por cada parâmetro de avaliação [51]

5

COMPARAÇÃO DA SOLUÇÃO PRÉ-FABRICADA ESTUDADA COM UMA SOLUÇÃO TRADICIONAL EM ALVENARIA

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo irá ser discutida a viabilidade da solução em painéis de betão pré-fabricados através da sua comparação com uma solução ETICS corrente em pano alvenaria de blocos de betão. Irão ser abordados os mesmos parâmetros discutidos no capítulo 4, de maneira a fazer uma análise independente à solução pré-fabricada.

5.2. DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO EM ALVENARIA

Para reproduzir uma solução corrente na construção portuguesa, optou-se por uma solução simples em alvenaria tradicional, que exemplificasse bem o tipo de construção “in-situ”. Nesse contexto, foi escolhida uma a pano simples de alvenaria de blocos de betão acabado a ETICS.

Esta solução é composta por:

- Um revestimento interior com uma espessura de 15 mm.
- Um pano simples de alvenaria apoiado sobre a laje e faceado, de 20 cm de espessura, de alvenaria, de bloco vazado de betão, 50x20x20 cm, para revestir, com juntas horizontais e verticais de 10 mm de espessura, assente com argamassa de cimento confeccionada em obra;
- Um Isolamento térmico pelo exterior, com sistema ETICS, composto por: painel rígido de poliestireno expandido, segundo NP EN 13163, de superfície lisa e bordo lateral reto, de cor branca, de 80 mm de espessura, fixado ao suporte com argamassa, aplicada mecanicamente e fixações mecânicas com bucha de expansão de polipropileno;
- Uma camada de regularização de argamassa, aplicada manualmente, armada com malha de fibra de vidro, anti alcalina, de 5x4 mm de vão de malha, de 0,6 mm de espessura e de 160 g/m² de massa superficial. Uma camada de acabamento de argamassa acrílica, cor branco, sobre primário acrílico.

Consideraram-se perfis de arranque de alumínio, perfis de fecho superior de alumínio, perfis de canto de PVC com malha, pasta vedante monocomponente e cordão de espuma de polietileno expandido de células fechadas para vedação de juntas.

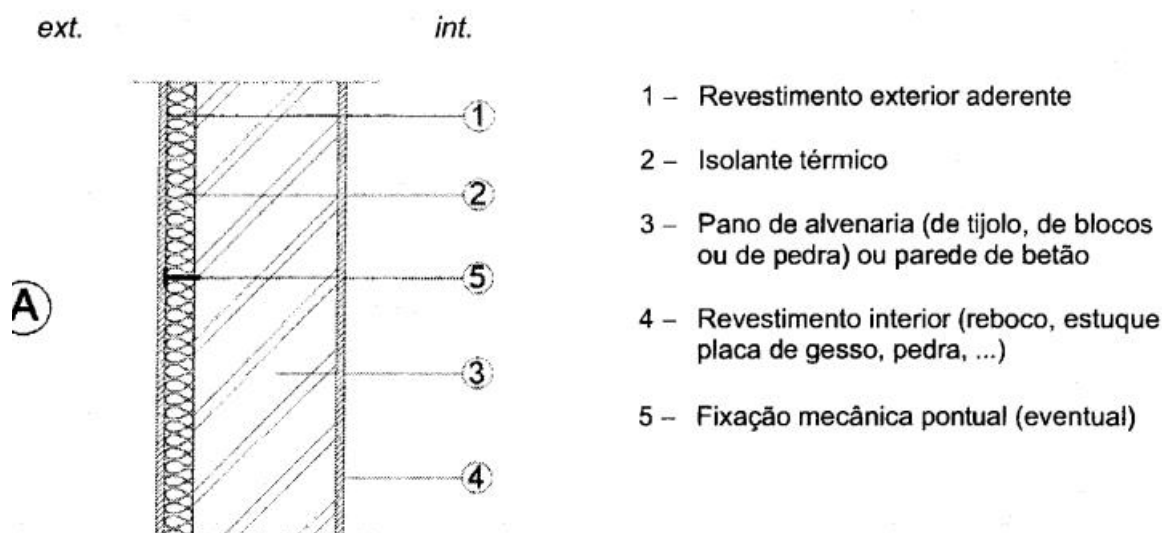


Fig. 5.1 – Corte ortogonal da solução ETICS (adaptado do ITE 50)

5.3. COMPARAÇÃO COM A SOLUÇÃO PRÉ-FABRICADA

A viabilidade da solução do painel sanduíche em betão pré-fabricado, reflete-se na sua comparação com uma solução em alvenaria tradicional, em aspetos como o desempenho térmico, o desempenho acústico, o comportamento ao fogo, a estanqueidade ao ar e à água das juntas, processo construtivo, planeamento, economia e por última a pegada de carbono. Quanto ao desempenho estrutural assume-se que tanto uma como outra solução cumprem com as normas em vigor, garantindo assim uma boa segurança estrutural à fachada do edifício.

A área de fachada preenchida por painéis sanduíche, 1500 m², irá ser a mesma usada para a solução em alvenaria, para efeitos económicos, de planeamento, de pegada de carbono e gestão de resíduos.

Quanto ao vão envidraçado, este acaba por ser desprezado no desempenho térmico, no comportamento face ao fogo, na perspetiva económica e de planeamento, uma vez que ambas soluções partilham a mesma solução, ou seja, não tem impacto na análise.

5.3.1. DESEMPENHO TÉRMICO

Ambas as soluções opacas apresentam valores de coeficiente de transmissão térmicos baixos, no entanto a solução pré-fabricada tem um valor inferior, o que indica que neste parâmetro é uma solução com melhor desempenho térmico, ainda que tenha uma espessura bastante superior à solução em ETICS.

Quadro 5.1 – Comparação do desempenho térmico das duas soluções

Coeficiente de Transmissão Térmica “U” [W/(m².°C)]	
Solução pré-fabricada	Solução em alvenaria tradicional*7
0,21	0,40

*7 Valor obtido segundo o anexo 2, quadro 2.5, do ITE 50, para sistemas de isolamento pelo exterior com revestimento aplicado sobre o isolamento (ETICS).

5.3.2. RESISTÊNCIA AO FOGO

Neste parâmetro de análise, a solução em alvenaria tradicional com sistema ETICS, quando comparada com a solução pré-fabricada, apresenta um comportamento pior na perspetiva de reação ao fogo. Isto porque a camada de isolamento térmico, com categoria E de reação ao fogo, encontra-se pelo exterior, sendo suscetível a uma propagação do fogo mais rápida quando comparada com a camada de betão da solução pré-fabricada, devido à deficiente resistência desta face a períodos mais longos de exposição ao fogo.

Quanto ao comportamento ao fogo, a solução pré-fabricada também apresenta um comportamento melhor que a solução ETICS, pela mesma razão referida no parâmetro da reação ao fogo.

Quadro 5.2 – Comparação da reação ao fogo das duas soluções

Reação ao Fogo	
Solução pré-fabricada	Solução em alvenaria tradicional*8
≥ D-s3, d1	≥ B-S3, d0

*8 Segundo o artigo 7 da portaria n.º 135/2020, o elemento terá de cumprir com uma classe igual ou superior a B-s3, d0.

Quadro 5.3 – Comparação do comportamento ao fogo das duas soluções

Comportamento ao Fogo	
Solução pré-fabricada	Solução em alvenaria tradicional*9
EI60/ 90	EI60

*9 De acordo com o artigo 9 da portaria n.º 135/2020 foi possível determinar que a classe de resistência ao fogo mínima a cumprir para fachadas de edifícios com altura inferior a 28m é EI 60.

5.3.3. DESEMPENHO ACÚSTICO

Neste parâmetro foram comparadas as duas soluções com o vão envidraçado incluído. Para tal calculou-se o R_w médio para ser possível fazer uma comparação justa às duas soluções.

Segundo os cálculos efetuados ambas as soluções demonstram ter um desempenho acústico bastante semelhante, com um coeficiente acústico nos 45 dB.

Quadro 5.4 – Comparação do desempenho acústico das duas soluções

Coeficiente acústico, R_w (dB)	
Solução pré-fabricada	Solução em alvenaria tradicional
45	45

5.3.4. ESTANQUEIDADE À ÁGUA

O comportamento em termos de estanqueidade à água será em princípio menos suscetível no caso de alvenaria dado que a solução é contínua e não tem juntas, ao contrario da solução pré-fabricada. No entanto se adequadamente realizada e mantida, a solução de painéis pré-fabricados tem uma estanqueidade aceitável, embora com um potencial de risco maior.

5.3.5. PLANEAMENTO DE OBRA

Relativamente a este aspeto, foi comparado o tempo de obra da solução pré-fabricada, com a solução ETICS, tendo em conta a mesma área de fachada dos painéis sanduiche, 1500 m², e excluindo a montagem do vão envidraçado.

Para fazer uma estimativa real dos tempos e da quantidade de mão-de obra que levaria a construir uma fachada ETICS recorreu-se à informação disponibilizada pelo “GERADOR DE PREÇOS” sobre os elementos constituintes da fachada, nomeadamente: para o pano de alvenaria em blocos de betão, para o sistema ETICS de isolamento pelo exterior e para as camadas de reboco interior.

Após a análise comparativa entre as soluções, foi possível verificar que a solução pré-fabricada é mais rápida cerca de 3 semanas.

Quadro 5.5 – Cálculo da duração da construção do pano de alvenaria em blocos de betão

Mão-de-obra	Rendimento (h/m ²)	Número	Rendimento da equipa (Req)	Duração (h) = Q (m ²) x Req	Semanas = D/40	Meses
Oficial	0,551	3	0,2	300	7,5	≈ 2
Servente	0,4	2				

Quadro 5.6 – Cálculo da duração da construção do sistema ETICS

Mão-de-obra	Rendimento (h/m ²)	Número	Rendimento da equipa (Req)	Duração (h) = Q (m ²) x Req	Semanas = D/40	Meses
Montador de isolamentos (1+1)	0,1	2	0,314	471	11,75	≈ 3
Aplicação de reboco (1+1)	0,528	2				

Quadro 5.7 – Cálculo da duração dos acabamentos interiores

Mão-de-obra	Rendimento (h/m ²)	Número	Rendimento da equipa (Req)	Duração (h) = Q (m ²) x Req	Semanas = D/40	Meses
Oficial	0,398	2	0,2925	439	11	≈ 3
Servente	0,187	2				

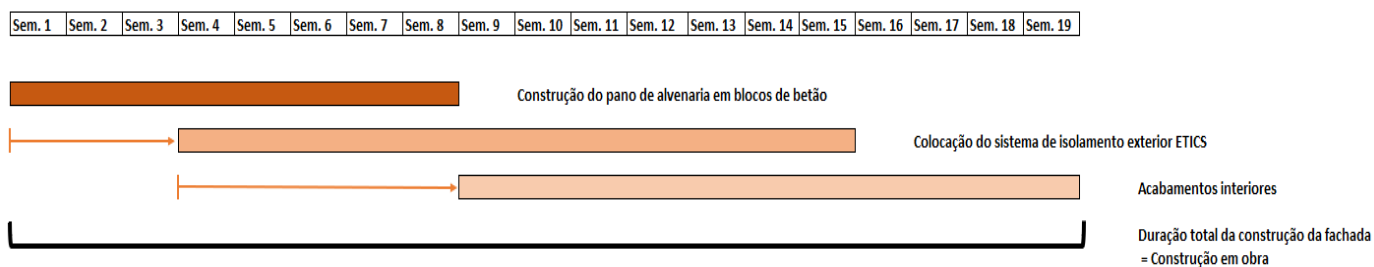


Fig. 5.2 – Esquema relativo à estimativa da duração das tarefas que envolvem o processo construtivo da fachada ETICS

Quadro 5.8 – Duração das tarefas da solução ETICS

Tarefas	Duração (Semanas)
Construção do pano de alvenaria	8
Sistema ETICS	12
Acabamentos interiores	11
Construção em obra =	
Construção total da fachada	19

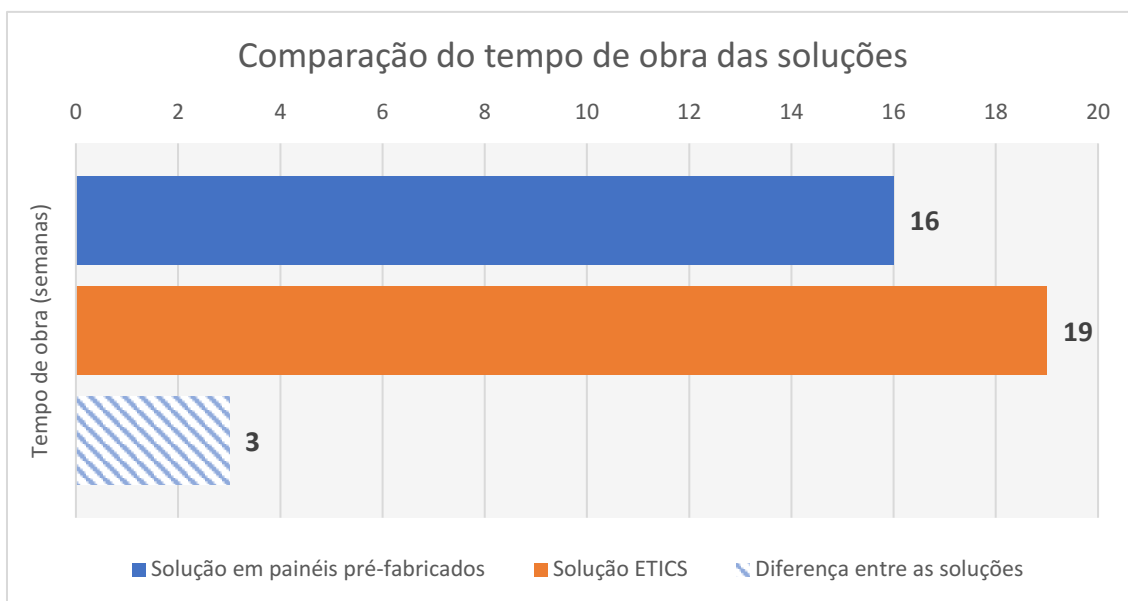


Fig. 5.3 – Gráfico comparativo do número de semanas de trabalho das duas soluções

5.3.6. ANÁLISE DE CUSTOS

Tal como no parâmetro anterior, a análise comparativa foi feita com base nos cálculos efetuados no capítulo 4, ainda que neste exercício tenha sido apenas contabilizado, para a mesma área de fachada referente aos painéis sanduíche, o preço dos materiais, o preço da mão de obra associada à sua montagem/ construção e o preço dos equipamentos, excluindo preço dos vãos envidraçados.

Neste contexto, recorreu-se novamente ao GERADOR DE PREÇOS de maneira a estimar um orçamento que seja o mais próximo possível da realidade atual para uma solução ETICS, respeitando sempre os materiais e dimensões previamente definidos.

Não obstante o mencionado acima, houve mais uma parcela que faria todo sentido incluir nos cálculos finais, que se prende com o tempo de aluguer de estaleiro. Ora como a solução pré-fabricada conseguiu ganhar cerca de três semanas de obra à solução convencional, assumimos para esse intervalo de tempo, um custo de 33 750€ (3 x custo de aluguer de estaleiro p/ semana).

Foi possível verificar que a opção pelo betão pré-fabricado ficou mais cara que uma solução em ETICS, com uma diferença de cerca de 167 500€.

Quadro 5.9 – Custo da solução ETICS

	Área (m2)	Custo (€/m2)	Total
Reboco Interior	1500	30,49	45 735,00 €
Pano de alvenaria em blocos de betão		22,65	33 975,00 €
Sistema ETICS		63,59	95 385,00 €
		TOTAL =	175 095,00 €

Quadro 5.10 – Custo total da solução ETICS

Solução em sistema ETICS	Custo (€)
ETICS	175 095,00 €
Equipamento (andaimes e grua)	37 000,00 €
3 semanas de estaleiro	33 750,00 €
TOTAL =	245 845,00 €

Quadro 5.11 – Custo da solução em painel de betão pré-fabricado

Solução em painel de betão pré-fabricado	Custo (€)
Painel de betão sanduíche	310 690,25 €
Camadas e acabamentos interiores	70 690,25 €
Equipamento	32 000,00 €
TOTAL =	413 380,50 €

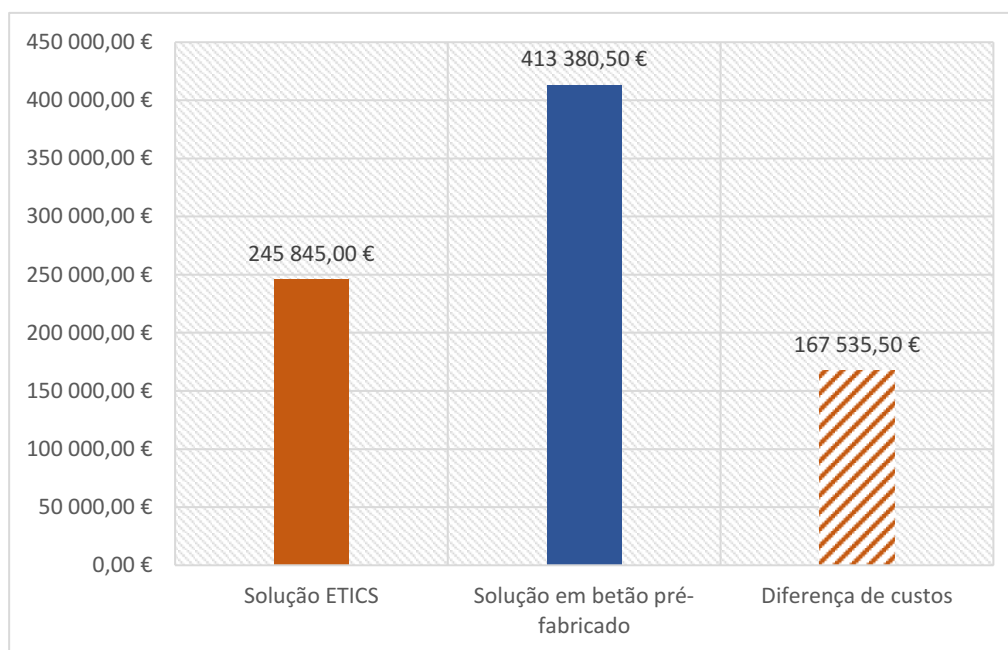


Fig. 5.4 – Gráfico comparativo da diferença de custos entre a solução ETICS e da solução em betão pré-fabricado

5.3.7. SUSTENTABILIDADE

Como forma de analisar a sustentabilidade, recorreu-se mais uma vez a um exercício de análise de dados aos resíduos gerados em obra e às quantidades de CO₂ emitidas por cada solução. A primeira com recurso às informações disponibilizadas pelo GERADOR DE PREÇOS e a segunda segundo o sistema de cálculo das emissões de carbono da aplicação ONE CLICK LCA.

Quanto aos resíduos gerados foi bastante evidente que o betão tem uma contribuição maior em peso e volume da solução ETICS, tal como aconteceu com a solução em betão pré-fabricado, no entanto em menos quantidade. Por fim, através da análise comparativa à totalidade dos dados criada por ambas soluções, foi perceptível que a solução de fachada em painéis pré-fabricados foi a que menos resíduos gerou.

Quadro 5.12 – Resíduos gerados pela solução ETICS de acordo com o Gerador de Preços

		Peso (kg)/m ²	Volume (l)/m ²
Pano de alvenaria em blocos de betão	Resíduos gerados	17,921	12,077
	Embalagens	0,19	0,242
Isolamento ETICS	Resíduos gerados	0,455	0,382
	Embalagens	0,841	1,148
Reboco Interior	Resíduos gerados	0,829	0,557
	Embalagens	0,199	0,253
Totalidade dos resíduos gerados pela solução ETICS =		30 652,5	21 988,5

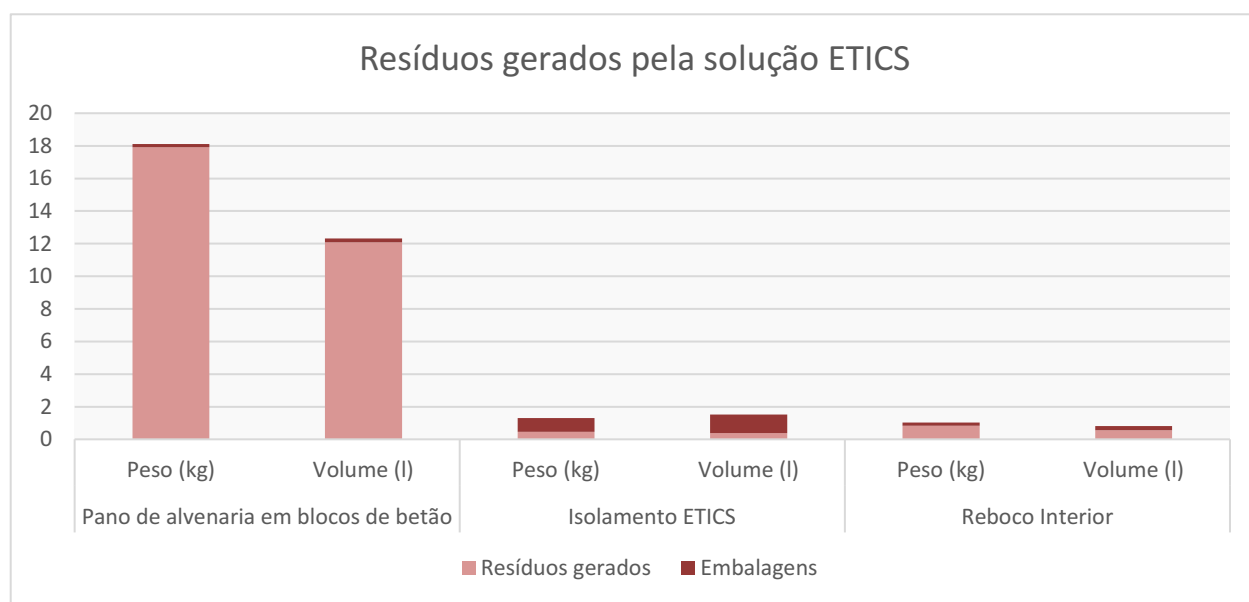


Fig. 5.5 – Gráfico do Peso (kg) e do Volume (l) de resíduos gerados pela solução ETICS

Percentagem de resíduos gerados pelas embalagens

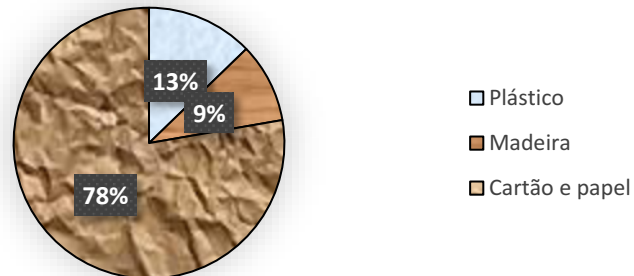


Fig. 5.6 – Gráfico percentual de resíduos gerados pelas embalagens, na solução ETICS

Percentagem de resíduos gerados pelos materiais de construção

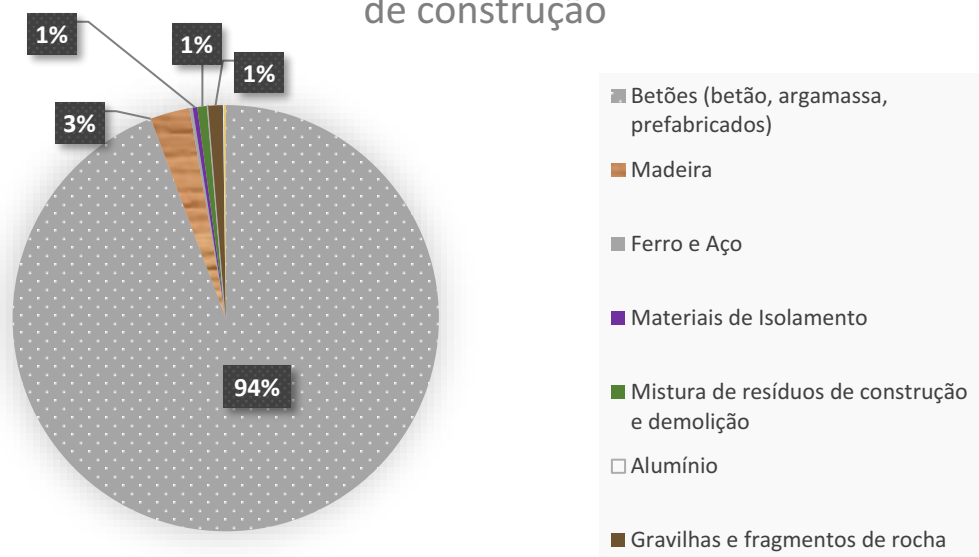


Fig. 5.7– Gráfico percentual de resíduos gerados pelos materiais de construção, na solução ETICS

Quadro 5.13 – Diferença da quantidade de resíduos gerados pelas duas soluções

	Peso (kg)	Volume (l)
Totalidade dos resíduos gerados pela solução pré-fabricada	23890,5	17524,5
Totalidade dos resíduos gerados pela solução ETICS	30652,5	21988,5
Diferença entre as soluções	6762	4464

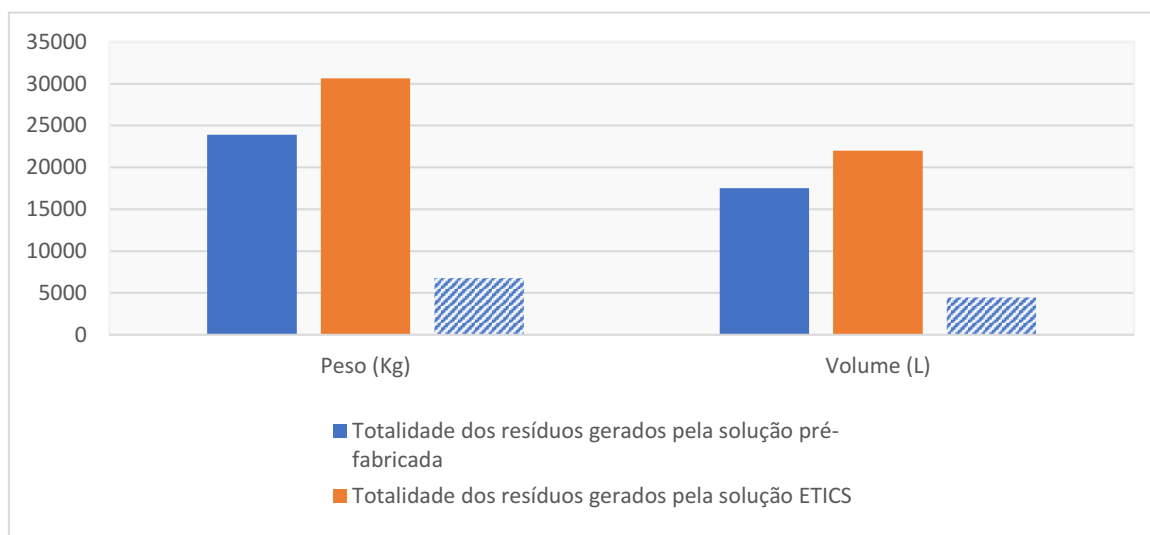


Fig. 5.8 – Gráfico comparativo da diferença do Peso e Volume de resíduos gerados pelas soluções de acordo com o Gerador de Preços

Relativamente à aplicação “One Click LCA”, foi possível gerar resultados com base no preenchimento de dados referentes à solução ETICS, tais como o tipo/quantidade de materiais usados e a quantidade de resíduos gerados em obra. Independentemente de o formulário não ter sido completamente preenchido com toda informação requisitada pela aplicação, acabou por não influenciar a obtenção de resultados e uma interpretação plausível dos mesmos.

A solução ETICS produz mais de metade da quantidade da solução em painéis de betão pré-fabricado, 128 ton., cerca de 2,78 kg de CO₂ por m² num ano, muito por culpa da seleção/quantidade de materiais, do volume de resíduos gerados “in-situ” e do tempo mais reduzido em obra.

Não obstante do facto de os materiais usados na fachada ETICS requererem de uma manutenção entre 5 em 5 anos para acabamentos exteriores e em média entre 10 em 10 anos para a renovação do sistema ETICS, o que se traduz num LCC menor, ou seja, uma menor durabilidade e uma maior necessidade de manutenção ao longo dos anos, quando comparada com solução em betão pré-fabricado, que ao longo do seu ciclo de vida necessita também renovações, mas em intervalos de tempo mais alargados.

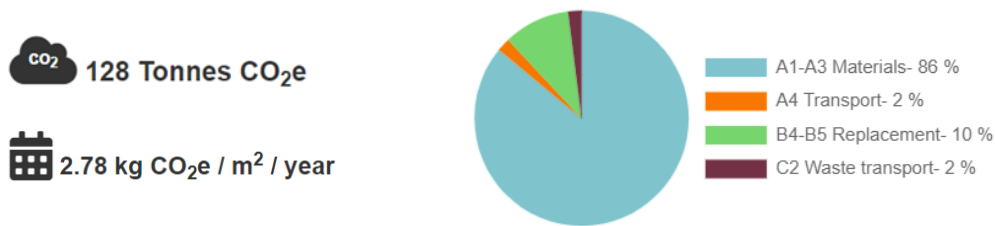


Fig. 5.9 – Percentagem correspondente ao peso de cada parâmetro no cálculo da avaliação da sustentabilidade associada à solução ETICS e o respetivo valor total de emissões de CO₂ [51]

Quadro 5.14 – Quadro síntese da análise comparativa

Quadro síntese da análise comparativa		
Parâmetros	Solução em painéis sanduíche pré-fabricados em betão	Solução ETICS (Alvenaria convencional)
Estanqueidade à água	Em zonas correntes o tipo de montagem em puzzle do painel de fachada origina juntas entre as diferentes peças que compõem o alçado. Ora nesse intervalo entre as juntas é necessário recorrer a materiais vedantes capazes de estancar a entrada da água e do ar para interior do edifício. Recorre-se essencialmente a materiais como um cordão neopolene e uma cola mástique posterior, compondo uma ou duas linhas de defesa, o que exige um elevado controlo de qualidade porque muitas vezes a sua colocação revela ser complicada e pode originar certos defeitos.	O comportamento em termos de estanqueidade à água será em princípio menos suscetível no caso de alvenaria dado que a solução é contínua e não tem juntas.
Desempenho térmico	Permite um ótimo desempenho térmico ainda que seja necessário uma ou outra camada interior, como forma de compensação do valor do coeficiente térmico, "U". Esta compensação obriga, no entanto, a um aumento da espessura do elemento de fachada e a uma redução do espaço útil no interior.	Garante um bom conforto térmico ao ocupante, com a metade da espessura da outra solução, ainda que com um "U" mais alto.
Desempenho acústico	Ambas as soluções, para as espessuras e materiais previamente referidos, garantem um comportamento acústico ótimo.	

Quadro 5.14 – Quadro síntese da análise

Resistência ao fogo	As exigências associadas a este parâmetro de análise dividem-se em duas condicionantes: Comportamento ao fogo: a solução tem um bom comportamento ao fogo, uma vez que o betão apresenta uma baixa condutividade térmica. A classificação acaba por não ser mais alta por culpa da alta condutibilidade da camada de isolamento no interior que impede um maior tempo de reação ao painel pré-fabricado. Reação fogo: revela boa reação ao fogo pelos mesmíssimos motivos apresentados acima.	O facto de o isolamento ser feito pelo exterior obriga a cumprir com uma exigência à reação e ao comportamento ao fogo superior à solução em painel de betão pré-fabricado. A solução é suscetível a uma propagação do fogo mais rápida quando comparada com a camada de betão da solução pré-fabricada, devido à deficiente resistência face a períodos mais longos de exposição ao fogo.
Montagem/ Construção	Fácil montagem dos painéis e dos vãos envidraçados. Tarefa realizada por uma equipa que aparafusa as fixações à estrutura e por uma grua telescópica com capacidade para elevar até 4x o peso do painel e garantir a sua estabilidade, através de cabos ligados às extremidades do painel por intermédio de ganchos. Exige, portanto, um maior cuidado na fase de manuseio do painel e no seu transporte desde o local de fabrico até ao estaleiro da obra. Quanto ao vão envidraçado, a equipa de montagem espera nestes casos um trabalho sem dificuldades aparentes, desde que as dimensões das aberturas do painel tenham sido respeitadas desde o acordado na fase de projeto entre o fabricante do painel e do vão. A colocação do caixilho ao painel é feita através de buchas aparafusadas. Caso não haja uma inclinação por parte do parapeito do painel é necessário criar uma ligeira inclinação por meio de uma chapa de alumínio, para impedir a acumulação de água da chuva nessa zona.	Necessita de andaime e de mão de obra especializada para a construção da fachada e de garantir a sua segurança em todo processo, já que a construção se faz pelo exterior.
Planeamento	A “standardização” do painel de fachada permite que a sua montagem decorra com grande rapidez e eficiência, e sem inconvenientes. Por vezes acontece que certas peças quando chegam ao estaleiro aparentam certos defeitos em termos de aspeto e acabam por ser devolvidas para novo fabrico e posterior substituição e acabam por atrasar a obra. Outro fator que pode influenciar o tempo de montagem é a falta de espaço suficiente em estaleiro para	Nesta solução, a produção da argamassa em obra e a construção do pano em alvenaria de blocos de betão por parte de uma equipa própria leva tempo. Da mesma maneira que na colocação do sistema ETICS se pede um trabalho cuidado e eficaz por parte da mão de obra especializada, pelo que se torna demorado.

Quadro 5.14 – Quadro síntese da análise

	que as gruas consigam manobrar e elevar os painéis da melhor forma. Quanto à instalação do vão envidraçado, este não leva muito tempo devido à facilidade na montagem. Em síntese quanto maior for a modularidade, menor será o tempo de obra.	
Custos	Apesar de ser possível poupar nos custos numa solução pré-fabricada, na maioria das vezes isso não acontece. Para tal o projeto, na sua fase inicial terá de ser pensado de forma a retirar o máximo proveito da padronização das dimensões de um modelo modular. E, de certa forma, quando essa ideia não está bem presente, vão surgir irregularidades em certos pontos do projeto que levam a alterações ao módulo inicialmente pensado ou até à criação de novos módulos, que por sua vez provocam um aumento do preço. É também importante frisar que quanto mais leve for a solução, menor serão os custos de transporte e montagem. Outro aspeto importante tem a haver com espaço existe disponível para as gruas telescópicas poderem trabalhar e se existe a possibilidade de armazenar certos elementos pré-fabricados como forma de aumentar a eficiência em obra, para reduzir custos de estaleiro. Quanto maior a produção “off-site”, menor será o tempo de obra e consequentemente menor serão os custos referentes ao aluguer de estaleiro.	Esta solução em alvenaria convencional apresenta custos mais baixos, (custo de fabrico, montagem, mão de obra e transporte incluído). No entanto, como o tempo de obra nesta solução por regra geral é maior, é inevitável os custos fixos de estaleiro aumentem.
Durabilidade	Trata-se de uma solução com grande durabilidade, já que o painel de betão pré-fabricado apresenta a possibilidade de ser reutilizado mais tarde e de ter um ciclo de vida útil bastante alargado. Apresenta um ciclo de manutenção bastante alargado com maior foco na renovação do material vedante nas juntas entre painéis, onde é necessária uma atenção especial.	O ciclo de renovação do ETICS ocorre por norma de 10 em 10 anos. E o acabamento de 5 em 5.

Quadro 5.14 – Quadro síntese da análise

Sustentabilidade	Tal como foi enunciado inicialmente a solução pré-fabricada apresenta níveis baixos de emissão de carbono e reduzidos volumes de resíduos gerados em obra. O tipo de materiais usados, resíduos gerados em obra e nº. de deslocações feitas da fábrica até à obra foram contabilizados no cálculo deste parâmetro.	Segundo o estudo realizado a escolha de materiais nesta solução, os resíduos gerados e todo o processo construtivo em obra, no seu conjunto, originam emissões de CO2 maiores que uma solução pré-fabricada.
-------------------------	--	---

6 CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Com o término desta dissertação considerou-se que os objetivos propostos foram atingidos.

A pré-fabricação demonstrou ser um conceito de construção que traz sem dúvida mais vantagens do que inconvenientes para o setor construtivo em Portugal. Vantagens essas, que foram possíveis comprovar no estudo do caso real da solução do painel em betão pré-fabricado, visando uma liberdade criativa em termos arquitetónicos, liberdade ao longo do projeto, uma maior rapidez de execução e por consequência um tempo de obra mais reduzido, uma menor dependência da mão-de-obra especializada, um bom desempenho acústico, térmico e de resistência ao fogo, uma vida útil não inferior à alternativa em alvenaria tradicional e uma ótima sustentabilidade.

De todo modo, é fundamental que no início de qualquer projeto, em que se considere optar por uma solução prefabricada, todas as partes envolvidas reúnam as condições necessárias para que se retire o máximo proveito dos seus benefícios, nomeadamente:

- Na fase de planeamento do projeto é fundamental determinar a dimensão e o número módulos necessários;
- Definir o tipo de fixações e ancoragens que vão ser utilizadas na sua montagem por forma a garantir uma boa estabilidade estrutural;
- Escolher o tipo de aspeto e textura do módulo que melhor se enquadra na arquitetura do edifício;
- Delinear o comprimento e profundidade das juntas e contabilizar as tolerâncias dos módulos;
- Planear o tempo de montagem como forma de otimizar ao máximo a produtividade em obra;
- Perceber que espaço de estaleiro está disponível para trabalhos de manuseio e porventura de armazenamento de material modular;
- Selecionar que tipo de equipamento vai ser imprescindível alugar para trabalhos de montagem;
- Analisar o tempo de vida útil do material consoante os materiais usados para poder estimar períodos de manutenção;
- De um ponto de vista sustentável e de planeamento contabilizar as viagens que irão ser realizadas para transportar a totalidade dos módulos até ao local de obra e que quantidades poderá ser possível carregar por cada viagem, de forma a reduzir tempo de obra e emissões de CO₂. E estimar o volume/peso dos resíduos gerados em obra.

Nas condicionantes referidas não se inclui as exigências aplicáveis à funcionalidade do projeto de execução. Adicionalmente no que respeita aos custos associados a uma solução pré-fabricada, refira-se que os valores iniciais, por norma superiores aos de uma solução em construção tradicional, podem sofrer reduções consoante o número e tamanho dos módulos de dimensões idênticas que se venha a produzir. Quanto maior for a modularidade do projeto, menor será duração da obra e por consequência menor o custo final da mesma.

A nível nacional tem sido notório um crescimento na aposta da pré-fabricação como método construtivo capaz de responder às necessidades que o setor enfrenta, ainda que não seja exponencial, a escolha por soluções mais eficientes e verdes revela ser acertada e com um futuro quem sabe risonho. Nomes grandes na construção em Portugal como a CASAIS, a MOTA-ENGIL e a DST, são exemplos de empresas que criaram secções próprias para a produção de soluções pré-fabricadas, pois acreditam que realmente é um método construtivo viável no nosso país.

6.2. RECOMENDAÇÕES FUTURAS

No âmbito desta tese e para desenvolvimento futuro seria interessante explorar o método de construção híbrida, que consiste numa redução em 40% no uso do betão, para uso de materiais de pré-fabricação mais leves, como a madeira, (conhecida por ter uma boa ductilidade, uma baixa condutividade térmica e uma baixa resistência ao fogo). Neste estudo seria oportuno analisar como este material iria responder a questões ligadas com: desenho arquitetónico, dimensionamento, desempenho funcional, durabilidade, orçamentação, planeamento e sustentabilidade. Acresce ainda a importância de estudar como se iria proceder ao equilíbrio entre a oferta e a procura por este bem material, uma vez que se trata de uma matéria-prima essencial ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Redshift Video Team, "The History of Prefabrication: From Roman Forts to Modern Modular Housing," *Redshift by Autodesk*, Dec. 16, 2021. <https://redshift.autodesk.com/videos/history-of-prefabrication> (accessed Nov. 27, 2022).
- [2] NOAH SHEIDLOWER, "THE CONTROVERSIAL HISTORY OF LEVITTOWN, AMERICA'S FIRST SUBURB," *Untapped New York*. Accessed: Nov. 27, 2022. [Online]. Available: <https://untappedcities.com/2020/07/31/the-controversial-history-of-levittown-americas-first-suburb/>
- [3] BoKlok, *BoKlok Lyckoåsen Mosås, Örebro*. Accessed: Nov. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.boklok.se/kop-bostad/sok-bostad/orebro-lyckoasen/>
- [4] LNEC, "Tecnologias da Construção e Edifícios," 1986.
- [5] "Architectural Precast Concrete," Chicago, IL, 1989.
- [6] G. Correia Lopes, R. Vicente, M. Azenha, and T. M. Ferreira, "A systematic review of Prefabricated Enclosure Wall Panel Systems: Focus on technology driven for performance requirements," *Sustainable Cities and Society*, vol. 40. Elsevier Ltd, pp. 688–703, Jul. 01, 2018. doi: 10.1016/j.scs.2017.12.027.
- [7] "Casas típicas." <https://www.janelaskommerling.pt/casas-tipicas-portugal/> (accessed Nov. 27, 2022).
- [8] "Aldeias de Portugal." <https://www.aldeiasdeportugal.pt/aldeia/fujaco/> (accessed Nov. 27, 2022).
- [9] "Edifício Vodafone." Accessed: Nov. 27, 2022. [Online]. Available: <https://espacodearquitetura.com/projetos/edificio-vodafone/>
- [10] N. Bertram, S. Fuchs, J. Mischke, R. Palter, G. Strube, and J. Woetzel, "Modular construction: From projects to products," 2019.
- [11] L. Na, "Investigation of the Designers' and General Contractors' Perceptions of Offsite Construction Techniques in the United States Construction Industry," the Graduate School of Clemson University, 2007.
- [12] P. Waskett, "DTI Construction Industry Directorate Project Report : Current Practice and Potential Uses of Prefabrication Prepared for," 2001. [Online]. Available: www.bre.co.uk
- [13] "REPORT BY THE NATIONAL AUDIT OFFICE |," 2005.
- [14] F. Saraiva, "Estruturas Pré-fabricadas em Betão," 2012.
- [15] David Miles, "Offsite construction: advantages in costs and efficiency," *Atamate*. <https://www.atamate.com/atamate-blog/offsite-construction-advantages-in-costs-and-efficiency> (accessed Nov. 29, 2022).
- [16] BigRentz team, "Sustainable Construction: Methods and Benefits," *BigRentz*, Mar. 2022.
- [17] BigRentz team, "Modular Construction: Reinventing the Building Process," *BigRentz*, Mar. 2020. <https://www.bigrentz.com/blog/modular-construction> (accessed Nov. 29, 2022).
- [18] "BREEAM & LEED: A study of materials and their life cycle impacts-Research essay by Arjun Basnet Sustainable Architecture Faculty of Architecture and Fine Arts."

- [19] Prudencio team, “A importância das certificações ambientais de edifícios,” Dec. 2019. Accessed: Nov. 29, 2022. [Online]. Available: <https://prudencio.pt/pt/a-importancia-das-certificacoes-ambientais-de-edificios/>
- [20] BREEAM team, “BREEAM,” 2022 Accessed: Nov. 29, 2022. [Online]. Available: <https://bregroup.com/products/breeam/how-breeam-works/>
- [21] LEED team, “LEED,” 2022 Accessed: Nov. 29, 2022. [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/leed>
- [22] Alyssa Watson, “What Sweden and Japan Can Teach the U.S. about Construction.” Accessed: Nov. 29, 2022. [Online]. Available: <https://adlventures.com/what-sweden-and-japan-can-teach-the-u-s-about-construction/>
- [23] Stacey Freed, “The Nordic Track,” Jul. 2022.
- [24] Kate Reggev, “12 Scandinavian Prefabs That Embody High-Design Hygge,” *dwel*, Jun. 2022. Accessed: Nov. 29, 2022. [Online]. Available: <https://www.dwell.com/article/prefab-homes-scandinavia-765e7456>
- [25] J. A. Vieira *et al.*, “METODOLOGIAS CONSTRUTIVAS ADEQUADAS A UM EDIFÍCIO MODULAR LEVE Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL-ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES.” [Online]. Available: <http://www.fe.up.pt>
- [26] H. J. Campos De Sousa, “Parte 2-Obra de ‘Toscos’ Tecnologia das Construções.”
- [27] Arnold Van Acker, “The Design of Precast Concrete Structures,” 2002.
- [28] K. Bergmeister, F. Fingerloos, and J. D. Wörner, *Beton-Kalender 2016 : Beton im Hochbau Silos und Behälter*.
- [29] H. P. J. Taylor, “Precast concrete cladding.” London, 1992.
- [30] “COMPORTAMENTO ESTRUTURAL”.
- [31] F. de Manuel Fernandes Sousa and P. Doutor Hipólito José Campos de Sousa, “FACHADAS VENTILADAS EM EDIFÍCIOS Tipificação de soluções e interpretação do funcionamento conjunto suporte/acabamento Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL-ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES.” [Online]. Available: <http://www.fe.up.pt>
- [32] the Visual Journalism team, “Grenfell Tower: What happened,” *BBC*, Oct. 2019, Accessed: Oct. 31, 2022. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/news/uk-40301289>
- [33] J. de Brito, “Exigências de Adequação ao Uso em Fachadas-Critérios de Manutenção,” 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/283795609>
- [34] “Aula_5_HS”.
- [35] C. Rego and D. E. Araújo, “SISTEMAS DE PREFABRICAÇÃO DE PAREDES EM ALVENARIA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM ENGENHARIA CIVIL-CONSTRUÇÕES.”
- [36] J. Torres *et al.*, “Plug and play modular façade construction system for renovation for residential buildings,” *Buildings*, vol. 11, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.3390/buildings11090419.
- [37] “A guide to the design and construction of precast concrete in buildings.”

- [38] F. S. Lisboa, “Execução de Estruturas Pré-fabricação em Betão,” 2010.
- [39] Lizzie Crook, “Kennon designs office tower with ‘solar facade’ for Melbourne,” *Dezeen*, Melbourne, Aug. 22, 2022.
- [40] V. P. Freitas, “eleção exigencial de painéis pré-fabricados em betão da pré gaia para aplicação em fachadas,” Porto, Jan. 2002.
- [41] “RCCTE 2006.”
- [42] J. G. M. A. P. Valério, “Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes,” IST - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- [43] Quilosa, “A sustentabilidade de um edifício, seguro graças às fachadas de betão pré-fabricado,” Madrid, Jun. 2020.
- [44] LIZ STINSON, “The World’s Tallest Modular Building May Teach Cities to Build Cheaper Housing,” *WIRED*, Nov. 23, 2016. Accessed: Nov. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.wired.com/2016/11/cities-can-learn-worlds-tallest-modular-building/>
- [45] HAUS VON EDEN team, “Rethinking living spaces: Modular architecture and housing concepts,” *HAUS VON EDEN*. Accessed: Nov. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.hausvoneden.com/urban-living/modular-architecture-and-flexible-living-concepts/>
- [46] “Archipelago House / Tham & Videgård Arkitekter,” *ArchDaily*, Jan. 2009. Accessed: Nov. 29, 2022. [Online]. Available: https://www.archdaily.com/12149/archipelago-house-tham-videgard-hansson?ad_source=search&ad_medium=projects_tab
- [47] GEG e GEOPOLIEDRO, “Fotos do projeto.”
- [48] Adaptado dos desenhos do fabricante, “Desenhos autocad.” 2022.
- [49] Catálogo SIKA, 2022.
- [50] Catálogo PHILIPP, 2022
- [51] One Click LCA.” Helsinki: One Click LCA Ltd, 2015.