

CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS COM CROSS LAMINATED TIMBER (CLT)

ANA ALEXANDRA PONTES DA COSTA

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

Orientador: Professor Doutor José Manuel Marques Amorim de A. Faria

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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 Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

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 Filhos,
Ana, Afonso e Daniel

O segredo da sabedoria, do poder e do conhecimento é a humildade.

Ernest Hemingway

AGRADECIMENTOS

Este período foi, sem dúvida, um período de ganho e conhecimento, mas também um período de grande esforço e dificuldade da minha vida.

Aos meus queridos pais e irmão, pelo apoio incondicional e pela constante motivação.

Ao meu marido, pela paciência demonstrada nos momentos mais difíceis, pela disponibilidade e pela amizade.

Aos meus filhos, pela compreensão do tempo que não lhes pude dedicar.

Ao Professor Doutor Amorim Faria, meu orientador científico, pela frontalidade, pela sabedoria, pelos pensamentos, pelas reflexões e pelo carinho.

RESUMO

Esta dissertação insere-se num projeto de investigação relacionado com a construção de edifícios com *Cross Laminated Timber* (CLT), documento este necessário para obtenção do Mestrado Integrado em Engenharia Civil.

Na última década, tem-se observado o aumento da procura de novas soluções estruturais em madeira para a construção de edifícios em altura. Esta temática possui vários fatores de motivação, sendo o de maior importância o perfil sustentável associado à madeira. O CLT é o material de eleição, uma vez que os sistemas construtivos em painéis mostram maior adequabilidade a este tipo de construção.

O presente trabalho apresenta um enquadramento desta recente temática, descrevendo as principais características do CLT, analisando as suas potencialidades e fragilidades na construção de edifícios, e apresentando também exemplos que recorrem a este material.

A materialização das vertentes expostas ao longo deste trabalho desenvolve-se em sete capítulos. No segundo capítulo é efetuada uma abordagem da evolução das casas de madeira, desde a sua origem até às tendências atuais. Os restantes capítulos dividem-se, essencialmente, em quatro vertentes: a primeira refere-se à descrição das principais características do CLT; a segunda aborda os edifícios mais emblemáticos construídos e ainda em desenvolvimento, com este material, no mundo, com maior incidência na Europa e na América do Norte; a terceira aposta numa vertente mais técnica, concretizando-se a pormenorização de um piso-tipo em CLT, consequência da pormenorização de carácter geral, desenvolvida nos capítulos 3 e 4; a quarta centra-se nas tendências futuras da construção em madeira, num contexto mundial, e analisa o papel do CLT no futuro. Nesta última vertente, o perfil sustentável da madeira é posto em relevo, salientando-se o interesse que, nessa perspectiva, este material suscita na atualidade em diversos contextos, desde o político ao arquitetónico, mas também ao das empresas de construção e de outros técnicos em geral.

PALAVRAS-CHAVE: Casas de madeira, *Cross Laminated Timber* (CLT), Estudo de caso, Sistema construtivo.

ABSTRACT

This dissertation is to be seen in the context of an investigation project related to building construction with Cross Laminated Timber (CLT), a required document in order to obtain an Integrated Master's Degree in Civil Engineering.

In the last decade one has witnessed an increase in the demand for new structural solutions in wood for high-rise building construction. This trend can be justified by several motivation factors and the sustainable profile ever associated to wood is surely the most important one. CLT is then the material of choice since panel building systems show themselves more adequate to this type of construction.

This study is intended to present a framework of this recent thematic, while describing CLT main characteristics, and analysing its potentials and weakness in building construction, as well as showing some examples that have used this material.

The materialisation of the different strands worked in this project discloses itself through seven chapters. In chapter two we approach the evolution in timber houses, since their origin to modern trends. The other chapters can be essentially divided in four areas: the first one regards the description of CLT main characteristics; the second one approaches signature buildings in CLT already built or still in execution throughout the world, focusing on Europe and North America; the third one concentrates on a more technical area and advances a show house-floor plan in CLT whose detailing is the outcome of a more general one which has been developed in chapters three and four; the fourth area focuses on the prospective tendencies in timber construction, in a world context, and analyses the role of CLT in the future. In this last area, timber sustainable profile comes into focus and we emphasize the importance this material is generating as such in several contexts, from the political to the architectonic one, but also to those of the building companies and other technicians in general.

KEY-WORDS: Timber houses, Cross Laminated Timber (CLT), Case study, Building systems.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETO, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO	1
1.2. BASES DO TRABALHO DESENVOLVIDO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. CASAS EM MADEIRA TENDÊNCIAS ATUAIS	5
2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	5
2.2. TIPOS DE CONSTRUÇÃO EM MADEIRA	9
2.2.1. CASAS DE TRONCOS - <i>LOGHOMES</i>	9
2.2.2. CASAS COM ESTRUTURAS EM MADEIRA PESADA - <i>HEAVY TIMBER</i>	10
2.2.2.1. Sistema porticado - <i>Post&Beam</i>	11
2.2.2.2. Sistema de entramado - <i>Timber frame</i>	11
2.2.3. CASAS COM ESTRUTURA EM MADEIRA LEVE – <i>LIGHT FRAMING</i>	12
2.2.3.1. Estrutura em balão - <i>Ballon frame</i>	12
2.2.3.2. Estrutura em plataforma - <i>Platform Frame System</i>	13
2.2.4. CASAS COM ESTRUTURA PRÉ-FABRICADA MODULAR.....	13
2.3. PROJETOS INOVADORES / TENDÊNCIAS ATUAIS	15
2.3.1. A TORRE TURÍSTICA TRANSPORTÁVEL (TTT)	15
2.3.2. CASA MIMA	17
2.3.3. CASAS EM MOVIMENTO.....	18
3. CLT – CROSS LAMINATED TIMBER - O QUE É?	21
3.1. OBJETO	21
3.2. O MATERIAL	21
3.2.1. PROCESSO DE FABRICO	22
3.2.1.1. Caracterização do material base usado no fabrico do CLT	23
3.2.1.2. Colagem	23

3.2.1.3. Prensagem.....	24
3.2.1.4. Corte	25
3.2.1.5. Homologação técnica	26
3.2.2. BASES DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL	26
3.2.2.1. Análise Estrutural.....	26
3.2.3. DURABILIDADE	27
3.2.4. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS	27
3.2.5. CONFORTO TÉRMICO.....	28
3.2.6. CONFORTO ACÚSTICO.....	30
3.2.7. UTILIZAÇÃO EM ZONA SÍSMICA.....	30
3.2.8. HIGROSCOPICIDADE	31
3.2.9. APLICAÇÃO EM OBRA.....	31
3.2.10. LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS.....	32
3.2.11. REDES INFRAESTRUTURAS	37
3.2.12. REVESTIMENTOS.....	39
3.2.13. LIGAÇÕES COM OUTROS SISTEMAS CONSTRUTIVOS.....	40

4. EXEMPLOS DE CONSTRUÇÕES EM CLT NO MUNDO 45

4.1. OBJETO 45

4.2. CONSTRUÇÕES EM CLT NO MUNDO 45

4.2.1. EDIFÍCIOS MAIS REPRESENTATIVOS 45

4.2.2. EUROPA 47

4.2.2.1. Breve contextualização..... 47

4.2.2.2. Origem 47

4.2.3. AMÉRICA DO NORTE - CANADÁ 48

4.3. STADTHAUS – MURRAY GROVE – UM EXEMPLO ICÓNICO 52

4.3.1. SUSTENTABILIDADE 52

4.3.2. CONCEÇÃO 53

4.3.3. FACHADA 54

4.3.4. LAYOUT..... 55

4.3.5. PROJETO ESTRUTURAL..... 57

4.3.6. LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS 61

4.3.7. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS 62

4.3.8. CONFORTO ACÚSTICO	62
4.3.9. CONSTRUÇÃO.....	62
4.4. O CLT EM PORTUGAL	65
4.4.1. EXEMPLOS REPRESENTATIVOS	65
4.4.1.1. Complexo municipal de piscinas na Caparica - Almada	65
4.4.1.2. Moradia unifamiliar - Alcanena.....	66
4.4.1.3. Casa de repouso - Coimbra	67
4.4.1. BREVES CONSIDERAÇÕES	69
5. PORMENORIZAÇÃO DE UM PISO TIPO EM CLT	71
5.1. OBJETO	71
5.2. BREVE DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO	71
5.2.1. SOLUÇÃO ESTRUTURAL / ACABAMENTOS	72
5.3. EDIFÍCIO CLT	77
5.3.1. SOLUÇÃO ESTRUTURAL - FUNDAÇÕES / CAVE / RÉS-DO-CHÃO.....	77
5.3.2. MATERIAIS.....	77
5.3.3. REGULAMENTAÇÃO	77
5.3.4. PLANTA DE ARQUITETURA - PISO TIPO.....	77
5.3.5. PLANTA DE PAINÉIS HORIZONTAIS	80
5.3.6. PLANTA DE PAINÉIS VERTICAIS E PADIEIRAS.....	82
5.3.7. PORMENORES CONSTRUTIVOS (CORTES VERTICAIS).....	87
5.3.7.1. Parede opaca exterior	87
5.3.7.2. Parede exterior não opaca – Ligação da caixilharia	88
5.3.7.3. Parede da caixa de elevadores.....	89
5.3.7.4. Parede da caixa de escadas	90
5.3.8. PORMENOR DE LIGAÇÃO DAS LAJES	91
5.3.9. REFLEXÕES SOBRE O DESEMPENHO	91
5.3.9.1. Comportamento térmico.....	91
5.3.9.2. Comportamento acústico.....	92
5.3.9.3. Comportamento face à ação do fogo.....	93
5.3.10. BREVES CONSIDERAÇÕES FINAIS	94

6. O FUTURO DAS HABITAÇÕES DE MADEIRA – O PAPEL DO CLT	95
6.1. OBJETO	95
6.2. AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O CRESCIMENTO URBANO	95
6.2.1. AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	95
6.2.2. O CRESCIMENTO URBANO	96
6.3. CONSTRUÇÃO EM CLT	96
6.3.1. PRINCIPAIS BARREIRAS	97
6.3.2. PRINCIPAIS VANTAGENS	97
6.3.2.1. Comportamento sísmico – Estudos experimentais	98
6.3.3. DESVANTAGENS	100
6.4. CONSTRUÇÃO EM CLT – O FUTURO	101
7. CONCLUSÃO	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – A estrutura mais simples de cobertura	5
Fig.2.2 – A estrutura de cobertura da Idade do Ferro	6
Fig.2.3 – Cidade lacustre Suíça	6
Fig.2.4 – Pagode do Templo Horyuji, no Japão.....	7
Fig.2.5 – Esquema de uma estrutura em “gaiola”	8
Fig.2.6 – Edifícios em Estrasburgo, França	8
Fig.2.7 – Exemplos de troncos com superfícies planas	10
Fig.2.8 – Esquema estrutural de casas de troncos	10
Fig.2.9 – Sistema porticado, à esquerda, e sistema entramado, à direita	11
Fig.2.10 – Estrutura em balão - <i>Ballon frame</i> , à esquerda e Estrutura em plataforma - <i>Platform System</i> , à direita... ..	13
Fig.2.11 – Sistema de pré-fabricação da empresa LUKASLANG	14
Fig.2.12 – Capacidade de flexibilidade, mudança a qualquer momento.....	14
Fig.2.13 – ttt (torre turística transportável)	15
Fig.2.14 – ttt (torre turística transportável)	16
Fig.2.15 – Casa Mima - flexibilidade	17
Fig.2.16 – Diversidade de opções de <i>layout</i> dentro de um módulo-base	18
Fig.2.17 – Casas em Movimento	18
Fig.2.18 – Diferentes posições da casa ao longo do dia, implantada nos socalcos do Douro	19
Fig.3.1 – Disposição das camadas	21
Fig.3.2 – Posicionamento de placas	24
Fig.3.3 – Processo de colagem.....	24
Fig.3.4 – Processo de colagem.....	24
Fig.3.5 – Prensagem.....	24
Fig.3.6 – Corte dos painéis	25
Fig.3.7 – Corte dos painéis	25
Fig.3.8 – Fábrica KLH - Áustria.....	25
Fig.3.9 – Diagrama de tensões normais e de corte na secção transversal	27
Fig.3.10 – Espessura de parede /coeficiente de transmissão térmica.....	29
Fig.3.11 – Importância das pontes térmicas lineares.....	29
Fig.3.12 – Encontro típico entre parede-piso-parede com estrutura de painéis CLT	30
Fig.3.13 – Aplicação dos painéis em obra	32

Fig.3.14 – Ligação parede CLT/base em betão (ligação metálica cantoneira).....	33
Fig.3.15 – Ligação parede exterior CLT mais espessa (ligação parafusos roscados)	33
Fig.3.16 – Ligação parede c/ soleira elevada (ligação placa metálica e parafusos roscados)	34
Fig.3.17 – Ligação paredes interiores/paredes exteriores (ligação placa metálica e parafusos roscados).....	34
Fig.3.18 – Ligação paredes exteriores (ligação placa metálica e parafusos roscados)	35
Fig.3.19 – Ligação entre painéis de laje (parafusos roscados)	35
Fig.3.20 – Ligação entre painéis de laje (parafusos roscados)	36
Fig.3.21 – Ligação coberturas inclinadas (parafusos roscados)	36
Fig.3.22 – Ligação coberturas inclinadas (parafusos roscados)	36
Fig.3.23 – Ligação coberturas planas (parafusos roscados).....	37
Fig.3.24 – Traçado de cortes horizontais e furações para passagem de cabos elétricos	37
Fig.3.25 – Traçado de cortes verticais e furações para passagem de cabos elétricos	38
Fig.3.26 – Solução de <i>courettes</i>	38
Fig.3.27 – Edifícios c/ revestimento de madeira à vista	39
Fig.3.28 – Edifícios c/ revestimento de argamassa.....	39
Fig.3.29 – Edifícios c/ revestimento Cerâmico	39
Fig.3.30 – Edifício c/ revestimento de vidro.....	40
Fig.3.31 – Edifício c/ revestimento de pedra	40
Fig.3.32 – Edifícios c/ revestimento de chapa metálica	40
Fig.3.33 – Ligação de viga de aço a painel suspenso na parte inferior.....	40
Fig.3.34 – Ligação de painel de laje (teto) com viga de aço	41
Fig.3.35 – Suspensão de tetos c/ peças metálicas	41
Fig.3.36 – Pormenor do apoio do painel de laje de CLT na parede existente.....	42
Fig.3.37 – Pormenor construtivo - apoio painel de laje CLT.....	42
Fig.3.38 – Pormenor construtivo – arranque da parede.....	43
Fig.3.39 – Pormenor de ligação CLT / “embasamento” (betão)	43
Fig.4.1 – Recentes edifícios construídos em madeira e futuros edifícios em estudo	46
Fig.4.2 – Opção 1, 12 andares.....	49
Fig.4.3 – Opção 2, 20 andares.....	49
Fig.4.4 – Opção 3, 20 andares.....	50
Fig.4.5 – Opção 4, 30 andares.....	51
Fig.4.6 – Foto exterior <i>Stadthaus</i>	52
Fig.4.7 – Pintura abstrata, <i>Gerhard Richter</i> 1999.....	54

Fig.4.8 - Fachada <i>pixel</i>	55
Fig.4.9 – Alçados <i>Stadthaus</i>	55
Fig.4.10 – Planta 3º andar (habitação social)	56
Fig.4.11 – Planta 5º andar (habitação privada).....	56
Fig.4.12 – Comparação entre construção em CLT e Betão Armado	57
Fig.4.13 – Disposição dos apartamentos, em torno do núcleo central	58
Fig.4.14 – Dissipação da ação do vento na estrutura do edifício.....	58
Fig.4.15 – <i>Layout</i> da distribuição de painéis de laje	59
Fig.4.16 – Secção tipo – parede exterior.....	60
Fig.4.17 – Secção tipo – núcleo	60
Fig.4.18 – Pormenores de ligações.....	61
Fig.4.19 – Fotos de pormenores de ligações.....	62
Fig.4.20 – Auto-grua, área de implantação e espaço de manobra reduzidos	63
Fig.4.21 – Transporte dos painéis de CLT	63
Fig.4.22 – Acondicionamento dos painéis de CLT	63
Fig.4.23 – Faseamento da obra	64
Fig.4.24 – Complexo Municipal de Piscinas, Almada	66
Fig.4.25 – Complexo Municipal de Piscinas, Almada – Pormenores de construção	66
Fig.4.26 – Moradia unifamiliar, Alcanena	67
Fig.4.27 – Casa Repouso, Coimbra – Montagem e escoramento painéis de parede	67
Fig.4.28 – Casa Repouso, Coimbra – Montagem painéis de laje	68
Fig.4.29 – Casa Repouso, Coimbra – Estrutura de parede e laje concluídas	68
Fig.5.1 – Fotografia do edifício Santos Pousada	72
Fig.5.2 – Edifício Santos Pousada - Planta de arquitetura	74
Fig.5.3 – Pormenor (P3) da fachada	75
Fig.5.4 – Corte	76
Fig.5.5 – Planta de arquitetura – piso-tipo	79
Fig.5.6 – Planta de painéis de laje – piso-tipo	81
Fig.5.7 – Planta de painéis verticais exteriores e de painéis do núcleo – piso-tipo	83
Fig.5.8 – Planta de painéis verticais interiores – piso-tipo	85
Fig.5.9 – Planta de padieiras – piso-tipo	86
Fig.5.10 – Parede opaca exterior	87
Fig.5.11 – Parede exterior - Ligação da caixilharia	88

Fig.5.12 – Parede da caixa de elevadores	89
Fig.5.13 – Parede da caixa de escadas	90
Fig.5.14 – Pormenor de ligação das lajes; (a) corte, (b) perspetiva	91
Fig.6.1 – Relação entre o poder de seleção dos materiais e a atitude perante a madeira dos vários intervenientes no setor da construção	97
Fig.6.2 – Indicações dos placards colocados na Nova Zelândia para a série de sismos 2010-2011	98
Fig.6.3 – Representação esquemática da mesa sísmica do LNEC	99
Fig.6.4 – Casa em CLT: (a) Perspetiva e componentes; (b) Edifícios sobre a mesa sísmica	100

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Sistemas de construção em madeira.....	9
Quadro 4.1 – Análise de redução de carbono (C).....	53
Quadro 4.2 – Resistência ao fogo - Stadthaus	62
Quadro 5.1 – Espessura de painéis verticais.....	78
Quadro 5.2 – Espessura de painéis de laje	80
Quadro 5.3 – Dimensões de painéis de laje	80
Quadro 5.4 – Dimensões de painéis verticais exteriores e núcleo	82
Quadro 5.5 – Dimensões de painéis verticais interiores	84
Quadro 5.6 – Coeficiente de transmissão térmica – parede opaca exterior	92
Quadro 5.7 – Coeficiente de transmissão térmica – laje entre pisos	92

1

INTRODUÇÃO

1.1. OBJETO, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO

O tema desta dissertação é “Construção de edifícios com Cross Laminated Timber (CLT)”.

A madeira é, certamente, um dos mais nobres e antigos materiais de construção utilizados pelo homem. O início da sua aplicação em construções dá-se no Período Neolítico, também conhecido por Idade da Pedra Polida, período este em que o homem começa a dar os primeiros passos na agricultura.

A utilização da madeira foi evoluindo paralelamente com os progressos tecnológicos, sendo, até ao início do século XX, um dos principais materiais de construção. Porém, o nível de evolução, até então atingido, pareceu não permitir maiores progressos. Este facto está, sem dúvida, relacionado com o aparecimento do betão armado, que permitiu simultaneamente não só acompanhar as exigências do desenvolvimento industrial, como também conduzir ao aparecimento de modernas e arrojadas estruturas, apoiadas no constante aperfeiçoamento do cálculo e do conhecimento das propriedades dos materiais. Esta realidade traduziu-se num crescente declínio da utilização da madeira como principal material de construção. Assim, a construção em madeira foi perdendo fulgor, ficando associada a algo de precário, temporário, de baixa qualidade arquitetónica e de baixa durabilidade quando comparada com o betão armado, noções estas que prevalecem, na grande maioria da população, até aos dias de hoje.

A consciencialização da população e das entidades governamentais para as questões ambientais - associada à importância que a madeira representa na economia dos países, tanto no que respeita ao seu valor enquanto matéria-prima, como no que respeita ao meio de subsistência/forma de vida para uma grande fatia das populações - está a permitir um conhecimento mais profundo das qualidades deste nobre material, gerando condições para o aparecimento de novos processos construtivos, associados a modernos conceitos arquitetónicos.

Neste contexto, surge, recentemente, o *Cross Laminated Timber* (CLT). Este material, com elevada capacidade de carga, em conjunto com o reduzido peso próprio, permite elementos de elevada esbelteza, mesmo para vãos de grande dimensão. Em comparação com outros tipos de sistemas estruturais, correntemente usados na construção, este sistema oferece novas possibilidades em termos de transferência de carga. Ao contrário dos sistemas porticados em que as cargas são transmitidas predominantemente em fluxos unidireccionais, nas estruturas em painéis de CLT, os elementos comportam-se como placas, sendo a transmissão da carga feita bidirecionalmente.

Espera-se, assim, um processo de inversão da tendência negativa na utilização da madeira na construção de edifícios.

É neste enquadramento que se insere o objeto da presente dissertação: estudar este recente material, o CLT, que está, indubitavelmente, associado a um inovador processo construtivo. O estudo desenvolvido passa por uma análise do estado da arte do CLT no mundo, no sentido de percebermos qual o seu papel e o seu enquadramento como principal material na construção de edifícios. Um especial destaque é dado ao edifício londrino, *Stadthaus*, visto ser, até ao momento, o edifício mais alto do mundo construído neste material (30m de altura, com 9 pisos). O capítulo cinco assume acentuada importância, já que é reservado exclusivamente à pormenorização de um piso-tipo em CLT. O objetivo deste capítulo é não só perceber o funcionamento do material enquanto sistema pré-fabricado, como também compreender as suas potencialidades e capacidades, ao nível exigencial e estrutural.

O perfil sustentável do CLT é constantemente abordado ao longo deste trabalho, visto que este material é um excelente aliado das recentes políticas ambientais mundiais para o setor da construção, que visam a diminuição premente das emissões de dióxido de carbono. Não podemos ignorar que a indústria da construção é responsável pela emissão de um terço do total das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera e que a chave, no combate a estas nocivas emissões, pode estar na utilização da madeira como principal material na construção, dada a sua capacidade inata de armazenar dióxido de carbono.

Em suma, a elaboração deste trabalho justifica-se pela necessidade de entender o que é efetivamente o CLT, refletir sobre as suas potencialidades e perceber qual o seu papel no futuro da construção, pretendendo, assim, dar um modesto contributo para o esclarecimento desta e outras questões.

O betão armado foi o material de excelência do século XX. Será o CLT a excelência dos materiais do século XXI?

1.2. BASES DO TRABALHO DESENVOLVIDO

O trabalho de investigação desenvolvido nesta dissertação apoiou-se em outros trabalhos de investigação referentes às diversas áreas abordadas, bem como de uma pesquisa normativa no domínio e de diversas referências bibliográficas, onde se destaca o livro editado pela Murray&Sorrell *FUEL, A Process Revealed* [17], no documento *The Case for Tall Wood Buildings* de M.C.Green e J.E. Karsh [33] e no livro *Timber buildings – low-energy constructions* de Cristina Benedetti [42].

Fundamental para este trabalho foram também os elementos cedidos pela empresa Tisem, Lda, e a pesquisa via web de *sites* relacionados com a presente temática, entre os quais se destacam os da KLH, empresa austríaca líder do mercado mundial de CLT.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se organizada segundo 7 capítulos:

Capítulo 1: É feita uma breve apresentação do trabalho e sintetiza-se o seu conteúdo;

Capítulo 2: Proceder-se a uma abordagem da evolução das construções em madeira, desde a sua origem até às suas atuais tendências;

Capítulo 3: É dado a conhecer o CLT - proveniência, características principais, composição, aplicabilidade em obra, vantagens no seu uso e a ligação a outros sistemas construtivos;

Capítulo 4: É efetuada uma abordagem aos edifícios, mais emblemáticos, construídos e ainda em desenvolvimento, em CLT, no mundo, com maior incidência na Europa e na América do Norte. É dado especial destaque ao icónico edifício Stadthaus, construído em Londres;

Capítulo 5: Neste capítulo, o principal objetivo é a pormenorização de um piso-tipo em CLT, tendo por base um edifício existente de construção tradicional. A finalidade é alterar o sistema construtivo base pelo sistema construtivo em CLT;

Capítulo 6: São abordadas as tendências futuras das construções em madeira, num contexto mundial, e enfatiza-se a importância do CLT, fazendo um paralelismo entre as políticas mundiais para o setor da construção, fruto do aquecimento global do planeta e do crescimento urbano, e a necessidade urgente de construir em madeira;

Capítulo 7: São sintetizadas as temáticas desenvolvidas nesta dissertação, apresentando-se as principais conclusões obtidas e alguns juízos sobre o futuro das construções em CLT.

2

CASAS EM MADEIRA TENDÊNCIAS ATUAIS

2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A Madeira é um material orgânico com origem no tecido formado pelas plantas lenhosas. É um material naturalmente resistente e relativamente leve, o que permite a sua utilização para fins estruturais e de sustentação de construções.

É, certamente, um dos mais nobres e antigos materiais de construção utilizados pelo homem. O início da sua aplicação em construções dá-se no período Neolítico, também conhecido por Idade da Pedra Polida (aproximadamente entre 12000 a.C. e 4000 a.C.), onde o homem começa a dar os primeiros passos na agricultura.

Desde a época neolítica, quando se dá o fenómeno da sedentarização, o homem sente necessidade de construir abrigo para se proteger, utilizando, para tal, os materiais e utensílios que tinha à sua disposição na natureza.

A madeira, sendo leve, resistente e fácil de talhar, e aparecendo com abundância com comprimentos e diâmetros variáveis, deu ao homem a possibilidade de abandonar a caverna, começando a construir as mais elementares estruturas de madeira, com a forma de dois paus cravados no solo e ligados nas extremidades superiores por elementos vegetais fibrosos [1].

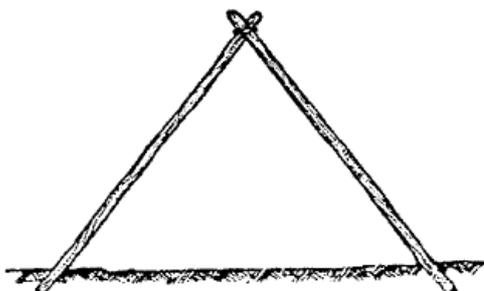


Fig. 2.1 – A estrutura mais simples de cobertura (Mateus, 1961) [1]

A necessidade de cobrir espaços mais amplos obriga à introdução de um apoio intermédio, surgindo assim as escoras. O travamento no sentido longitudinal era assegurado por duas madres e por uma fileira ao nível do cruzamento das peças inclinadas.

Para maior aproveitamento do espaço e mais facilidade de realizar aberturas para o exterior, as peças de suporte direto da cobertura deixaram de vir até ao solo e passaram a apoiar-se em elementos verticais, realizando assim o esqueleto de paredes.

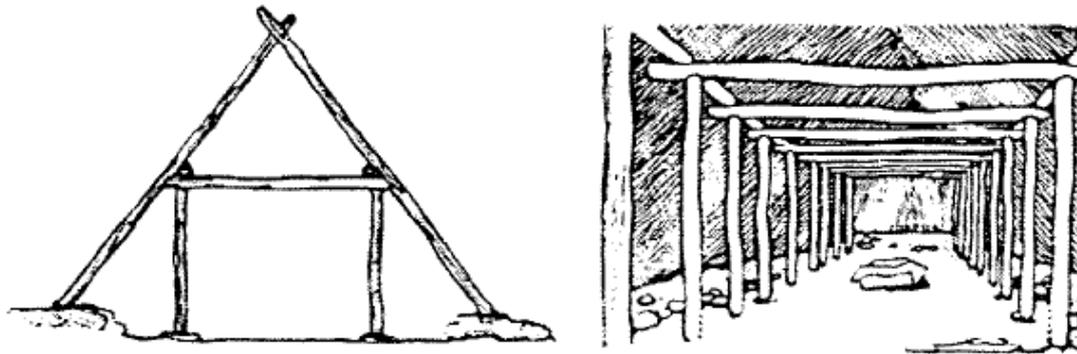


Fig. 2.2 – A estrutura de cobertura da Idade do Ferro (Mateus, 1961) [1]

A arte de carpinteiro é anterior à de pedreiro, esta última apenas surge quando o homem decide fracionar a pedra em blocos facilmente manuseáveis que, sobrepostos, davam longas paredes resistentes.

As cidades lacustres, de que ainda se encontram vestígios (Suíça), atestam o largo emprego que, na Pré-História, se deu à madeira na formação de estruturas resistentes, desde a estacaria às plataformas de acesso às habitações, e demonstram o desenvolvimento na arte de construir e como pode ser longa a durabilidade deste material.



Fig. 2.3 – Cidade lacustre Suíça [2]

Durante muitos séculos foi o carpinteiro o artífice mais importante na construção das edificações, cuja arquitetura foi fortemente influenciada por este material. Desde as habitações até às primeiras fortificações, com os seus órgãos de defesa (pontes levadiças, catapultas, etc.), passando pelos

edifícios religiosos, cuja cobertura e estruturas das torres trouxeram problemas de vão e de forma de resolução difícil, a intervenção do carpinteiro foi primordial.

Algumas regiões do mundo, nomeadamente a Ásia central, atingiram um nível tão grande de desenvolvimento que dificilmente a tecnologia moderna terá algo a acrescentar. Estas construções chegaram até hoje como testemunho da sua extraordinária tecnologia. Entre elas temos o templo *Horyuji*, localizado no Japão, na prefeitura de Nara. É um complexo constituído por vários edifícios onde se destaca uma Pagode de 5 andares, considerado como o edifício de madeira mais antigo do mundo totalmente preservado. Este edifício foi completado no ano 607 d.C., tendo mais de 1400 anos e uma altura de 32.25 metros. Conseguiu sobreviver aos variados sismos graças às suas características únicas estruturais. O seu peso próprio não é suportado pelas paredes, mas sim por um conjunto de pilares centrais, onde toda uma complexa estrutura se apoia, permitindo assim à estrutura ser flexível como uma árvore e absorver qualquer movimento de origem sísmica.



Fig.2.4 – Pagode do Templo Horyuji, no Japão [3]

Na Europa, é possível encontrar inúmeros registos de construções de troncos de árvores. Sabe-se que no ano 700 a.C. em *Biscupin*, na Polónia, existiu uma povoação constituída por casas de troncos. A partir do ano 1000 d.C., na Escandinávia, era frequente a construção de casas de troncos dispostos tanto na horizontal como na vertical. Os troncos horizontais eram unidos entre si nas suas esquinas, mediante diversos tipos de acoplamento. Esta disposição horizontal teve maior aceitação do que a disposição vertical, devido à maior estabilidade estrutural. O principal inconveniente da disposição horizontal prende-se com a estanquidade à água e ao vento, devido aos precários sistemas de união/acoplamento, procurando-se, no entanto, solucionar o problema, calafetando as fendas com telas tecidas na cor da madeira ou, nas casas mais humildes, com argila, musgo ou terra.

Com o desenvolvimento das técnicas de serragem, a partir do século XV, serrações utilizando a água como força motriz, tornaram mais fácil a obtenção de grossas tábuas, que, por meio de espigas, permitiam uma melhor união entre si. Deste modo, pouco a pouco, as casas de troncos foram sendo substituídas por casas de tábuas ou troncos retangulares, conferindo à estrutura uma melhor estanquidade e estabilidade. A arquitetura em madeira, partindo destes princípios, foi evoluindo, passando por uma fase de construção popular, alcançando níveis surpreendentes e de grande realização à medida da evolução do desenvolvimento tecnológico. Nos nossos tempos, podemos admirar extraordinários exemplos de arquitetura em madeira, em diversas zonas do globo. Igrejas e algumas casas da Nova Guiné têm mais de 18 metros de altura, 30 metros de comprimento e são construídas inteiramente em madeira. Pilares de Bambu profundamente cravados no solo, erguendo-se no ar, como arcos góticos, sustentam uma pesada cobertura de teto, constituindo algumas das mais audazes estruturas de madeira construídas com o auxílio de ferramentas artesanais e muito limitadas [4]. A construção sobre colunas de madeira está presente em praticamente todos os continentes, devendo-se a

sua popularidade à eficácia contra condições meteorológicas adversas (chuvadas) e ataques de animais selvagens.

Nos finais da Idade Média, o desenvolvimento era tal que permitia construir edifícios até 5 e 6 pisos (ver figura 2.6). Grande parte do encanto com as estruturas em madeira utilizada na construção de edifícios consistia nos elementos utilizados para formar paredes. Todas as paredes eram construídas enchendo simplesmente os espaços existentes entre os elementos em madeira, com areia e argila, que se aplicava sobre um entrelaçado de ripas e tecido firmemente preso à estrutura de madeira, tanto pelo interior como pelo exterior. Geralmente as argamassas das paredes exteriores eram pintadas ou revestidas com outros materiais, como azulejos, dando um aspeto decorativo muito interessante.

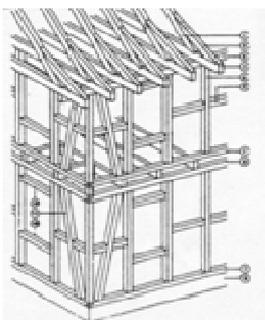


Fig.2.5 – Esquema de uma estrutura em “gaiola” [5]



Fig.2.6 – Edifícios em Estrasburgo, França [5]

Este sistema foi adotado em Portugal com a designação “taipa”, no Porto, e “gaiola”, em Lisboa. Em França, este sistema designa-se por “à colombage”. Podemos observá-lo nas figuras 2.5 e 2.6. No Porto, o recurso à taipa evolui para uma utilização essencialmente em divisórias interiores, enquanto que nos séculos XVIII e XIX a grande maioria dos edifícios em Lisboa foram edificados com estruturas resistentes em “gaiola”. Depressa este sistema de enchimento foi substituído pela utilização de alvenaria e tijolos, pois não apresentava a elasticidade suficiente para contrariar os efeitos de contração e torção da madeira, estalando com facilidade.

Nos finais do séc. XIX, dão-se os primeiros passos na utilização do betão armado. O princípio do século XX é caracterizado por um desenvolvimento extraordinário na utilização e compreensão do funcionamento e possibilidades do betão armado.

Em Portugal, no início do séc. XX, muitas famílias, impulsionadas pelo forte desenvolvimento industrial, migraram para as grandes cidades na esperança de uma vida melhor. Este êxodo massivo criou uma deficiência grave de habitação nessas cidades e a solução encontrada foi a criação de habitações sociais, através de pré-fabricados em madeira. Os pré-fabricados passam assim a ser a solução para as carências habitacionais, para o desenvolvimento da estrutura educacional com a criação de escolas, para a construção de variadas estruturas secundárias, celeiros, anexos e outros. As construções em madeira ficam assim associadas a algo de precário, temporário e de baixa qualidade arquitetónica, noções essas que prevalecem, na grande maioria da população, até aos dias de hoje.

No entanto, em países mais desenvolvidos, a madeira nunca perdeu a sua notoriedade, como nos Estados Unidos da América, Canadá, países nórdicos e Japão, onde a madeira continua a ser o material mais utilizado na construção de habitação residencial (responsável por cerca de 80% da habitação residencial).

No sul da Europa, as crescentes preocupações ambientais promovem a madeira como material de excelência, associando-o, não só, ao seu perfil sustentável, mas também à sua elevada capacidade

estrutural, lançando-o novamente no mercado, como um material competitivo de grandes potencialidades.

Com o crescimento da consciência ecológica e com a aplicação da ciência à construção, o Homem passa a compreender melhor e aprende a corrigir o comportamento de alguns sistemas construtivos do passado, que se mostram atualmente bastante mais compatíveis com o equilíbrio dos ecossistemas do que os atuais sistemas construtivos amplamente implementados e disseminados.

Esta nova abordagem vai lentamente dissipando junto da população a ideia de que a madeira é uma má opção para a construção, começando a reconhecer as qualidades deste nobre material.

2.2. TIPOS DE CONSTRUÇÕES EM MADEIRA

As construções em madeira são classificadas em três grandes tipos: casa de troncos (*Loghomes*), casas com estrutura em madeira pesada (*Heavy Timber*) e casas com estrutura em madeira leve (*Light Framing*).

No entanto, mais recentemente foram criados novos sistemas que, pelo seu grau de desenvolvimento e tecnologias utilizadas, não podem ser englobados nos tipos enunciados, tais como as estruturas pré-fabricadas modulares. No entanto, é objeto deste capítulo ilustrar as novas tendências atuais, pelo que os módulos habitacionais em madeira são também abordados.

Quadro 2.1 – Sistemas de construção em madeira

Tipo de estrutura	Sistemas
Casa de troncos	<i>Loghomes</i>
Estrutura pesada de madeira (<i>Heavy Timber</i>)	Porticado (<i>Post&Beam</i>)
	Entramado (<i>Timber Frame</i>)
Estrutura leve de madeira (<i>Light Framing</i>)	Sistema em balão (<i>Ballon Frame</i>)
	Sistema plataforma (<i>Platform Frame</i>)
Estrutura pré-fabricada modular	Módulos de pequenas dimensões
	Módulos de grandes dimensões
	Módulos tridimensionais

2.2.1. CASAS DE TRONCOS - LOGHOMES

Este modelo estrutural é o mais antigo dos tipos de construção em madeira mais frequentes (as primeiras edificações datam da Idade da Pedra na Polónia e na Turquia).

A edificação à base de toros ou troncos pode-se assimilar à construção em muros de alvenaria, visto que estruturalmente funcionam da mesma maneira. O sistema clássico, como já referido anteriormente, coloca os troncos horizontalmente, devido à maior estabilidade estrutural, apesar da disposição vertical, embora menos frequente, ser correntemente adotada.

Do ponto de vista formal, e apesar da sua rusticidade, a madeira apresenta-se aqui com toda a sua expressividade, condicionando o aspeto final da casa. Este sistema construtivo é o único que dispensa qualquer tipo de revestimento ou acabamento.

Do ponto de vista estático, a madeira é aqui utilizada de forma deficiente, visto estar a trabalhar perpendicularmente à direção das suas fibras. As suas propriedades nesta direção, devido à sua constituição anisotrópica, são entre 20 a 30 vezes menores do que no sentido longitudinal, porque esta disposição só aproveita 5% da capacidade resistente das peças.

Por outro lado, os muros sofrem deslocamentos notáveis devido ao efeito da secagem dos troncos, o que pode prejudicar a sua estabilidade, a qual já é dificultada pela difícil interligação entre as peças.

A forma redonda e ligeiramente cónica dos troncos tornam completa a união. A estabilidade do conjunto é assegurada pela união das paredes nos cantos e pelo travamento providenciado pela ligação com os muros interiores. Nesses pontos, as cabeças são travadas mediante encaixes especiais. Na sua evolução posterior, o tronco passa a ser manufacturado, ganhando formas quadradas que permitem maiores superfícies de apoio, melhorando a estabilidade [3].

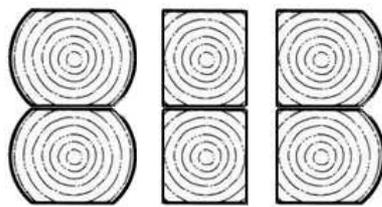


Fig.2.7 – Exemplos de troncos com superfícies planas [5]

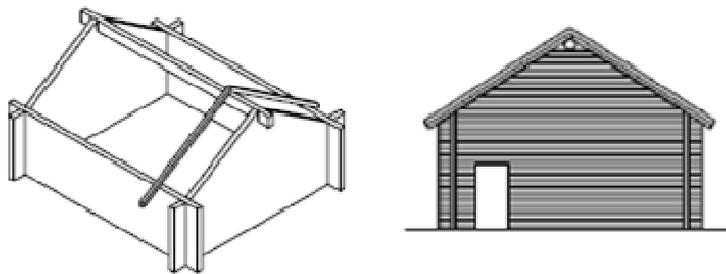


Fig.2.8 – Esquema estrutural de casas de troncos [6]

2.2.2. CASAS COM ESTRUTURAS EM MADEIRA PESADA - *HEAVY TIMBER*

Este tipo de edificação surge naturalmente como resposta à necessidade do Homem de atingir a excelência, na procura de edificações maiores, originais e singulares.

As estruturas pesadas constituem um sistema praticamente universal que está presente ao longo de toda a história da arquitetura numa grande quantidade de países. A corrente ocidental nasce na Europa, sendo exportada para a América do Norte e a corrente oriental nasce na China e expande-se para o Japão e todo o sudoeste asiático. No Ocidente, desenvolve-se desde a idade média até ao século XIX, onde entra em decadência com a aparição dos novos materiais. No Oriente, o seu período de desenvolvimento e declínio é similar.

Apercebendo-se das limitações estruturais dos sistemas mais precários, o homem potencializa as características resistentes da madeira, colocando as peças a trabalhar ao longo da direção paralela às fibras. Este sistema inovador permite aberturas maiores e edifícios até seis andares. A sua crescente popularidade faculta a globalização do sistema, nomeadamente da Europa até à América do Norte e

Ásia. Como acima referido, este sistema prevalece até ao séc. XIX onde atinge o seu apogeu, sendo então substituído por sistemas com estruturas em betão armado. Este método tem como particularidade principal a separação física entre a estrutura, envolvente e revestimentos. Na sua origem era um sistema muito artesanal e complexo. As peças eram cortadas e montadas *in situ*. Atualmente é muito mais competitivo e simples devido a vários níveis de industrialização e pré-fabricação. Todas as peças são desmontáveis e transportáveis, podendo ser montadas noutra local graças à sua numeração.

Podem-se considerar dois tipos diferentes de estruturas *Heavy timber*: o sistema porticado, *Post&Beam* e o sistema de entramado, *Timber frame*. Todos têm em comum o uso de grandes elementos de madeira com elevado peso próprio.

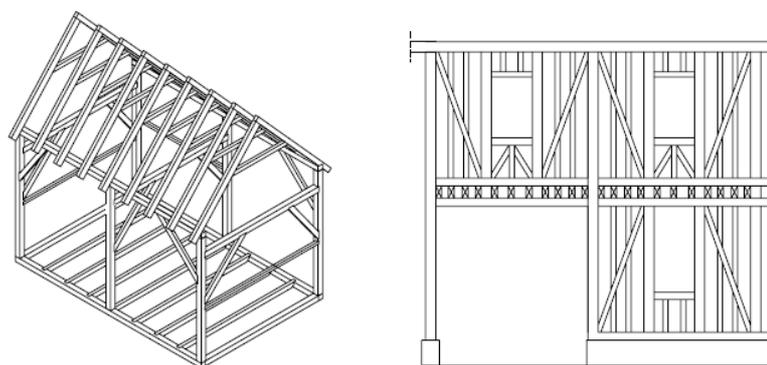


Fig.2.9 – Sistema porticado, à esquerda, e sistema entramado, à direita [6]

2.2.2.1. Sistema porticado - *Post&Beam*

Este sistema é constituído por um conjunto de pórticos que formam um conjunto rígido autoportante e independente de revestimentos. As vigas e os pilares têm secções de grande dimensão que permitem a execução de vãos relativamente elevados e têm muitas vezes expressão arquitetónica suficiente para ficarem aparentes. As placagens, à exceção dos pavimentos, funcionam como elementos decorativos e de definição dos espaços. A rigidez do pórtico consegue-se através de elementos diagonais e de elementos transversais ou estribos. Uma série de cavilhas e cunhas contribuem para dar adequada rigidez ao conjunto. O aparecimento de novos materiais, como os lamelados colados, favoreceu também o seu desenvolvimento, bem como o desenho assistido por computador (CAD) e as máquinas para trabalhar madeira do tipo CAD-CAM.

Em diversos países da Europa muitas estruturas modernas em madeira utilizam este tipo de solução.

2.2.2.2. Sistema de entramado - *Timber frame*

Este sistema, estruturalmente, varia do anterior essencialmente pela introdução de elementos portantes diagonais, ao contrário dos elementos sem grande expressão física da solução anterior. Assim, nesta solução, a definição dos espaços fica obrigatoriamente condicionada pela presença destes elementos (definição de planos verticais). Estruturalmente, cada parede funciona como um muro resistente, onde a madeira trabalha na direção das fibras e as ligações, do tipo macho-fêmea, são menos complexas que no sistema porticado. A utilização dos elementos estruturais de grande largura tem implicações, ao nível do peso da estrutura, que se traduzem numa redução dos pés-direitos disponíveis em relação ao sistema anterior. Os preenchimentos e revestimentos estão também condicionados sendo que se

preenchem os espaços vazios com materiais adequados (madeira, cerâmica), podendo a estrutura ficar visível.

2.2.3. CASAS COM ESTRUTURAS EM MADEIRA LEVE – *LIGHT FRAMING*

O sistema das casas com estrutura em madeira leve é mais recente no que respeita às construções em madeira, e surge no séc. XIX, na América do Norte, como consequência direta de dois fatores: a existência e disponibilidade de produtos industriais normalizados (madeira serrada e pregos) e a necessidade dum sistema de construção rápido que respondesse à carência de habitações resultantes da colonização do Oeste dos Estados Unidos da América.

Este sistema, embora surgindo no seguimento das estruturas em madeira pesada, representa um novo conceito estrutural. Efetivamente, a introdução de novos elementos estruturais (muros e lajes) confere à estrutura uma nova dimensão, dotando o resultado de uma noção espacial semelhante ao praticado nas atuais estruturas em betão armado. Utiliza-se grande número de elementos de largura reduzida, pois a carga é distribuída e alternada através de muitos elementos.

As peças são usualmente normalizadas e certificadas, o que permite o intercâmbio, a modulação e a pré-fabricação. Para além disso, também têm uma geometria simples, o que permite obter uma construção mais económica.

As uniões são simples, sem juntas nem encaixes especiais, bastando o uso de pregos e cavilhas. Por outro lado perde-se bastante a “arte” da carpintaria, pois requer pessoal pouco especializado, pelo que se ganha em produtividade.

É mais fácil isolar e impermeabilizar do que uma vivenda tradicional. As cavidades entre os elementos estruturais permitem a passagem das instalações e o preenchimento com isolante.

A nível do projeto, esta solução permite uma grande flexibilidade tanto no desenho inicial, como em modificações posteriores, se necessárias. Exige uma grande quantidade de detalhes construtivos especiais, devido ao elevado número de peças que se empregam e também um maior controlo na receção dos materiais, sua proteção e armazenagem.

Do ponto de vista estético, as estruturas leves exigem ser “escondidas”. Uma estrutura leve não revestida é uma solução esteticamente inaceitável.

A sua durabilidade não tem razão de ser menor que a construção tradicional, desde que tenha uma manutenção adequada. Nos Estados Unidos, Rússia e Escandinávia existem vivendas que duram há centenas de anos.

As estruturas leves são correntemente divididas em dois tipos: *Balloon frame* (estrutura em balão) e *Platform frame* (estrutura em plataforma).

2.2.3.1. Estrutura em balão - *Ballon frame*

É o sistema original que dá origem às estruturas leves. No sistema em balão, as fachadas são executadas com montantes contínuos em toda a sua altura, normalmente de dois pisos. A ereção do edifício é bastante complexa, devido à altura dos montantes, da dificuldade de obter peças de madeira suficientemente estáveis e geometricamente perfeitas e ao facto de todos os elementos deverem ser armados simultaneamente.

As paredes, pavimentos e coberturas são constituídas por vigas e os montantes de madeira de pequenas secções são espaçados entre si cerca de 60 cm e fixados exclusivamente com o recurso a pregos. As

vigas das lajes ligam-se diretamente aos montantes, as quais são travadas por tábuas transversalmente, formando o piso.

A conceção apresenta deficiências no comportamento em relação à resistência ao fogo, por existir uma total continuidade entre os pisos.

A leveza dos elementos reduz consideravelmente os custos com a mão-de-obra de execução.

2.2.3.2. Estrutura em plataforma - *Platform Frame System*

Este sistema é a evolução das estruturas em balão, progredindo no sentido de colmatar as falhas inerentes ao sistema anterior.

O componente essencial das estruturas em plataforma é o revestimento das estruturas com placas de madeira, originalmente de madeira maciça e na atualidade de derivados de madeira. O revestimento garante o funcionamento conjunto da estrutura como um corpo único desde a fundação até à cobertura. As plataformas ao nível de cada piso apoiam diretamente nestes muros que funcionam como estrutura de suporte. A altura dos montantes coincide com a altura dos pisos.

O sistema presta-se melhor à pré-fabricação por facilitar a construção de elementos intermédios. A ereção é muito simples. Vão-se elevando consecutivamente as plataformas de muros e lajes que se vão travando entre elas.

Apresentam um melhor comportamento ao fogo, pois possibilitam uma maior separação entre pisos.

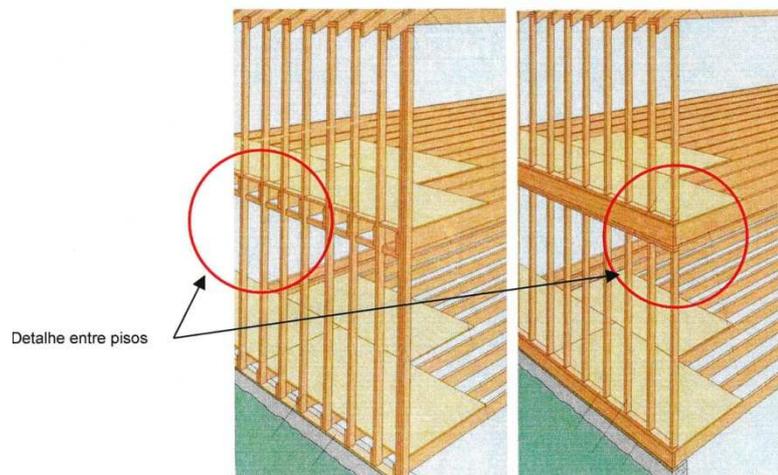


Fig.2.10 – Estrutura em balão - *Ballon frame*, à esquerda e Estrutura em plataforma - *Platform System*, à direita (Wagner, 2005) [7]

2.2.4. CASAS COM ESTRUTURA PRÉ-FABRICADA MODULAR

O estereótipo negativo de casa pré-construída ainda existe, mas é resultado da má informação que circula em forma de “boato”.

Os projetos de habitação em larga escala raramente preenchem os requisitos estéticos e de *design* da maioria dos seus habitantes. Muitas vezes, a conceção de habitações ou edifícios mais arrojados ou com utilização de outros materiais não está ao alcance de todos os orçamentos. É nesta medida que a pré-fabricação ganha terreno face à construção tradicional, uma vez que permite a realização de

projetos de larga escala com *design* moderno e novas soluções arquitetônicas, ao alcance de um maior número de pessoas.

A pré-fabricação surge como consequência de todas as características que o modo de trabalhar a madeira pode apresentar [8]. É concebida de forma totalmente integrada em que as tarefas a efetuar em ambiente fabril estão perfeitamente definidas, permitindo que partes inteiras da construção sejam produzidas em fábrica, seguindo modernos conceitos de racionalização, rigor, obedecendo assim a elevados níveis de controlo de qualidade.

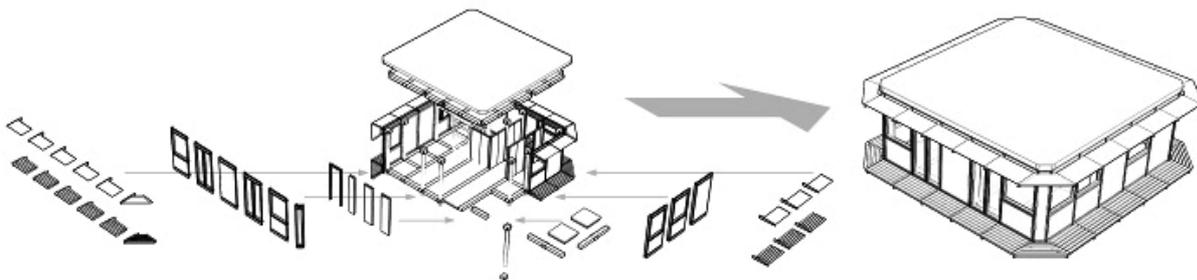


Fig.2.11 – Sistema de pré-fabricação da empresa LUKASLANG [9]

A construção modular permite conjugar um elevado número de possibilidades estéticas e dimensionar os espaços adequados a cada realidade familiar ou industrial, de forma permanente ou progressiva.

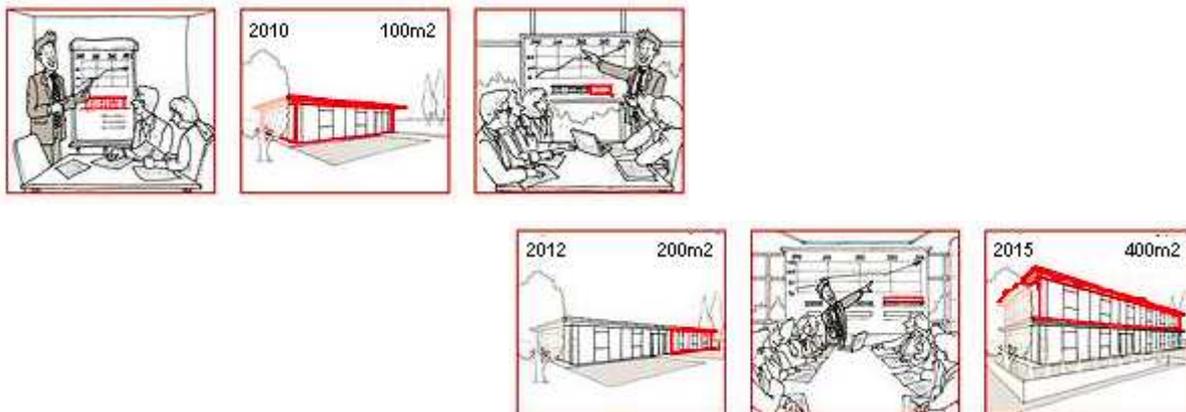


Fig.2.12 – Capacidade de flexibilidade, mudança a qualquer momento [9]

Nas casas modulares a coordenação dimensional modular é uma metodologia, que permite que todo o processo de construção seja uniformizado através da racionalização das dimensões dos componentes, otimizando o processo de construção, desde a concepção à construção.

A coordenação modular visa organizar as dimensões da construção por estabelecer um módulo padrão como unidade de medida de referência. A permutabilidade de diferentes sistemas construtivos para a mesma edificação é possível caso estes obedeçam a critérios definidos por um módulo comum proposto.

São muitos os sistemas construtivos que têm por base os fundamentos da construção modular. Podem ser classificados como sistemas modulares fechados e sistemas modulares abertos [8].

No sistema modular fechado, o módulo é semelhante a uma célula, não se desagrega, todos os componentes estão ligados, não existe possibilidade de mudança. Os módulos podem ser combinados empilhados, ligados entre si ou suspensos por uma estrutura metálica que funciona como esqueleto.

No sistema modular aberto, onde se incluem o sistema de vigas e pilares, elementos como as paredes interiores e exteriores não têm qualquer função estrutural, são os pilares e as vigas que suportam todas as cargas da estrutura. A dissociação entre os elementos estruturais e não estruturais possibilita a criação de espaços de maior dimensão, mais abertos, dando possibilidade à criação de configurações distintas.

No sistema de painéis, também ele classificado de sistema aberto, estes são responsáveis pelo suporte de todas as cargas a que o edifício está sujeito. Os painéis são, por norma, concebidos segundo o Sistema Plataforma, formados por um conjunto de perfis de madeira maciça, igualmente distanciados, enrijecido por placas estruturais (ex. OSB, partículas de madeira cimento ou contraplacado), que conferem estabilidade à estrutura [8].

Um novo derivado da madeira é usado recentemente nesta indústria: o CLT. Este recente material é aplicado em paredes internas e externas, pavimentos e coberturas, apresentando uma grande capacidade estrutural. Este sistema vai ser desenvolvido nos capítulos seguintes, sendo este novo sistema construtivo o tema principal deste trabalho.

2.3. PROJETOS INOVADORES / TENDÊNCIAS ATUAIS

2.3.1. A TORRE TURÍSTICA TRANSPORTÁVEL (TTT)

A ttt (torre turística transportável) é um projeto industrializado e multifuncional de arquitetura sustentável. Constitui simultaneamente uma prática de modularidade e evolutividade urbana, de integração ambiental e de mobilidade turística, numa inovadora mistura que representa um novo conceito de habitabilidade.



Fig.2.13 – ttt (torre turística transportável) [10]

A verticalidade que caracteriza esta torre é um fator inovador relativamente ao que é a oferta existente no mercado da microarquitetura pré-fabricada. Tal demarcação ocorre devido à necessidade imperiosa de cumprir o limiar da habitabilidade humana em espaços reduzidos, o que jamais se verificaria posicionando ao alto os convencionais contentores de 20 ou 40 pés, recorrentemente utilizados em vários tipos de soluções pré-fabricadas, pronto a habitar [11].



Fig.2.14 – ttt (torre turística transportável) [11]

A ttt (torre turística transportável) é um sistema construtivo bioclimático desenvolvido pela parceria dst,s.a. / Universidade do Minho, aliando investigação e estratégia empresarial. Este conceito turístico e habitacional teve o seu lançamento mundial na Expo Xangai 2010 e foi premiado no Concurso Nacional de Inovação BES, sector de Energia.

Esta tecnologia consagra uma inovadora solução estrutural mista madeira-vidro onde a combinação destes materiais assume igualmente carácter energético, funcional e estético. Tal particularidade enquadra o produto desta investigação no domínio conjunto da engenharia e da arquitetura, no campo específico das tecnologias inovadoras da construção, quer em edifícios novos quer na reabilitação de edifícios existentes. O sistema materializa-se através de um painel modular polivalente, utilizável como laje ou como parede resistente. Este integra sistemas solares passivos, sistemas solares ativos e funções bioclimáticas, que se traduzem diretamente em eficácia energética, constituindo clara inovação ao nível de elementos estruturais pré-fabricados.

Funcionando como torre, e embora com uma área de construção reduzida/otimizada, o módulo desenvolve-se por 3 pisos, com uma área de implantação de pouco mais que 10m². Ainda assim, contém um conjunto alargado de funcionalidades, como instalações sanitárias, pequena cozinha, espaço de refeições, espaço de estar, pequeno escritório, quarto/cama e varanda exterior/posto de observação no topo [12].

Para além da pré-fabricação, este projeto assume como princípios estratégicos a modularidade, a evolutividade habitacional, a produção em série e a transportabilidade. Tais princípios enquadram-se numa aposta na otimização produtiva e na estratégia de implementação de mercado.

Materializada predominantemente por madeira, elemento construtivo natural e 100% renovável, mas também por vidro, 100% reciclável, privilegia uma política de reutilização, apresentando um impacto construtivo significativamente reduzido [10].

A polivalência estrutural da ttt permite também o seu funcionamento horizontal, uma vez que essa é a sua posição de transporte. Esta característica permite a sobreposição de módulos, por camadas, originando soluções urbanas em altura, prontas a ocupar e revitalizar tecidos de cidade. Destaca-se a possibilidade de aumentar o espaço habitável, duplicando ou quadruplicando a área útil das soluções de propriedade horizontal.

2.3.2. CASA MIMA

A Casa Mima foi concebida por dois jovens arquitetos de Viana do Castelo cuja inspiração teve por base as casas vernaculares japonesas. Conscientes de que a maioria da população não dispõe de meios para adquirir arquitetura de habitação (de construção tradicional), esse facto motivou-os na procura por uma solução capaz de, por um lado, simplificar os processos de arquitetura tradicional e, por outro, incorporar todas as características e atributos que viabilizam e conferem a qualidade arquitetónica e espacial de uma obra. Este projeto arrecadou em Março de 2012 o prémio *Building of the year 2011*.

Nesta casa pré-fabricada modular, a questão da flexibilidade é enfatizada pelo modo como as paredes – constituídas por uma estrutura leve de base em alumínio e por painéis de contraplacado em cada um dos lados – podem ver o seu aspeto alterado num processo simples de rotação ou substituição dos mesmos. Também as fachadas podem ser alteradas. A composição base da casa contempla fachadas totalmente envidraçadas em todo o perímetro, às quais, caixilho a caixilho, podem ser adicionados painéis de aplicação semelhantes aos das paredes interiores, mas com uma resistência e durabilidade adaptadas à exposição exterior [13]. Esta flexibilidade permite o melhor aproveitamento do sol e aquecimento da casa durante o inverno e evita o sobreaquecimento da casa durante as estações mais quentes.

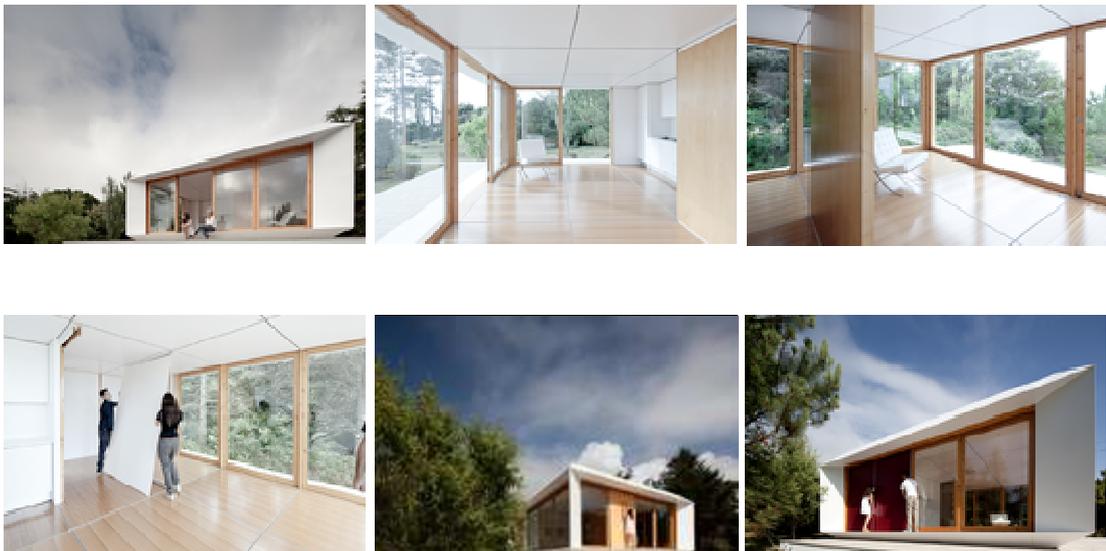


Fig.2.15 – Casa Mima - flexibilidade [14]

Esta casa modular é constituída por uma estrutura simples de pilar e viga em lamelado colado de pinho. Os pilares estão colocados nas extremidades da casa, permitindo que o módulo disponha de 36 m² de área livre. A casa MIMA possui planta regular de 7,57 x 7,57 metros. A área bruta da casa, ou seja, contabilizando o perímetro exterior da casa, é de 57 m². A área habitável da casa é de 36 m² delimitados por um quadrado de 6,00 x 6,00 metros. O pé direito interno da casa é de 2,40 metros e a altura total da casa é de 3,00 metros. As janelas são constituídas por caixilhos de alumínio revestidos a madeira, vidro duplo com proteção UV e painéis de revestimento interior e exterior em contraplacado marítimo. Todos os elementos de acabamento - peças de chão, teto, paredes interiores e paredes exteriores - são painéis de contraplacado com 1,5 m de largura. Os materiais de acabamento e cores são decididos pelo cliente [14].

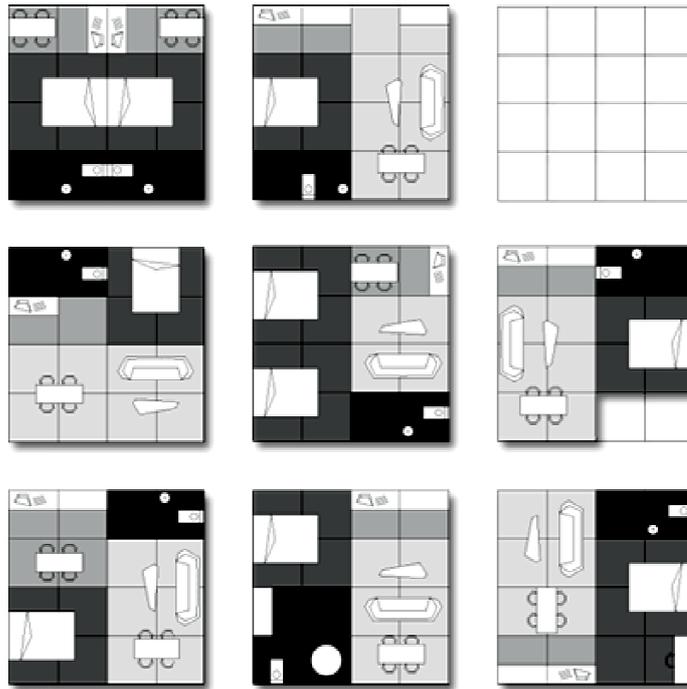


Fig.2.16 – Diversidade de opções de *layout* dentro de um módulo-base [13]

Este projeto, singular, de excelente qualidade “artística” pode ser produzido em apenas um mês. É fabricado no Porto, e está a ser exportado para vários países. Por exemplo, o módulo de 57m² pode ser transportado, em camião, de uma só vez, e o seu tempo de montagem é normalmente de 4 dias. Todas as infraestruturas estão incluídas no módulo e estão prontas a ligar às redes públicas.

2.3.3. CASAS EM MOVIMENTO

Casas em Movimento é o espelho vivo da inovação arquitetónica, aliada à sustentabilidade na construção. É um projeto pioneiro no mundo inteiro, que nasceu em Portugal. Desenvolvido na Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto representou Portugal no concurso universitário internacional Solar Decathlon Europe, evento que decorreu em Madrid, e que promove a construção e arquitetura de casas sustentáveis com base no aproveitamento de energia solar, assim como o menor uso de recursos naturais.



Fig.2.17 – Casas em Movimento [15]

Tal como uma árvore de folha caduca cuja copa se modifica com as estações do ano, a cobertura da casa tem posições distintas, permitindo a criação de sombras no verão e a incidência de sol no inverno. Esta é a base da inovação do projeto: os movimentos de rotação dos painéis e da própria casa, em função do percurso do Sol.

À semelhança de um girassol a casa rodará aproximadamente 180° de nascente para poente. Os referidos movimentos combinados de rotação necessários, além de responsáveis pela sustentabilidade da própria casa - no sentido de garantir um melhor aproveitamento de luminosidade no interior, maiores ganhos energéticos a nível térmico e maior produção de energia elétrica - também são encarados como geradores de novos espaços interiores e exteriores.

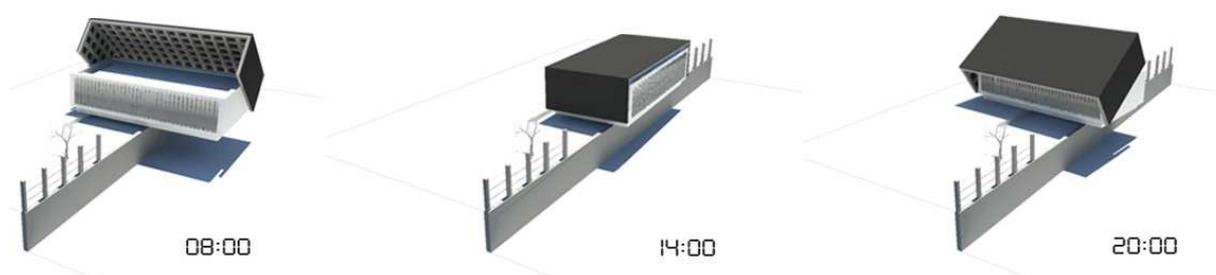


Fig.2.18 – Diferentes posições da casa ao longo do dia, implantada nos socalcos do Douro [16]

Além do conceito de sustentabilidade, o projeto Casas em Movimento também tem patente o conceito evolutivo, ou seja, é uma casa modular que permite crescer e diminuir em função das necessidades da família. Esta casa admite aumentos e reduções de área, variando as dimensões, numa atitude de adição e subtração de módulos, que permitem concretizar o propósito da reutilização de estruturas modulares, dando assim prioridade ao cumprimento dos conceitos de construção. Desta forma, esta solução também permite que, se a família mudar de local, a casa vá com ela. Os espaços interiores também se adaptam aos habitantes, oferecendo divisões transformáveis pela mobilidade de uma parede que se aumenta, diminui e transforma ao nível do tamanho e limites.

O processo de rotação está pensado para ser automático. É por isso que, em termos de organização espacial, ocorre também uma mutação de espaços, ao longo do dia, em função das rotinas da família. Segundo o autor do projeto, Manuel Vieira Lopes, “É uma casa que se adapta às necessidades da família e não o contrário”. Por exemplo, a cozinha à hora do almoço está virada a norte e ao final do dia funde-se com a sala, quando a família faz as refeições em conjunto, facilitando o convívio.

Na construção do protótipo foram privilegiados a utilização de materiais sustentáveis, característicos da indústria portuguesa, como a cortiça e a madeira [16].

3

CLT – CROSS LAMINATED TIMBER O QUE É?

3.1. OBJETO

Cross Laminated Timber não é, apenas, um mero material de construção, mas sim um novo processo de construção.

Pretende-se neste capítulo aprofundar, tecnologicamente, este recente material, desde a sua origem à sua aplicabilidade na construção de edifícios. O seu perfil sustentável e as suas capacidades, ao nível estrutural e exigencial, são, também, aqui abordados.

3.2. O MATERIAL

A madeira lamelada colada cruzada é um material que nasceu em Zurique, Suíça, em 1990, mas foi desenvolvido posteriormente na Áustria através da cooperação entre a indústria e a universidade. Uma das empresas pioneiras no fabrico de CLT foi a empresa austríaca, KLH, fundada por *Heimo de Monte* e *Wolfgang Weirer*, em 1998, depois de vários anos de pesquisa e estudos desenvolvidos em parceria com a *Graz University of Technology* [17].

Este material baseia-se no mesmo conceito de colagem de várias camadas de tábuas (lamelas) de madeira utilizado na produção de madeira lamelada colada, mas que, no caso do CLT, cola camadas sucessivas com tábuas dispostas ortogonalmente.

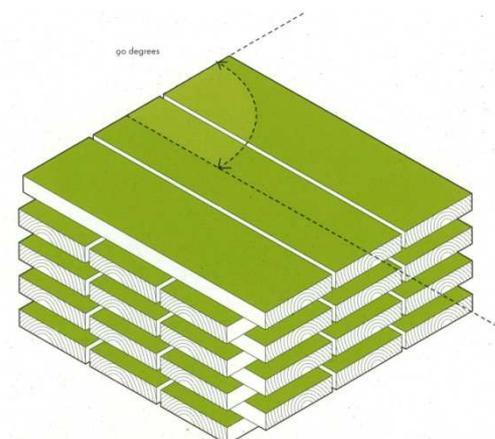


Fig. 3.1 – Disposição das camadas [17]

Assim, uma das principais inovações do CLT assenta na produção de elementos em painel, ao contrário dos comuns elementos lineares, podendo servir como elementos quer de parede, quer de laje. Além disso, a configuração cruzada das lamelas de madeira permite atingir capacidades de resistência e rigidez mais elevadas, quer no plano, quer fora do plano.

As excelentes propriedades resistentes estão relacionadas com a sua composição interna maciça, composta pelas referidas lamelas cruzadas coladas, permitindo uma distribuição da carga de forma bidirecional. A elevada capacidade de carga, em conjunto com o reduzido peso próprio, permite elementos de elevada esbelteza, mesmo para vãos de grande dimensão. Em comparação com outros tipos de sistemas estruturais comumente usados na construção, este sistema oferece novas possibilidades em termos de transferência de carga. Ao contrário dos sistemas porticados em que as cargas são transmitidas predominantemente em fluxos unidirecionais, nas estruturas em painéis de CLT os elementos comportam-se como placas, sendo a transmissão da carga feita bidirecionalmente.

Os painéis podem conter entre três e sete camadas, possuindo sempre um número de camadas ímpar, de modo a criar um eixo de simetria na camada central.

O CLT é considerado como um material estável (dimensionalmente), uma vez que o cruzamento das lamelas restringe os movimentos higroscópicos da madeira quando sujeita a variações do teor de água (menos de 1% na direção das fibras e 2% na direção perpendicular às fibras). Para tal, é produzida com um controlo rigoroso do teor de água das tábuas que constituem o elemento, aproximadamente 12%, saindo da fábrica com um teor de água entre 10 e 14% [18].

O comportamento dos edifícios de CLT em altura quando sujeitos a ações sísmicas tem vindo a ser alvo de alguns estudos experimentais, os quais têm provado que este tipo de edifícios possui uma performance bastante satisfatória, apesar de muito dependente do tipo de ligações utilizadas. Um desses estudos é o *Project SOFIA* [19], o qual testou, em mesa sísmica, um edifício de sete andares à escala real, que sobreviveu à ação sísmica sem danos significativos.

O CLT apresenta, também, um excelente desempenho ao nível acústico e térmico e um bom comportamento face à ação do fogo. Estes desempenhos são abordados, mais à frente, neste capítulo.

O conhecimento, cada vez mais aprofundado deste material, possibilita, atualmente, a utilização de CLT em construção de edifícios em altura, atingindo-se níveis de qualidade, ao nível exigencial, excelentes. O edifício *Stadthaus*, em Londres, que é detalhado no capítulo seguinte, é um testemunho firme dos níveis que se podem atingir com esta nova tecnologia.

3.2.1. PROCESSO DE FABRICO

A madeira, antes de aplicada, é cuidadosamente escolhida, respeitando os valores técnicos exigidos pelas normas de controlo e qualidade. Todas as lamelas são sujeitas a um tratamento de triagem visual e mecânica, bem como a medição de humidade. Os painéis de CLT são realizados com madeira seca de acordo com as normas europeias aplicáveis, apresentando uma percentagem de humidade perto dos 12%, com variações de mais ou menos 2%, de forma a evitar o ataque de fungos e insetos xilófagos.

Na produção de painéis, são aceites diferentes tipos de madeira, desde que as suas características respeitem os limites normativos exigidos para as características mecânicas. Os tipos de madeira aceitáveis para a produção de painéis são: pinho, eucalipto, abeto e choupou.

3.2.1.1. Caracterização do material base usado no fabrico do CLT

A madeira para produção de um painel é escolhida de acordo com a exigência e papel que desempenhará no edifício, isto é, a qualidade da madeira é definida pela sua posição e exposição nos elementos da superestrutura, apresentando diferentes “qualidades de superfície”:

- Invisível;
- Vista industrial;
- Vista moradia.

A superfície de “qualidade invisível” é recomendada, exclusivamente, para componentes de construção que não sejam visíveis no edifício, estando por isso revestidos de ambos os lados. As placas de madeira para este tipo de componentes são escolhidas apenas em função dos critérios de resistência e não pela sua aparência. Neste tipo de “vista” são utilizadas sobretudo madeiras provenientes de abeto, com categoria de resistência C24 (EN338) e, também, em menores quantidades C16, respeitando sempre os valores de resistência exigidos no Eurocódigo 5.

A superfície de “qualidade industrial” aparece, geralmente, apenas num dos lados da parede, podendo ter acabamento nas duas faces se assim for determinado em projeto. Este tipo de superfície é apropriada para edifícios industriais, e são usualmente utilizadas placas de abeto de qualidade B, conforme exigido na norma EN 13017-1, unidas por entalhe múltiplo e com juntas de no máximo 4 mm de largura. A superfície do painel maciço é escovada e lixada, podendo no acabamento final apresentar, ainda, sinais desses trabalhos. São, também, admitidas na superfície algumas irregularidades na realização das juntas, ligeiras penetrações de cola e rugosidades ao longo do desenvolvimento do painel. Este tipo de “vista” é adequado quando se pretende que a estrutura de madeira fique à vista, mas em situações em que não haja grande exigência sobre o aspeto e qualidade do acabamento. Por estes motivos, este tipo de acabamentos é adequado a edifícios industriais. No entanto, o seu uso não é aconselhável para edifícios de habitação onde as exigências de qualidade e aparência são bastante superiores.

Na superfície de “qualidade moradia” são utilizados dois acabamentos de painéis maciços, que se distinguem na classificação desses em painéis CT e CL. Os painéis CT possuem orientação das camadas expostas perpendiculares ao desenvolvimento do painel, sendo usados para paredes. Já os painéis CL possuem orientação das camadas paralela ao desenvolvimento do painel, sendo estes utilizados para lajes e coberturas. Neste tipo de “vista” a qualidade da superfície do painel tem de estar situada entre a classe A e B (EN 13017-1) e as juntas devem ter no máximo 2mm de largura. Tal como na “vista industrial” deve-se ter em conta a possibilidade de encargos extra para melhoria do acabamento da superfície.

3.2.1.2. Colagem

Após a colocação de várias placas de madeira, lado a lado e orientadas numa mesma direção, procede-se à colagem dessas com uma nova camada de placas semelhantes, suprajacente e com orientação perpendicular à da camada subjacente. A colagem efetua-se com a utilização de resina adequada, como por exemplo, *Purbond* (HB 110, HB 530), isenta de solventes, orgânicos voláteis e formaldeído, e sem produção de odores. Este processo permite o contacto humano sem risco para a saúde [20].



Fig. 3.2 – Posicionamento de placas [21]



Fig. 3.3 – Processo de colagem [21]

A cola é aplicada de modo automático e cobre toda a superfície da placa. Por m^2 de superfície a colar, são aplicadas cerca de 200 gramas de cola com posterior prensagem, garantindo uma união de elevada qualidade.



Fig. 3.4 – Processo de colagem [21]

3.2.1.3. Prensagem

Após o processo de colagem dos painéis, estes são prensados a uma pressão de $6MN/m^2$, fazendo com que as várias camadas fiquem rigorosamente coladas, formando um painel maciço monolítico.



Fig. 3.5 – Prensagem [21]

3.2.1.4. Corte

O corte do painel monolítico é realizado na carpintaria e é feito com recurso à mais moderna tecnologia. A forma do corte é especificada nos planos de pormenor/projetos de especialidade, principalmente no que respeita às grandes aberturas como portas e janelas ou colunas de serviço no caso das lajes.



Fig. 3.6 e Fig. 3.7 – Corte dos painéis [21]

A pré-fabricação é controlada por controlo numérico (CNC), sendo possível “rasgar” rigorosamente os elementos, conforme as indicações de projeto, e diminuir os resíduos em obra, sendo estes imediatamente encaminhados em fábrica para possíveis reutilizações.

As tolerâncias para o corte de painéis de paredes, lajes e coberturas são especificadas na norma DIN 18203. A precisão de corte dos painéis de madeira maciça oscila em torno de ± 2 mm, para uma humidade da madeira de 12%, encontrando-se desse modo ainda muito abaixo dos valores permitidos pela norma. A tolerância de ± 2 mm refere-se a trabalhos de corte de painéis *standard* com uma dimensão mínima de 1 m² por elemento.

Se os painéis forem revestidos em ambos os lados, o valor das tolerâncias indicadas refere-se sempre ao lado interior. As tolerâncias para o lado exterior podem ser ligeiramente maiores.

O comprimento máximo dos painéis é de 16,5m. Este limite prende-se com a viabilidade em termos de transporte. A largura dos painéis pode atingir os 2,95m e a espessura 0,50m.



Fig. 3.8 – Fábrica da KLH - Áustria [17]

3.2.1.5. Homologação técnica

Os painéis de CLT possuem uma Aprovação Técnica Europeia (ETA-06/0138 – *European Technical Approval*). Esta consiste numa apreciação técnica favorável da aptidão ao uso de um produto, estabelecida com base nas exigências essenciais das obras de construção onde esse produto seja incorporado. Como base nesta ETA, foi concedido a este produto um selo de qualidade – Marcação CE.

3.2.2. BASES DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

A modelação estrutural deste sistema impõe a compreensão de algumas características importantes, das quais se podem destacar:

- A junção de painéis para a composição de paredes, pisos, coberturas e outros corresponde habitualmente a ligações resistentes ao corte (ligação rotulada) e muito dificilmente com resistência ao momento fletor;
- Em flexão no plano perpendicular ao painel (pavimentos e coberturas) deverá ser calculada uma inércia efetiva;
- Para além das características geométricas da secção, a inércia efetiva depende da distância entre pontos de inflexão no painel (pontos de momento nulo);
- Este cálculo poderá ser efetuado com o recurso ao Anexo B do Eurocódigo 5 ou de forma mais expedita com ábacos de pré-dimensionamento disponibilizados pelos fabricantes [22];
- Em flexão no plano do painel, situação comum nas padieiras de portas e janelas ou paredes em consola, a secção efetiva corresponde às lamelas horizontais sem perda de secção.

As características mecânicas dos painéis não obedecem ainda a uma standardização, ao contrário do que sucede por exemplo com a madeira lamelada-colada através da definição das classes de resistência. Assim, por exemplo, a aposição de Marcação CE neste produto recorre, sem alternativa, aos documentos de Aprovação Técnica Europeia (ETA). Estes documentos, desenvolvidos por cada fabricante, definem todas as propriedades relevantes para usar no projeto e dimensionamento estrutural dos painéis. Em função do processo de colagem, são de esperar algumas diferenças entre fabricantes, particularmente, ao nível do módulo de elasticidade.

3.2.2.1. Análise Estrutural

Para compreensão do funcionamento destes elementos é relevante focar mais alguns aspetos essenciais:

- A secção transversal deverá ser avaliada considerando a deformação por esforço transversal que ocorre nas lamelas transversais ao plano de flexão (ver fig. 3.9);
- Possibilidade de distribuição de cargas em duas direções ortogonais, considerando a configuração dos estratos e as dimensões do painel;
- Elevada estabilidade dimensional, devido à restrição provocada pela colagem ortogonal dos estratos;
- Utilização de classes de serviço 1 e 2 e desaconselhamento na Classe de Serviço 3.



Fig. 3.9 – Diagrama de tensões normais e de corte na secção transversal [23]

Nesta figura esquemática, pode-se observar os diagramas de tensões esperados na secção transversal de um painel em CLT. Ao centro está representada a evolução das tensões normais, sendo notória a ausência de rigidez de flexão nos estratos transversais. À direita, na representação das tensões de corte, distinguem-se entre as tensões de corte apenas com componentes perpendiculares ao fio (corte rasante) e as tensões de corte “normais” que possuem componentes perpendiculares e paralelas ao fio da madeira. A deformação provocada pelo esforço transversal rasante nos estratos ortogonais à direção principal de flexão (distorção das lamelas) corresponde a um escorregamento relativo entre os estratos longitudinais, com a consequente perda de rigidez de flexão. A título de exemplo, um painel com 5 estratos e 145mm de espessura pode ter uma redução de 23% na rigidez à flexão, para um vão de 4m. Em paredes, elementos solicitados no seu plano, os esforços são absorvidos pelos estratos verticais, transmitindo tensões paralelas ao fio da madeira. Com esforços deste tipo, o dimensionamento é condicionado pela verificação à instabilidade por encurvadura. Em painéis com aberturas de vãos o lintel formado é analisado como uma viga (geralmente bi-encastada), desprezando-se agora as lamelas verticais [23].

3.2.3. DURABILIDADE

O nível de durabilidade biológica dos painéis depende naturalmente da espécie utilizada e das suas condições de aplicação e utilização. De acordo com os respetivos documentos de Aprovação Técnica Europeia (ETA), a utilização dos painéis está limitada às classes de risco 1 e 2, correspondentes portanto a uma exposição abrigada e sem contacto direto com as condições meteorológicas (NP EN335-1:2011). Nestas circunstâncias poderá ocorrer ocasionalmente uma humidificação elevada mas não persistente, consistente com situações típicas do interior de edifícios ou tetos no exterior. Com a durabilidade natural das espécies normalmente utilizadas (EN350-2:1994), é recomendável a aplicação de um produto biocida preservador.

A definição da vida útil dos painéis é referida nos documentos de Aprovação Técnica Europeia, com o valor de 50 anos.

3.2.4. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS

A resistência ao fogo é tradicionalmente um dos aspetos de maior importância no sentimento de segurança que um edifício deve proporcionar e, a este respeito, a adoção de sistemas em madeira levam muitas vezes à rejeição destes.

Quaisquer elementos de madeira, com um teor de água abaixo da saturação, possuem vulnerabilidade à ação do fogo, dada a sua fácil combustibilidade. Todavia, esta característica depende, de forma significativa, das dimensões da respetiva secção transversal. O senso comum mostra-nos que ramos secos e de pequena secção ardem de forma rápida e intensa numa fogueira, ao contrário do que sucede com elementos de maior secção. O mesmo tipo de experiência evidencia que elementos de madeira já

carbonizada possuem maior dificuldade de ignição e combustibilidade pela sua baixa condutibilidade térmica e inibição de combustão através das camadas já carbonizadas. Numa situação limite, a estrutura de madeira consegue, inclusive, tirar partido da grande rigidez da madeira carbonizada como fator de estabilidade estrutural.

A ligação estrutural entre os vários componentes de madeira da estrutura é normalmente efetuada através de elementos metálicos. Estes degradam as suas características de resistência e rigidez de forma rápida com o aumento de temperatura. Por esse motivo, todos os componentes metálicos com função estrutural – pregos, parafusos, chapas, cabos ou outros, deverão ser protegidos da ação direta do fogo como forma atenuadora do aumento da temperatura. Dada a característica de baixa condutibilidade térmica da madeira, uma das estratégias mais utilizadas para proteção das ligações metálicas é o seu embutimento na madeira. Outro meio de proteção será o seu encapsulamento com materiais não combustíveis.

As estruturas baseadas em painéis maciços de CLT possuem características especiais de comportamento face à ação do fogo. Sendo compostas por estratos ortogonais haverá que atender ao número de estratos, assim como à sua disposição. Por esta razão, a resposta à ação do fogo poderá ser avaliada de forma distinta para os casos de paredes ou de pavimentos. Em qualquer circunstância, o parâmetro em avaliação deverá ser a perda de secção calculado através de uma taxa de carbonização unidirecional, β_0 . De acordo com o estipulado pelo Eurocódigo 5, a taxa de carbonização, β_0 , deverá assumir valores de 0,65mm/min e 1,00mm/min, respetivamente para elementos de madeira maciça ou lamelada-colada e painéis de contraplacado. Contudo, está ainda por desenvolver um método de cálculo específico para o CLT que considere diferentes taxas de carbonização para as camadas internas e externas. Todavia, os documentos de aprovação técnica europeia (ETA) dos painéis de CLT já estabelecem valores específicos para CLT. Na ETA para os painéis produzidos pela KLH, estabelecem-se os valores de taxa de carbonização de 0,67mm/min para o primeiro estrato e 0,76mm/min para os estratos seguintes. Outra das estratégias habituais para salvaguarda de uma determinada resistência ao fogo passa pela fixação de revestimentos adicionais (com classe de reação ao fogo não inferior a A2) [20].

O conhecimento, cada vez mais aprofundado do comportamento ao fogo destes painéis, tem permitido a sua utilização em situações bastante improváveis ao nível da segurança contra incêndios, tais como no edifício Stadthaus, detalhado no capítulo 4.

3.2.5. CONFORTO TÉRMICO

As características de condutibilidade térmica dos painéis (0,13 W/m.°K.) apresentam valores ímpares de entre os materiais de construção com capacidade estrutural. Um painel simples com 95 mm de espessura, sem isolamento, satisfaz o desempenho mínimo requerido pelo RCCTE. A natural colocação de revestimentos, de espaços não ventilados e de material de isolamento térmico proporciona uma solução com características excepcionais, atingindo-se facilmente coeficientes de transmissão térmica inferiores a 0,35W/m².°K..

O bom desempenho na estação fria assenta ainda na ausência de pontes térmicas planas e nas reduzidas pontes térmicas lineares associadas ao sistema construtivo. Não obstante do facto de as paredes compostas por painéis de CLT apresentarem características de resistência térmica por si só relevantes, estas traduzem ainda uma melhoria significativa quando comparadas com as paredes de alvenaria que compõe as envolventes dos edifícios tradicionais. Este bom comportamento térmico

torna-se efetivamente relevante quando comparado com sistemas construtivos tradicionais, como se detalha de seguida.

Adotando a solução com painéis de madeira de CLT, relativamente ao conforto térmico, destacam-se as seguintes vantagens face às paredes de alvenaria:

- Espessura de parede significativamente inferior para os mesmos valores de coeficiente de transmissão térmica;
- Grande redução de pontes térmicas lineares;
- Ausência de pontes térmicas planas.

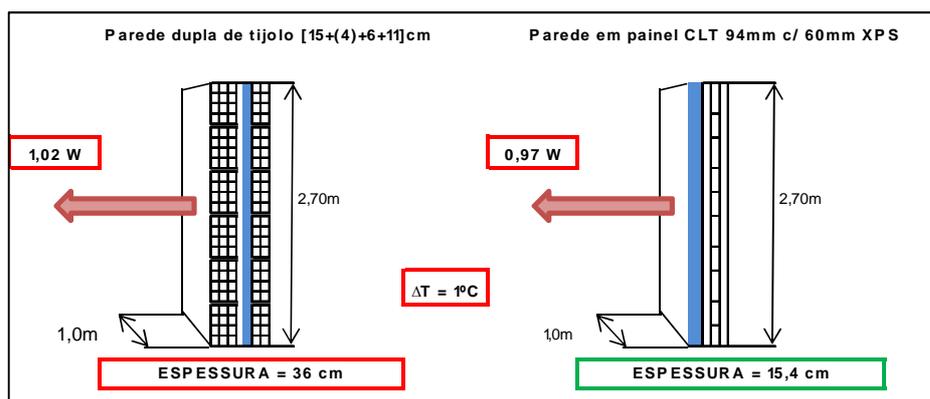


Fig. 3.10 – Espessura de parede /coeficiente de transmissão térmica [20]

A figura seguinte pretende demonstrar a importância das pontes térmicas lineares, ilustrando que a ligação da parede com o pavimento apresenta uma perda térmica por metro linear de parede idêntica à perda térmica que ocorre na zona corrente da mesma.

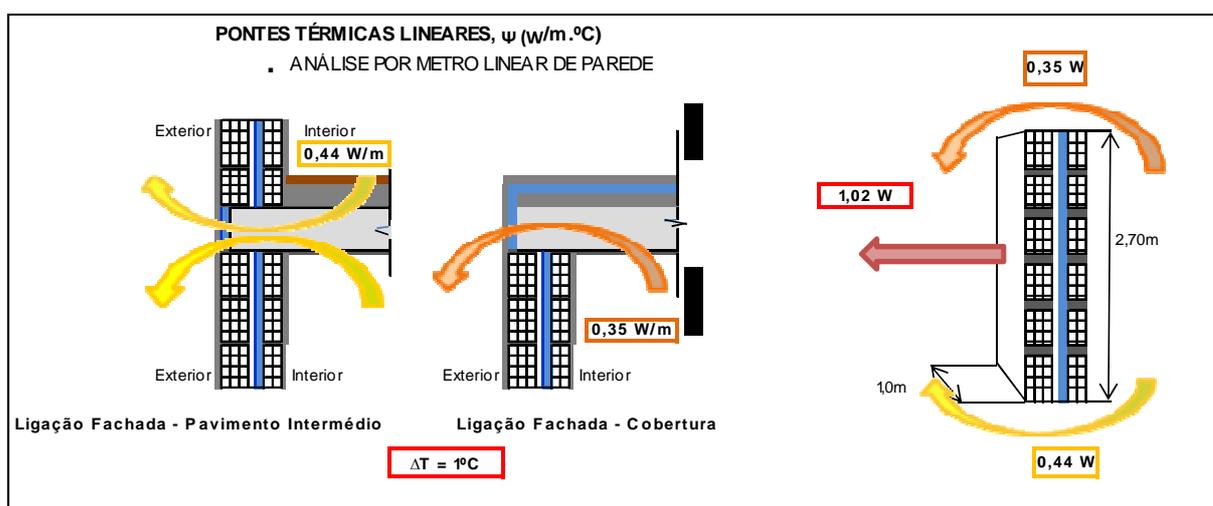


Fig. 3.11 – Importância das pontes térmicas lineares [20]

A ausência de pontes térmicas planas é justificada pela homogeneidade do material entre elementos contíguos e conseqüente inalterabilidade das condições de condutibilidade térmica. As figuras seguintes ilustram estas diferenças construtivas.

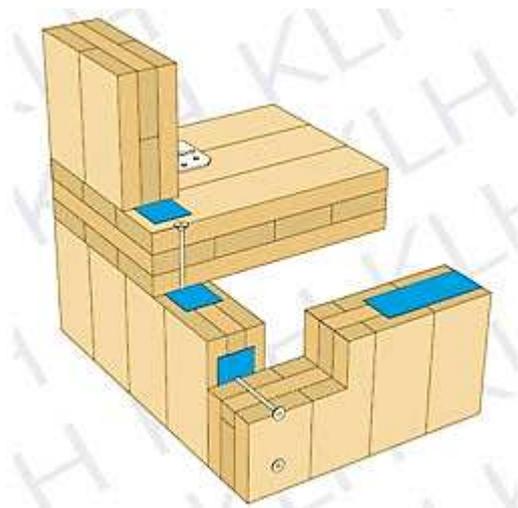


Fig. 3.12 – Encontro típico entre parede-piso-parede com estrutura de painéis CLT [24]

Estes dois últimos pontos são particularmente significativos, dado que, devido às atuais restrições regulamentares, nas estruturas tradicionais a problemática das pontes térmicas lineares e planas obriga a cuidados acrescidos, requerendo métodos de execução mais complexos, que comportam maiores custos e maiores riscos de futura patologia. A execução de estruturas em CLT revela-se neste campo uma solução mais simples, mais competitiva e que implica menores perdas térmicas.

3.2.6. CONFORTO ACÚSTICO

Acusticamente, o sucesso do CLT na arquitetura é uma referência. Os painéis têm uma densidade significativamente mais elevada do que as construções de madeira comuns (500kg/m^3 , ou 50kg/m^2 para um painel de parede de 100mm de espessura) [17]. De qualquer forma, para soluções mais exigentes, o comportamento acústico pode ser melhorado, introduzindo camadas de isolamento, de modo a superar questões de transferência de som.

3.2.7. UTILIZAÇÃO EM ZONA SÍSMICA

O comportamento dos edifícios de madeira com painéis de CLT face à ação sísmica é amplamente reconhecido, tendo sido, por exemplo, o sistema escolhido para a reconstrução da cidade de *L'Aquila*, em Itália, após o sismo de 2009.

O Eurocódigo 8 implica o cumprimento de dois requisitos essenciais: não ocorrência de colapso e limitação de dano, correspondendo respetivamente a Estados Limites Últimos e a Estado Limites de Danos. Em estados Limites Últimos, para além naturalmente da resistência, a capacidade de dissipação de energia desempenha um papel fundamental, traduzida no coeficiente de comportamento da estrutura. De acordo com alguns autores, este coeficiente poderá atingir o valor de 4, embora mais recentemente alguns fabricantes sejam bastante mais conservativos e apontem somente para um coeficiente de comportamento de 2. A este respeito é importante frisar que o Eurocódigo 8 não inclui, na atual versão, disposições para este sistema construtivo. Este desempenho é possibilitado tendo em

conta a dissipação histerética de energia que ocorre principalmente em zonas especificamente projetadas para o efeito, designadas por zonas dissipativas ou zonas críticas.

Nos sistemas com painéis de madeira este comportamento é conseguido nas ligações entre painéis, mas especialmente na ligação à fundação ou ao “embasamento”. As zonas dissipativas devem estar localizadas nas ligações, enquanto os elementos de madeira devem ser considerados como tendo um comportamento elástico-linear. Para permitir a plastificação cíclica nas zonas dissipativas, todos os outros elementos e ligações estruturais devem ser projetados com uma sobrerresistência suficiente. Alguns autores propõem um valor mínimo de 1,3 para o coeficiente de sobrerresistência [11].

Os princípios orientadores que regem o bom comportamento sísmico deste sistema construtivo assentam nos seguintes valores:

- Simplicidade estrutural;
- Redundância estrutural;
- Ação de diafragma ao nível dos pisos e das paredes;
- Massa reduzida (menor força de inércia);
- Capacidade de dissipação de energia nas ligações metálicas.

As paredes de madeira constituem-se assim como elementos sísmicos primários de contraventamento e resistência às forças horizontais, ligados por diafragmas rígidos ao nível dos pisos.

O Estado de Limitação de Danos é verificado pela limitação do deslocamento horizontal dos pisos. As paredes de madeira providenciam à estrutura o nível de contraventamento necessário para reduzir estes deslocamentos. Ensaios sísmicos realizados em edifícios à escala real comprovam o excepcional desempenho deste sistema construtivo sob uma ação sísmica intensa e repetida [11]. Exemplo disso, tal como referido no ponto 3.2, é o estudo Projeto SOFIA, o qual testou, em mesa sísmica, um edifício de sete andares à escala real, que sobreviveu à ação sísmica sem danos significativos.

3.2.8. HIGROSCOPICIDADE

A madeira, pelas suas características higroscópicas, tem um efeito semelhante ao de um retardador de vapor, sendo capaz de absorver, reter e libertar humidade. A construção fica então com alguma capacidade de regular, de forma natural, o teor de humidade no ar, conduzindo a um ótimo ambiente interior e com boa salubridade nas habitações. No inverno, com baixa humidade, a capacidade da madeira para o seu transporte é reduzida e aumenta logo que esta, no interior, for ajustada ao clima de verão. A madeira, como um material de construção natural, comporta-se em sintonia com a natureza ao longo de toda a sua vida útil. Os painéis de madeira aumentam e diminuem de volume consoante a humidade ambiente, embora o painel de madeira mantenha a sua forma estável devido à sua colagem transversal. É, no entanto, desadequado colocar revestimentos (azulejo, telhas, etc.) diretamente sobre a superfície do painel, pois as tensões de flexão, devido à mudança de forma, poderão ocasionar deformações indesejáveis.

3.2.9. APLICAÇÃO EM OBRA

Os painéis de madeira são entregues diretamente em obra nas dimensões e formas definidas em projeto. Com o planeamento adequado, a sua chegada à obra é coordenada com a equipa de montagem, possibilitando de imediato a montagem da estrutura. A facilidade, a rapidez e a eficácia da montagem da estrutura decorrem das grandes dimensões dos painéis (até 16,5m de comprimento; 2,95m de largura e 0,50m de espessura).

O CLT é um material que conjuga vantagens relacionadas com o processo de construção do edifício, com vantagens relacionadas com a própria conceção do projeto. Primeiro, o sistema construtivo reduz o tempo de construção e aumenta a segurança em obra, o que resulta numa conseqüente diminuição de custos. Segundo, a produção dos elementos em fábrica, permitida pelo reduzido peso dos materiais, torna o processo de construção simples, rápido e silencioso, sendo possível construir o edifício apenas com o auxílio de uma grua, um plano de montagem e mão-de-obra especializada em carpintaria. Os painéis chegam à obra prontos a aplicar, ou seja, já “rasgados”, conforme especificado no projeto, o que diminuiu substancialmente os resíduos em obra.

A montagem simples de paredes e lajes por encaixe reduz o número de possíveis fontes de erros durante a montagem, e como essa é feita praticamente a “seco” permite, quase que em simultâneo, a instalação de outros sistemas técnicos e a aplicação de revestimentos interiores e exteriores.

Este material apresenta grandes vantagens na fase de construção. Além de exigir uma área mínima de estaleiro, necessita de equipamentos pouco ruidosos, de pouca produção de pó, minimizando o impacto negativo da construção, perante as comunidades envolventes.

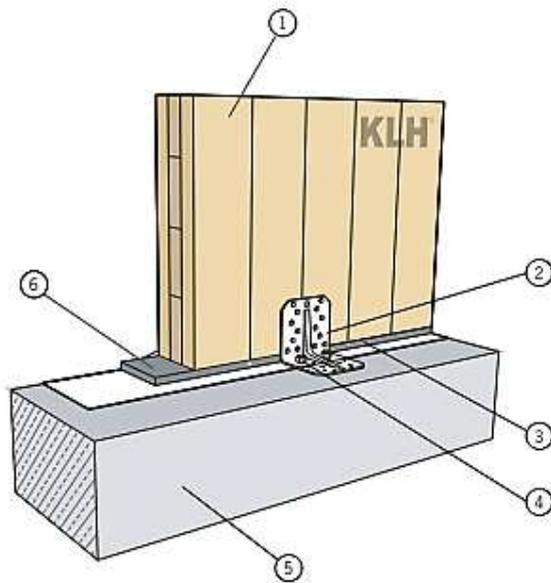


Fig. 3.13 – Aplicação dos painéis em obra [21]

A título de exemplo, e como detalhado no capítulo seguinte, a estrutura do Stadthaus, edifício de nove andares construído em Londres, foi executado por uma equipa de 4 carpinteiros que, com a ajuda de adequados meios de movimentação de cargas, conseguiram um rendimento de 3 dias/piso.

3.2.10. LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS

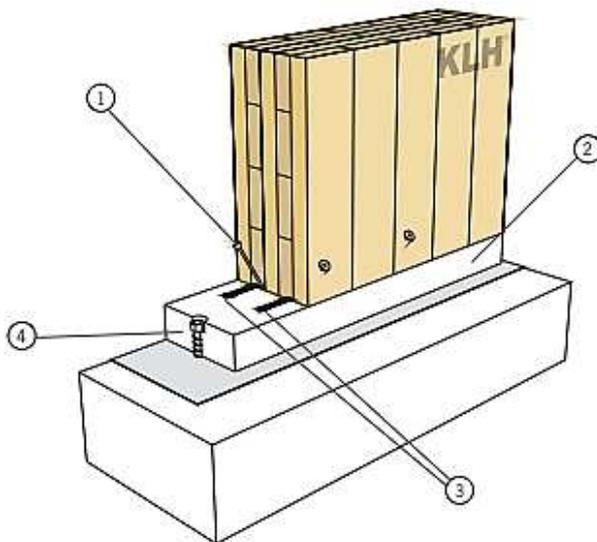
As eficazes ligações dos elementos de construção são essenciais para o bom funcionamento deste sistema construtivo. A título exemplificativo, apresentam-se, a seguir, algumas sugestões de soluções tipo, uma vez que as soluções a adotar (tipo de ligadores/número de ligadores por ml de parede) deverão ser avaliadas projeto a projeto.



Legenda:

- 1 - Painel parede de CLT;
- 2 - Cantoneira para ligação;
- 3 - Tela impermeabilizante;
- 4 - Parafuso roscado;
- 5 - Soleira de betão armado;
- 6 - Placa de material resiliente.

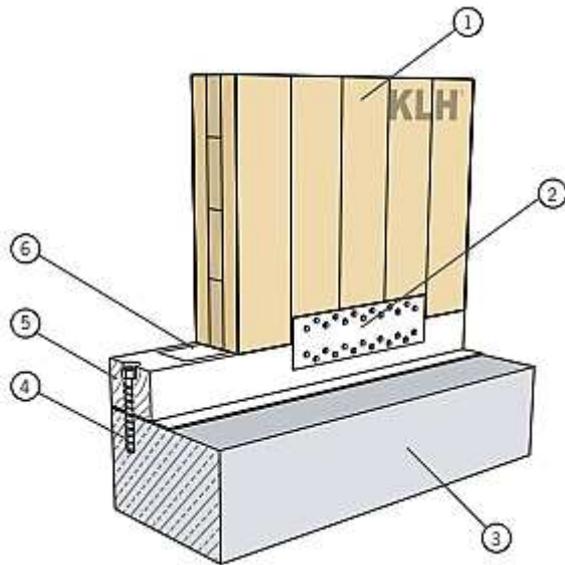
Fig. 3.14 – Ligação parede CLT/base em betão (ligação metálica cantoneira) [24]



Legenda:

- 1 - Parafusos diagonais roscados para absorver maiores esforços horizontais;
- 2 – Soleira em betão simples;
- 3 – Fita impermeabilizante;
- 4 - Parafuso roscado ligação vertical.

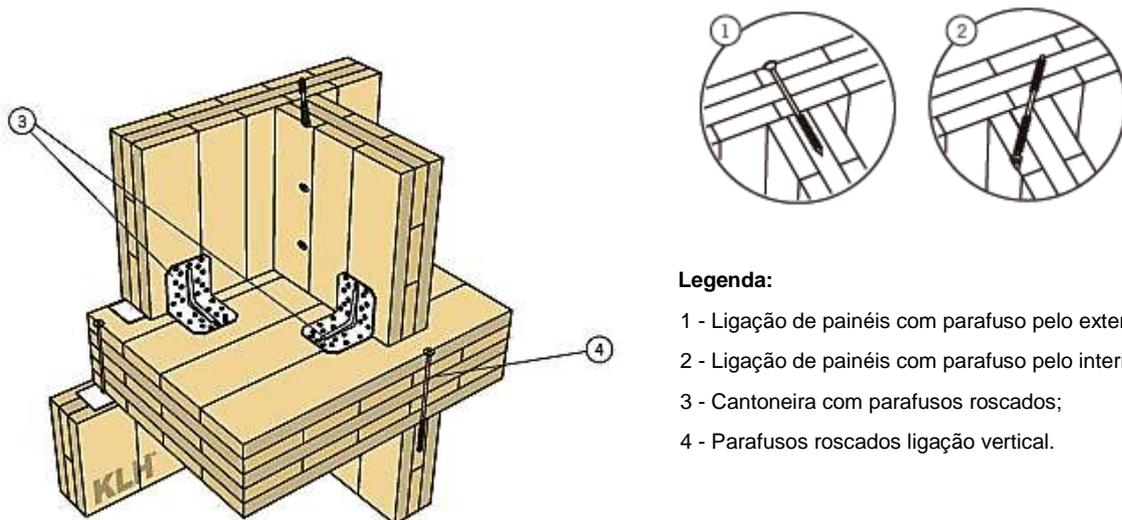
Fig. 3.15 – Ligação parede exterior CLT mais espessa (ligação parafusos roscados) [24]



Legenda:

- 1 – Painel parede CLT;
- 2 – Placa metálica de ligação;
- 3 – Soleira em betão armado;
- 4 - Parafuso roscado ligação vertical;
- 5 – Trave de madeira maciça p/ assentamento de painéis;
- 6 – Material resiliente de assentamento.

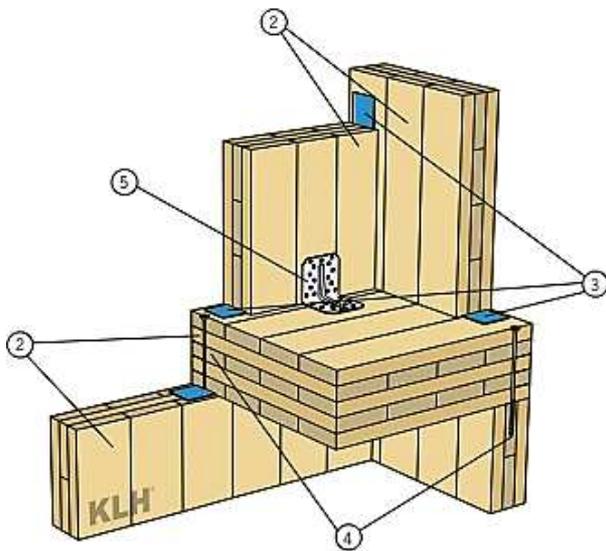
Fig. 3.16 – Ligação parede c/ soleira elevada (ligação placa metálica e parafusos roscados) [24]



Legenda:

- 1 - Ligação de painéis com parafuso pelo exterior;
- 2 - Ligação de painéis com parafuso pelo interior;
- 3 - Cantoneira com parafusos roscados;
- 4 - Parafusos roscados ligação vertical.

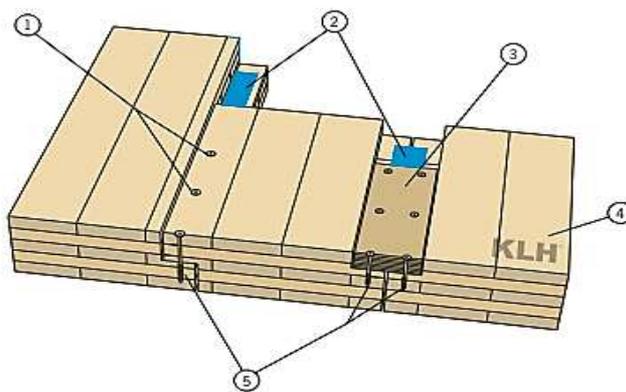
Fig. 3.17 – Ligação paredes interiores/paredes exteriores (ligação placa metálica e parafusos roscados) [24]



Legenda:

- 1 - Ligação de canto com parafuso;
- 2 - Painéis de parede;
- 3 - Material resiliente de assentamento;
- 4 - Parafusos roscados ligação vertical;
- 5 - Cantoneira com parafusos roscados.

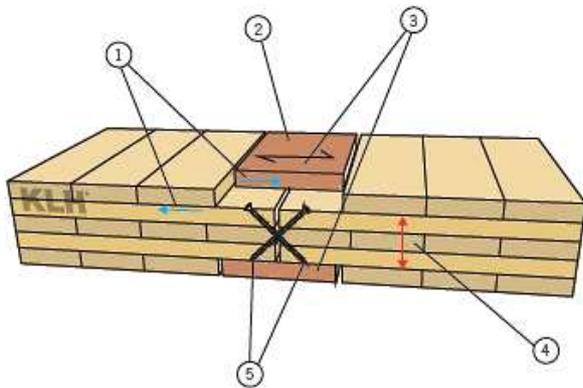
Fig. 3.18 – Ligação paredes exteriores (ligação placa metálica e parafusos roscados) [24]



Legenda:

- 1 - Ligação entre painéis;
- 2 - Material resiliente elástico;
- 3 - Trave de madeira de ligação;
- 4 - Painel laje;
- 5 - Parafusos roscados verticais.

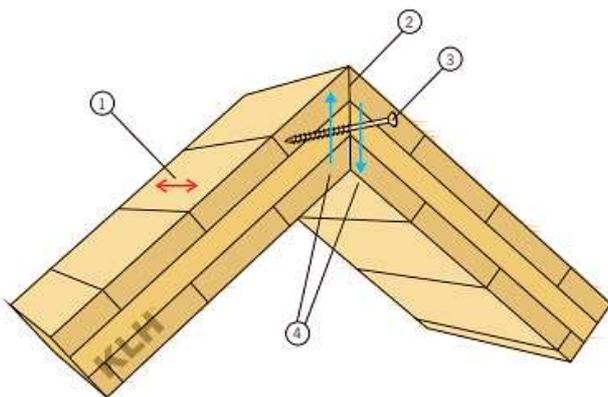
Fig. 3.19 – Ligação entre painéis de laje (parafusos roscados) [24]



Legenda:

- 1 – Transferência de forças axiais;
- 2 – Zona de ligação de painéis;
- 3 – Trave de madeira de ligação;
- 4 – Espessura do painel de laje;
- 5 - Parafusos roscados inclinados.

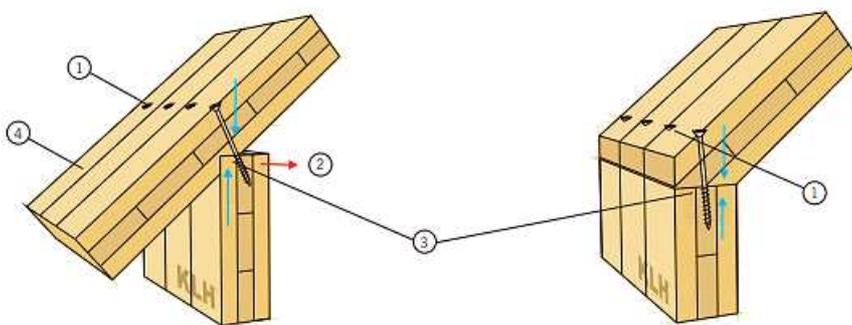
Fig. 3.20 – Ligação entre painéis de laje (parafusos roscados) [24]



Legenda:

- 1 – Direção da camada externa direção do painel CLT;
- 2 – Zona de ligação de painéis;
- 3 – Parafuso roscado de ligação entre painéis;
- 4 – Transferência de forças de corte.

Fig. 3.21 – Ligação coberturas inclinadas (parafusos roscados) [24]



Legenda:

- 1 – Parafuso c/ posição perpendicular ao painel;
- 2 – Força provocada pela ligação dos painéis e anulada pela introdução dos parafusos.
- 3 – Superfície de apoio com ângulo normal na direção das cargas principais;
- 4 – Painéis CLT.

Fig. 3.22 – Ligação coberturas inclinadas (parafusos roscados) [24]

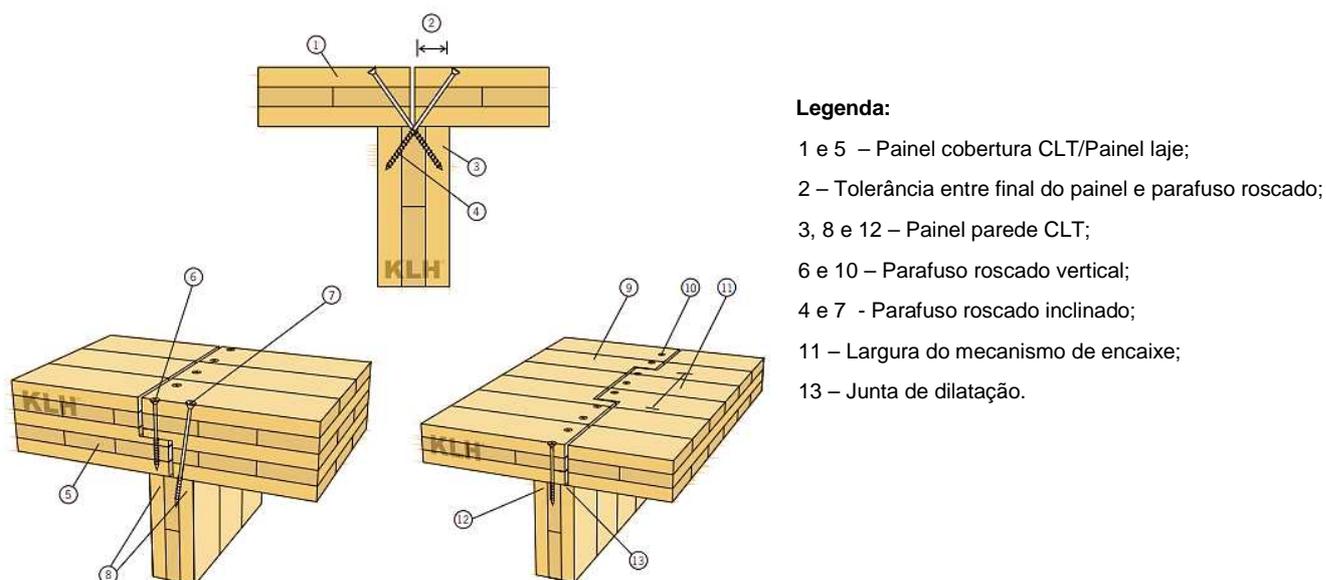


Fig. 3.23 – Ligação coberturas planas (parafusos roscados) [24]

3.2.11. REDES INFRAESTRUTURAS

Na maioria dos casos, sempre que as paredes ou pisos são revestidos, as instalações técnicas são realizadas de forma usual sem necessidade de especiais requisitos técnicos.

Mas, havendo necessidade de abertura de rasgos, o traçado dos mesmos deve ser devidamente estudado e analisado tendo em conta questões de natureza estrutural e acondicionamento acústico. Nas paredes estruturais, os rasgos devem ser abertos na direção vertical (direção estrutural principal), deixando uma segurança mínima de segurança ao topo lateral de 10cm. Os rasgos não deverão ser abertos em faces opostas, da mesma secção transversal da parede, recomendando-se uma distância mínima de 1 metro, também por questões de uniformidade do isolamento acústico. Nos rasgos em pisos, aplicam-se conceptualmente os mesmos cuidados que nas paredes.

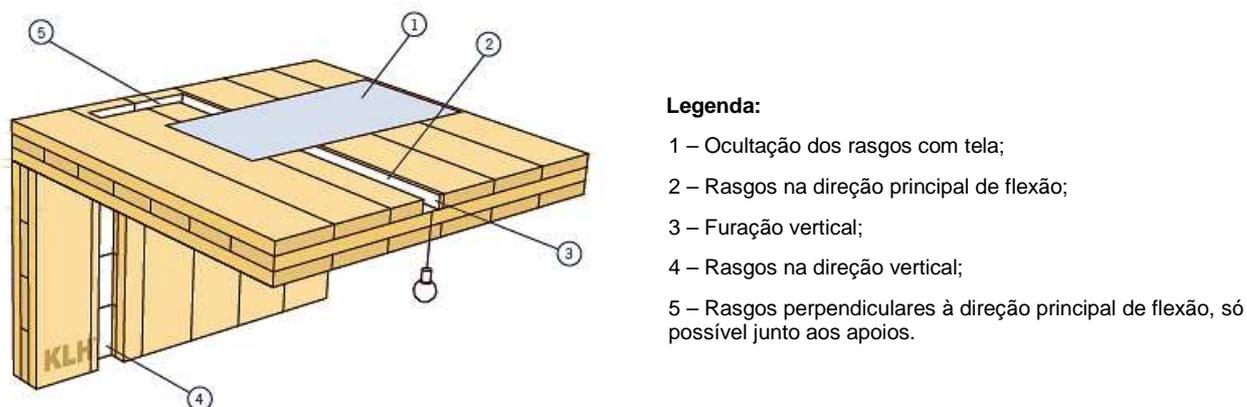
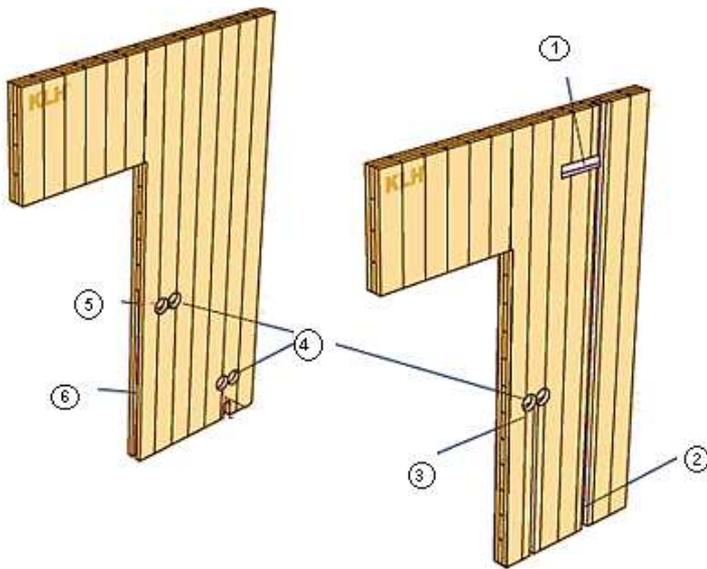


Fig. 3.24 – Traçado de cortes horizontais e furações para passagem de cabos elétricos [24]

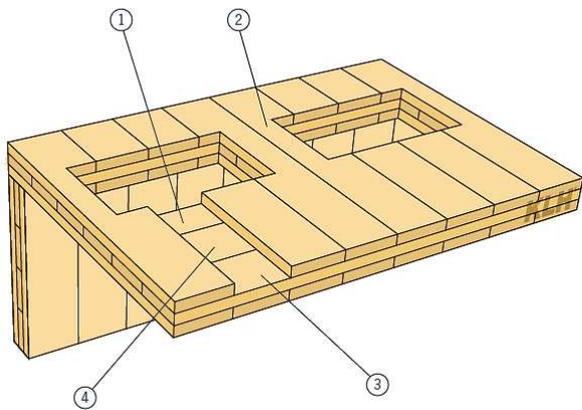


Legenda:

- 1 – Rasgos horizontais com corte dos estratos verticais, só possível após verificação da estrutura;
- 2 – Rasgos na direção vertical;
- 3 – Distância mínima da borda 10cm;
- 4 – Interruptores;
- 5 – Furação p/ acesso aos interruptores;
- 6 – Corte no topo do painel.

Fig. 3.25 – Traçado de cortes verticais e furações para passagem de cabos elétricos [24]

Apresenta-se de seguida solução de *courettes*, abertura vertical no painel de laje, para passagem das diferentes infraestruturas.



Legenda:

- 1 – Abertura vertical no painel (*courette*);
- 2 – Painel de laje CLT;
- 3 e 4 – Ranhura horizontal para passagem de tubagens (apenas até à primeira camada transversal).

Fig. 3.26 – Solução de *courettes* [24]

3.2.12. REVESTIMENTOS

Na construção de edifícios em CLT, é possível combinar diferentes materiais de revestimento nas fachadas. Para tal, é necessário garantir níveis de ventilação dessas fachadas que serão tanto maiores quanto maiores forem as densidades dos materiais de revestimento. Deve-se igualmente proceder à aplicação de barreiras para-vapor, corretamente dimensionadas, de forma a proteger os painéis de madeira de condensações e possíveis problemas de degradação precoce.

De seguida são apresentados alguns exemplos de revestimentos possíveis para os edifícios executados em CLT.



Fig. 3.27 – Edifícios c/ revestimento de madeira à vista [25]



Fig. 3.28 – Edifícios c/ revestimento de argamassa [25]



Fig. 3.29 – Edifícios c/ revestimento Cerâmico [25]



Fig. 3.30 – Edifício c/ revestimento de vidro [25]



Fig. 3.31 – Edifício c/ revestimento de pedra [25]

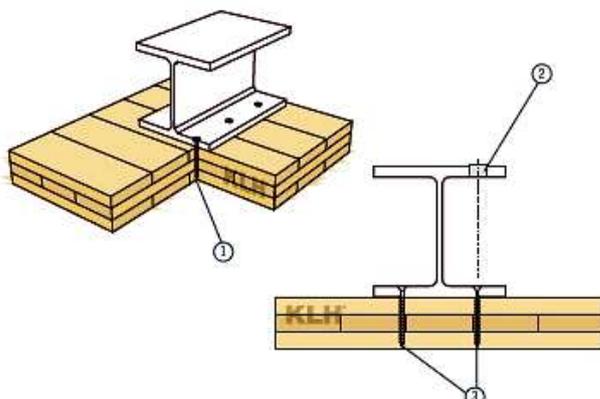


Fig. 3.32 – Edifícios c/ revestimento de chapa metálica [25]

3.2.13. LIGAÇÕES COM OUTROS SISTEMAS CONSTRUTIVOS

O CLT também se destaca pela sua capacidade de compatibilidade com outros materiais e sistemas construtivos. A possibilidade da sua conjugação torna-o num método construtivo versátil, sendo possível utilizar este material, não só em projetos mais arrojados do ponto de vista estrutural, bem como na sua utilização em projetos de recuperação de edifícios, entre outros.

A título exemplificativo, apresentam-se, a seguir, algumas sugestões de ligações tipo, uma vez que as soluções a adotar deverão ser avaliadas projeto a projeto.



Legenda:

- 1 – Parafuso roscado ou parcialmente roscado vertical;
- 2 – Vigas de aço com altura inferior requerem uma abertura a fim de garantir o eficaz aparafusamento;
- 3 – Dupla ligação p/ evitar efeitos de torção na viga de aço.

Fig. 3.33 – Ligação de viga de aço a painel suspenso na parte inferior [24]

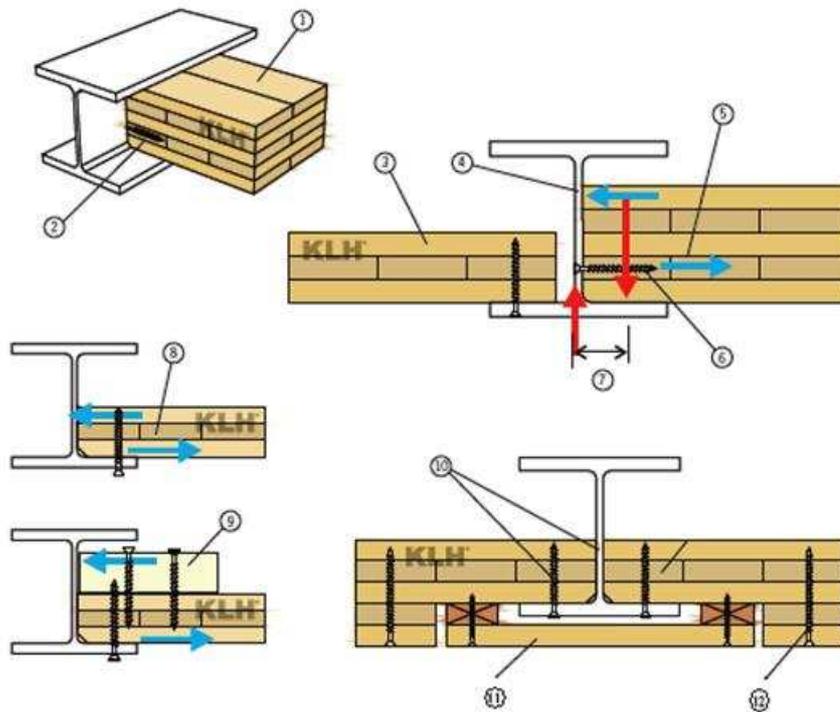


Fig. 3.34 – Ligação de painel de laje (teto) com viga de aço [24]

Legenda:

- 1 – Painel colado na flange inferior da viga de aço;
- 2 – Parafuso roscado ou parcialmente roscado;
- 3 – Ligação simplificada. Possível se a excentricidade da carga for, por ex., suportada pelo painel adjacente;
- 4 – Força, pressão de contacto;
- 5 – Força de tração;
- 6 – Parafuso, deve ser colocado na camada transversal;
- 7 – Excentricidade;
- 8 – Solução possível para excentricidades de carga pequenas (painéis finos);
- 9 – Componente de painel de madeira aparafusado, para fazer face a maiores excentricidades de carga;
- 11 – Painel de madeira. Deve ser projetado em função dos requisitos de proteção contra incêndios;
- 12 – Fixação transversal, se necessário;

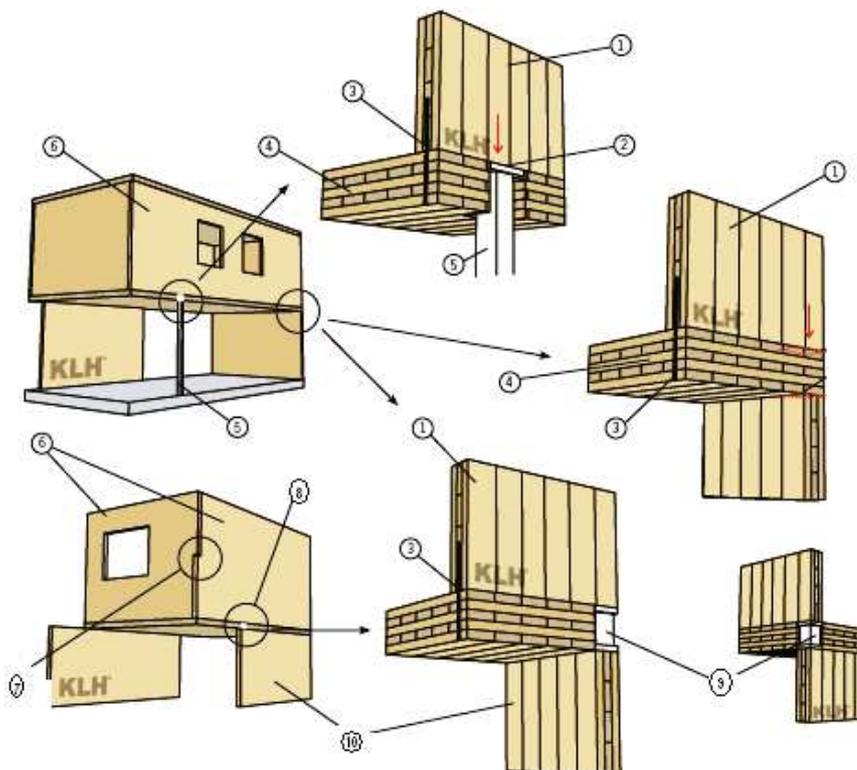


Fig. 3.35 – Suspensão de tetos c/ peças metálicas [24]

Legenda:

- 1 – Painel de parede CLT;
- 2 – Transmissão de carga diretamente a partir das camadas verticais da parede na chapa de aço;
- 3 – Parafuso totalmente roscado (distância max. 10 a 15cm);
- 4 – Painel de laje CLT;
- 5 – Suporte de aço p/ suporte da estrutura de madeira;
- 6 – Painel de parede CLT;
- 7 – Placa de metal p/ transferência de forças;
- 8 – Prever aço, se existirem elevadas forças localizadas;
- 9 – Componente em aço para deflexão de elevadas forças de rotação;
- 10 – Painel de parede CLT.

Para uma melhor perceção, no que respeita à conjugação do CLT com outros materiais e processos construtivos, apresentam-se a seguir alguns pormenores e fotografias de uma obra de recuperação de um edifício social (Centro de Repouso), levada a cabo em Coimbra, cujo material eleito para a sua reconstrução foi o CLT.



Fig. 3.36 – Pormenor do apoio do painel de laje de CLT na parede existente (Cortesia Tisem)

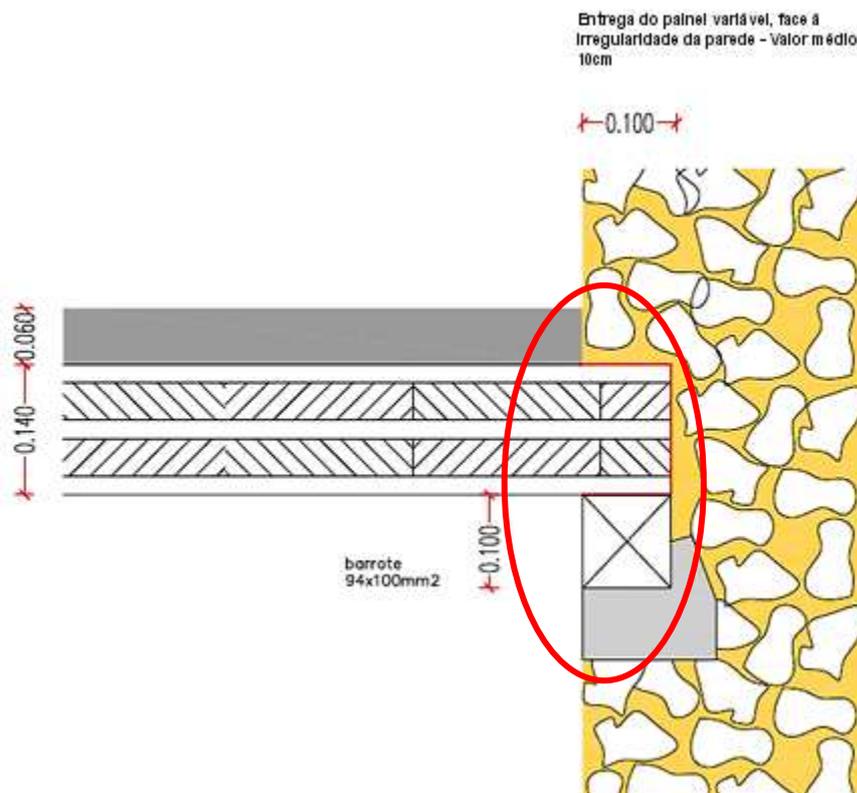


Fig. 3.37 – Pormenor construtivo - apoio painel de laje CLT (Cortesia Tisem)



Fig. 3.38 – Pormenor construtivo – arranque da parede (Cortesia Tisem)

A ligação da estrutura de CLT ao “embasamento”, em betão, é das mais importantes, dada a suscetibilidade da madeira à humidade. Como tal, deverão ser implementadas técnicas construtivas eficazes, no sentido de se evitar uma deterioração precoce da madeira. A madeira tem um comportamento estrutural excelente, no entanto, temos que entender quais são os seus *handicaps*, para podermos tirar o máximo partido deste material. Alguns cuidados a ter neste tipo de ligação são elucidados no pormenor tipo a seguir apresentado.

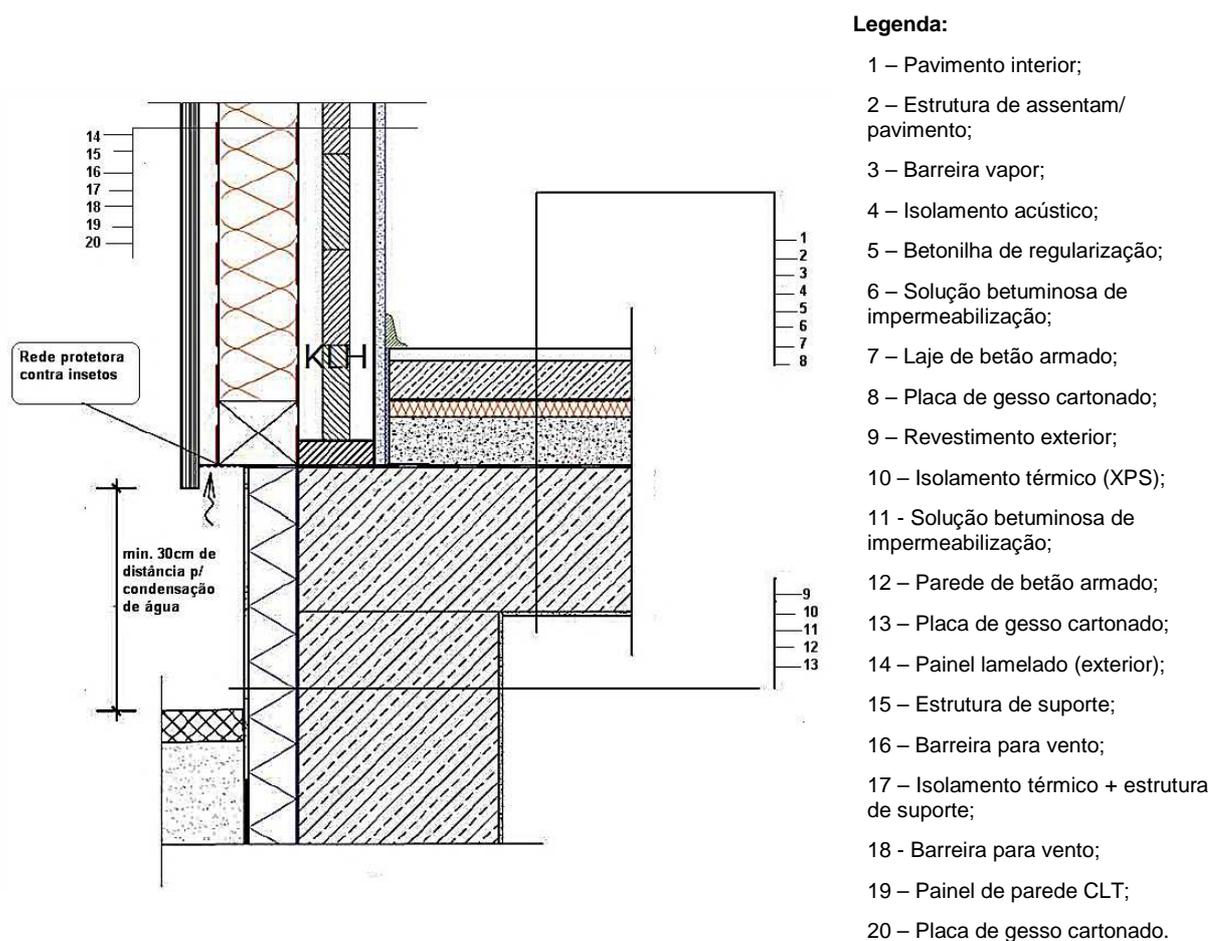


Fig. 3.39 – Pormenor de ligação CLT / “embasamento” (betão) [26]

4

EXEMPLOS DE CONSTRUÇÕES EM CLT NO MUNDO

4.1. OBJETO

A temática da construção de madeira em altura surge nos dias de hoje como um ideal bastante arrojado, arriscado e talvez para muitos até um pouco disparatado. Importa no entanto salientar que esta ideia não é completamente nova. Países culturalmente marcados pela construção em madeira já deram provas das arrojadas capacidades construtivas deste material, nomeadamente no que se refere à construção em altura. Existem alguns edifícios que, apesar de sustentados por técnicas construtivas anacrônicas, atingiram cêrceas consideráveis, permanecendo em uso até aos dias de hoje. Exemplo disso, tal como referido no capítulo 2.1, temos o edifício pagode do Templo *Horyuji*, construído no Japão, há mais de 1400 anos, com 32,25m de altura ou, ainda, na China a antiga *Yingxian* pagoda (1056), com 67.31m de altura, entre outros.

Neste capítulo, pretende-se efetuar uma abordagem de edifícios construídos em CLT, no mundo, com maior incidência na Europa e na América do Norte.

Um lugar de destaque neste capítulo é dado ao já emblemático edifício Stadthaus, construído e concluído em Londres no ano de 2008. Stadthaus é declarado como a mais alta estrutura de madeira moderna do mundo, construída a partir de painéis de CLT.

4.2. CONSTRUÇÕES EM CLT NO MUNDO

4.2.1. EDIFÍCIOS MAIS REPRESENTATIVOS

A utilização de madeira em estruturas e a sua maior ou menor implantação dependeu sempre da disponibilidade da matéria-prima, face à oferta de outros materiais alternativos, do clima e de questões culturais e sociais.

No decorrer da última década, têm vindo a ser construídos alguns edifícios bem acompanhados e monitorizados, principalmente na Europa, que procuram promover este sistema construtivo, assim como explorar as suas melhores técnicas e potencialidades.

Na figura 4.1, referem-se alguns dos edifícios, construídos nos últimos dez anos e ainda em projeto, sendo clara a sua maior incidência na Europa.

	Edifício	nº Andares	País	Estado Desenvolvimento	
Edifícios Altos	FFTT System	30	Canadá	Em Estudo	
	LifeCycle Tower	20 - 30	Áustria	Em Estudo	
	Barents House	20	Noruega	Em Estudo	
Edifícios Médios	Forté	10	Austália	Em construção	
	Delta Building		Austália	Em Estudo	
	Stadthaus	9	Reino Unido	Concluído	
	Via Cenni		Itália	Concluído	
	Bridport	8	Reino Unido	Concluído	
Edifícios Baixos	Esmarchstrasse	7	Alemanha	Concluído	
	Wagramer-strasse		Áustria	Em construção	
	Svartlamoen	5 - 6	Noruega	Concluído	
	Steinhausen, CH		Suíça	Concluído	
	Muhlweg Project	3 - 4	Áustria	Concluído	

Fig. 4.1 – Recentes edifícios construídos em madeira e futuros edifícios em estudo

4.2.2. EUROPA

4.2.2.1. Breve contextualização

Na Europa, o setor da construção é responsável por uma parcela significativa dos impactos ambientais negativos em termos de consumo final de energia (42%), emissão de gases com efeito de estufa (50%) e produção de resíduos (22%) [27]. Neste âmbito, a União europeia tem vindo a estabelecer metas e políticas para a redução destes impactos no setor da construção. A procura de soluções alternativas, para alcançar estas metas, tem conduzido a um crescente interesse pela utilização da madeira como material de construção.

A título de exemplo, referem-se a seguir algumas ações impulsionadoras que alguns governos têm vindo a implementar para fazer face ao cumprimento das metas estabelecidas:

- O governo da Escócia definiu a “*Scottish Forestry Strategy*” (Estratégia para a floresta escocesa), que contempla ações específicas para promover a construção em madeira [28];
- Em França, estabeleceu-se na lei a obrigatoriedade de um volume mínimo de madeira a integrar em edifícios novos [29];
- Na Alemanha, o governo lançou em 2002 o documento “*Charta fur Holz*” (Carta para a promoção da madeira) que estabeleceu o objetivo de aumentar o consumo de madeira *per capita* em 20% [30];
- Paralelamente às iniciativas governamentais, também vários programas, como o “*Roadmap 2010*”, e plataformas internacionais, como o “*Forest-Based Sector*”, juntaram parceiros dos diversos setores da fileira da madeira, com o objetivo de incentivar a investigação, o consumo da madeira na Europa e a exportação para mercados externos [31].

A importância da madeira para a economia dos países europeus não pode ser subestimada, tanto no que respeita ao seu valor enquanto matéria-prima, como meio de subsistência / forma de vida para uma grande fatia das populações (silvicultores). Mais de dois milhões de europeus trabalham na indústria da floresta primária e cerca de 350.000 pessoas vivem da gestão florestal. De referir que um dos maiores tesouros ecológicos da união europeia são as florestas, ocupando estas uma área 42% [32].

Nesta sequência, a construção de edifícios residenciais de vários andares, em CLT aumentou significativamente, na Europa, nos últimos dez anos, sendo neste continente que este material se tem imposto. A implementação deste novo material tem levado à crescente investigação das suas potencialidades ao nível estrutural, entre outras, resultando na execução de projetos inovadores de demonstração (fig. 4.1).

4.2.2.2. ORIGEM

O CLT é um material que nasceu na Europa, mais precisamente na Suíça, e foi desenvolvido posteriormente na Áustria através da cooperação entre a indústria e as universidades.

Ser na Áustria o berço da inovação deste material faz todo o sentido, face à abundância desta matéria-prima neste país e ao significado que a sua produção tem em termos socioeconómicos. Na Áustria, a silvicultura é altamente regulada e a quantidade de madeira cortada tem que estar em consonância com o crescimento de novas espécies. Em 2008, os *stocks* de madeira ascenderam a mais de um bilião de metros cúbicos que estão a aumentar progressivamente, sendo alocados os excedentes em indústria de papel e carvão, bem como no uso de energia [17]. Em *Muraau*, cidade austríaca onde foram fabricados os painéis para o Stadthaus, a indústria madeireira tem uma história de mais de 700 anos, fazendo parte da cultura daquela população.

4.2.3. AMÉRICA DO NORTE - CANADÁ

O Canadá tem sido um dos principais países impulsionadores da utilização de CLT na construção de edifícios. Além da sua cultura ambiental perfeitamente enraizada, o Canadá é um país de imensas áreas florestais, onde a indústria da madeira tem um impacto significativo na economia do país. As florestas canadianas são responsáveis por 10% da cobertura florestal do mundo e representam 30% das florestas boreais do mundo. Este país da América do Norte tem cerca de 397,3 milhões de hectares de floresta. Anualmente, menos de 1% das florestas canadianas são colhidas. Em 2009, a contribuição da indústria florestal para o PIB do Canadá representou cerca de 21 mil milhões de dólares (1,62%) [33].

A construção em madeira e/ou derivados de madeira, em habitações unifamiliares é, desde sempre, a solução de excelência implementada neste país. No entanto, o aparecimento do CLT veio suscitar novas potencialidades que o Canadá, de forma alguma, tem vindo a descurar.

O governo federal do Canadá tem sido um sério patrocinador de projetos de demonstração de CLT. Além disso, o seu empenho na criação de códigos/regulamentos, objetivos, modernos e competitivos, está a oferecer novas oportunidades para o uso da madeira neste país [34].

Após o reconhecimento e inclusão o NBCC 2005 (*Nacional Building Code of Canada*) do uso de inovações tecnológicas em madeira, *FPIInnovations*, o instituto nacional de pesquisas do Canadá sobre produtos florestais, lançou, em 2007, um estudo multidisciplinar, no sentido de identificar a próxima geração de sistemas de madeira na construção, onde se inclui o CLT (para edifícios acima de 10 andares) e a construção híbrida [34].

No sentido de explorar os aspetos positivos relacionados com a construção em altura, alguns conceitos recentes encontram-se, atualmente, em desenvolvimento. Michael Green, arquiteto canadiano, está desde 2008 a desenvolver um novo modelo de construção em altura, *FFTT system (Find the Forests Through the Trees)*, que visa tirar o máximo partido das capacidades do CLT.

O *FFTT system* é um sistema ousado. Propõe-se suportar um edifício de 30 andares recorrendo a uma solução que combina pilares e vigas em madeira lamelada colada, paredes, pavimentos e um núcleo central em CLT, e vigas em aço ancoradas no núcleo central. Esta combinação usa os elementos de madeira para resistir às cargas gravíticas, enquanto os elementos de aço, além de fazerem parte do sistema de resistência às cargas gravíticas, resistem às forças laterais, incrementando a rigidez do edifício, tornando esta combinação extremamente vantajosa [33]. O *FFTT system*, com o recurso a elementos de aço, consegue maior flexibilidade e amplitude espacial e, por outro lado, a construção do núcleo central em CLT evita o recurso ao betão armado. As vantagens associadas a este sistema híbrido podem pôr em causa o extremismo da construção integral em CLT, pois este sistema resulta em soluções estruturalmente capazes de responder a fins mais arrojados. Os sistemas híbridos pretendem ser uma solução apetecível para dar resposta a um determinado tipo de tipologias e melhoram substancialmente o desempenho de soluções construídas integralmente em CLT.

De seguida, apresentam-se as configurações estruturais, que o *FFTT system* propõe.

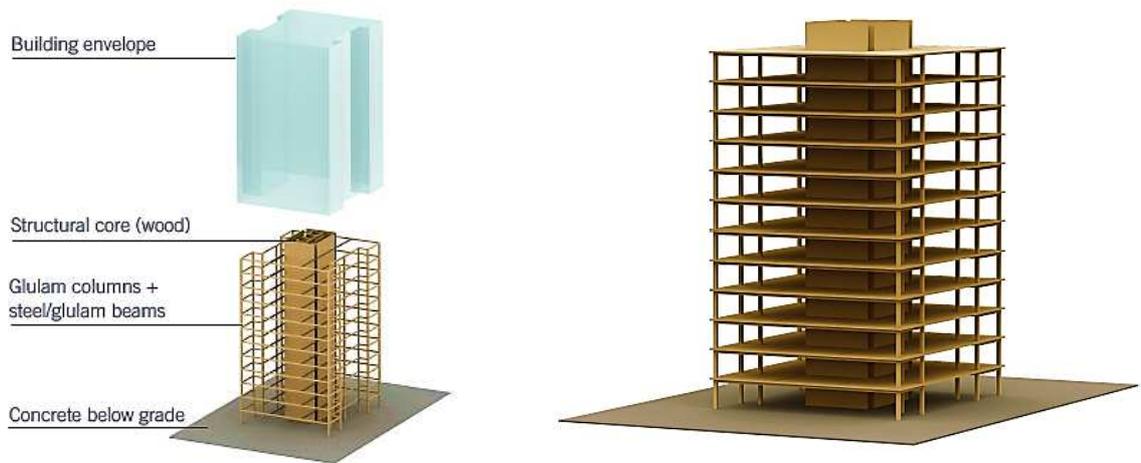


Fig. 4.2 – Opção 1, 12 andares [33]

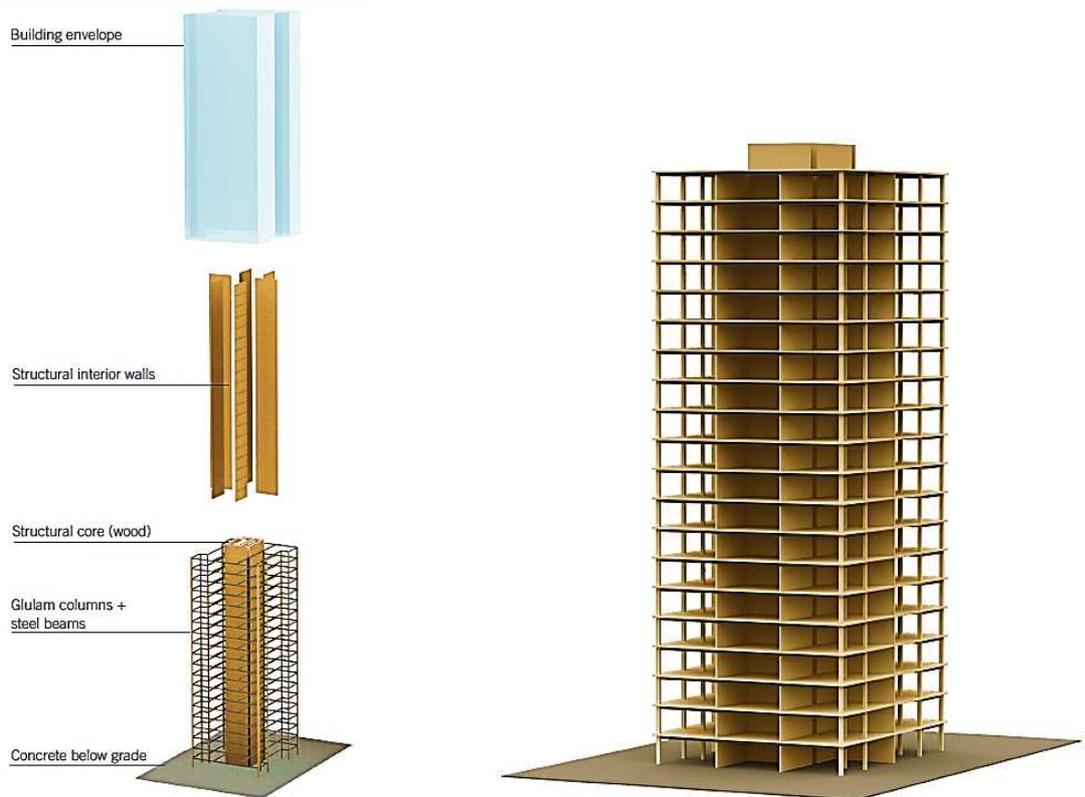


Fig. 4.3 – Opção 2, 20 andares [33]



Fig. 4.4 – Opção 3, 20 andares [33]

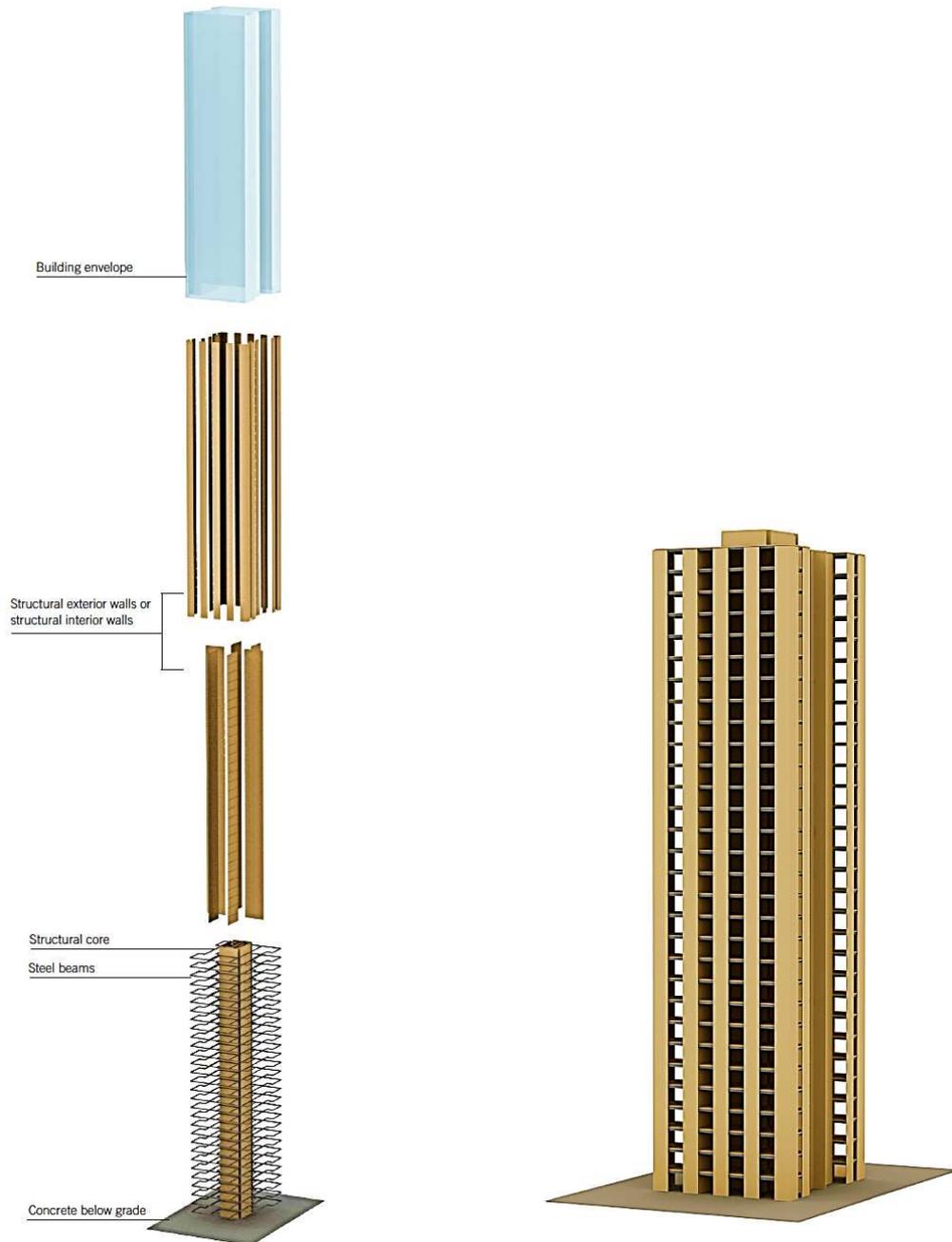


Fig. 4.5 – Opção 4, 30 andares [33]

4.3. STADTHAUS – MURRAY GROVE – UM EXEMPLO ICÓNICO

Stadthaus tem aproximadamente 30m de altura (9 pisos), localiza-se em *Hackney*, leste de Londres. Foi projetado pelo gabinete de arquitetura *Waught Thistleton Architects*, a convite do empreendedor local, *Telford Homes and Metropolitan Housing Association*, tendo o projeto estrutural sido desenvolvido pela empresa *Techniker, Ltd.*. O fornecimento e montagem dos painéis de madeira foram assegurados pela empresa austríaca *KLH*.

O edifício ocupa uma área de 289m² (17m x17m) e é constituído por 29 apartamentos. Dos 29 apartamentos 20 foram vendidos a privados e 9 foram arrendados a preços acessíveis (habitação social). O piso térreo destina-se a espaços comerciais.



Fig. 4.6 – Foto exterior *Stadthaus* [35]

O objetivo principal da *Waught Thistleton Architects* foi demonstrar que, através do uso de painéis de CLT, é possível dar resposta à necessidade iminente do Reino Unido em construir habitação de grande densidade, inerente ao elevado crescimento urbano, trilhando o caminho do desenvolvimento sustentável. O *Stadthaus* é, assim, o exemplo pioneiro de arquitetura que aponta para o caminho neutro do carbono na construção.

A aceitação do edifício no mercado foi de tal forma excelente que todos os apartamentos foram vendidos nas duas horas posteriores ao seu lançamento [17].

4.3.1. SUSTENTABILIDADE

Em 2005, 30% da energia do Reino Unido foi gasta no consumo interno. Segundo os responsáveis locais pela estratégia habitacional, se nada for feito, as emissões de carbono resultantes da construção de habitação em Londres atingirão o valor de 19,7 milhões de toneladas, por ano, em 2025. Reagindo a estes números, o governo estabeleceu como objetivo que, em 2016, as emissões de carbono na construção de nova habitação sejam zero. Se estas metas são ou não realistas pode ser questionável, mas o que está claro é que é necessário agir com urgência [17].

Neste projeto, a *Waught Architects* conseguiu demonstrar que a madeira como material natural, renovável, reciclável e capaz de armazenar dióxido de carbono, poderá constituir um fator chave no combate a estas emissões nocivas ao meio ambiente.

No Stadthaus, a substituição de betão por madeira significou a redução de 310 toneladas de carbono, o equivalente ao consumo de carbono em 21 anos de ocupação. Os 901m³ de madeira consumidos na construção armazenam mais de 186.000kg de carbono.

Quadro 4.1 – Análise de redução de carbono (C)

(a)

	Consumo C/ton Mat. Utilizado (kg/ton)	Quantidades Estimadas - Stadthaus (se construído em betão)			Produção de Carbono (kg)
		Betão (m3)	Aço (ton)	Cimento (ton)	
Betão	237	903		285	67.545,00
Aço	477		120		57.240,00

A produção de cimento produz 870kg de CO₂, que se traduz em 237kg de Carbono por ton de material utilizado

A produção de aço produz 1750kg de CO₂, que se traduz em 477kg de Carbono por ton de material utilizado

(b)

	Economia Madeira (ton/m3)	CO ₂ /m ³	Quantidade Consumida - Stadthaus		Economia CO ₂ (ton)	Economia Carbono (Kg)
			Madeira (m3)			
Madeira	0,8		901		720,8	186.000,00

(a)+(b)

Total Carbono (Kg)	Economia Carbono (Kg)
	310.785,00

A decisão da *Waught Architects* em usar a madeira na construção do *Stadthaus* teve em mente não só as diretrizes governamentais para a nova habitação em vigor, como a necessidade iminente de reduzir a pegada de carbono. Aliás, para este gabinete de arquitetos, esta era uma prioridade já de longa data.

Importante será salientar que, durante o período de conceção e durante a fase de planeamento da construção, foram mantidos laços com a comunidade local no sentido de informar e elucidar as pessoas do tipo de projeto que iria ser construído. Esta postura perante a sociedade permitiu que aos governantes locais, vereadores e às associações de moradores, fosse dada a oportunidade de conhecimento prévio do novo projeto, bem como permitiu-lhes expressar as suas dúvidas e preocupações.

O cliente, *Telford Houses*, foi corajoso em assumir este material inovador e o sucesso atingido pode significar um ponto de viragem para a indústria da construção civil no Reino Unido.

4.3.2. CONCEÇÃO

A viabilidade da edificação do *Stadthaus* em CLT estava dependente da sua aprovação por parte de duas organizações britânicas, o *National House Building Council* (NHBC) e o *Building Research Establishment* (BRE). A NHBC define padrões e garantias para a habitação nova e reabilitada no Reino Unido. A sua principal função é fornecer proteção aos potenciais compradores, visto que, às casas registadas na NHBC, é-lhes conferida uma garantia de 10 anos, garantindo ao consumidor que o imóvel foi construído para um padrão de qualidade por eles reconhecido.

A NHBC concordou em estudar o projeto do Stadthaus como um projeto-piloto e começou por examinar o novo material em detalhe.

Por outro lado, o BRE obrigou a verificações exaustivas aos projetos técnicos do *Stadthaus*. O BRE existe para testar produtos e fornecer dados técnicos sobre o seu desempenho – um serviço pago pelo fornecedor do material, neste caso o KLH.

O certificado europeu garante ao material uma expectativa de vida de 50 anos, mas, para que o projeto fosse aprovado, a NHBC exigiu uma certificação atestando uma garantia de vida de 60 anos. Esta certificação foi conferida em cerca de 6 meses [17].

4.3.3. FACHADA

A fachada do *Stadthaus* foi projetada de forma a transmitir a simplicidade da construção, tendo por base o seu contexto e as exigências de sustentabilidade. A altura do edifício foi preponderante na escolha do material de revestimento da fachada, pois era necessário garantir a longevidade do mesmo, com o mínimo de manutenção ao longo dos anos (pintura, envernizamento ou limpeza).

A equipa de arquitetos projetou um revestimento exterior em painéis da *Eternit*, um material leve, feito de uma fibra com 70% de resíduos de madeira. As cores escolhidas e o posicionamento das placas foram pensados de forma a aumentar a leveza física do edifício. A precisão da estrutura em madeira (comparada com o equivalente em betão) permitiu ao arquiteto trabalhar uma fachada muito mais precisa, uma vez que o alinhamento dos painéis não varia ao longo de todo o edifício. Ao nível do piso térreo, foi utilizado um material de revestimento com base de cimento, mais durável e resistente ao desgaste do que os painéis *Eternit*, que transmitiram robustez e peso à base do edifício.

As construções vizinhas são na sua maioria edifícios municipais dos anos 50, revestidos a tijolo. O efeito *pixel* na fachada do *Stadthaus* foi pensado de forma a minimizar o impacto da sua implantação face à arquitetura do local.

O padrão da fachada é composto por mais de 5.000 painéis individuais, de cores cinza, preto e branco e foi inspirado em algumas pinturas abstratas do pintor alemão *Gerhard Richter*.



Fig. 4.7 – Pintura abstrata, *Gerhard Richter* 1999 (CR 857-3) [36]

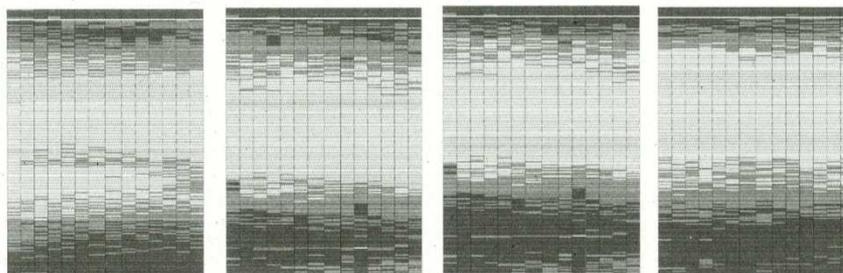


Fig. 4.8 – Fachada *pixel* [17]



Fig. 4.9 – Alçados *Stadthaus* [17]

4.3.4. LAYOUT

O *Stadthaus* foi implantado na interseção das ruas *Murray Grove* e *Provost Street*, em *Hackney*, leste de Londres. Com uma área de implantação de 289m² e 9 pisos, foi concebido maioritariamente para habitação. Apenas no rés-do-chão foi projetado um espaço comercial.

O edifício alberga 29 apartamentos, dos quais onze T1, dez T2, cinco T3 e três T4.

O edifício é integralmente construído em CLT a partir do primeiro andar até ao nono, incluindo o núcleo (caixas de escadas e elevadores).

Os arquitetos e engenheiros perceberam que um dos principais pontos fracos da madeira é a sua suscetibilidade à humidade, chegando à conclusão que seria prudente manter a madeira o mais possível afastada do solo. Por esse facto, o primeiro andar foi projetado e construído em betão armado.

Foi estabelecido que os três primeiros pisos (1º ao 4º) seriam destinados à habitação social e os restantes (5º ao 9º) destinados a habitação residencial privada. Foi exigido pela *Metropolitan Housing Association* que as entradas para estas duas zonas fossem independentes. Os arquitetos não fizeram mais do que espelhar o rés-do-chão, atribuindo uma entrada idêntica para ambas as zonas, em lados opostos, tendo sido atribuída a cada uma a sua própria caixa de escadas e de elevador.

No espaço envolvente ao edifício, os arquitetos tiveram o cuidado de criar dois espaços verdes, um na frente e outro na traseira do edifício. No *Stadthaus*, em cada apartamento existe uma varanda, os cantos do edifício são abertos, permitindo um duplo aspeto à sala de estar, proporcionando ventilação cruzada do espaço. Tendo em mente as necessidades/comodidade dos residentes, todos os T3 e T4, nos pisos mais baixos, têm uma ampla vista para o jardim das traseiras, onde as crianças podem brincar, transmitindo uma certa segurança aos pais.

Como acima referenciado, também na planta da figura 4.10, se pode constatar a exclusividade do acesso aos pisos 1º, 2º e 3º do edifício (caixa de escadas e elevador). A planta 4.11 mostra-nos a exclusividade de acesso aos restantes pisos (4º ao 8º).

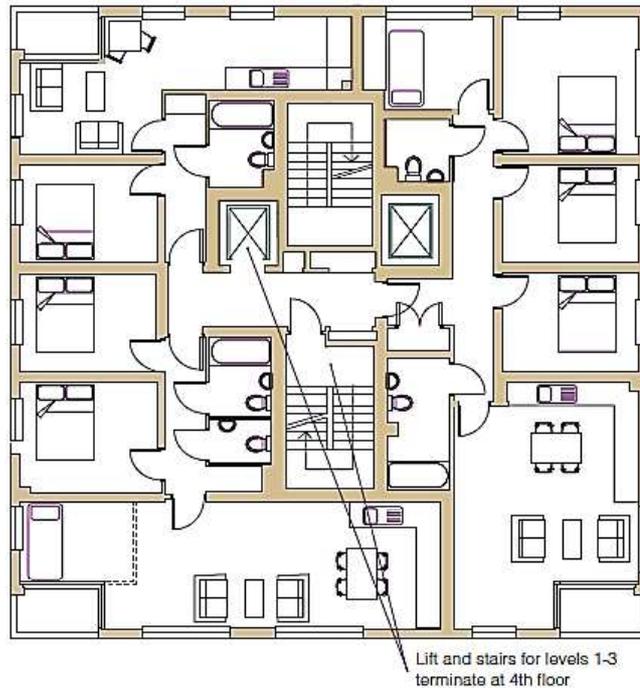


Fig. 4.10 – Planta 3º andar (habitação social) [37]

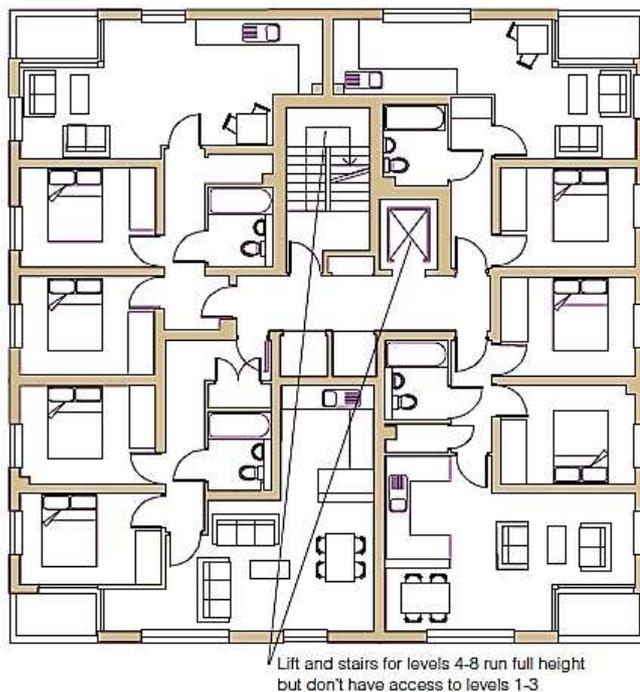


Fig. 4.11 – Planta 5º andar (habitação privada) [37]

Um dos problemas com que os arquitetos se debateram com as autoridades locais foi que um terço do edifício fosse destinado a habitação familiar, que neste caso resultou que 50 a 60% dos habitantes do prédio fossem crianças.

Waight Thistleton diferenciou *layouts* para as mesmas tipologias, indo ao encontro do rácio ótimo entre adultos e crianças, garantindo assim o equilíbrio ocupacional nas sucessivas gerações de ocupantes do edifício.

4.3.5. PROJETO ESTRUTURAL

Os principais desafios foram garantir a estabilidade da estrutura a longo prazo e minimizar os riscos de incêndio (os regulamentos europeus especificam que os núcleos de construção devem ser construídos a partir de materiais não combustíveis). Sem precedentes para um edifício de madeira desta altura, a maior parte dos projetos do *Stadthaus* tiveram de ser desenvolvidos a partir de princípios originais.

Os sistemas de construção maciços, como é este o caso, oferecem vantagens à construção em madeira em altura quando comparados com sistemas leves, mais correntes. No que respeita ao comportamento estrutural, a construção maciça, constituída por painéis de grande dimensão, possui um comportamento monolítico, semelhante às estruturas de betão armado e alvenaria. Além disso, é também um sistema baseado na distribuição de paredes resistentes responsáveis pela distribuição de cargas através de superfícies lineares contínuas, o que resulta numa menor concentração de esforços nos seus componentes estruturais e num conjunto estrutural com maior resistência e rigidez.

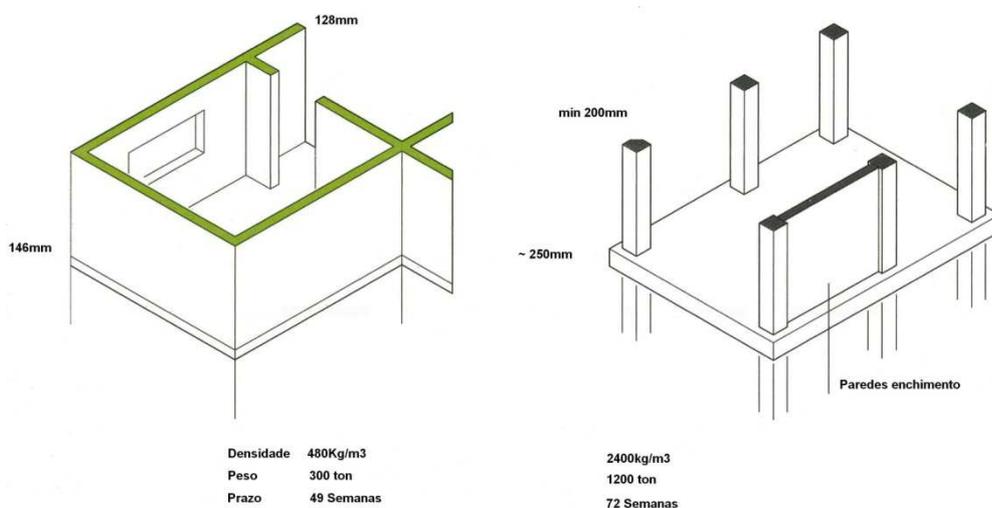


Fig. 4.12 – Comparação entre construção em CLT e Betão Armado [17]

Os apartamentos do *Stadthaus* foram dispostos num padrão de “favo de mel”, em torno do núcleo central resistente (caixa de elevadores e caixa de escadas). O arranjo do núcleo, bem como a localização das paredes sólidas estruturais (todas as paredes exteriores e algumas interiores), tornam esta construção excepcionalmente resistente e, para além disto, com este sistema conseguimos atingir uma excelente separação acústica, não só entre apartamentos, mas também entre pisos.

A construção celular do *Stadthaus*, paredes e pisos ortogonais, forma um sistema tridimensional de painéis de travamento, que foram explorados para maximizar a robustez da estrutura. Para a equipa projetista, a máxima estabilidade foi conseguida, transformando todos os elementos verticais em

paredes resistentes, criando, assim, uma grande capacidade de resistência a cargas verticais e a solicitações horizontais, como por exemplo a ação do vento. Esta ação, exercida nas fachadas do edifício, é inicialmente transmitida às paredes exteriores que, por sua vez, a transferem aos painéis de pavimento. Estes transmitem, posteriormente, os esforços resultantes para as paredes internas e externas que, por fim, são transferidos para a estrutura base inferior do edifício e fundações em betão.

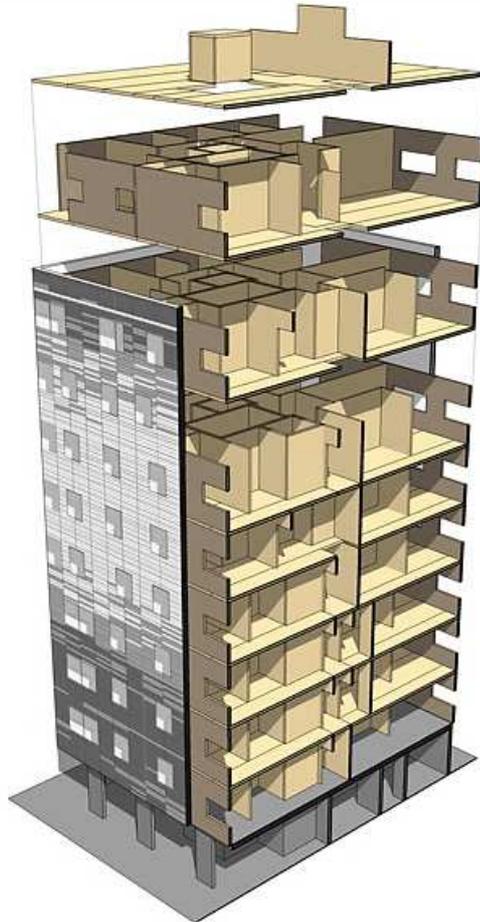


Fig. 4.13 – Disposição dos apartamentos, em torno do núcleo central [17]

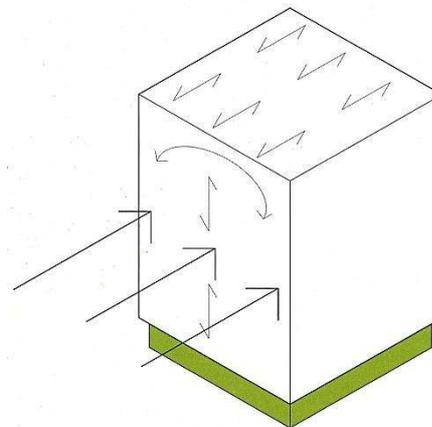
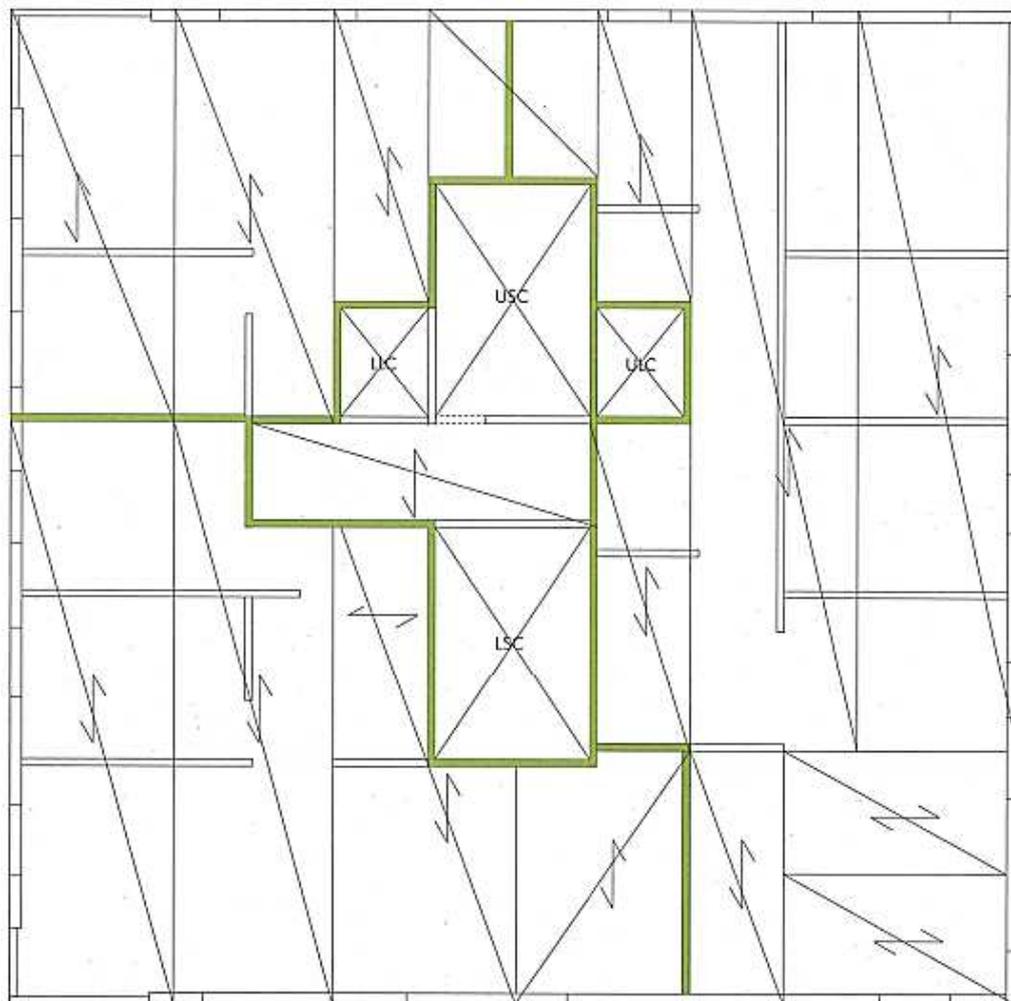


Fig. 4.14 – Dissipação da ação do vento na estrutura do edifício [17]



- Legenda:**
- Paredes separação (núcleo central resistente)
 - ULC Caixa de elevador - parte superior (4^o ao 8^o piso)
 - LLC Caixa de elevador - parte inferior (1^o ao 3^o piso)
 - LSC Caixa de escadas - parte inferior (1^o ao 3^o piso)
 - USC Caixa de escadas - parte superior (4^o ao 8^o piso)

Fig. 4.15 – *Layout* da distribuição de painéis da laje [17]

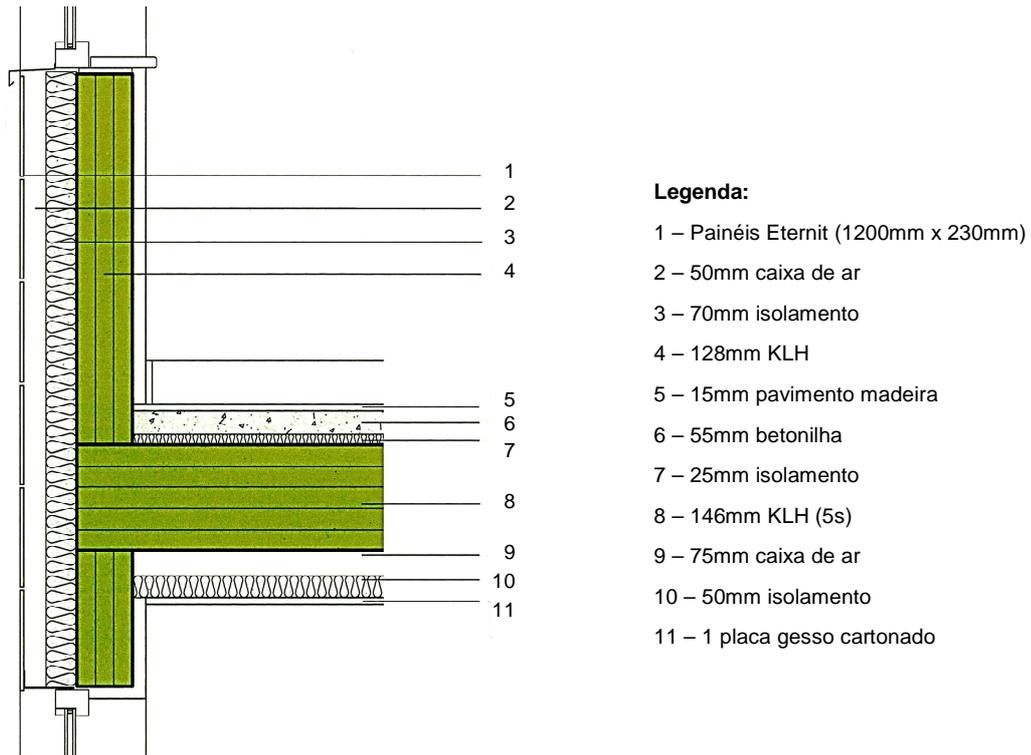


Fig. 4.16 – Secção tipo – parede exterior [17]

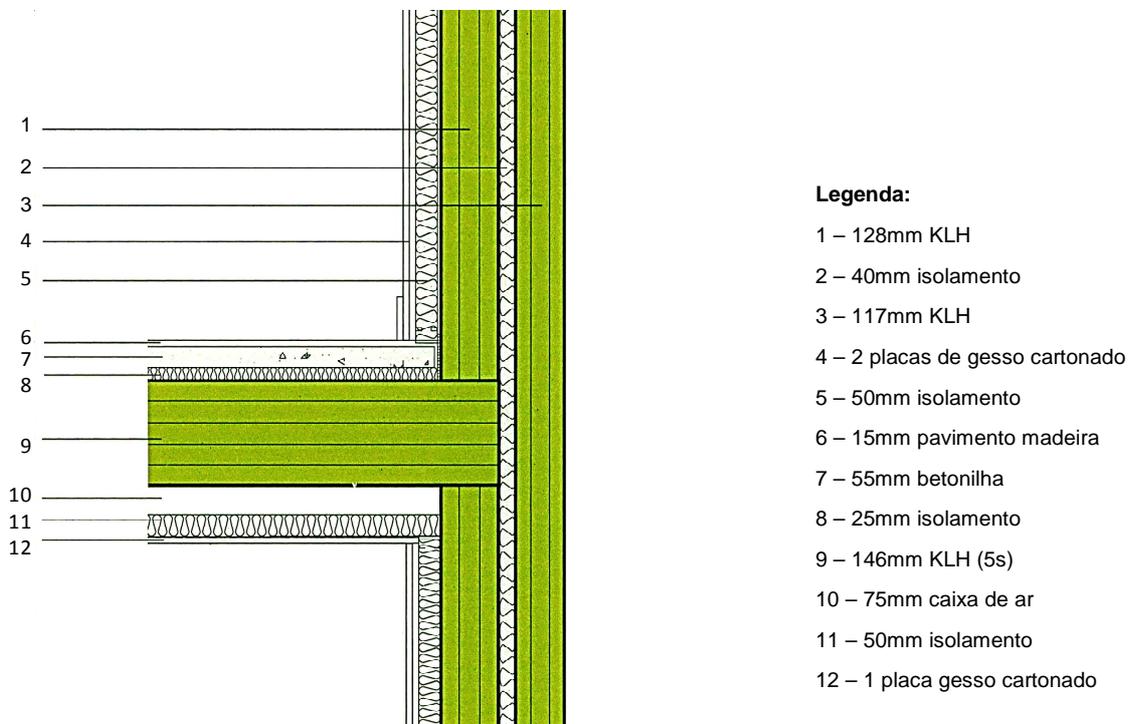


Fig. 4.17 – Secção tipo – núcleo [17]

A parte crucial do projeto do *Stadthaus*, realizado pela *Techniker*, foi assegurar a robustez do edifício, de forma a evitar o colapso progressivo.

Existem três abordagens estabelecidas, infra enumeradas, para evitar este cenário. No entanto, estas abordagens tiveram sempre por base estudos de estruturas em betão armado, aço ou alvenaria:

- Assegurar que todos os elementos de um edifício são adequadamente ligados;
- Teoricamente, qualquer elemento pode ser removido, mantendo-se a restante estrutura com capacidade de se autossustentar;
- Todas as partes da estrutura devem ser dimensionadas para resistir a uma carga acidental de 34KN/m^2 .

Como não existiam, à data, diretrizes oficiais para a construção de edifícios usando este método construtivo, projetar o *Stadthaus*, tendo por base as abordagens supra referidas, tornaria a construção extremamente onerosa e revelar-se-iam, provavelmente, desnecessárias.

Perante este cenário, os projetistas aconselharam-se junto da TRADA (*Timber Research and Development Association*) e da TFA (*Timber Frame Association*), no sentido de alcançarem um método que combinasse adequadamente as ligações com a remoção parcial de elementos.

Uma carga lateral de $7,5\text{KN/m}^2$, em qualquer elemento, e a hipotética remoção de um qualquer painel de parede, foram tidas como exigência de projeto [17].

4.3.6. LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS

Apenas dois tipos de suporte/placas e parafusos foram implementados em todo o edifício, com a exceção da fixação utilizada ao nível do primeiro andar, ou seja da ligação entre a estrutura de betão do piso do rés-do-chão e a estrutura de madeira em CLT. Esta solução teve como principal objetivo minimizar o risco de erro, aliviando assim os custos de supervisão.

A *Techniker* optou por utilizar um “padrão prateleira”, para suportes e placas nos centros regulares. Os meios de fixação simples foram distribuídos pelo edifício, de acordo com o padrão de forças ocorridas em cada junção. O *Stadthaus* foi cuidadosamente desenhado para distribuir e minimizar as tensões de compressão ao longo dos painéis de parede. A junção regular dos painéis introduz um grau de tolerância no sistema, suficiente para acomodar as expansões e contrações provocadas pelas variações da temperatura do clima do Norte da Europa.

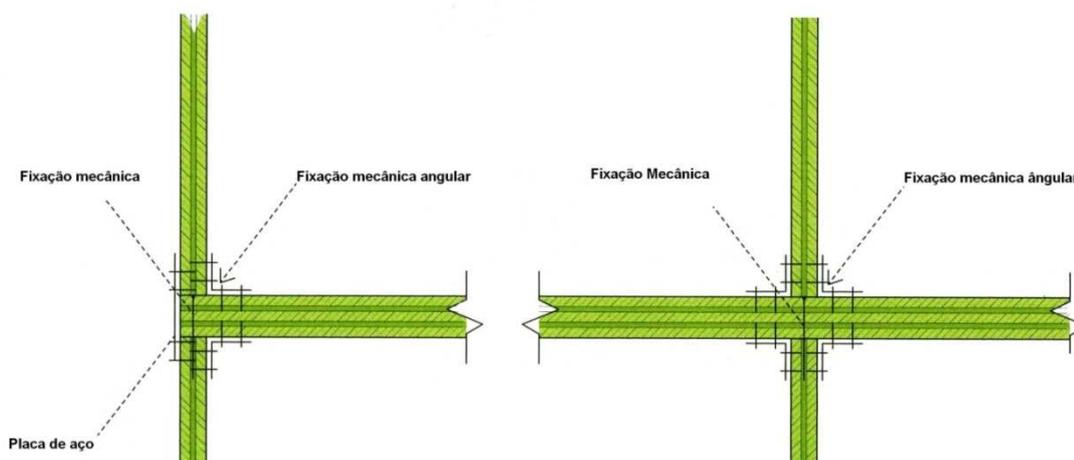


Fig. 4.18 – Pormenores de ligações [17]



Fig. 4.19 – Fotos de pormenores de ligações [17]

4.3.7. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS

No Stadthaus, nos elementos estruturais principais foram utilizados painéis com cinco camadas. Para melhorar o desempenho ao fogo, a classe de resistência foi aumentada graças à introdução de revestimentos suplementares (ver pormenores figs.4.16 e 4.17).

Quadro 4.2 – Resistência ao fogo - *Stadthaus*

Elementos Estruturais	Tempo (Min)
Entre divisórias internas (quartos/corredor)	30
Entre apartamentos	60
Entre apartamentos e zonas comuns	60
Entre apartamentos e caixas de escadas/elevadores	120
Todos os elementos estruturais (paredes e pavimentos)	90

4.3.8. CONFORTO ACÚSTICO

Depois de muita pesquisa e experimentações de várias soluções, a *Waught Architects* optou pela introdução, ao nível do piso, portanto acima das lajes de pavimento em madeira, de uma camada de isolamento compactado com 25mm, e sobre esta foi colocada uma betonilha com 55mm (onde foi instalado o sistema de aquecimento com piso radiante). Ao nível dos tetos, foram aplicados tetos falsos com isolamento adicional (fig.4.16 e fig.4.17). Os níveis de conforto acústico alcançados foram excelentes, acima do regularmente exigido no Reino Unido, com uma média de 55db entre apartamentos e 53db entre andares [17].

4.3.9 CONSTRUÇÃO

O processo de construção de madeira pré-fabricada é rápido. Todo o edifício foi montado e ficou concluído em 49 semanas, sendo o tempo estimado de construção de um edifício similar, em betão, de 72 semanas. O material foi transportado desde a Áustria até ao Reino Unido em 21 camiões. Por questões de restrições do transporte, o comprimento e larguras dos painéis foram limitados aos máximos de 14m e 2,95m, respetivamente.

A estrutura de madeira foi erguida, durante 27 dias, ao longo de 9 semanas, por uma equipa de montagem constituída por 4 homens, que trabalhava apenas 3 dias por semana.

A construção do Stadthaus foi possível, apenas, com o auxílio de uma auto-grua. Se a construção fosse em betão armado, seria necessária a implementação, no mínimo, de uma grua torre.



Fig. 4.20 – Auto-grua, área de implantação e espaço de manobra reduzidos (Cortesia Tisem)



Fig. 4.21 – Transporte dos painéis de CLT,(Cortesia Tisem)



Fig. 4.22 – Acondicionamento dos painéis de CLT, (Cortesia Tisem)



Fig. 4.23 – Faseamento da obra (Cortesia Tisem)

4.4. O CLT EM PORTUGAL

Em Portugal, a utilização de madeira na construção, e principalmente a madeira para estruturas, possui um estigma bastante acentuado na opinião pública e nos técnicos do sector, originada em mitos relacionados com a durabilidade e a resistência ao fogo. As estruturas de madeira em Portugal são conotadas como soluções provisórias ou de menor qualidade. Diversas condicionantes locais poderão justificar em parte a reduzida penetração da construção em madeira, tais como altas temperaturas na estação quente, a maior propensão para o ataque biológico e a escassez da madeira de qualidade. A estas razões soma-se a reduzida mobilidade das famílias, a preferência por processos correntes de construção, a escassez de técnicos especializados, a reduzida formação ministradas nas universidades nacionais sobre o tema e a ausência de regulamentação específica [38].

Após alguns anos de desenvolvimento na Europa, a construção em CLT está a dar os primeiros passos em Portugal; na minha opinião, e fazendo um paralelismo com a difícil penetração do conceito “casa de madeira” no nosso país, antevejo similares dificuldades na sua implementação.

No entanto, o CLT apresenta excelentes capacidades ao nível estrutural e exigencial que tornam este processo construtivo atrativo e num sério “concorrente” à construção tradicional, de betão armado e alvenaria.

Quanto a mim, a “chave” do sucesso para a eficaz penetração desta nova tecnologia passa por:

- Mais intervenção dos arquitetos;
- Dissipar eventuais dúvidas junto dos consumidores;
- Medidas ou programas públicos que incentivem especificamente a construção de casas de madeira;
- Aumentar a formação nesta área nas universidades, no sentido de dotar os futuros engenheiros de formação mais especializada na construção em madeira;
- Enquadramento legal mais claro;
- Investimento na publicidade e marketing, fazendo jus à sua sustentabilidade enquanto material de construção.

4.4.1 EXEMPLOS REPRESENTATIVOS

O CLT é representado em Portugal pela empresa Tisem, Lda [20]. Esta empresa, de conceção, projeto e construção, sediada na Figueira da Foz, representa os painéis de CLT fabricados na Áustria pela empresa *KLH Massivholz GmbH*. Segundo informações da referida empresa, apenas três edifícios foram construídos em CLT em Portugal, sendo um deles uma reabilitação de um edifício:

- Complexo municipal de piscinas em Almada;
- Habitação unifamiliar em Alcanena;
- Casa de repouso em Coimbra (reabilitação).

4.4.1.1 Complexo municipal de piscinas na Caparica - Almada

A maior obra construída, até ao momento, foi em Almada, com um edifício para piscina e uma sala polivalente (figura 4.24). O edifício compreende uma nave com um tanque de 25m e uma sala polivalente contígua com 213m². A característica principal do edifício foi a utilização massiva de madeira na estrutura, painéis CLT, tirando partido da sua tripla função: estrutura, compartimentação e revestimento. A forte higrometria interior limitou a existência de madeira à vista aos locais compatíveis para a Classe de Serviço 2, de acordo com o Eurocódigo 5. Nas zonas interiores de

circulação, as paredes e tetos apresentam-se em madeira à vista. Nos balneários, as paredes de madeira foram impermeabilizadas e revestidas nas zonas dos chuveiros, devido ao contacto direto com a água, conservando-se os tetos com madeira à vista. Nas zonas de vestiário mantiveram-se as paredes de madeira à vista. No piso da sala polivalente, os painéis CLT executam uma laje fungiforme, apoiando-se pontualmente em pilares metálicos dispostos, segundo uma métrica regular quadrada de 6m de lado. O mesmo painel fica visível pelo exterior (teto) e pelo interior (pavimento). Na nave da piscina, os painéis CLT realizam a cobertura [23].



Fig. 4.24 – Complexo Municipal de Piscinas, Almada [20]



Fig. 4.25 – Complexo Municipal de Piscinas, Almada – Pormenores de construção [20]

4.4.1.2 Moradia unifamiliar - Alcanena

A figura 4.26 apresenta uma moradia unifamiliar, construída no concelho de Alcanena, sendo este o primeiro edifício construído em CLT em Portugal. A moradia possui 260m² de construção, tendo consumido 89m³ em painéis de CLT. A estrutura de madeira, constituída por todas as paredes interiores e exteriores, laje de cobertura e pavimento intermédio, foi executada em cinco dias por uma equipa de quatro carpinteiros. As paredes exteriores possuem um sistema de isolamento térmico ETICS, colado aos painéis. Pelo interior, à exceção da zona das escadas, as paredes foram revestidas

com placas de gesso cartonado. Sobre os painéis de cobertura foram aplicados painéis de isolamento térmico em PIR, sendo a impermeabilização em tela de PVC [20].



Fig. 4.26 – Moradia unifamiliar, Alcanena [20]

4.4.1.3 Casa de repouso - Coimbra

No que concerne à reabilitação de edifícios, foi efetuada uma obra em Coimbra, uma Casa de Repouso. Este edifício foi revestido integralmente, não apresentando madeira à vista. Nas ilustrações seguintes podemos observar algumas fases de execução da obra, tendo já sido detalhado no capítulo 3.2.13 alguns pormenores de ligação entre sistemas construtivos.



Fig. 4.27 – Casa Repouso, Coimbra – Montagem e escoramento painéis de parede (Cortesia Tisem)



Fig. 4.28 – Casa Repouso, Coimbra – Montagem painéis de laje (Cortesia Tisem)



Fig. 4.29 – Casa Repouso, Coimbra – Estrutura de parede e laje concluídas (Cortesia Tisem)

Na reabilitação de edifícios, este sistema construtivo pode apresentar diversas vantagens:

- Compatibilidade com outros materiais e sistemas construtivos;
- Peso próprio da estrutura reduzido;
- Estrutura esbelta, proporcionando ganhos na área e altura disponíveis;
- Obra seca e pré-fabricação;
- Reduzidos prazos de execução;
- Reversibilidade da intervenção;
- Capacidade de contraventamento do edifício para efeito de reforço sísmico.

Apesar da pouca experiência em Portugal na utilização deste tipo de solução, é já no entanto reconhecida desde há muito a adequabilidade da utilização de madeira em geral, seja através de madeira maciça, lamelada-colada ou outros produtos derivados de madeira, face ao carácter pouco intrusivo das intervenções, à sua reversibilidade, ao baixo peso próprio das estruturas e ao facto de se traduzir numa obra seca. A aplicação de pisos em betão armado ou com estruturas mistas em aço-betão obriga geralmente à adição de elementos de suporte, normalmente nos mesmos materiais dos pisos, dado que as paredes existentes em alvenaria não apresentam capacidade resistente aos esforços axiais ou de flexão produzidos pelo acréscimo de peso próprio da estrutura. Tem-se verificado, por tal razão, que as intervenções em edifícios antigos de alvenaria com a adição de elementos em betão armado ou aço tendem a esventrar as paredes existentes, ou alternativamente à obrigatoriedade de

diminuição do espaço útil interior, quando os elementos adicionados são aplicados à face interior das paredes existentes. Em muitas destas intervenções, as paredes em alvenaria antiga deixam de possuir carácter estrutural, sendo a sua manutenção apenas uma exigência legal. As intervenções de reabilitação com recurso a painéis CLT antevêm-se menos invasivas do ponto de vista estrutural e arquitetónico, sendo naturalmente mais compatíveis com a ocupação e manutenção em serviço dos imóveis. Esta situação é muitas vezes comprometida por operações associadas à aplicação de betão fresco (escoramento, cofragem, descofragem, cura, armazenamento de materiais e sobretudo a utilização de água. A existência de um “estaleiro seco” com ausência quase total de resíduos (entre outros, efluentes decorrentes das lavagens em obra de camiões betoneira ou detritos de demolições) encontra-se claramente em consonância com o disposto no Decreto-Lei n.º 46/2008 de 12/03, que estabelece o Regime das Operações de Gestão de Resíduos resultantes de Obras ou Demolições de Edifícios, o qual indica que a elaboração de projetos e a respetiva execução em obra devem privilegiar a adoção de metodologias e práticas que minimizem a produção e a perigosidade dos RCD. As intervenções de reabilitação através da adoção de perfis de aço permitem soluções quase “secas”, mas que apresentam alguns problemas, tais como a necessidade de se garantir uma boa ligação à alvenaria original, e a grande diferença de rigidez entre a estrutura de aço e a de alvenaria, o que origina grandes concentrações de tensões nos pontos onde estas se ligam. Estas situações não ocorrem na reabilitação com painéis CLT em que as ligações entre os painéis e a alvenaria não são pontuais, mas sim lineares.

4.4.2 BREVES CONSIDERAÇÕES

Do ponto de vista da autora, a utilização do CLT na reconstrução de edifícios pode ser uma excelente aposta. Por um lado, a construção de habitação nova está em declínio, o número de alojamentos ultrapassa em 50% o número de famílias [39], por outro, a reconstrução do edificado torna-se, cada vez mais, uma necessidade premente das nossas cidades.

5

PORMENORIZAÇÃO DE UM PISO TIPO EM CLT

5.1. OBJETO

Pretende-se neste capítulo pré dimensionar e pormenorizar um piso tipo de um edifício em CLT. Como base, para este estudo, considerou-se um edifício existente, de construção tradicional, implantado na cidade do Porto. O projeto do edifício, por cortesia, foi cedido pela empresa Soares da Costa, S.A., sendo o objetivo alterar o sistema construtivo base para o sistema construtivo de painéis de madeira lamelados cruzados (CLT).

Neste estudo, mantem-se o projeto base no que concerne à cave e rés-do-chão, por motivos abaixo explanados, em subcapítulo próprio. No restante edifício as paredes de betão armado, núcleo central resistente e as paredes de alvenaria são substituídas por paredes constituídas por painéis de *Cross Laminated Timber*. Todos os revestimentos interiores e exteriores são mantidos. Ao nível da pormenorização o foco é dado a um piso-tipo. No entanto, são pormenorizadas algumas zonas particulares de referência do restante edifício, como a ligação entre pisos de CLT.

No que concerne à avaliação e preconização dos isolamentos térmico e acústico, bem como à segurança contra incêndios do edifício, efetua-se uma reflexão acerca destes desempenhos.

Ao nível das redes técnicas, todos os traçados do projeto base se mantêm, apenas se preconizando, ao nível dos painéis horizontais, as aberturas para as respetivas *courettes*.

5.2. BREVE DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

O edifício está implantado no gaveto da rua Santos Pousada / rua da Póvoa, no Porto, sendo constituído por uma cave / piso térreo, destinados a estacionamento e comércio e por mais 6 pisos destinados a habitação, perfazendo um total de 7 lajes, incluindo a cobertura.

A área total de construção é de 1.262,5m². A cave encontra-se parcialmente abaixo do nível do solo, onde se localiza uma área destinada a garagem e arrumos, acessível pela rua dos Abraços. A uma cota ligeiramente superior, relativamente ao espaço anterior, agarrando-se à cota da rua de Santos Pousada, existe uma área comercial e a zona de entrada no edifício. Ao nível dos pisos intermédios existem duas habitações, uma do tipo T2 e outra do tipo T0. Relativamente ao nível do piso 5, existem também duas habitações, uma do tipo T2 e outra do tipo T1. Este desenvolve-se em dois pisos, sendo o último piso recuado.



Fig. 5.1 – Fotografia do edifício Santos Pousada

5.2.1. SOLUÇÃO ESTRUTURAL / ACABAMENTOS

A solução estrutural existente consiste em lajes maciças betonadas *in situ*, apoiadas em vigas de bordadura e diretamente nos pilares/paredes. Os elementos verticais (pilares e paredes) são igualmente em betão armado, constituindo as paredes um núcleo resistente, confinando a caixa de escadas e elevadores. As fundações são em betão armado, sendo as sapatas apoiadas diretamente no terreno.

Relativamente aos revestimentos exteriores a solução base contempla:

Paredes:

- Envazamento de granito amarelo bujardado a pico fino colado, sobre parede dupla em alvenaria de tijolo vazado 11x20x30 + 15x20x30 cm com 30 mm de poliestireno extrudido e uma caixa-de-ar com 20 mm;
- Paredes duplas em alvenaria de tijolo vazado de 11x20x30 + 11x20x30 e com uma caixa de ar com 30 mm, sobre a qual foi aplicado um sistema de isolamento térmico ETICS do tipo “Capotto” constituído por poliestireno expandido com 40mm de espessura, com argamassa tipo “ADESEN CPS - B”, armada com rede de fibra anti-alkalino de 150g/m² e acabamento “VISOLPLAST RSTF”.

Caixilharia:

- Caixilharia em alumínio anodizado acetinado do tipo “Extrusal séries A0040, B003H e A080”;
- Vidro duplo incolor 4+10+6mm em todos os vãos, exceto nos vãos das casas de banho nos quais será colocado um vidro fosco no lado interior;
- Peitoris em chapa de alumínio anodizado acetinado;
- Peitoris interiores em madeira de Tola;
- Soleiras em Granito amarelo amaciado;
- Estores *Blackout* pelo interior.

No que concerne aos revestimentos interiores a solução base contempla:

Paredes Divisórias:

- No interior das habitações foram executadas em alvenaria de tijolo vazado de 11x20x30 e na envolvente da caixa de escadas executou-se uma forra em alvenaria de tijolo de 7x20x30;
- Nas zonas de *courettes* foram executadas em alvenaria de tijolo de 7x20x30;
- Paredes das caixas de escadas foram executadas em betão armado com 0.15m de espessura.

Sala, Hall, Circulações e Quartos:

- Pavimentos – Lamparquete em madeira de Cumaru;
- Paredes – Pintura sobre barramento tipo “SERAL”;
- Tetos – Pintura sobre barramento tipo “SERAL”.

Cozinhas e Lavandarias:

- Pavimentos - Mosaico de Grês Porcelânico “Land Evolution Smooth” (Padimat) preto polido 60x60x0.8mm;
- Paredes – Mosaico Cerâmico “Land Evolution Clear” (Padimat) cinza brilho 30x60x0.8mm;
- Tetos - Pintura a tinta anti-fungos sobre barramento tipo “SERAL”.

Banhos:

- Pavimentos - Mosaico de Grês Porcelânico;
- Paredes - Mosaico Cerâmico;
- Tetos - Teto falso em gesso cartonado hidrofugado com pintura a tinta anti-fungos.

Caixa de Escadas:

- Pavimentos – Mosaico de Grês extrudido tipo “Keratec” 40x40x0.8mm;
- Paredes – Pintura sobre barramento tipo Seral;
- Tetos – Pintura sobre barramento tipo Seral;
- Guardas de Escadas - Pintura a tinta de esmalte “Cinofer Forja” sobre perfis de ferro.

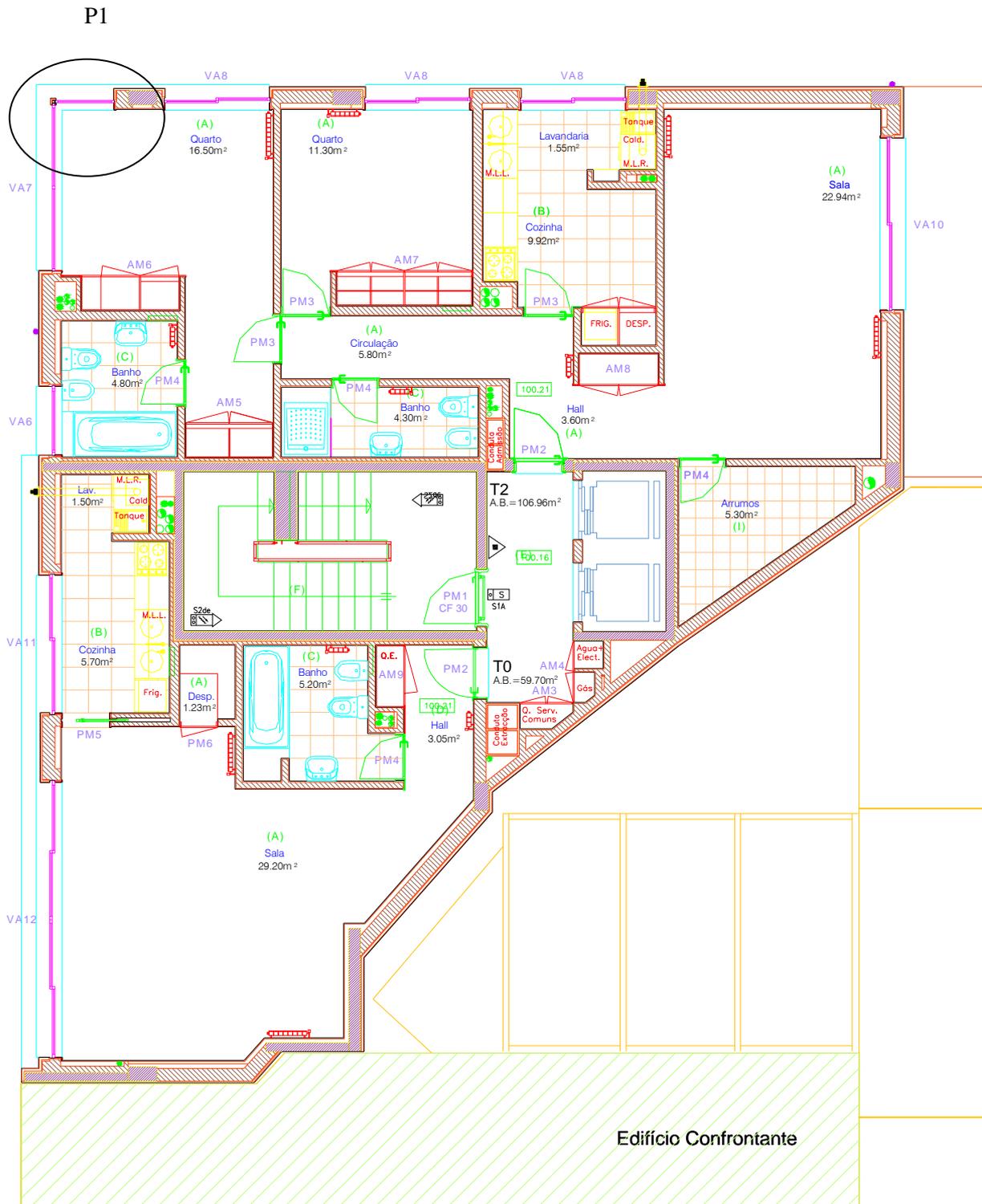


Fig. 5.2 – Edifício Santos Pousada - Planta de arquitetura (Cortesia Soares da Costa, S.A.)

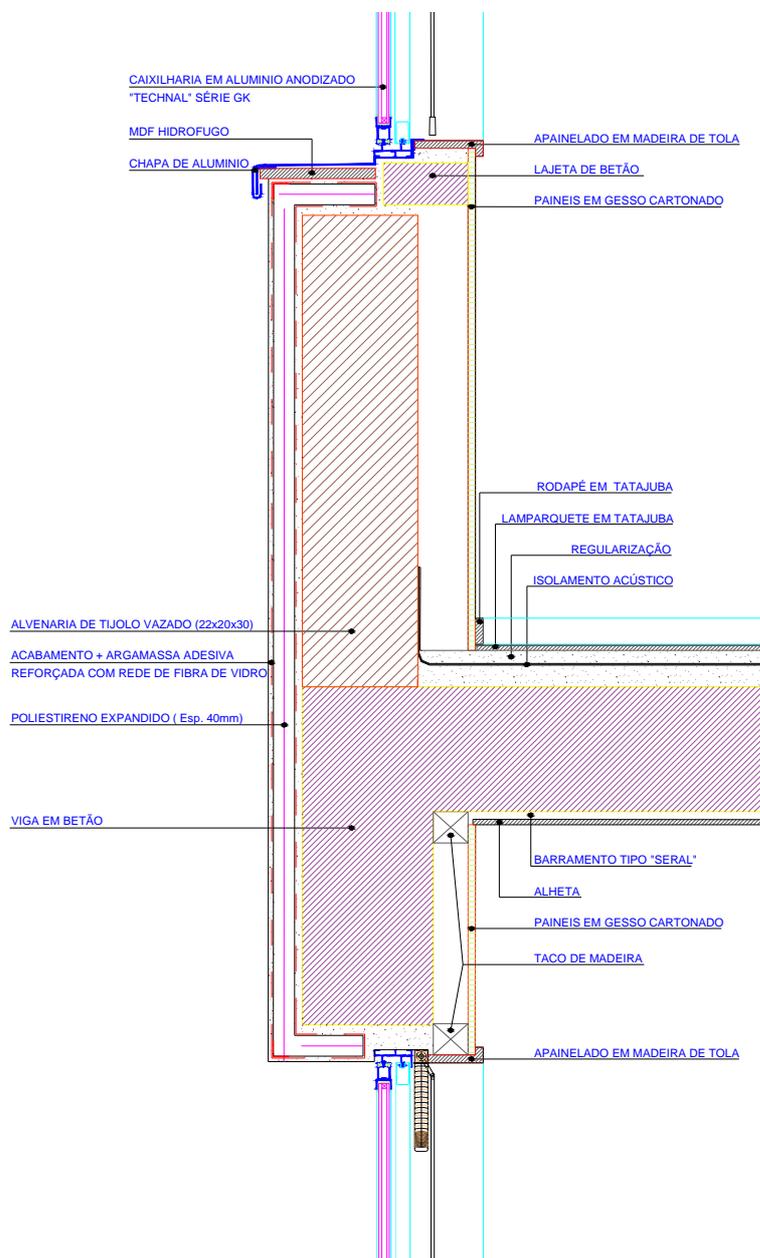


Fig. 5.3 – Pormenor (P3) da fachada (Cortesia Soares da Costa, S.A.)

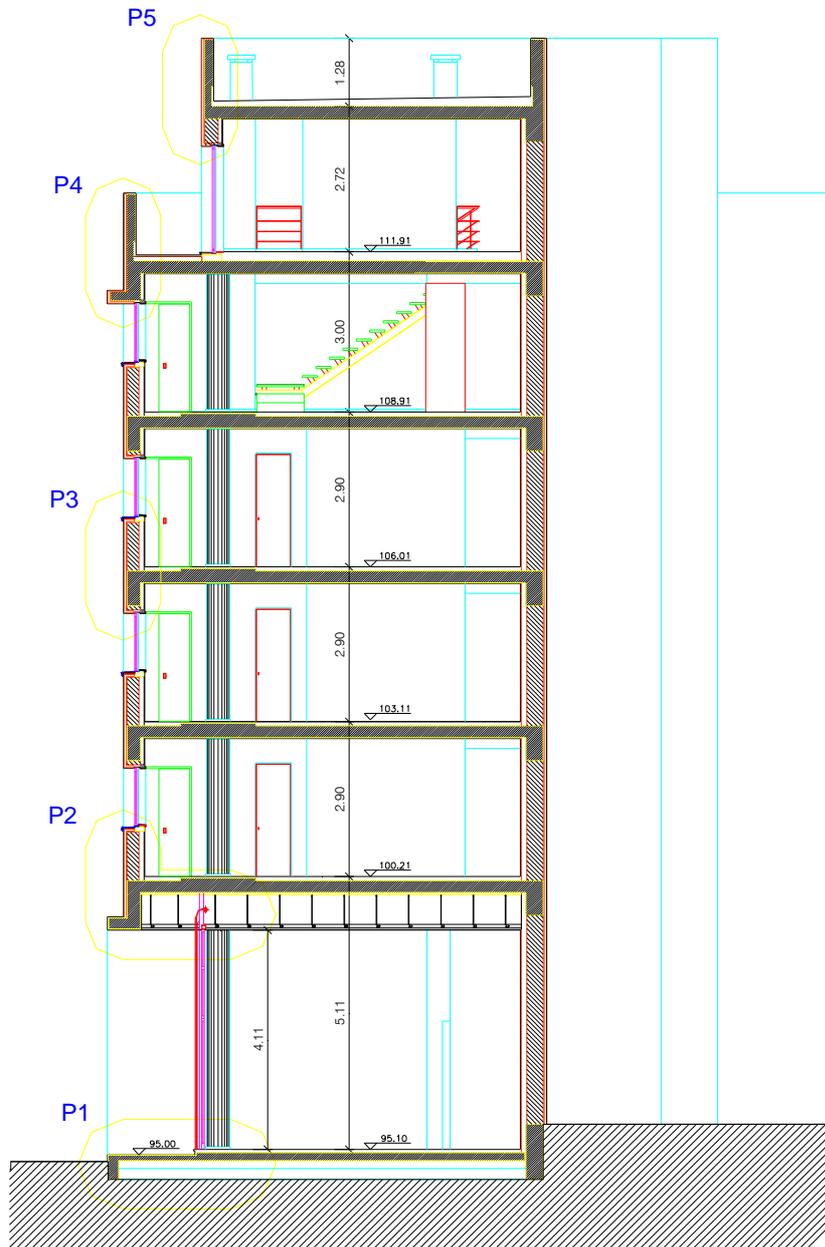


Fig. 5.4 – Corte (Cortesia Soares da Costa, S.A.)

5.3. EDIFÍCIO CLT

5.3.1. SOLUÇÃO ESTRUTURAL - FUNDAÇÕES / CAVE / RÉS-DO-CHÃO

As fundações são mantidas conforme o preconizado no projeto base, bem como a solução estrutural do piso da cave e rés-do-chão.

A opção em manter a cave e rés-do-chão, conforme o preconizado no projeto base, deve-se ao facto de a madeira apresentar alguma suscetibilidade à presença de humidade, sendo desaconselhável a sua aplicação em contacto direto com o solo.

5.3.2. MATERIAIS

Serão utilizados painéis de madeira lamelada colada cruzada, CLT, em toda a estrutura do edifício, acima do rés-do-chão. Estes painéis substituem os elementos de betão armado e alvenaria preconizados no projeto base.

O CLT a utilizar no edifício será em pinho europeu, de nome científico *Pinus sylvestris* L.. A escolha recaiu no pinho, em detrimento do abeto, face às suas características de durabilidade natural e tratabilidade [40].

5.3.3. REGULAMENTAÇÃO

As características mecânicas dos painéis não obedecem ainda a uma standardização, ao contrário do que sucede por exemplo com a madeira lamelada-colada através da definição das classes de resistência. Assim, a aposição de Marcação CE neste produto recorre, sem alternativa, aos documentos de Aprovação Técnica Europeia (ETA). Estes documentos, desenvolvidos por cada fabricante, definem todas as propriedades relevantes ao projeto e dimensionamento estrutural dos painéis.

Os painéis de CLT, a utilizar neste projeto, foram dimensionados, efetuando uma analogia/paralelismo com o edifício *Stadthaus*, dado que o âmbito deste capítulo não recai no dimensionamento estrutural efetivo do edifício, e ainda, através de ábacos disponibilizados pela empresa KLH, sendo que, todos os requisitos de qualidade e desempenho estrutural são assegurados pelo Documento de Aprovação Técnica Europeia (ETA 06-128).

Do ponto de vista estrutural, e para que seja entendível o funcionamento destes elementos, remete-se para o capítulo 3, subcapítulo 3.2.4 deste trabalho, onde é efetuada uma breve abordagem do funcionamento estrutural destes elementos, visto não ser do âmbito deste trabalho o cálculo estrutural efetivo.

5.3.4. PLANTA DE ARQUITETURA - PISO TIPO

A planta de arquitetura a seguir apresentada refere-se a um piso tipo do edifício em estudo, contemplando as paredes em CLT. Esta planta foi uma adaptação do projeto base. Para a sua execução, tomou-se como principal referência os limites do lote, a partir dos quais foram descontados os revestimentos/isolamento, obtendo-se assim os limites exteriores das paredes exteriores de CLT. Para este projeto consideraram-se três tipos de painéis de parede, cujo detalhe se apresenta no quadro 5.1.

Salienta-se, ainda, que na fachada norte do edifício (ver P1, nas plantas das figuras 5.2 e 5.5), por questões estruturais, garantia de apoio para o painel de laje PL3.1 (ver planta 5.6), optou-se pela diminuição do vão da janela. Existem ainda no edifício mais dois vãos de janela, 4 e 5, que merecem uma atenção especial, situados na fachada este e oeste do edifício, respetivamente. Optou-se por manter estes vãos pelos seguintes motivos: o vão 5 não tem função de suporte, pois o painel de laje PL3.2C não descarrega segundo aquele plano. Relativamente ao vão de janela 4, embora se tenha

optado pela sua permanência, este funciona como apoio dos painéis PL1.1. Neste caso apenas se aumentou a espessura da parede interior (para 128mm), no sentido de criar um apoio mais eficaz. Como já atrás referido o âmbito deste trabalho não contempla o dimensionamento estrutural, no entanto, as soluções adotadas, nomeadamente estes três casos, careciam de uma análise estrutural cuidada.

Uma das limitações do CLT prende-se com a dificuldade de execução de grandes vãos de envidraçados, dado tratar-se de um sistema monolítico em que as paredes também têm funções estruturais.

Quadro 5.1 – Espessura de painéis verticais [41]

Elementos	Esp. (mm)	Nº Camadas	Esp.Lamela (mm)				
			T	L	T	L	T
Paredes divisórias interiores	94	3	30	34	30		
Paredes exteriores	128	5	30	19	30	19	30
Núcleo resistente (caixas de escadas de elevadores)	(120+40+120)*	6	40	40	40		
			40	40	40		

*Parede dupla com 40mm de isolamento

Neste edifício, a separação dos apartamentos faz-se através das paredes da caixa de escadas e caixa de elevadores, pelo que não houve necessidade de preconizar uma solução de separação entre apartamentos.

A estrutura esbelta do CLT proporciona um ganho, significativo, em termos de área do edifício. De salientar que, com a solução preconizada neste estudo, conseguiu-se otimizar a área útil do piso em aproximadamente 11,5m². Valor muito significativo, mas que toma outras proporções se analisarmos o ganho de área para os cinco pisos, cerca de 57,5m².

Por outro lado, a precisão da estrutura em madeira (comparada com o equivalente em betão e alvenaria), permite trabalhar a fachada com maior precisão, uma vez que o alinhamento dos painéis não varia ao longo de todo o edifício.

5.3.5. PLANTA DE PAINÉIS HORIZONTAIS

No pré dimensionamento dos painéis horizontais foram tidas em conta as seguintes considerações:

- Possibilidade de distribuição de cargas em duas direções ortogonais, considerando a configuração dos estratos e as dimensões do painel;
- A largura de cada painel foi estudada de forma a tirar o máximo partido das dimensões *standard* dos mesmos; desta forma, evitou-se o desperdício e rentabilizou-se a encomenda em termos económicos;
- A dimensão máxima dos painéis, por limitações de transporte, está condicionada a 13,5m de comprimento;
- Vãos dos elementos envidraçados.

Relativamente às *courettes*, os painéis poderão ser encomendados já cortados ou podem ser executadas (corte no painel) no local. De qualquer forma, a sua representação consta na planta da figura 5.6, cumprindo-se a localização prevista no projeto base.

A ligação entre painéis de laje é pormenorizada mais à frente, subcapítulo 5.3.8.

Quadro 5.2 – Espessura de painéis de laje [41]

Elementos	Espessura (mm)	Nº Camadas	Esp. Lamelas (mm)				
			L	T	L	T	L
Lajes	145	5	34	21.5	34	21.5	34

Quadro 5.3 – Dimensões de painéis de laje

PAINÉIS DE LAJE			
Designação	Largura (m)	Comprimento (m)	N.º (un)
PL1.1	2.4	4,25	2
PL1.1C	2.4	Var.	1
PL2.1	2.5	6,60	1
PL2.2C	2.5	Var.	1
PL3.1	2.72	6,60	3
PL3.2C	2.72	Var.	2
PL4.1C	2.95	Var.	1
PL4.2C	2.95	Var.	1
<u>TOTAL</u>			<u>12</u>

Legenda:

PL – Painel de laje

1ª Numeração – (1, 2, 3 e 4) - Largura do painel (refere-se às quatro dimensões *standard*)

2ª Numeração - Comprimento do painel (por medida)

C – Painel cortado (por medida)

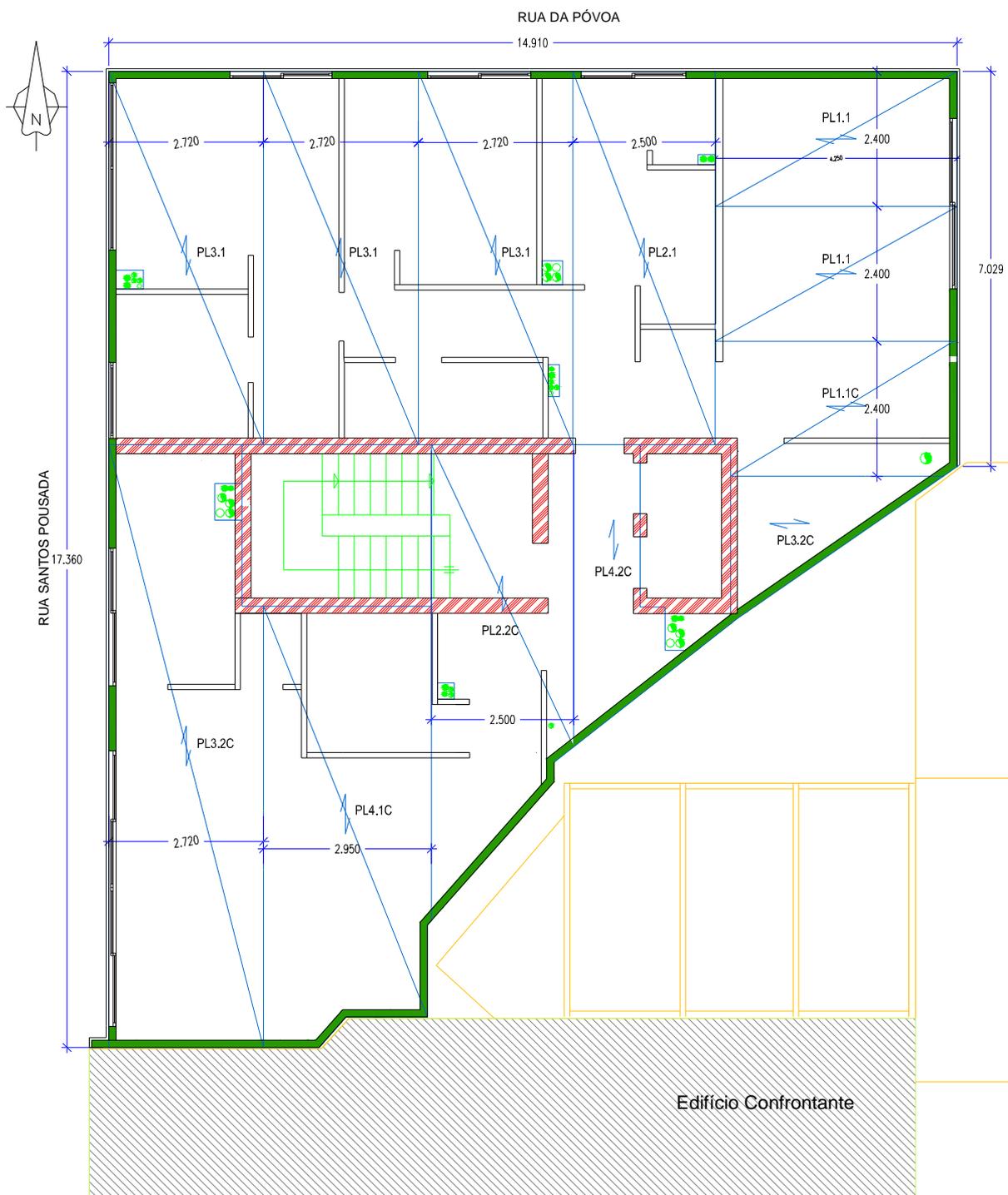


Fig. 5.6 – Planta de painéis de laje – piso-tipo

5.3.6. PLANTA DE PAINÉIS VERTICAIS E PADIEIRAS

As espessuras dos painéis verticais encontram-se detalhadas no quadro 5.1. Para o pré dimensionamento destes elementos foram tidas em conta as seguintes considerações:

- O comprimento dos painéis verticais, por limitações de transporte, está condicionado a 13,5m;
- Pé direito livre mínimo versus pé direito do edifício base;
- Aberturas nos painéis verticais onde estão preconizados vãos de janelas.

Quadro 5.4 – Dimensões de painéis verticais exteriores e núcleo

PAINÉIS VERTICAIS EXTERIORES E NÚCLEO			
Designação	Altura (m)	Comprimento (m)	Padieiras
PVe1	2,72	7,734	PDe1 /PDe2
PVe2	2,72	7,048	PDe3
PVe3	2,72	6,990	PDe4
PVe4	2,72	4,506	-
PVe5	2,72	4,327	-
PVe6	2,72	0,493	-
PVe7	2,72	3,188	-
PVe8	2,72	1,509	-
PVe9	2,72	1,601	-
PVe10	2,72	0,720	-
PVe11	2,72	3,937	-
PVe12	2,72	9,729	PDe7 /PDe8
PVe13	2,72	7,503	PDe5 /PDe6
PVi1	2,72	10,932	PDi6
PVi2	2,72	5,227	-
PVi3	2,72	2,845	-
PVi4	2,72	2,565	PDi10
PVi5	2,72	3,125	-
PVi6	2,72	1,549	-
PVi7	2,72	2,565	PDi8/PDi9

Legenda:

PVe – Painel vertical exterior
 PVi – Painel vertical interior
 PDe – Padieira exterior
 PDi – Padieira interior

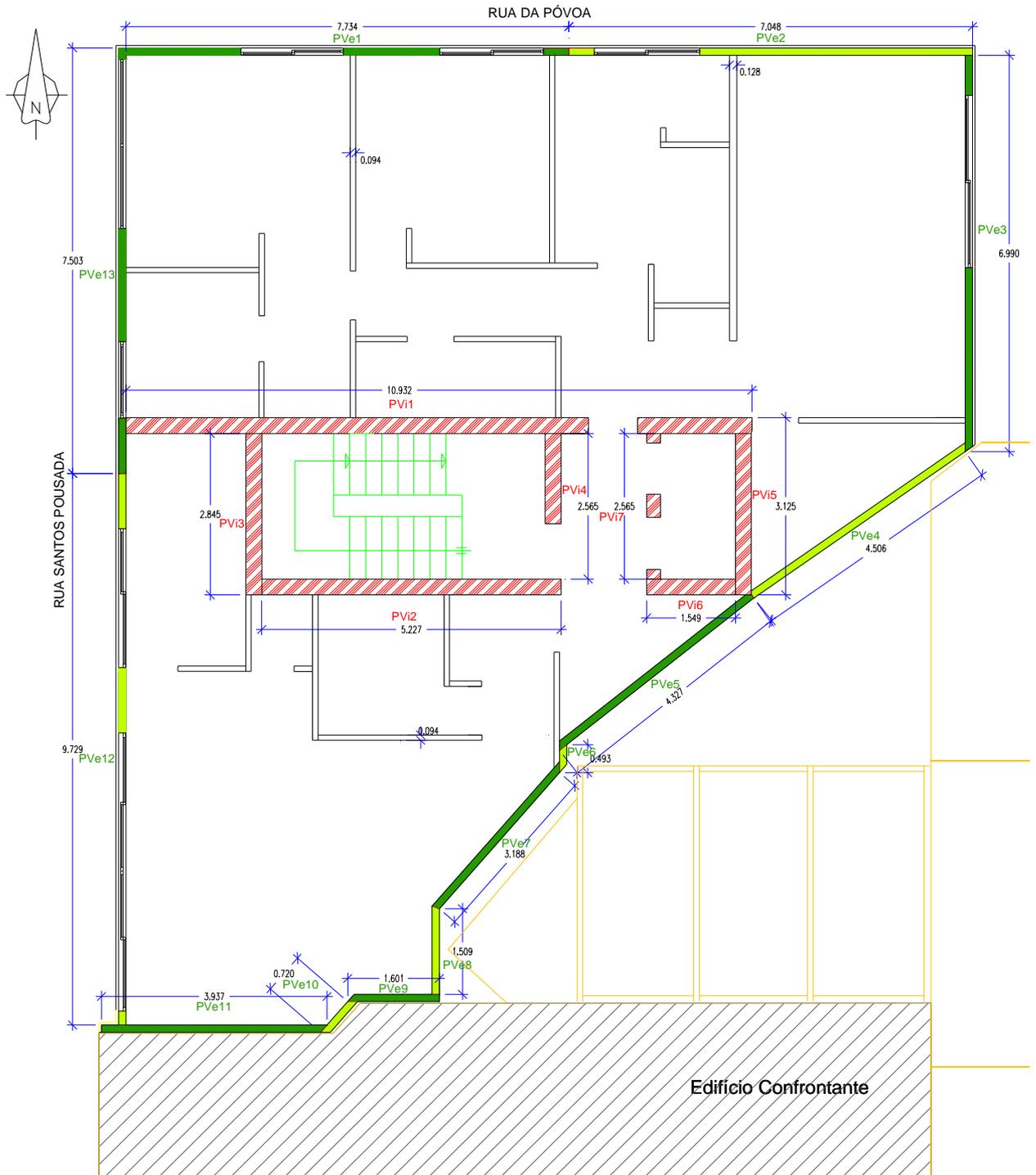


Fig. 5.7 – Planta de painéis verticais exteriores e de painéis do núcleo – piso-tipo

No que concerne ao pé direito, o edifício existente tem um pé direito livre de 2,68m. Neste caso, optou-se pela utilização de painéis verticais com uma altura de 2,72m (dimensão *standard*), proporcionando este painel, face às soluções preconizadas ao nível dos pisos e tetos, um pé direito livre de 2,582m, valor este que se enquadra dentro do mínimo regulamentar, 2,40m, (art.º65.º do

Regulamento Geral da Edificações Urbanas). Esta diminuição terá implicações na cêrcea do edifício, mas poderia ser facilmente anulada se partíssemos para o dimensionamento integral do mesmo.

Quadro 5.5 – Dimensões de painéis verticais interiores

PAINÉIS VERTICAIS INTERIORES			
Designação	Altura (m)	Comprimento (m)	Padieiras
PVi8	2,72	2,323	-
PVi9	2,72	3,250	PDi3
PVi10	2,72	6,392	PDi2
PVi11	2,72	0,609	-
PVi12	2,72	5,112	PDi1/PDi5
PVi13	2,72	3,666	-
PVi14	2,72	1,203	-
PVi15	2,72	5,037	-
PVi16	2,72	3,722	PDi7
PVi17	2,72	1,322	-
PVi18	2,72	1,350	-
PVi19	2,72	1,435	-
PVi20	2,72	3,493	PDi4
PVi21	2,72	2,092	PDi13
PVi22	2,72	1,349	-
PVi23	2,72	1,072	PDi12
PVi24	2,72	2,565	-
PVi25	2,72	1,609	-
PVi26	2,72	0,562	-
PVi27	2,72	3,048	PDi11
PVi28	2,72	2,857	-

Legenda:

PVi – Painel vertical interior

PDi – Padieira interior

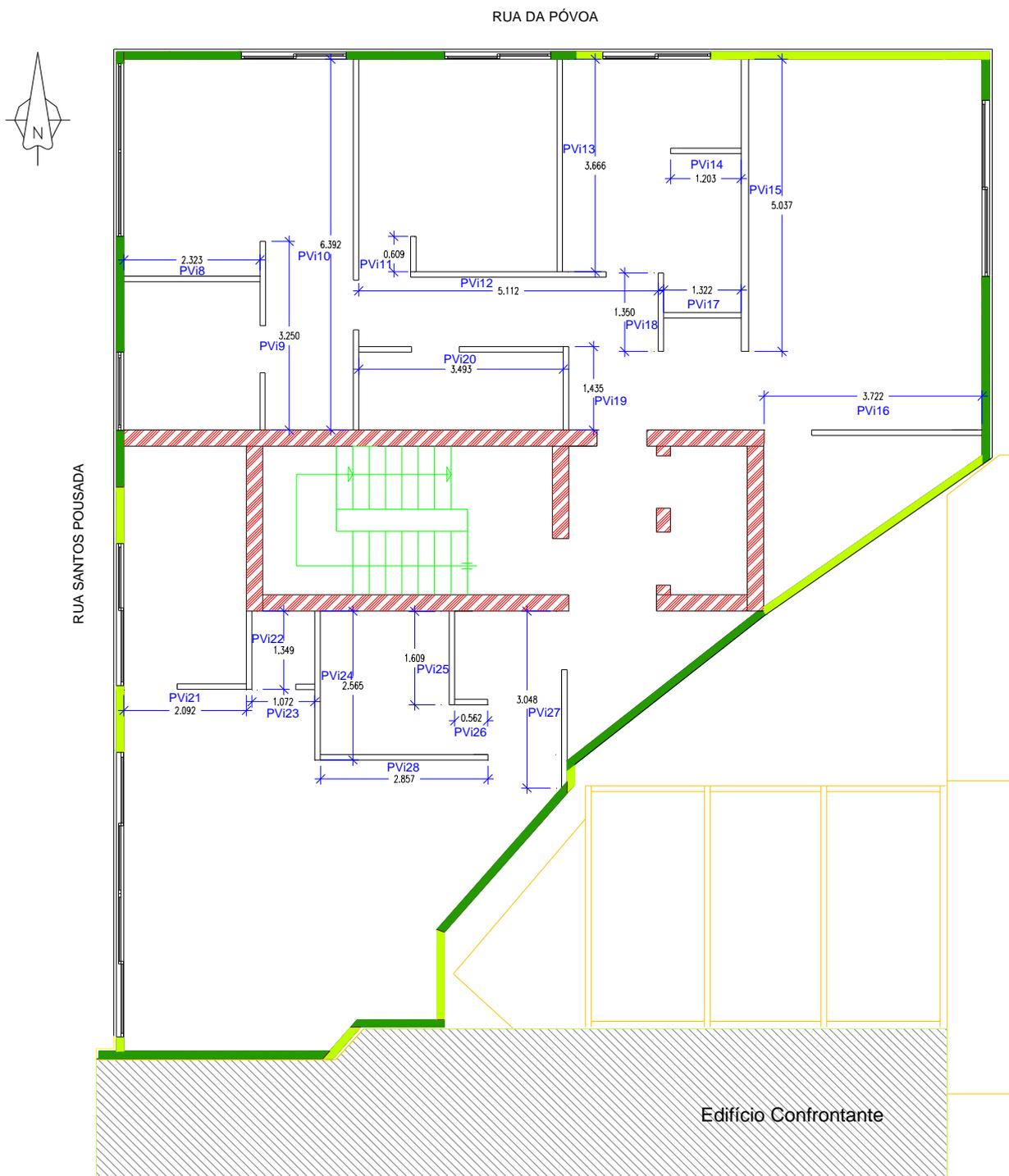


Fig. 5.8 – Planta de painéis verticais interiores – piso-tipo

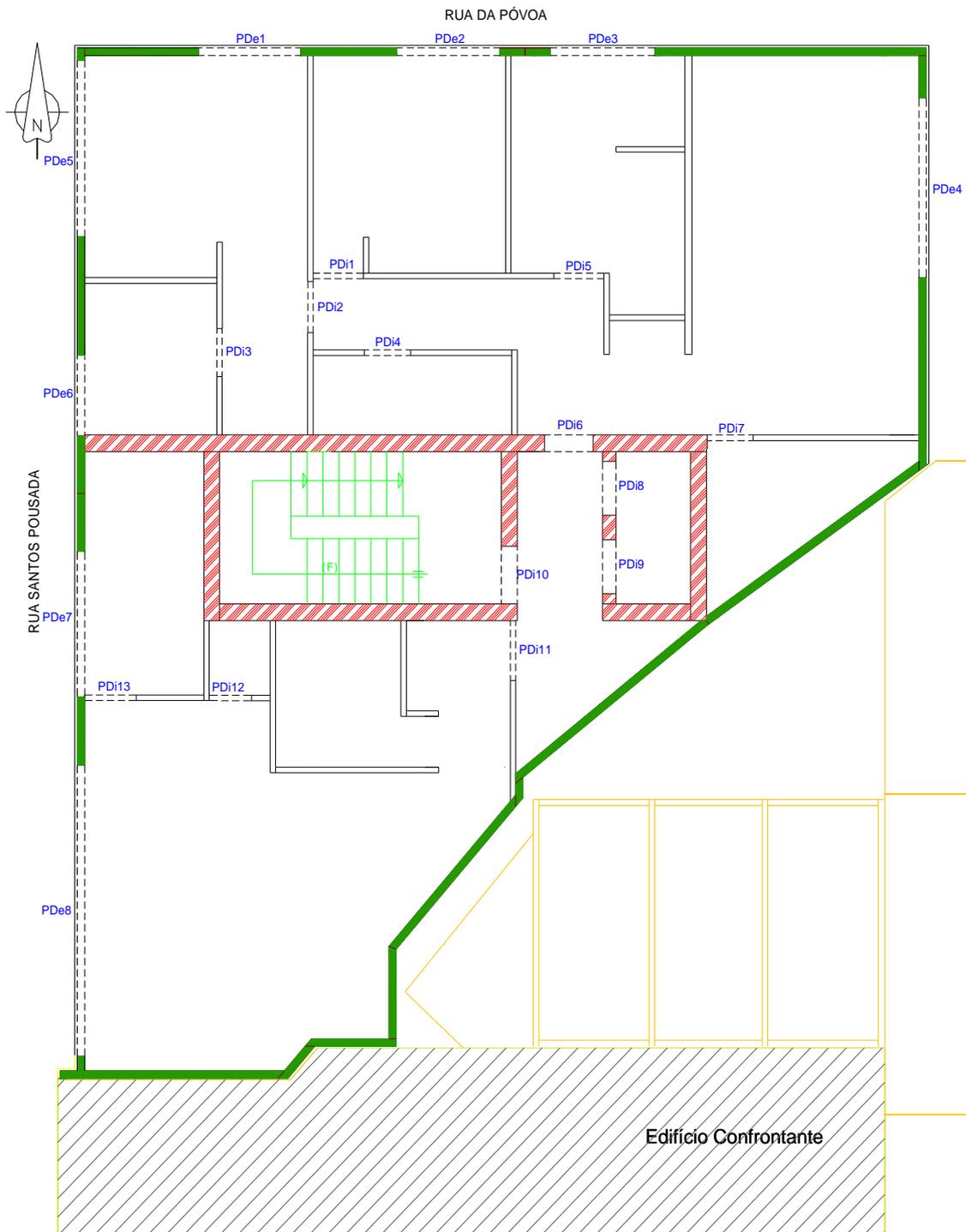
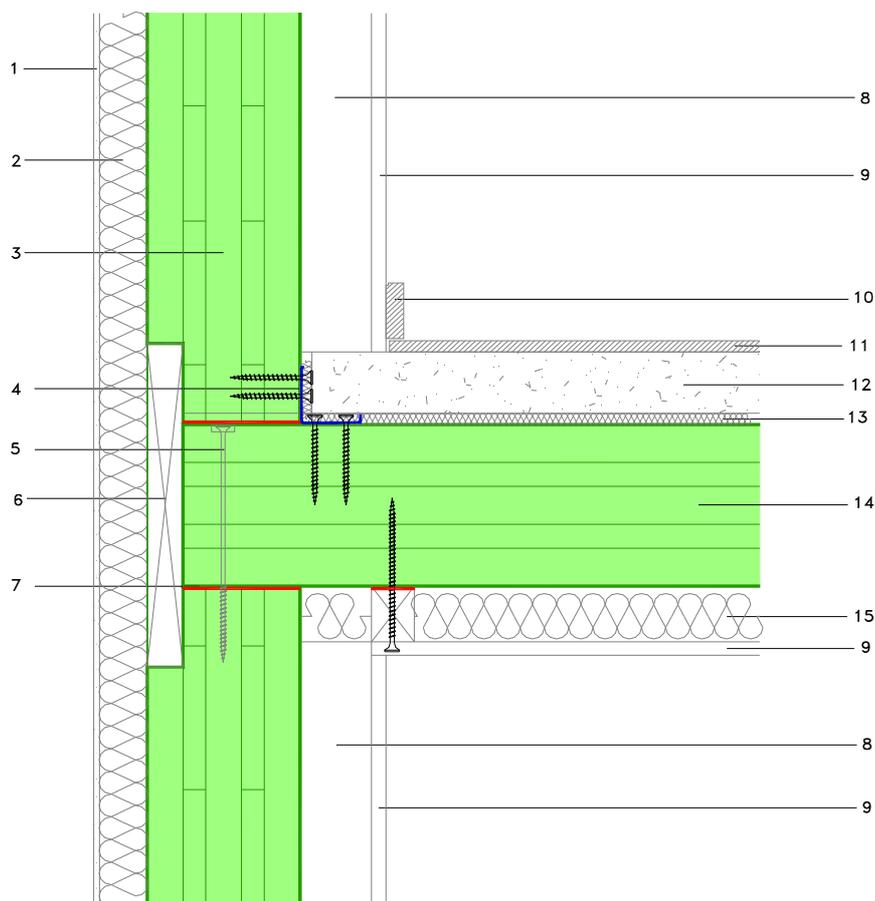


Fig. 5.9 – Planta de padieiras – piso-tipo

5.3.7. PORMENORES CONSTRUTIVOS (CORTES VERTICAIS)

Os pormenores construtivos apresentados foram estudados tendo por base o preconizado em [42].

5.3.7.1. Parede opaca exterior



Legenda:

- 1 – Acabamento + argamassa reforçada c/ fibra de vidro;
- 2 – Poliestireno expandido (esp.40mm);
- 3 – Painel de parede 128mm KLH (5 painéis);
- 4 – Fixação mecânica angular c/ parafusos mecânicos;
- 5 – Parafusos ligação vertical;
- 6 – *Plywood* (OSB ou LVL);
- 7 – Material resiliente de assentamento;
- 8 – Estrutura para gesso cartonado (30mm);

- 9 – 1 Placa de gesso cartonado (13mm);
- 10 – Rodapé em tatajuba;
- 11 – Lamparquete tatajuba;
- 12 – Betonilha de regularização (50mm);
- 13 – Isolamento acústico, tipo "Impactodan" (10mm);
- 14 - Painel de laje 145mm KLH (5 painéis);
- 15 – Isolamento acústico e térmico, tipo "Termolan" (50mm).

Fig. 5.10 – Parede opaca exterior

5.3.7.2. Parede exterior não opaca – Ligação da caixilharia

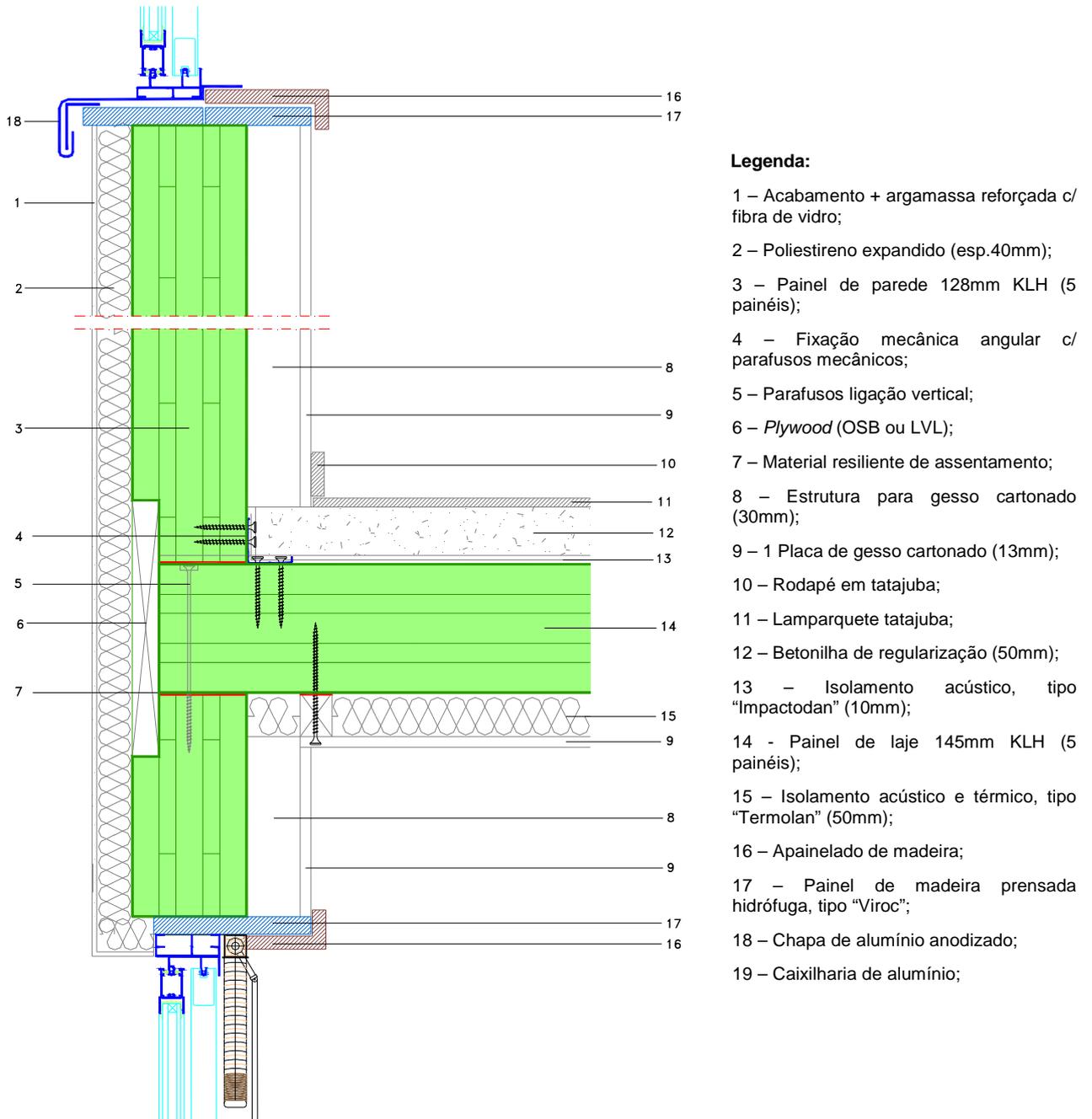
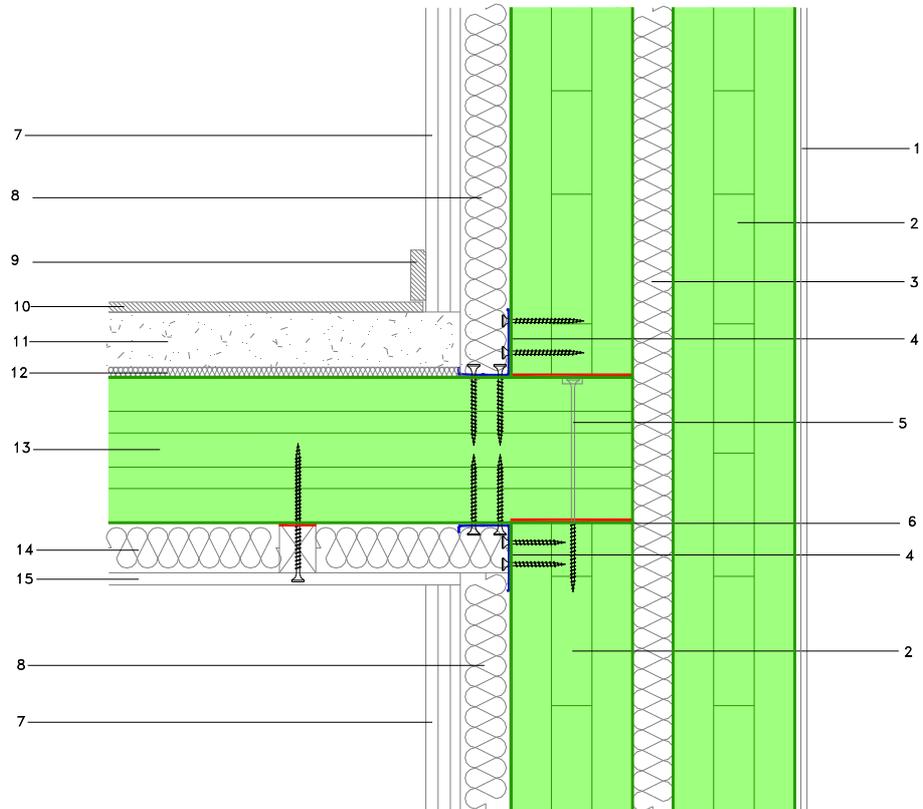


Fig. 5.11 – Parede exterior – Ligação da caixilharia

5.3.7.3. Parede da caixa de elevadores



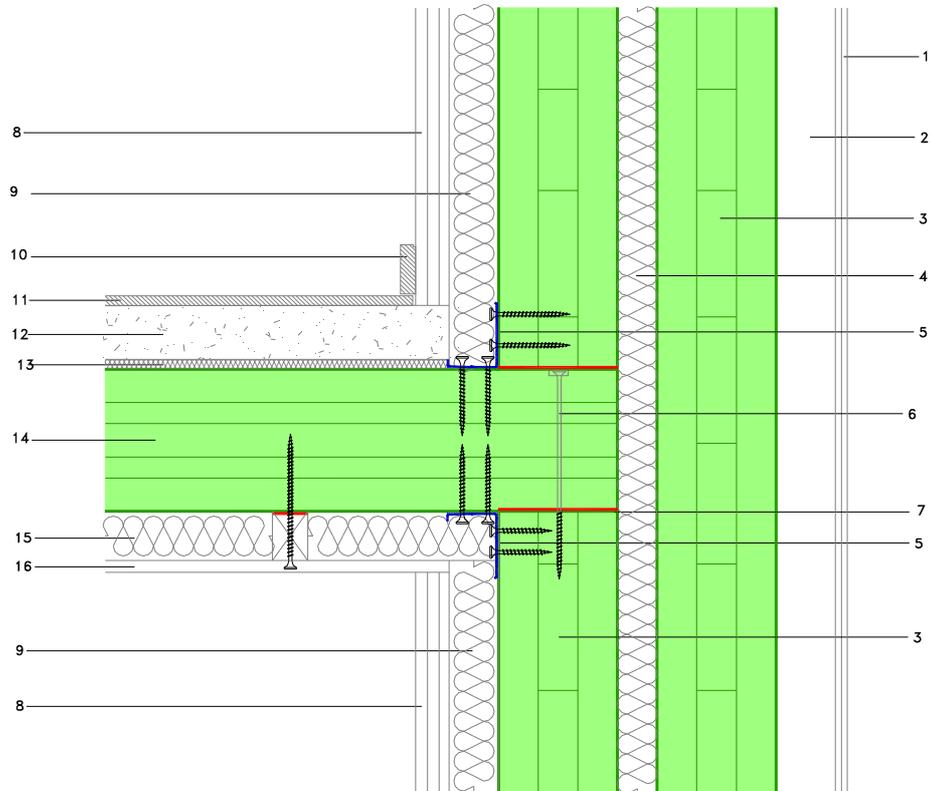
Legenda:

- 1 – 2 Placa de gesso cartonado, tipo “Pladur” CH120 2x15 FOC LR’ (30mm);
- 2 – Paineis de parede 120mm KLH (3 painéis);
- 3 – Isolamento acústico e térmico, tipo “Termolan” (40mm);
- 4 – Fixação mecânica angular c/ parafusos mecânicos;
- 5 – Parafusos ligação vertical;
- 6 – Material resiliente de assentamento;
- 7 – 2 Placas de gesso cartonado (13+13mm);

- 8 – Isolamento acústico e térmico, tipo “Termolan” (50mm);
- 9 – Rodapé em tatajuba;
- 10 – Lamparquete tatajuba;
- 11 – Betonilha de regularização (50mm);
- 12 – Isolamento acústico, tipo “Impactodan” (10mm);
- 13 - Paineis de laje 145mm KLH (5 painéis);
- 14 - Isolamento acústico e térmico, tipo “Termolan” (50mm);
- 15 – 1 Placa de gesso cartonado (13mm).

Fig. 5.12 – Parede da caixa de elevadores

5.3.7.4. Parede da caixa de escadas



Legenda:

- | | |
|---|---|
| 1 – 2 Placa de gesso cartonado, tipo “Pladur” CH120 2x15 FOC LR’ (30mm) ; | 9 – Isolamento acústico e térmico, tipo “Termolan” (50mm); |
| 2 - Estrutura para gesso cartonado (30mm); | 10 – Rodapé em tatajuba; |
| 3 – Paineis de parede 120mm KLH (3 painéis); | 11 – Lamparquete tatajuba; |
| 4 – Isolamento acústico e térmico, tipo “Termolan” (40mm); | 12 – Betonilha de regularização (50mm); |
| 5 – Fixação mecânica angular c/ parafusos mecânicos; | 13 – Isolamento acústico, tipo “Impactodan” (10mm); |
| 6 – Parafusos ligação vertical; | 14 - Paineis de laje 145mm KLH (5 painéis); |
| 7 – Material resiliente de assentamento; | 15 - Isolamento acústico e térmico, tipo “Termolan” (50mm); |
| 8 – 2 Placas de gesso cartonado (13+13mm); | 16 – 1 Placa de gesso cartonado (13mm). |

Fig. 5.13 – Parede da caixa de escadas

Neste caso, contrariamente ao preconizado na parede da caixa de elevadores, optou-se pela colocação de estrutura de suporte para gesso cartonado, no sentido de introdução de uma caixa-de-ar, para passagem de redes de infraestruturas, elétricas, etc.

5.3.8. PORMENOR DE LIGAÇÃO DAS LAJES

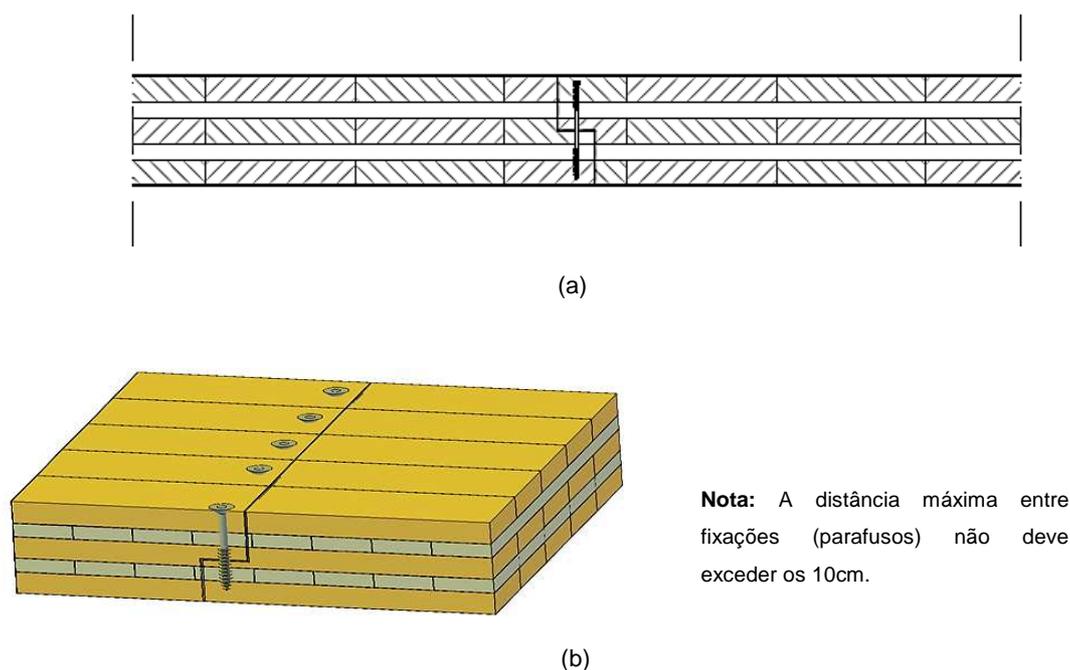


Fig. 5.14 – Pormenor de ligação das lajes; (a) corte, (b) perspectiva

5.3.9. REFLEXÕES SOBRE O DESEMPENHO

5.3.9.1. Comportamento térmico

As características de condutibilidade térmica dos painéis ($0,13 \text{ W/m}^2\text{C}$) apresentam valores ímpares de entre os materiais de construção com capacidade estrutural.

Um painel simples com 95 mm de espessura, sem isolamento e funcionando como parede, possui um coeficiente de transmissão térmica de $1,11 \text{ W/m}^2\text{C}$, satisfazendo o desempenho mínimo requerido pelo RCCTE (Decreto-Lei n.º 80/2006 de 04/04). Situação semelhante ocorre para um painel de 128mm sem isolamento e a funcionar como cobertura, em que o coeficiente de transmissão térmica ascendente é de $0,84 \text{ W/m}^2\text{C}$, cumprindo os requisitos mínimos do RCCTE.

Desta forma, a natural colocação de revestimentos e de materiais de isolamento proporciona uma solução com características melhoradas, atingindo-se facilmente excelentes coeficientes de transmissão térmica, cumprindo com espessuras finais reduzidas de parede e cobertura, os coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência indicados no RCCTE.

O bom desempenho na estação fria assenta ainda na ausência de pontes térmicas planas associadas ao sistema construtivo, e de reduzidas pontes térmicas lineares. A construção com painéis de CLT comparativamente com a construção tradicional (estrutura de betão e paredes exteriores em alvenaria) apresenta valores de pontes térmicas lineares muito menores, tanto para a situação em que as paredes são isoladas pelo exterior, como para as situações em que o isolamento é aplicado pelo interior [43].

Relativamente à parede opaca exterior e laje de piso, foi efetuado o cálculo para os coeficientes de transmissão térmica superficiais (U), tendo por base as soluções estruturais e de revestimentos preconizadas para os referidos elementos. Os valores alcançados encontram-se nos quadros seguintes.

Quadro 5.6 – Coeficiente de transmissão térmica – parede opaca exterior

Constituição do Elemento (Parede Opaca Exterior)	Massa Vol. (Kg/m ³)	Massa Superficial (Kg/m ²)	e (m)	λ (W/m.°C)	R (m ² /W.°C)
Argamassa	2000	40	0,02	1,8	0,011
Isolamento Térmico EPS	20	0,8	0,04	0,04	1,000
Painel de parede 128mm KLH (5 painéis)	520	66,56	0,128	0,13	0,985
Estrutura para gesso cartonado (30mm)			0,03		0,180
1 Placa de gesso cartonado (13mm)	750	9,75	0,013	0,25	0,052
R si					0,13
R se					0,04
R se+∑Rj+R si					2,40
esp. = 0,23 m			U (W/m²°C) =		0,42

Constata-se que o desempenho térmico da parede opaca exterior é excelente. O valor alcançado, de **0,42 W/m²°C**, para o coeficiente de transmissão térmica superficial, encontra-se muito abaixo do máximo admissível regulamentarmente, que para este caso é de **1,60 W/m²°C** (RCCTE, anexo IX, quadro IX.1, zona climática I2, elementos exteriores, zonas opacas verticais).

Quadro 5.7 – Coeficiente de transmissão térmica – laje entre pisos

Constituição (Laje entre pisos)	Massa Vol. (Kg/m ³)	Massa Superficial (Kg/m ²)	e (m)	λ (W/m.°C)	R (m ² /W.°C)	
Revestimento do Piso	1000	10	0,01	0,2	0,050	
Lajeta Flutuante (betonilha)	2300	115	0,05	1,3	0,038	
Painel de laje 145mm KLH (5 painéis)	520	75,4	0,145	0,13	1,115	
Isolamento acústico, tipo Impactodan (10mm)	25	0,25	0,01	0,04	0,250	
Isolamento acústico e térmico, tipo Termolan (50mm)	55	2,75	0,05	0,035	1,429	
1 Placa de gesso cartonado (13mm)	750	9,75	0,013	0,25	0,052	
					Asc	Desc
R si					0,10	0,17
R si					0,10	0,17
R se+∑Rj+R si					3,13	3,27
esp. = 0,278 m			U'lna (W/m²°C) =		0,32	0,31

A legislação não tem requisitos que obriguem à verificação do coeficiente de transmissão térmica entre elementos interiores em zona corrente (entre apartamentos), pois está implícito que os ambientes são aquecidos. No entanto, os valores dos coeficientes de transmissão térmica apresentados no quadro supra, podem ser analisados, por exemplo, para a laje de piso do primeiro andar, pois o rés-do-chão é uma área comercial. Aqui o regulamento define como coeficiente de transmissão térmica superficial máxima **1,30 W/m²°C** (RCCTE, anexo IX, quadro IX.1, zona climática I2, elementos interiores, zonas opacas horizontais). Constata-se, novamente, que o desempenho térmico da zona interior opaca horizontal, cumpre largamente o exigido.

5.3.9.2. Comportamento acústico

Em termos acústicos, um painel de CLT com 94mm, sem revestimento, apresenta um isolamento aos sons aéreos de 33dB [44]. Este valor pode facilmente ser melhorado pela fixação direta de placas em

gesso cartonado no painel, sendo que o revestimento de uma ou das duas faces implica um acréscimo de 5dB ou 7dB, respetivamente.

À luz do Decreto-Lei n.º 96/2008 de 09/06, o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m, nT,w}$, entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos deve ser ≥ 33 dB.

Em zonas onde se exige um isolamento acústico aos sons aéreos elevado, tais como em paredes de separação de fogos habitacionais ou em separação destes de zonas de circulação comum, o tratamento acústico pode efetuar-se pela adição de mantas de lã de rocha e placas de gesso cartonado, com ou sem caixa-de-ar, podendo-se alcançar valores de isolamento aos sons aéreos superiores a 55dB, cumprindo-se desta forma o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, (entre locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores), que deve ser ≥ 40 dB.

Relativamente aos sons de precursão, um painel de 128mm apresenta um valor base de índice de isolamento aos sons de precursão ($L_{n,w}$) de 80dB [41]. Dado que este valor é superior aos valores correntes regulamentares, da ordem dos 60dB (Decreto-Lei n.º 09/2007 de 17/01 e Decreto-Lei n.º 96/2008 de 09/06), há que efetuar correções acústicas. Estas efetuam-se, tal como preconizado no presente projeto, através da execução de lajetas flutuantes pela face superior, bem como com a introdução de revestimentos acústicos. De referir que o revestimento acústico preconizado proporciona uma redução de transmissão do ruído de impacto em 19dB.

De referir que a análise acima efetuada é meramente expedita, indicando no entanto para o cumprimento dos valores mínimos exigidos regulamentarmente. Estas soluções carecem de estudo acústico específico, de forma a verificar a conformidade das soluções adotadas.

5.3.9.3. Comportamento face à ação do fogo

De acordo com a decisão da Comissão Europeia, 2003/43/EC, os painéis de CLT possuem a classificação de **D-s2 d0** no caso de paredes e tetos ou **DFL-s1** no caso particular de utilização como acabamento visível nos pisos.

À luz da regulamentação portuguesa (Decreto-Lei n.º 220/2008 de 12/11 e Portaria n.º 1532/2008 de 29/12), os painéis de CLT podem ser aplicados, sem qualquer tipo de proteção, em Locais de Risco A, independentemente da Utilização-Tipo considerada, ou nos espaços interiores de cada fogo. Note-se que todos os locais de um edifício, com exceção dos espaços interiores de cada fogo e das vias horizontais e verticais de evacuação, são classificados de acordo com a natureza do risco. Por local de Risco A considera-se um local que não apresenta riscos especiais no qual se verifiquem simultaneamente as seguintes condições:

- O efetivo total não exceda 100 pessoas (efetivo – número máximo estimado de pessoas que pode ocupar em simultâneo um dado espaço de um edifício);
- O efetivo de público não exceda 50 pessoas;
- Mais de 90% dos ocupantes não se encontrem limitados na mobilidade ou nas capacidades de perceção e reação a um alarme;
- As atividades nele exercidas ou os produtos, materiais e equipamentos que contém, não envolvam riscos agravados de incêndio.

Neste caso, face ao exposto e acrescendo o facto de que a estrutura de madeira é totalmente revestida, o edifício não apresenta quaisquer problemas face à ação do fogo.

No que concerne à envolvente de circulação vertical, caixa de escadas e caixa de elevadores, foram preconizadas, para isolamento e proteção das paredes e tetos, placas de gesso cartonado com uma

classe de resistência ao fogo EI – 120. Este valor cumpre o mínimo exigido regulamentarmente, (Decreto-Lei n.º 220/2008 de 12/11 e Portaria n.º 1532/2008 de 29/12, art.º.28º alínea b).

Relativamente ao revestimento da escada mantém-se o previsto no projeto original, Mosaico de Grés extrudido tipo “Keratec” 40x40x0.8mm.

5.3.10 BREVES CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a pormenorização do piso tipo do edifício Santos Pousada é possível evidenciar algumas das mais-valias deste sistema construtivo, bem como alguns dos seus *handicaps*.

Mais-valias:

- Processo construtivo versátil; adapta-se com facilidade a diversos tipos de arquitetura;
- Permite ganhos em termos de área útil (ganho verificado no piso de 11,5m²);
- Prazo para montagem da estrutura em CLT estimado em 5 semanas, como apoio de mão-de-obra especializada (4 homens); de referir que a estrutura do edifício Santos Pousada (betão armado e alvenaria) foi construído em aproximadamente 22 semanas;
- Necessidade de uma área reduzida de estaleiro, aspeto fundamental tendo em conta o ambiente urbano em que o edifício se insere;
- Necessidade de uma auto-grua apenas;
- Obra limpa, diminuição de resíduos de demolição e construção e consequentemente menor impacto ambiental;
- Elevado rigor na encomenda dos painéis, de modo a tirar o máximo partido da standardização e, deste modo, rentabilizar economicamente o projeto; este rigor exige técnicos e preparadores com experiência neste tipo de construção; quanto menor a margem de erro admitida, menor o risco envolvido no projeto e consequentemente menores custos;
- Eficácia em termos de desempenho térmico, acústico e ação do fogo.

Handicaps:

- O CLT, enquanto sistema construtivo modular, requer projetos de arquitetura e consequentemente de especialidades com baixas tolerâncias ao nível do fabrico e montagem, não sendo admitidas alterações de fundo e/ou variadas ao projeto, uma vez que todos os elementos construtivos são previamente preparados e cortados em fábrica (sistema CNC);
- Uma outra limitação do CLT prende-se com a dificuldade de execução de grandes vãos de envidraçados, dado tratar-se de um sistema monolítico em que as paredes também têm funções estruturais.

6

O FUTURO DAS HABITAÇÕES DE MADEIRA – O PAPEL DO CLT

6.1. OBJETO

Ao longo dos últimos anos, o setor da construção tem procurado desenvolver e apresentar soluções construtivas para uma habitação de custos mais reduzidos, utilizando tecnologias construtivas pré fabricadas e de reduzido impacto ambiental, não descurando os aspetos funcionais. Neste contexto, a madeira surge como o material que possibilita conjugar todos esses fatores. Séculos de experiência no uso da madeira na construção foram permitindo aferir e reconhecer os métodos mais seguros de construção, as dificuldades nas ligações, assim como as suas limitações.

A grande evolução verificou-se nas técnicas de produção, no melhoramento relativamente à sua durabilidade e, essencialmente, no potencial arquitetónico que este material e seus derivados oferece. A madeira é hoje um material de elevado potencial renovado na área da construção.

Neste capítulo pretende-se abordar as tendências futuras das habitações de madeira, num contexto mundial, fazendo um paralelismo entre as políticas ambientais mundiais para o setor da construção, fruto do aquecimento global e crescimento urbano, e a necessidade premente de construir em madeira. Uma abordagem relativamente às suas mais-valias e *handicaps* é também efetuada.

6.2. AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O CRESCIMENTO URBANO

6.2.1. AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Ao longo do último século as *skylines* urbanas, ao redor do mundo, foram moldadas por arranha-céus construídos em betão e aço. No final de 1880, e logo após a virada do século, a evolução do betão armado - barato, forte, durável, à prova de som, quase à prova de fogo e possuindo uma elevada inércia térmica - tornou-o no material de construção perfeito para estruturas urbanas de alta densidade. Os profissionais de arquitetura e engenharia têm explorado o potencial do betão e aço extensivamente e têm desenvolvido literatura que nos levam à compreensão considerável do seu desempenho em uma variedade de ambientes, como zonas de elevada perigosidade sísmica e elevadas ações dos ventos. No que concerne à proteção destas estruturas face à ação do fogo, também se desenvolveu no século passado considerável literatura de compreensão. Estes materiais têm permitido a construção de edifícios de elevadas alturas, cuja construção se disseminou em redor do mundo.

Hoje temos um novo paradigma que põe em causa estes dois incumbentes materiais, e pergunta-se: existem outras alternativas com menor impacto sobre a mudança climática?

A indústria da construção é responsável pela emissão de um terço do total das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera. De acordo com os números da *Wood For Good*, a quantidade de energia necessária para produzir uma tonelada de tijolos é quatro vezes superior à despendida para produzir uma tonelada de painéis de madeira, o betão é 5 vezes, o vidro, 6 vezes, o aço 24 e o alumínio 126.

A partir de 2006, cerca de 7,5 mil milhões de metros cúbicos de betão são fabricados por ano, mais de 1 metro cúbico por pessoa [45]. Hoje, a indústria do cimento é uma das principais produtoras de dióxido de carbono.

A utilização de madeira em vez de outros materiais economiza, em média, 0,8 toneladas de CO₂ por metro cúbico, ou seja, uma construção feita de madeira pode alcançar uma pegada de carbono negativa, possuindo a menor energia incorporada, comparada com qualquer outro material de construção tradicional.

A necessidade premente de diminuição das emissões de dióxido de carbono no planeta está na base das recentes políticas ambientais ao nível mundial.

A madeira, como material da natureza, reciclável, renovável e capaz de armazenar dióxido de carbono, poderá, certamente ser o fator chave no combate às emissões nocivas ao meio ambiente. De salientar que o uso da madeira, como principal material, na construção constituirá um reservatório de dióxido de carbono, que só será devolvido ao ambiente no momento da combustão ou decomposição da madeira.

6.2.2. O CRESCIMENTO URBANO

Paralelamente, de acordo com os dados da ONU-Habitat, atualmente 50% da população do mundo vive em ambiente urbano e estima-se que atinja os 70% em 2050 [46].

Por outro lado, segundo a ONU-Habitat, 1.000 milhões de pessoas vive em favelas, um número que a agência diz que está a caminho de chegar aos 3.000 milhões em 2050. Para resolver esta questão, a ONU anunciou, na Declaração do Milénio, a sua intenção de abrigar 100 milhões de habitantes de bairros degradados até 2020. Enquanto isso, na China, onde mais de um terço dos moradores da cidade vive em favelas, o governo iniciou um plano para construir 36 milhões de unidades habitacionais a preços acessíveis até 2015 – projetos que serão provavelmente construídos em betão [47].

A necessidade de construção de habitação em grande escala nos grandes centros urbanos, para fazer face ao crescimento populacional, vai contribuir, sem dúvida, para as alterações climáticas do planeta. Esta tendência pode ser anulada e/ou minimizada com a implementação de políticas que visem uma mudança estrutural sistémica na construção urbana de alta densidade, que passa pela utilização da madeira como principal material na construção.

6.3. CONSTRUÇÃO EM CLT

O CLT surge como a próxima geração de materiais de madeira. Os sistemas construtivos em madeira que apostam em novas abordagens estruturais têm vindo a mostrar largas vantagens em comparação com os sistemas leves. É neste contexto que estudos e projetos recentes usam o CLT na procura de novas soluções estruturais para a construção em altura.

6.3.1. PRINCIPAIS BARREIRAS

Apesar de todos os aspetos positivos que motivam a implementação da construção de madeira em altura, existem importantes barreiras a ultrapassar. Uma das mais importantes dificuldades está relacionada com a desconfiança da sociedade civil no que respeita à eficiência da madeira enquanto material de construção. É necessário combater o preconceito erróneo que a estrutura de madeira tem uma resistência ao fogo inferior à estrutura de aço, presente na maioria dos edifícios em altura. Importa salientar que, nos casos dos países da Europa do Sul, é a falta de cultura de construir em madeira, a principal razão para a escassez de técnicos especializados que, conseqüentemente, está na origem de certas limitações legais presentes nos códigos de construção [18]. A figura 6.1 representa a atitude dos vários intervenientes no mercado de construção face ao uso da madeira na construção, provando a falta de sensibilização e formação para esta temática [48].

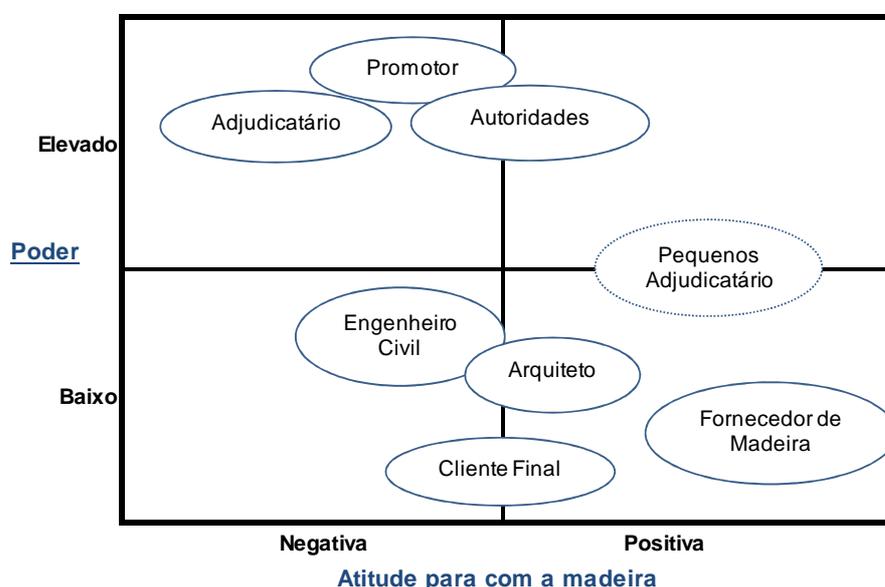


Fig. 6.1 – Relação entre o poder de seleção dos materiais e a atitude perante a madeira dos vários intervenientes no setor da construção [48]

6.3.2. PRINCIPAIS VANTAGENS

O CLT é um material que conjuga, além das vantagens do ponto de vista ambiental, vantagens relacionadas com o processo de construção do edifício e relacionadas com a própria conceção do projeto. De seguida, elencam-se algumas das vantagens associadas à construção de edifícios com este material.

- A pegada de carbono de um edifício construído em CLT pode alcançar uma pegada de carbono negativa;
- Estimulam o plantio de mais árvores e o aumento da área florestal;
- Reduzido tempo de construção, que se traduz num conseqüente aumento da segurança em obra e conseqüente redução de custos;
- A produção dos elementos em fábrica, permitida pelo reduzido peso dos materiais, torna o processo de construção simples, rápido e silencioso, sendo possível construir o edifício com o

apoio de apenas uma grua, um plano de montagem e mão-de-obra especializada em carpintaria;

- A pré-fabricação é controlada por controlo numérico (CNC), sendo possível rasgar os elementos rigorosamente, conforme as indicações do projeto;
- Redução de resíduos em obra;
- Permite elevada versatilidade ao projetista; este material pode materializar diferentes tipos de elementos estruturais, pode aplicar-se a edifícios com diferentes formas, pode atingir vãos de laje consideravelmente longos sem o auxílio de elementos estruturais de suporte;
- Adapta-se a sistemas híbridos, podendo trabalhar em conjunto com outros materiais;
- Relativamente ao comportamento estrutural, a construção maciça, constituída por painéis de grande dimensão, possui um comportamento monolítico, semelhante às estruturas de alvenaria e betão armado;
- Este sistema, baseado na distribuição de paredes resistentes responsáveis pela distribuição das cargas através de superfícies lineares contínuas, resulta numa menor concentração de esforços nos seus componentes estruturais e num conjunto estrutural com maior rigidez;
- A *performance* térmica também representa uma mais valia: a baixa condutividade térmica da madeira assegura a redução das pontes térmicas e assegura um grau de massa térmica capaz de reduzir os gastos de energia de aquecimento/arrefecimento;

6.3.2.1. Comportamento sísmico – Estudos experimentais

Um destaque deve ser dado ao comportamento dos edifícios de CLT quando sujeitos a ações sísmicas. Alguns estudos experimentais têm sido feitos, os quais têm provado que este tipo de edifícios têm uma *performance* muito satisfatória.

A experiência de projetar estruturas de madeira para os sismos, nomeadamente em altura, é moderada. Um estudo recente foi efetuado para os sismos da Cantuária na Nova Zelândia. A avaliação do desempenho de 112 igrejas afetadas e construídas essencialmente nos últimos 150 anos, ver figura 6.2, indica claramente a maior vulnerabilidade das construções em alvenaria (cerca de 85% danificadas), quando comparadas com as construídas em madeira (cerca de 5% danificadas).

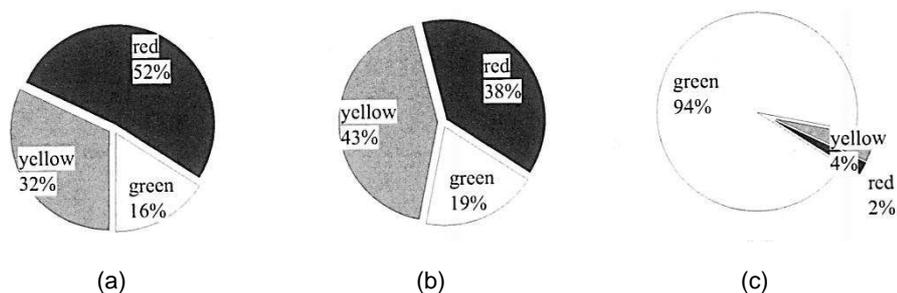


Fig. 6.2 – Indicações dos placards colocados na Nova Zelândia para a série de sismos 2010-2011 (vermelho: edifício inseguro com acesso proibido; amarelo: segurança comprometida com acesso urgente permitido; verde: sem restrições) : (a) Igrejas de pedra; (b) Igrejas de alvenaria de tijolo; (c) Igrejas de madeira [49]

Também recentemente, no âmbito do Programa Capacidades do 7º Programa da Comissão Europeia, numa parceria de 23 atores relevantes na engenharia sísmica, foram efetuadas ensaios na mesa sísmica triaxial do LNEC. Os equipamentos disponibilizados incluem as quatro maiores mesas sísmicas na

União Europeia, a maior parede de reação e instalação e duas centrifugadoras conceituadas. O objetivo do projeto “Casas de Madeira” é avaliar o seu desempenho sísmico, considerando três soluções distintas: (i) sistema porticado com contraplacado, *Platform frame system*; ii) sistema de troncos de madeira maciça, *log house system*; iii) sistema de painéis maciços de madeira, *CLT*. O projeto envolve diretamente a indústria produtora destes sistemas, empresas especialistas na construção em madeira e três universidades europeias (Universidade de Trento, Itália, Universidade Técnica de Graz, Áustria e Universidade do Minho, Portugal). O objetivo da presente campanha de ensaios é verificar, utilizando ensaios à escala real, os efeitos de um sismo em diferentes casas de madeira projetadas e construídas de acordo com as regras atuais da engenharia das madeiras. Os resultados permitirão ainda validar os modelos de cálculo existentes, definir coeficientes de comportamento adequados e definir regras construtivas adequadas no que respeita a ligadores, prumos, elementos de contraventamento, aberturas, deslocamentos entre pisos, entre outros aspetos relevantes para o desempenho sísmico. A campanha de ensaios foi realizada na mesa sísmica triaxial do LNEC, figura 6.3, durante os anos de 2012 e 2013, incluindo o ensaio de quatro edifícios de 2 e 3 pisos à escala real [49].

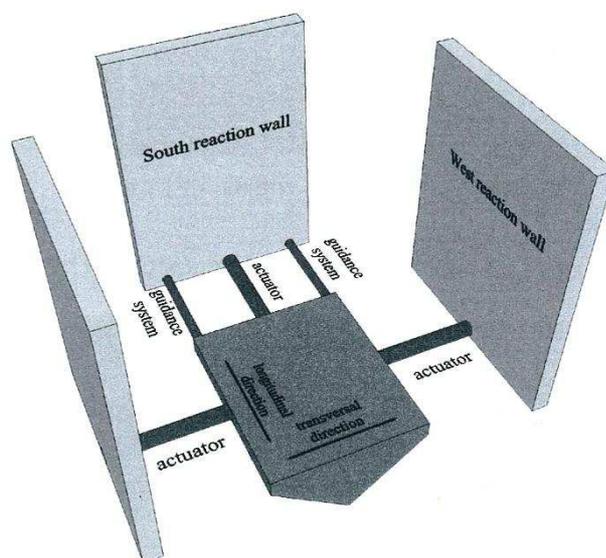


Fig. 6.3 – Representação esquemática da mesa sísmica do LNEC [49]

A aceleração introduzida correspondeu ao sismo de Montenegro de 1979 escalada para diferentes magnitudes que corresponderam a uma aceleração de pico (*peak ground acceleration* de 0,07g, 0,28g e 0,5g). A figura 6.4 apresenta os componentes da casa de CLT, bem como uma imagem da casa sobre a mesa sísmica. Trata-se de uma casa com 3 pisos e 8m de altura, com uma planta de 6x7m². O desempenho destas casas para o registo de sismos definido foi excelente, sem qualquer dano estrutural. A casa de CLT ficará instalada em Portugal para monitorização e utilização durante os próximos anos, permitindo avaliar o seu desempenho em serviço ao longo do tempo [49].

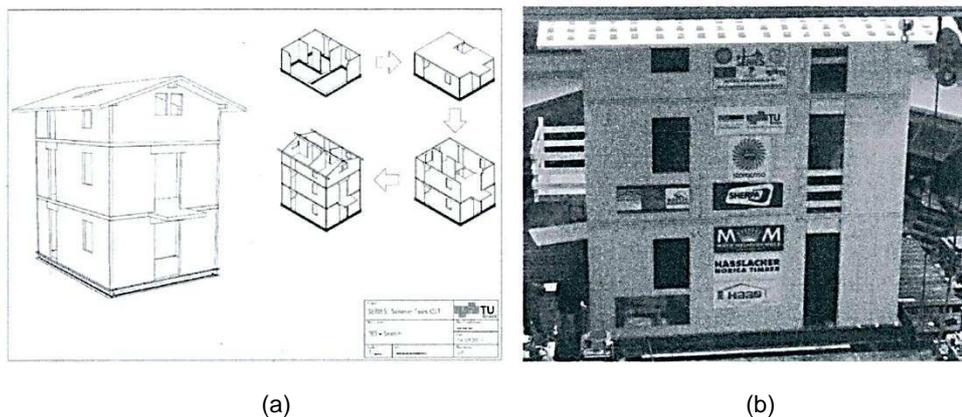


Fig. 6.4 – Casa em CLT: (a) Perspetiva e componentes; (b) Edifícios sobre a mesa sísmica [49]

Os sistemas tradicionais de estruturas de madeira e os vários sistemas inovadores desenvolvidos, ou em fase de desenvolvimento, são agora aplicados, não apenas no norte da Europa, mas, recentemente, no sul da Europa, onde a perigosidade sísmica é mais elevada. O comportamento elástico-frágil dos elementos de madeira, em particular quando submetidos a esforços de tração ou flexão, pode limitar a aplicação das construções de madeira, utilizadas no passado, essencialmente para coberturas e pavimentos. A suspeição da comunidade técnica e científica relativamente à resistência sísmica das estruturas de madeira está patente na normativa atual, uma vez que apenas se reconhecem as capacidades dissipativas das ligações entre elementos, com restrições severas em diversas ligações. No entanto, demonstrou-se com recurso a ensaios em mesa sísmica que as modernas ligações em madeira possuem um excelente desempenho sísmico para ações sísmicas de magnitude considerável.

Salienta-se ainda que o sistema escolhido para a reconstrução da cidade de *L'Aquila*, em Itália, após o sismo de 2009, foi o CLT. Na cidade de Milão, considerada uma zona sísmica, está, atualmente, a ser construído um complexo de habitação social, *Via Cenni*, composto por 4 torres de 9 pisos em CLT.

6.3.3. DESVANTAGENS

Apesar de todas as vantagens, deve referir-se que os sistemas de construção maciça possuem algumas fragilidades, tais como:

- Risco de colapso progressivo, o que resulta em medidas preventivas de reforço estrutural ou na projeção de percursos de distribuição de carga alternativos;
- O número elevado de paredes resistentes resulta numa excessiva compartimentação, limitando os edifícios ao uso habitacional;
- Para respeitar o tempo de resistência ao fogo exigido para edifícios de vários pisos obriga a que os painéis de CLT sejam revestidos, por exemplo com placas de gesso cartonado;
- O preço ainda elevado do CLT e o recurso a materiais como o gesso cartonado fazem com que este sistema não seja ainda economicamente vantajoso;
- A construção de edifícios em CLT é um mercado de nichos suportado por redes sociais frágeis que apostam na inovação, e por medidas políticas de caráter ecológico;
- Requer projetos concluídos atempadamente e de elevada precisão, para permitir o fabrico dos diversos elementos em fábrica;
- Requer revestimento externo;
- Suscetível ao contato com o solo.

6.4. CONSTRUÇÃO EM CLT – O FUTURO

O betão armado foi o material de excelência do século XX, o CLT será, inevitavelmente, a excelência dos materiais do século XXI.

Este inovador sistema construtivo está, paulatinamente, a despertar o interesse de investigadores, entidades governamentais e profissionais da construção para o estudo de soluções alternativas, ecologicamente eficazes, surgindo inevitavelmente a construção em altura em madeira como uma solução inovadora e de futuro.

No entanto, torna-se premente o desenvolvimento desta técnica construtiva, para que se torne capaz de competir em pé de igualdade com os materiais de construção correntes. Alguns conceitos recentes encontram-se atualmente em desenvolvimento. Trata-se de ideias que procuram tirar o máximo partido do CLT, através de soluções híbridas *FFTT system* (temática já abordada no capítulo 4).

Esta temática, ainda recente, está ainda pouco explorada. Este tipo de construção necessita de investigação quer ao nível do material quer no desenvolvimento de novos sistemas construtivos. O objetivo principal deverá focar-se em tornar este sistema ainda mais versátil, capaz de suportar soluções mais arrojadas, reforçando a sua competitividade face aos materiais de construção correntes. Para tal é necessário:

- Caracterizar o comportamento do CLT sob efeito de ações a médio e longo prazo (ciclos de humidade, fluência, fadiga, etc.);
- Desenvolver novos sistemas construtivos capazes de combinar requisitos funcionais e estéticos, mesmo que para tal seja necessário recorrer a soluções híbridas;
- Desenvolver ligações específicas para a construção em CLT;
- Propor formas mais complexas para os edifícios e explorar as potencialidades visuais da madeira;
- Procurar soluções construtivas capazes de responder a diferentes usos, contornando as questões relacionadas com a compartimentação excessiva e a reduzida dimensão das aberturas.

Estamos agora perante algo novo em madeira, mas temos de superar o obstáculo emocional de construir com ela. No futuro, vamos olhar para uma paisagem de prédios de madeira com a mesma naturalidade que olhamos, hoje, para os prédios de betão e de aço. Mas, para que isso aconteça, é preciso remover o limite arbitrário de altura ao redor do mundo, pois só assim é possível competir. Também a implementação de métodos de gestão nas florestas, com elevados padrões de sustentabilidade, são necessários. A este respeito a Europa lidera este caminho que a curto prazo terá que ser seguido nos restantes continentes.

A escala do problema que enfrentamos com a habitação, no mundo, exige inovação em novas tecnologias, o CLT é, sem dúvida, um dos caminhos.

7

CONCLUSÃO

Ao longo dos últimos anos, o setor da construção tem procurado desenvolver e apresentar soluções construtivas para uma habitação de custos mais reduzidos, utilizando tecnologias construtivas pré fabricadas e de reduzido impacto ambiental, não descurando os aspetos funcionais. Neste contexto, a madeira surge como o material que possibilita conjugar todos esses fatores. Séculos de experiência no uso da madeira, na construção, foram permitindo aferir e reconhecer os métodos mais seguros e eficazes, capazes de devolver a este material o seu lugar de destaque na construção de edifícios.

Neste contexto surge, nos finais do século XX , um novo material e processo de construção apelidado de *Cross Laminated Timber*.

O objetivo principal deste trabalho consiste no estudo aprofundado desta inovadora tecnologia, que aposta numa nova abordagem estrutural. Demonstrou-se que o CLT apresenta variadas vantagens, pois, além das suas potencialidades ao nível estrutural, o CLT é um material estável (dimensionalmente), uma vez que o cruzamento das lamelas restringe os movimentos higroscópicos da madeira, quando sujeita a variações do teor de humidade. Por outro lado, o comportamento dos edifícios de CLT em altura, quando sujeitos a ações sísmicas, tem vindo a ser alvo de alguns estudos experimentais, os quais têm provado que este tipo de edifícios possui uma excelente performance. Paralelamente, o CLT apresenta um bom desempenho ao nível acústico e térmico e um eficaz comportamento face à ação do fogo.

A análise do estado da arte, num contexto global, foi um dos objetivos. A este nível verifica-se uma maior incidência de edifícios construídos em CLT na Europa do Norte. No entanto, mais recentemente tem-se verificado um crescimento da implementação deste sistema construtivo no sul da Europa, onde a perigosidade sísmica é mais elevada. Este facto deve-se ao sucesso das recentes demonstrações efetuadas com recurso a ensaios em mesa sísmica, que têm demonstrado que as modernas ligações em madeira possuem um excelente desempenho sísmico para ações sísmicas de magnitude considerável.

No que concerne a Portugal, a implementação deste sistema encontra-se numa fase muito embrionária. Encontrou-se registo de apenas três edifícios construídos em CLT, sendo que um deles é uma reconstrução.

Ao emblemático edifício londrino, *Stadthaus*, foi dado, neste trabalho, um especial destaque. O desenvolvimento aprofundado teve como objetivo principal ajudar ao eficaz entendimento das potencialidades do CLT. Este edifício constitui um marco histórico para este sistema construtivo, e provavelmente um ponto de partida para a evolução da utilização de CLT em edifícios em altura.

No que diz respeito à América do Norte, o Canadá tem sido um dos principais países impulsionadores da utilização de CLT na construção de edifícios. A construção em madeira e/ou derivados de madeira,

em habitações unifamiliares é, desde sempre, a solução de excelência implementada neste país. No entanto, o aparecimento do CLT veio suscitar novas potencialidades que o Canadá, de forma alguma, tem vindo a descurar. Exemplo disso é o desenvolvimento de um novo modelo de construção em altura, *FFTT system (Find the Forests Through the Trees)* [33], que visa tirar o máximo partido das capacidades do CLT. Este sistema propõe-se suportar um edifício de 30 andares, recorrendo a uma solução que combina, pilares e vigas em madeira lamelada colada, paredes, pavimentos e um núcleo central em CLT, e vigas em aço ancoradas no núcleo central.

Outro dos objetivos fulcrais deste trabalho foi a pormenorização de um piso tipo em CLT de um edifício construído em betão armado na rua Santos Pousada no Porto. Com esta pormenorização, e atendendo às particularidades do edifício em estudo, constatou-se que este processo construtivo é versátil, adaptando-se com facilidade a diversos tipos de arquitetura. Evidenciou-se também uma das vantagens da aplicação do CLT, a sua capacidade estrutural associada à elevada esbelteza do material, o que reverteu em ganhos significativos em termos de área útil. Também, o entendimento das características deste material, enquanto estrutura pré fabricada, foi essencial para a otimização do processo de fabrico (encomenda) e consequente aplicação em obra, ou seja, a distribuição dos painéis foi pensada de forma a tirar o máximo partido da standardização do material e dos condicionalismos de transporte. Ao nível exigencial também se demonstrou que se conseguem superar os índices/valores preconizados regulamentarmente.

Por último, questiona-se um pouco sobre o futuro das habitações de madeira e qual o papel do CLT nesse tema.

Apesar de todos os aspetos positivos que motivam a implementação da construção de madeira, existem importantes barreiras a ultrapassar. Uma das mais importantes dificuldades está relacionada com a desconfiança da sociedade civil no que respeito à eficiência da madeira enquanto material de construção. É necessário combater o preconceito erróneo que a estrutura de madeira tem uma resistência ao fogo inferior à estrutura de aço, presente na maioria dos edifícios em altura. Importa salientar que, nos casos dos países da Europa do Sul, é a falta de cultura de construir em madeira, a principal razão para a escassez de técnicos especializados que, consequentemente, está na origem de certas limitações legais presentes nos códigos de construção.

Em Portugal, a utilização de madeira na construção e principalmente a madeira para estruturas possui um estigma bastante acentuado na opinião pública e nos técnicos do sector, originada também em mitos relacionados com a durabilidade e a resistência ao fogo. As estruturas de madeira em Portugal são conotadas como soluções provisórias ou de menor qualidade. Diversas condicionantes locais poderão justificar, em parte, a reduzida penetração da construção em madeira, tais como altas temperaturas na estação quente, a maior propensão para o ataque biológico e a escassez da madeira de qualidade. A estas razões soma-se a reduzida mobilidade das famílias, a preferência por processos correntes de construção, a escassez de técnicos especializados, a reduzida formação ministrada nas universidades nacionais sobre o tema e a ausência de regulamentação específica. Como tal, é fundamental implementar medidas que visem a utilização da madeira na construção de edifícios, tais como:

- Mais intervenção dos arquitetos;
- Dissipar eventuais dúvidas junto dos consumidores;
- Medidas ou programas públicos que claramente incentivem a construção de casas em madeira;
- Aumentar a formação nesta área nas universidades, no sentido de dotar os futuros engenheiros e arquitetos de formação mais especializada na construção em madeira;
- Enquadramento legal mais claro;
- Investimento na publicidade e marketing, fazendo jus à sua sustentabilidade enquanto material de construção.

Por outro lado, apesar de todas as vantagens, também os sistemas de construção em CLT possuem fragilidades. Este tipo de construção necessita de investigação quer ao nível do material quer no desenvolvimento de novos sistemas construtivos. O objetivo principal deve focar-se em tornar este sistema ainda mais versátil, capaz de suportar soluções mais arrojadas, reforçando a sua competitividade face aos materiais de construção correntes. Para tal, é fundamental por exemplo:

- A caracterização do comportamento do CLT sob efeito de ações a médio e longo prazo,
- Desenvolver novos sistemas construtivos capazes de combinar requisitos funcionais e estéticos, mesmo que para tal seja necessário recorrer a soluções híbridas;
- Desenvolver ligações específicas para a construção em CLT;
- Propor formas mais complexas para os edifícios e explorar as potencialidades visuais da madeira;
- Procurar soluções construtivas capazes de responder a diferentes usos, contornando as questões relacionadas com a compartimentação excessiva e a reduzida dimensão dos vãos.

Porém, o elevado potencial deste inovador sistema construtivo, associado à necessidade de construção de habitação em grande escala nos grandes centros urbanos, para fazer face ao crescimento populacional, está, paulatinamente, a despertar o interesse de investigadores, entidades governamentais e profissionais da construção para o estudo de soluções alternativas, ecologicamente eficazes.

Não podemos ficar indiferentes aos 7,5 mil milhões de metros cúbicos de betão que são fabricados por ano (desde 2006), mais de 1 metro cúbico por pessoa [45]. Não podemos ignorar que, atualmente, a indústria do cimento é uma das principais produtoras de dióxido de carbono e que o setor da construção é responsável pela emissão de um terço do total das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera. Paralelamente, de acordo com os dados da ONU-Habitat, atualmente 50% da população do mundo vive em ambiente urbano e estima-se que atinja os 70% em 2050 [46], números que merecem uma séria reflexão e aos quais não podemos ficar indiferentes. Neste trabalho, foram enunciadas medidas tomadas por vários governos ao nível legislativo, para incentivar o uso da madeira na construção.

É claro que o CLT não vai de forma alguma substituir o betão armado, nem é isso que se pretende. No entanto, o crescimento da madeira como principal material de construção pode certamente dar um contributo significativo para a minimização das emissões nocivas ao meio ambiente. A madeira, como material da natureza, reciclável e renovável é capaz de armazenar dióxido de carbono. O uso da madeira, como principal material, na construção, constituirá um reservatório de dióxido de carbono, que só será devolvido ao ambiente no momento da sua combustão ou decomposição.

Como tal, torna-se premente o desenvolvimento desta inovadora técnica construtiva, para que a torne capaz de competir em pé de igualdade com os materiais de construção correntes.

Ao longo deste trabalho de investigação, muito foi possível conhecer, entender e concluir acerca deste novo sistema construtivo, pelo que arrisco deixar a minha humilde opinião sobre o que penso que pode vir a ser o CLT no futuro.

O betão armado foi o material de excelência do século XX, o CLT será, inevitavelmente, a excelência dos materiais do século XXI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Joana de Sousa Coutinho, *Materiais de Construção 1*, FEUP, 1999.
- [2] http://www.swissinfo.ch/por/cultura/Povoacoes_lacustres_candidatas_a_chancela_da_UNESCO.html?cid=8670684. Consultado em Abril 2013.
- [3] Stéfane Mendes Vaz. *Avaliação Técnica e Económica de Casa Pré-fabricadas em Madeira Maciça*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2008.
- [4] <http://www.casema.pt/sobre/um-pouco-de-historia>. Consultado em Abril de 2013.
- [5] João Tiago Caridade Torres. *Sistemas Construtivos Modernos em Madeira*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010.
- [6] Sánchez, J., Martitegui, F., Martitegui, C., Alvarez, M., Sánchez, F., Nevado, M.. *Casas de Madera*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho, AITIM, 1995.
- [7] <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/10980/capitulo;jsessionid=D9B4BCB654C75E421819E752336CFC09?sequence=7>. Consultado em Abril 2013.
- [8] Paulo B. Lourenço, Jorge M. Branco, Helena Cruz e Lina Nunes. *Casas de Madeira*. Módulo - Casas de madeira. Da tradição aos novos desafios, Seminário LNEC, Lisboa, 2013.
- [9] <http://www.lukaslang.com/>. Consultado em Maio 2013.
- [10] <http://www.dstsgps.com/>. Consultado em Maio 2013.
- [11] Revista, *Construção Magazine* nº 45, Setembro/Outubro, 2011.
- [12] José Pequeno. *Brief summary – ttt Transportable Tourist Tower – Memória Descritiva*. Braga, Fevereiro 2010.
- [13] Paulo B. Lourenço, Jorge M. Branco, Helena Cruz e Lina Nunes., *Casas de Madeira*. Módulo – Arquitetura, conceito e preconceito, Seminário LNEC, Lisboa, 2013.
- [14] <http://www.mimahousing.pt/>. Consultado em Maio 2013.
- [15] www.portugalglobal.pt/PT/PortugalNews/EdicaoAicepPortugalGlobal/Documents/cmovPT220612.pdf. Consultado em Abril 2013
- [16] Paulo B. Lourenço, Jorge M. Branco, Helena Cruz e Lina Nunes. *Casas de Madeira*. Módulo – Sustentabilidade e independência energética da arquitetura viva, a solução “CEM”, Seminário LNEC, Lisboa, 2013.
- [17] Andrew Waugh, Karl Heinz Weiss, Matthew Wells. *A Process Revealed*. Murray&Sorrell FUEL, 2009.
- [18] Catarina Silva, Jorge M. Branco e Paulo B. Lourenço. *MLCC na Construção em Altura*. Congresso Construção, Coimbra, 2012
- [19] Ario Ceccotti, Carmen Sandhaas, Motoi Yasumura. *Seismic Behaviour of Multistory Cross-laminated Timber Buildings*. Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe – Timber Committee, October 11-14, Geneva, Switzerland, 2010.
- [20] <http://www.tisem.pt/>. Consultado em Abril 2013.

- [21] Daniela Barral e Sara Costa. *Construção de edifícios com Cross Laminated Timber (CLT)*. Trabalho realizado para a cadeira de “Tecnologias de Sistemas Construtivos”, FEUP, 2012/2013.
- [22] <http://www.klh.at/statik/>. Consultado em Maio 2013.
- [23] Paulo B. Lourenço, Jorge M. Branco, Helena Cruz e Lina Nunes. *Casas de Madeira*. Módulo – Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada-colada cruzada (X-Lam), Seminário LNEC, Lisboa, 2013.
- [24] http://www.klhuk.com/media/30351/klh_component%20catalogue%20for%20cross%20laminated%20timber%20structures_version%2001_2011.pdf. Consultado em Maio 2013.
- [25] <http://www.klh.at/en/cross-laminated-timber/areas-of-application.html>. Consultado em Maio 2013.
- [26] http://www.klh.at/fileadmin/klh/kunde/2011/Technische%20Anwendungen/Konstruktion/ES/Catalogo_de_elementos_de_construccion_KH.pdf. Consultado Maio 2013.
- [27] Luís Morgado, J. Branco Pedro, Helena Cruz e Pedro Pontifice. *Projeto e construção de casas de madeira em Portugal*. Jornadas LNEC, Lisboa, Junho 2012
- [28]* Scottish Executive – The Scottish Forestry Strategy. Edinburgh: Forestry Commission Scotland, 2006. Disponível em <http://www.forestry.gov.uk/>.
- [29]* Décret n° 2010-273 du 15 mars 2010 relatif à l’utilisation du bois dans certaines constructions. Journal officiel de la République Française. Texte 2 sur 118 (17 mars 2010). Disponível em: http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/decret_2010_273_bois.pdf/.
- [30]* Böcher, Michael; Ebinger, Frank; Elsässer, Peter; Kastenzholz, Edgar; Setzer, Frank – Integrating Innovation and Development Policies for the Forest Sector Country Report Germany Phase I. Cost Action E51, 2007. Disponível em: <http://www.boku.ac.at/>.
- [31]* CEI Bois, European Confederation of Woodworking Industries – Sítio da Internet da «European Confederation of Woodworking Industries» [Em linha]. 2011. Disponível em: <http://www.cei-bois.org/en/>.
- [32] <http://naturezaecologica.com/florestas-na-europa/>. Consultado em Abril 2013.
- [33] M.C. Green e J.E. Karsh. *The Case for Tall Wood Buildings*. Creative Commons (CC) Licence, 2012.
- [34] M. Mohammad, S. Gagnon, E. Karacabeyli e M. Popovski. *Innovative Mid-rise timber Structures Offer New Opportunities for Designers*. Structural Engineers Association California, SEAOC 2011, CONVENTION PROCEEDINGS.
- [35] <http://www.waughthistleton.com/project.php?name=murray>. Consultado em Abril de 2013.
- [36] <http://www.gerhard-richter.com/>. Consultado em Abril de 2013.
- [37] TRADA Technology. *Case Study / Stadthaus, 24 Murray Grove, London* 2009. Disponível em <http://www.trada.co.uk/casestudies/>.
- [38] LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 118/2001 – NAU, *Caracterização da oferta de casas de madeira em Portugal* – Lisboa, Dezembro 2011.
- [39] <http://pominvest.blogspot.pt/2012/12/censos-2011-existe-excesso-de-habitacao.html>. Consultado em Maio de 2013.

- [40] BN EN 350-2:1994 –Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe.
- [41] KLH Massivholz GmbH, Structural pre-analysis tables, Version:01/2012.
- [42] Cristina Benedetti. *Timber buildings – low-energy construction*, University Library of Bozen-Bolzano, 2010.
- [43] Simões, N.. *Comportamento Térmico de Soluções em Madeira - Adequação ao RCCTE*. Atas do 1º Encontro Nacional de Engenharia de Madeiras, Coimbra, 2009.
- [44] KLH Massivholz GmbH, Building elements catalogue- multi storey buildings. PDF, Standards details – WB – V3.1 – Jan.2003.
- [45] Magnus Larsson, Alex Kaiser, Ulf Arne Girhammar. *WCTE - World Conference on Timber Engineering, Session 47, Futures Trend*, New Zealand, 2012
- [46] <http://www.unhabitat.org/content.asp?cid=5964&catid=7&typeid=46>, site UN-HABITAT, *State of the World's Cities – Harmonious Cities*, 2008/2009.
- [47] <http://www.architectmagazine.com/green-building/branching-up.aspx>. Consultado em Junho 2013.
- [48] Steffen Lehmann. Article, *Sustainable Construction for Urban Infill Development Using Engineered Massive Wood Panel Systems* – SUSTAINABILITY, ISSN 2071-1050, 2012.
- [49] Paulo B. Lourenço, Jorge M. Branco, Helena Cruz e Lina Nunes. *Casas de Madeira*. Módulo – Avaliação experimental do comportamento sísmico de casas de madeiras, Seminário LNEC, Lisboa, 2013.

*Bibliografia não consultada