



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



Dimensionamento de Estruturas de Madeira e Mistas

RAFAEL FONSECA DE JESUS PEREIRA GUILHERME
(Licenciado em Engenharia Civil)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Civil na área de Especialização de Estruturas

Orientador (es):

Mestre Cristina Ferreira Xavier de Brito Machado
Master of Science (MSc Eng) Marian Kubisz

Júri:

Presidente: Doutor Paulo Jorge Henriques Mendes

Vogais:

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques
Mestre Cristina Ferreira Xavier de Brito Machado

Janeiro 2019

RESUMO

O presente documento foi desenvolvido no âmbito do Trabalho Final de Mestrado do Curso de Engenharia Civil, na área de especialização de Estruturas. Trata-se de um relatório de estágio que reflete a inserção e participação do mestrando numa Consultoria na área de Engenharia Estrutural, incluindo vários projetos em madeira leve (*Timber Frame*) desenvolvidos pelo mesmo, complementado por uma descrição das principais propriedades físicas e mecânicas da madeira, bem como de algumas das suas características naturais. São neste trabalho também brevemente descritos alguns dos produtos de madeira industrializada recorrentemente utilizados e os sistemas estruturais em madeira desenvolvidos até à data.

A entidade mencionada tem como nome ADEPT Consulting (UK) Ltd., estabelecida no ano 2008 no Reino Unido com o objetivo principal de ir ao encontro das exigências do cliente, oferecendo-lhe soluções rentáveis de forma eficiente e procurando a excelência na qualidade do serviço prestado. Especializados em estruturas de madeira e de aço, o carácter interdisciplinar da empresa permite uma abordagem a projetos de menor e maior escala, desenvolvendo soluções estruturais com recurso a diversos materiais e métodos de construção, de entre os quais se destacam as estruturas em *Timber Frame*, em painéis isolados estruturais (SIP), madeira lamelada cruzada (CLT), madeira lamelada colada (*glulam* ou MLC) e em aço leve (*Lightweight Steel Frame* ou LSF). Uma estrutura mista é obtida pela utilização simultânea de dois ou mais materiais acima referidos.

No final deste relatório são apresentados quatro dos projetos desenvolvidos pelo mestrando no decorrer do estágio, como acima mencionado, com base no sistema estrutural em madeira leve. Neste capítulo estão incluídos todos os elementos iniciais (como desenhos de arquitetura e restrições por parte do cliente), os materiais utilizados e valores de cálculo considerados, bem como os elementos finais produzidos para o cliente. Complementarmente, é descrito de forma sucinta o processo de dimensionamento deste tipo de estruturas, incluindo uma breve descrição dos seus principais elementos estruturais (montantes, vigotas, montantes curtos, vigas, guias conectoras, asnas e fixações) para uma melhor compreensão sobre este sistema estrutural.

PALAVRAS-CHAVE

Estruturas de Madeira, Estruturas Mistas, Sustentabilidade, Pré-Fabrico

ABSTRACT

This document was developed as part of the final work of the Master’s Degree in Civil Engineering, structures area. It is a training report that shows the embodiment of the trainee and his development as an active part of a Structural Engineering consultancy, including several Timber Frame projects conducted by him, accompanied by a description of the main, both physical and mechanical, properties of the timber, as well as of its main natural characteristics. In the present report it is also briefly described not only some of the engineered wood products (EWP), but also the main timber structural systems developed so far.

The aforesaid entity has the name of ADEPT Consulting (UK) Ltd., and was established in 2008 in the United Kingdom with the main purpose of meeting the strict time restrictions of clients, providing cost effective engineering solutions and ensuring at the same time exceptional quality of service. Specialized in timber structures and steel structures, their multidisciplinary skill allows that an approach to projects in all kinds of scale can be made, providing structural solutions with different materials along with construction methods, where it is possible to highlight Timber Frame, SIP (Structural Insulated Panel), CLT (Cross Laminated Timber) and glulam (Glued Laminated Timber), as well as Lightweight Steel Frame (LSF) structures. The hybrid structure is created as the result of a simultaneous use of two or more materials previously mentioned.

At the end of this report are presented four of the projects developed by the trainee during the traineeship, as mentioned above, based on the Timber Frame structural system. In this chapter all the initial information (like architecture drawings and client restrictions), all the materials used and project values considered, as well as all the final elements produced for the client, are included. Complementarily, it is described all the design process of this type of structures, including a brief description of its main elements (studs, joists, cripple studs, beams, headbinders, trusses and fixings), for a better understanding of this structural system.

KEYWORDS

Timber Structures, Hybrid Structures, Sustainability, Prefabrication

AGRADECIMENTOS

A elaboração de um trabalho final de mestrado é um processo moroso no qual todo o apoio recebido deve ser devidamente apreciado, especialmente quando tal implica uma adaptação a um novo país. Como tal, procura-se aqui agradecer a um conjunto de pessoas sem as quais o estágio, bem como presente relatório final, não poderiam ter sido desenvolvidos e concluídos.

Em território nacional, quero agradecer primeiramente à minha orientadora, Professora Cristina Machado, pela sua prontidão, apoio e iniciativa prestados de forma contínua durante a produção deste relatório final.

A toda a equipa da ADEPT Consulting (UK), incluindo o co-orientador do TFM e Diretor da empresa Marian Kubisz e a responsável pelos recursos humanos, Hana Kubiszova, um especial obrigado pela acolhedora receção e pelo apoio prestado, não só numa vertente profissional, mas também social, no decorrer do estágio. A dedicação e disponibilidade transversais a toda a equipa foram essenciais na obtenção de conhecimento relativo a estruturas em madeira.

Aos familiares e amigos que se mantiveram ao meu lado apesar da distância, sem o vosso constante apoio incondicional esta experiência não teria sido mais do que uma simples ideia.

ÍNDICE DE TEXTO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA	1
1.3 ENTIDADE DE ACOLHIMENTO	2
1.4 ESTRUTURA DO RELATÓRIO	4
2 MADEIRA NA CONSTRUÇÃO: ENQUADRAMENTO	5
2.1 MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	5
2.2 SILVICULTURA E PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA	6
2.3 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO	10
2.3.1 Engenharia sustentável	10
2.3.2 Madeira: um recurso sustentável	12
2.3.3 Inovação em conceitos, ferramentas e projetos	14
2.3.3.1 Passivhaus	15
2.3.3.2 Life Cycle Assessment	16
2.3.3.3 LifeCycle Tower One	19
3 MADEIRA: COMPREENDER O MATERIAL	21
3.1 ESTRUTURA	21
3.2 CARACTERÍSTICAS NATURAIS	24
3.2.1 Nós	24
3.2.2 Ângulo das fibras	25
3.2.3 Madeira de reação e madeira juvenil	25
3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS	27
3.3.1 Teor em água	27
3.3.2 Retração e dilatação	29
3.3.3 Distorção	30
3.3.4 Massa volúmica	31
3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS	32
3.4.1 Resistência mecânica e rigidez	32
3.4.2 Influência da duração da carga	34
3.4.3 Influência da temperatura e comportamento sob fogo	36
3.4.4 Influência das dimensões	37
3.4.5 Deformações a longo prazo	39
3.5 CLASSIFICAÇÃO	41
3.5.1 Classificação visual	41
3.5.2 Classificação por máquina	42

4 PRODUTOS INDUSTRIALIZADOS E ESTRUTURAS MISTAS	43
4.1 PRODUTOS DE MADEIRA INDUSTRIALIZADOS (EWP)	43
4.1.1 Madeira Lamelada Colada – MLC	43
4.1.2 Painéis de fibras orientadas – OSB	46
4.1.3 Open Metal Web Joist e I-Joist	46
4.1.4 Madeira Lamelada Cruzada – CLT	48
4.2 ESTRUTURAS MISTAS	52
4.2.1 Combinação de materiais	52
4.2.2 Vantagens da estrutura mista	56
4.2.3 Desafios em estruturas mistas	59
5 SISTEMAS ESTRUTURAIS EM MADEIRA	61
5.1 SISTEMA MODULAR	61
5.2 SISTEMA PILAR E VIGA	62
5.3 SISTEMAS PLANARES	64
5.3.1 Sistema Blockhaus	64
5.3.2 Sistema por painéis	65
5.3.3 Sistema em madeira leve	67
6 PROJETOS ELABORADOS	75
6.1 EXTENSÃO DE UM PRIMEIRO ANDAR EM LLANDYSUL, PAÍS DE GALES	88
6.1.1 Arquitetura e especificações	88
6.1.2 Cálculos estruturais	88
6.1.3 Apresentação final (Marcações estruturais, cargas, referências e detalhes)	90
6.2 NOVA MORADIA EM ROWLANDS GILL, INGLATERRA	92
6.2.1 Arquitetura e especificações	92
6.2.2 Cálculos estruturais	92
6.2.3 Apresentação final (Marcações estruturais, cargas, referências e detalhes)	95
6.3 EXTENSÃO DA ESCOLA PRIMÁRIA LANCHESTER E.P. EM DURHAM, INGLATERRA	96
6.3.1 Arquitetura e especificações	96
6.3.2 Cálculos estruturais	96
6.3.3 Apresentação final (Marcações estruturais, cargas, referências e detalhes)	98
6.4 EXTENSÃO EM ALTURA E LATERAL DE UM EDIFÍCIO EM KETTERING, INGLATERRA	99
6.4.1 Arquitetura e especificações	99
6.4.2 Cálculos estruturais	100
6.4.3 Apresentação final (Marcações estruturais, cargas, referências e detalhes)	100
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS	101
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
7.2 PERSPETIVAS FUTURAS	101

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Logotipos das entidades certificadoras.....	3
Figura 1.2 – Centro de negócios Basepoint e logotipo da empresa.....	3
Figura 2.1 – Três espécies de madeira macia: a) Espruce-europeu (<i>Picea abies</i>); b) Pinheiro-silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>); c) Lariço (<i>Larix</i>).....	7
Figura 2.2 – Equipamentos florestais para silvicultura: a) Harvester; b) Forwarder/Logger.....	8
Figura 2.3 – Produção mundial de aço e cimento (Chaturvedi e Ochsendorf, 2004).....	10
Figura 2.4 – Ponte Traversina, Suíça, por Jürg Conzett (1996).....	12
Figura 2.5 – Aplicação do conceito <i>Passivhaus</i> : <i>Sulgrave Gardens</i> , Reino Unido.....	16
Figura 2.6 – Fases do processo de <i>Life Cycle Assessment</i>	18
Figura 2.7 – Laje compósita de madeira e betão, <i>LyfeCicle Tower One</i>	19
Figura 2.8 – Interior e exterior da estrutura <i>LyfeCicle Tower One</i> , Bregenz, Áustria.....	20
Figura 3.1 – Estrutura básica da molécula de celulose (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	21
Figura 3.2 – Estrutura de uma célula de madeira (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	22
Figura 3.3 – Estrutura da madeira resinosa: a) Princípio de desenvolvimento da parede celular; b) Corte transversal de um tronco (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	23
Figura 3.4 – Exemplo de um nó de aresta num espécime de madeira (Bertil Enquist, 2010).....	24
Figura 3.5 – Fibras de pinheiro desenvolvidas sob a forma de espiral, em ambos os sentidos.....	25
Figura 3.6 – Transição de propriedades da madeira juvenil para adulta (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	26
Figura 3.7 – Fases da libertação de água na madeira a nível celular (TRADA, 2011).....	29
Figura 3.8 – Influência do ângulo das fibras na retração longitudinal e transversal da madeira: a) em madeira adulta; b) na presença de madeira juvenil de compressão (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	29
Figura 3.9 – Modos de distorção da madeira: a) <i>twist</i> ; b) <i>spring</i> ; c) <i>cup</i> ; d) <i>bow</i> (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	30
Figura 3.10 – Tensões normais e de corte nas três direções na madeira (<i>Structural Timber Design to Eurocode 5</i>).....	32
Figura 3.11 – Relações gerais tensão-extensão em madeira macia carregada axialmente (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	34
Figura 3.12 – Relação entre resistência à flexão (em %) e duração da aplicação da carga (em horas, h) (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	35
Figura 3.13 – Ilustração do comportamento da madeira sob ação de fogo.....	37

Figura 3.14 – Curva de fluência em função da carga aplicada e do tempo (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	39
Figura 3.15 – Princípio de um ensaio estático de flexão num elemento de madeira (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	42
Figura 4.1 – Cronologia do desenvolvimento de EWP (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	43
Figura 4.2 – Processo de fabrico de elemento lineares em <i>MLC</i> (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	44
Figura 4.3 – À esquerda: Viga em <i>MLC</i> combinada; À direita: Função de distribuição de resistência em <i>MLC</i> combinada e madeira serrada (<i>Design of timber Structures – Volume 1</i>).....	44
Figura 4.4 – Em cima: Cobertura da arena <i>Richmond Olympic Oval</i> , Canadá, com arcos em <i>MLC</i> e aço; em baixo: Estufa <i>Sheffield Winter Gardens</i> , Reino Unido, com arcos em <i>MLC</i> (esquerda); Torre de observação <i>Pyramidenkogel</i> , Áustria, com pilares em <i>MLC</i> (direita).....	45
Figura 4.5 – Painel de fibras orientadas em madeira – <i>Oriented Strand Board (OSB)</i>	46
Figura 4.6 – Vigotas em forma de I (<i>I-Joists</i>).....	47
Figura 4.7 – Vigotas com alma metálica aberta (<i>Open Metal Web Joist</i>).....	47
Figura 4.8 – Formação de um painel de CLT.....	48
Figura 4.9 – Edifício em CLT <i>Forté</i> , Melbourne, Austrália.....	49
Figura 4.10 – CLT e pilares em <i>MLC</i> evidenciados no alpendre e interior do <i>Earth Sciences Building, UBC</i> , Canadá.....	49
Figura 4.11 – Transporte por helicóptero para montagem simples e rápida de painéis em CLT num local remoto, na Áustria.....	50
Figura 4.12 – À esquerda: estrutura em CLT no local dos ensaios sísmicos; à direita: elementos de ligação e de suporte metálicos (em cima) e ligação <i>half-lap</i> (em baixo).....	51
Figura 4.13 – Estruturas treliçadas mistas: treliça do tipo <i>Fink</i> (esquerda); treliça do tipo <i>Fan</i> (direita).....	52
Figura 4.14 – Estrutura mista em <i>MLC</i> e aço: Torre de observação <i>Pyramidenkogel</i> , Áustria.....	53
Figura 4.15 – Modelo de ligação articulada dúctil como sistema misto aplicado em LVL.....	54
Figura 4.16 – Sistemas de ligação e aço entre dois ou mais elementos de madeira.....	54
Figura 4.17 – Em cima: laje compósita madeira-betão com conectores metálicos; em baixo: transporte de laje compósita, <i>LifeCycle Tower One</i>	55
Figura 4.18 – Modelos típicos de <i>fitch beam</i>	56
Figura 4.19 – Sistema de contraventamento na estrutura mista <i>Earth Sciences Building, UBC</i> , Canadá.....	57

Figura 4.20 – Bases em aço implementadas nos semi-arcos em <i>MLC, Brentwood SkyTrain Station</i> , Canadá.....	58
Figura 4.21 – Esquerda: detalhe incorreto de pilares de madeira em contacto com o solo; direita: detalhe correto da ligação pilar de madeira-substrato em betão, com exemplo ilustrativo.....	58
Figura 4.22 – Detalhe de um conector <i>Sherpa</i> na ligação entre duas vigas com exemplo ilustrativo.....	59
Figura 5.1 – <i>First Arlanda Hotel Airport</i> , Suécia: módulo em fábrica e aspeto final.....	61
Figura 5.2 – Sistema primário, secundário e revestimento na formação de uma cobertura através do sistema pilar e viga.....	62
Figura 5.3 – Aplicação do sistema pilar e viga <i>Trä8</i> na construção em altura.....	63
Figura 5.4 – Sistema estrutural <i>Blockhaus</i> em habitações.....	64
Figura 5.5 – Esquerda: painel isolado estrutural (SIP); direita: construção através do sistema por painéis SIP.....	65
Figura 5.6 – Modelo em SketchUp e plano de lajes intermédias em CLT no projeto <i>Cool Venues Ice Rink</i>	66
Figura 5.7 – Paredes formadas por painéis no sistema <i>Timber Frame</i>	67
Figura 5.8 – Fundação da estrutura com blocos de betão leve antes (esquerda) e após (direita) a colocação da DPC e da primeira guia de madeira.....	68
Figura 5.9 – Detalhe de uma fundação superficial no sistema <i>Timber Frame</i> em 2D (esquerda) e 3D (direita).....	69
Figura 5.10 – Secções típicas de paredes no sistema <i>Timber Frame</i> : a) parede externa; b) parede interna; c) parede partilhada (<i>party wall</i>).....	70
Figura 5.11 – Resistência a ações laterais: a) parede resistente; b) <i>racking</i> ; c) derrubamento.....	71
Figura 5.12 – Piso térreo de uma estrutura ainda sem cobertura, em <i>Timber Frame</i>	71
Figura 5.13 – Robust Detail E-FT-3 com opção de pavimento flutuante.....	72
Figura 5.14 – Princípio de aplicação do <i>Screedflo System</i>	73
Figura 5.15 – Conectores <i>Simpson Strong-Tie</i> e <i>ITW-Cullen BP</i> e exemplos de aplicação.....	73
Figura 5.16 – Modelo em SketchUp da elevação do primeiro piso e instalação da cobertura, em <i>Timber Frame</i>	74
Figura 6.1 – Exemplos de coberturas: a) <i>gable roof</i> (duas águas); b) <i>hip roof</i> (quatro águas); c) <i>mansard roof</i>	77
Figura 6.2 – Ângulo de referência no método geral de análise da ação do vento.....	79
Figura 6.3 – Efeito de sucção provocado pela ação do vento.....	79
Figura 6.4 – Transferência de forças laterais de uma laje para paredes resistentes.....	81
Figura 6.5 – Parede formada por vários painéis e com duas zonas de abertura.....	81

Figura 6.6 – Encurvadura lateral de um pilar ou montante.....	82
Figura 6.7 – Vigotas em madeira serrada espaçadas por 600 mm, utilizadas no projeto de referência.....	83
Figura 6.8 – Viga em <i>MLC</i> utilizada no projeto de referência: a) localização da viga, inserida numa parede interna; b) secção transversal; c) marcação estrutural 2D.....	84
Figura 6.9 – Viga em aço utilizada no projeto de referência: a) localização da viga, suportando a cobertura; b) localização da viga na parede externa; c) marcação estrutural 2D.....	85
Figura 6.10 – Montantes curtos no projeto de referência: a) como suporte de uma viga de cumeeira; b) como suporte de um lintel numa zona de abertura.....	86
Figura 6.11 – Fixações de painéis e guias no sistema <i>Timber Frame</i> : pregos (esquerda) e parafusos (direita).....	87
Figura 6.12 – Duas cargas pontuais de 7 kN (3 kN de carga permanente e 4 kN de sobrecarga) correspondentes às reações do lintel na zona de abertura; carga linear (permanente/sobrecarga/vento) em kN/m ao longo da parede.....	91
Figura 6.13 – Detalhe do degrau existente na cobertura da estrutura.....	98
Figura 6.14 – Alçado Norte/Oeste proposto (extensões revestidas em telha, no topo e em alvenaria, à esquerda).....	99
Figura 6.15 – Secção transversal da extensão em altura, evidenciando a forma da cobertura.....	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Determinação dos valores característicos das propriedades mecânicas da madeira macia segundo a norma EN 338-2003.....	9
Tabela 2.2 – Combustível fóssil necessário na produção dos mais comuns materiais de construção (Ferguson, 1996).....	14
Tabela 2.3 – Níveis de libertação e sequestro de CO ₂ nos materiais de construção mais comuns (Ferguson, 1996).....	14
Tabela 3.1 – Efeito do ângulo das fibras nas propriedades resistentes da madeira (<i>Structural Timber Design to Eurocode 5 de acordo com BS EN 338-2003: Table 1</i>).....	25
Tabela 3.2 – Classes de serviço especificadas no Eurocódigo 5 e no BS 5268-2 (TRADA, 2011).....	28
Tabela 3.3 – Propriedades de resistência e rigidez e valores de densidade para várias classes de resistência de madeira estrutural (<i>Structural Timber Design to Eurocode 5 de acordo com BS EN 338-2003: Table 1</i>).....	33
Tabela 3.4 – Definição das classes de duração de carga (<i>Structural Timber Design to Eurocode 5</i>).....	35
Tabela 3.5 – Valores de k_{mod} para madeira e EWP (<i>Structural Timber Design to Eurocode 5</i>).....	36
Tabela 3.6 – Valores de k_h , k_l e k_{vol} para madeira e EWP (<i>Structural Timber Design to Eurocode 5 de acordo com EC5, 3.2, 3.3, 3.4 e 6.4.3</i>).....	38
Tabela 6.1 – Fator de modificação associado ao tipo de edifício, K_b	78
Tabela 6.2 – Fator de modificação K_{100}	80

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

EWP – Engineered Wood Product

SIP – Structural Insulated Panel

CLT – Cross-Laminated Timber

MLC – Glued Laminated Timber

MLC – Madeira Lamelada Colada

LSF - Lightweight Steel Frame

CO₂ – Dióxido de carbono

NHBC – National House Building Council

TRADA – Timber Research and Development Association

PIB – Produto Interno Bruto

CEI – Comunidade dos Estados Independentes

EN – Norma Europeia

LCA – Life Cycle Assessment

ACV – Análise do Ciclo de Vida

BRE – Building Research Establishment

BS – British Standard

ISO – International Organization for Standardization

PSF – Ponto de Saturação das Fibras

EC5 – Eurocódigo 5

LVL – Laminated Veneer Lumber

ELS – Estado Limite de Serviço

SLS – Serviceability Limit State

C_r – Dynamic Augmentation Factor (Fator de ampliação dinâmica)

H – Building Height (Altura do edifício acima da superfície)

K_b – Building Type Factor (Fator de tipo de edifício)

V_e – Effective Wind Speed (Velocidade efetiva do vento)

C_{pe} – External Pressure Coefficient (Coeficiente de pressão externa)

C_{pi} – Internal Pressure Coefficient (Coeficiente de pressão interna)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

A construção em madeira tem vindo a acentuar a sua imagem em diversos tipos e dimensões de estruturas. Sendo um material celular natural, a madeira é resistente e relativamente leve, tornando fácil o seu transporte e montagem. É um material facilmente aplicável à pré-fabricação que, com o auxílio de um sistema de produção de alta precisão por controlo computacional e com o recente desenvolvimento a nível de resistência e dimensões de produtos de madeira industrializados (*Engineered Wood Products* ou EWP) como a madeira lamelada cruzada (*Cross Laminated Timber* ou CLT) ou madeira lamelada colada com a fibra na mesma direção (*Glued Laminated Timber* ou MLC), permite uma redução significativa na duração de todo o processo de construção e de forma geral, a um custo reduzido.

Com o incremento da sua popularidade e o seu potencial em contínua exploração, o interesse em compreender este tipo de estruturas foi o ponto de partida para a realização de um estágio nesta área. De modo semelhante, a necessidade de um constante desenvolvimento do setor da construção face a novos desafios conduz a uma imprescindível procura por novas soluções, desde a aquisição de novos métodos que incrementem a eficiência de uma estrutura até ao uso combinado de diferentes materiais, procurando uma otimização a nível estrutural, estético, funcional e ecológico.

Deste modo, e com o conhecimento adquirido relativo a estruturas de betão e aço, tornou-se aliciante complementar tais competências com a abordagem a um novo material, não explorado de modo idêntico aos restantes a nível académico. Estes foram os principais fatores que conduziram a uma procura por uma experiência a nível académico e profissional numa empresa cujo principal foco é o dimensionamento de estruturas em madeira.

1.2 Objetivos e Metodologia

O presente relatório tem como objetivo a condução de um estudo relativo ao dimensionamento e funcionamento de estruturas em madeira com base no estágio realizado nos seis meses anteriores, onde foi dada ao mestrando a hipótese de integrar uma equipa de engenheiros estruturais e desenhadores, permitindo a aquisição pela sua parte de noções primárias relativas aos materiais comuns a este tipo de construção, ao dimensionamento de elementos isolados e, posteriormente, de estruturas completas.

Neste último ponto, pretende-se que o mestrando desenvolva autonomamente projetos de pequena escala, onde este será responsável pelo dimensionamento de todos os elementos de madeira pertencentes à estrutura.

Para tal, foi prestado um acompanhamento numa base diária por parte de toda a equipa, mediante a sua disponibilidade, tornando possível a adaptação e progresso individual do mestrando. De modo semelhante, foi também proporcionado um aumento gradual no grau de dificuldade inerente aos projetos onde este participou, permitindo assim que conceitos simples fossem compreendidos e consolidados previamente à abordagem a conceitos mais complexos.

1.3 Entidade de Acolhimento

A ADEPT Consulting (UK) Ltd. foi estabelecida no ano 2008 no Reino Unido, inserindo-se no setor da construção como uma consultora. Em contínuo crescimento, a empresa conta neste momento com uma equipa de cerca de 20 membros, sendo a maioria destes especializados em Engenharia Estrutural. O seu conhecimento e experiência nesta área permite uma abordagem a estruturas em madeira, aço, tijolo, betão, mistas e métodos de construção *off-site*, permitindo à empresa uma participação em diferentes mercados, promovendo dessa forma a sua expansão [1].

Além do serviço de engenharia estrutural, a empresa é composta também por uma equipa de desenhadors técnicos, responsáveis pela área de Detalhe Estrutural, em que grande volume de trabalho corresponde à elaboração de peças desenhadas e respetivos detalhes para produção em fábrica e posterior montagem em campo [2].

Desde edifícios na área da educação, limitados particularmente pela duração dos períodos de férias, conduzindo à necessidade de um tipo de construção rápido, passando por edifícios na área da saúde (onde a construção em módulos é incentivada), até à vertente hoteleira, a ADEPT possui um repertório transversal a todas estas estruturas. O raio de ação da empresa passa também pelo mercado da habitação incluindo moradias, apartamentos, residências para estudantes, não deixando de parte projetos de alterações e adaptações a construções existentes, como uma extensão a uma casa ou a conversão de uma estrutura para um diferente fim.

A nível de critérios de qualidade, a ADEPT apresenta-se certificada segundo a norma ISO 9001. Além disso, encontra-se qualificada como entidade Certificadora Registada em construção *Timber Frame*

segundo a NHBC (*National House Building Council*), responsável no Reino Unido pela emissão de Seguros e Garantias na construção de novas habitações. Outra organização à qual a ADEPT se encontra associada é a TRADA (*Timber Research and Development Association*), dedicada à criação de métodos e especificações no âmbito do dimensionamento e construção de estruturas em madeira, estabelecendo soluções estandardizadas, conduzindo a uma convergência para as boas práticas na indústria (ver Figura 1.1) [3].

No que diz respeito a instalações, a ADEPT encontra-se neste momento no Centro de Negócios Basepoint (ver Figura 1.2), em Chepstow, País de Gales e em Birmingham, Inglaterra, sendo Chepstow a localização do escritório inicial, onde se encontra aproximadamente 70% do quadro técnico. Este tem como foco todos os projetos que envolvam estruturas em madeira, enquanto que o escritório de Birmingham centra-se nas estruturas em aço leve.



Figura 1.1 – Logotipos das entidades certificadoras associadas à ADEPT



Figura 1.2 – Centro de negócios Basepoint e logotipo da empresa

1.4 Estrutura do Relatório

O presente relatório de estágio encontra-se essencialmente dividido em sete capítulos, sendo cada um destes subdividido em dois ou mais subcapítulos (à exceção do último), visando uma organização coerente dos conteúdos dispostos da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução:

De modo a introduzir o trabalho realizado em estágio, é feito um enquadramento geral do tema, são explicados de forma sucinta os objetivos e a metodologia adotada durante o mesmo e é também feita uma breve descrição da entidade de acolhimento. Ainda neste capítulo é definida a estrutura do relatório final.

- Capítulo 2 – Madeira na construção: enquadramento:

Neste capítulo é descrita, em traços gerais, a evolução no âmbito da utilização estrutural da madeira, incluindo a sua relação com a procura por uma construção sustentável. São neste ponto evidenciadas algumas ferramentas e projetos experimentais e também identificadas quais as espécies mais utilizadas no sistema estrutural em madeira leve.

- Capítulo 3 – Madeira: compreender o material:

Neste capítulo são descritas de forma detalhada as características naturais e mecânicas da madeira, bem como todo o processo de tratamento pelo qual esta é sujeita desde o seu estado natural até ser utilizada para fins estruturais, incluindo os critérios para a sua classificação.

- Capítulo 4 – Produtos industrializados e estruturas mistas:

Neste capítulo procura-se descrever alguns dos produtos de madeira industrializados (EWP) recorrentemente utilizados. Este ponto refere-se também a estruturas e sistemas mistos, referindo as diferentes formas de combinação de materiais, explorando algumas das suas vantagens e desafios inerentes à conexão de materiais com diferentes propriedades estruturais.

- Capítulo 5 – Sistemas estruturais em madeira:

O quinto capítulo é alusivo aos diversos sistemas de construção em madeira, desde a construção volumétrica à construção em plataforma, onde são explícitas as suas características gerais.

- Capítulo 6 – Projetos elaborados:

Neste capítulo procede-se à descrição detalhada de diversos projetos realizados ao longo do estágio, com diferentes graus de complexidade, evidenciando as particularidades de cada um.

- Capítulo 7 – Considerações finais e perspetivas futuras:

No sétimo e último capítulo são apresentadas conclusões relativas ao trabalho desenvolvido ao longo do estágio, assim como perspetivas de posterior desenvolvimento do tema em estudo.

2 MADEIRA NA CONSTRUÇÃO: ENQUADRAMENTO

2.1 Madeira como Material de Construção

“The best friend of man is the tree. When we use the tree respectfully and economically, we have one of the greatest resources on the earth.” Frank Lloyd Wright. Architect

A madeira, o aço e o betão representam os materiais mais utilizados no setor da construção. No entanto, a sua distribuição a nível geográfico não é linear, existindo uma tendência para o recurso à madeira como material estrutural nos países nórdicos e dotados de uma área florestal suficiente face à constante procura.

A utilização estrutural da madeira não é novidade, tendo surgido com os primeiros fenómenos de civilização e muito antes do estudo das ciências matemáticas, da necessidade por parte do Homem em construir abrigos de forma improvisada, sem grande rigor. No entanto, foram estas primeiras edificações, marcadas pela tentativa e erro, que deram forma ao que ainda hoje é praticado na construção em madeira. Apesar da negligência sofrida em comparação com os restantes materiais de construção acima referidos, refletida na sua omissão na maioria dos livros de teoria estrutural por défice de exploração do material para tal uso, é possível afirmar que a madeira está neste momento a viver um período de renascimento [4, 5].

O progresso no conhecimento tecnológico e na área da ciência dos materiais, essencialmente no último século, onde começa a existir um melhor conhecimento relativo aos pontos fortes e às fraquezas da madeira, permitiu a criação de produtos industrializados, otimizados para o seu fim estrutural. Tal progresso, aliado a um desenvolvimento na área das ligações entre elementos, onde o aparecimento do aço inoxidável tem um papel fundamental, conduziu a uma libertação progressiva de técnicas estruturais previamente estabelecidas, criando espaço para a abordagem a métodos originais que exploram a versatilidade dos diversos materiais.

De um ponto de vista puramente estrutural, uma das principais razões à qual se deve tal mudança corresponde ao desenvolvimento de ligações por tração com maior eficiência. O conhecimento pré-científico na construção em madeira não promovia a exploração da sua resistência à tração, procurando

a materialização de todas as ligações puramente à compressão, resultando na necessidade de compensar as forças de tração dispersas através de paredes em alvenaria pesada, pilares, contrafortes e fundações. Com o desenvolvimento não só na área dos conectores, mas também das colas modernas, tornou-se possível o dimensionamento de estruturas com um equilíbrio interno de esforços de compressão e tração, resultando conseqüentemente numa vantagem a nível económico no que diz respeito a elementos de suporte [5].

Quando comparados entre si para fins estruturais, o aço, o betão e a madeira têm características individuais que os tornam mais ou menos adequados consoante a situação em particular. Contudo, é apoiada neste relatório a ideia do funcionamento destes em simultâneo, onde se procura tirar partido das melhores valências de cada um, promovendo uma otimização da estrutura como um todo.

2.2 Silvicultura e Produção de Madeira Serrada

“In 2009, 3.95 billion hectares of land were classified as forest in the world. Of these forests, 25 percent were located in Europe, 21 percent in South America, 16 percent in Africa, 15 percent in Asia, 18 percent in North and Central America and 5 percent in Oceania. Just under half of the wood use in the world is used as industrial wood (pulp, paper and wood products); the other half is used for fuel, the main part of this in developing countries. The countries that produce the largest amounts of sawn timber are USA, Canada, Russia, Germany and Sweden. Canada, Russia and Sweden are also large exporters of sawn timber.” Design of timber structures – Volume 1

O setor florestal representa uma importante parcela económica para a Europa, correspondendo a aproximadamente 1% do seu Produto Interno Bruto (PIB) e empregando aproximadamente quatro milhões de pessoas. Cerca de 40% do território europeu encontra-se ocupado por florestas, onde a Federação Russa, na sua área total, contém 81% dos seus recursos florestais. Na maioria dos estudos estatísticos, a Europa encontra-se dividida em três regiões distintas: Europa Ocidental¹, Europa de Leste e países membros da Comunidade dos Estados Independentes (CEI). A gestão de florestas é, na maioria dos países europeus, regulada pelo governo, o que se traduz em políticas e regras bem definidas

¹ Considerando Europa Ocidental sendo constituída pelos seguintes países: Portugal, Espanha, Andorra, França, Bélgica, Alemanha, Irlanda, Luxemburgo, Mónaco, Holanda, Suíça e Reino Unido.

e restritas a nível de corte e plantação. No entanto, e apesar de não se verificar nos países da Europa de Leste e da CEI, mais de 70% das florestas na Europa Ocidental encontram-se no setor privado. Esta fragmentação, fomentada pela criação de associações privadas, dificulta a existência de uma manutenção regulada e controlada nestes países. Aproximadamente metade da madeira para serração produzida na Europa até 1990 foi proveniente dos países da Europa de Leste e da CEI, tendo sofrido um drástico decréscimo por alterações de políticas após esse ano. Contudo, a produção nestes países encontra-se novamente em crescimento, principalmente pelo incremento na procura de produtos de madeira industrializados (EWP) [6].

A floresta europeia pode ser classificada como floresta boreal ou floresta conífera, essencialmente nos países nórdicos e na zona Norte da Federação Russa, coexistindo, no entanto, com áreas de floresta temperada, visíveis na zona central da Europa e no sul da Federação Russa. Nas florestas boreais dominam as espécies de madeira macia (ver Figura 2.1), nomeadamente o Espruce-europeu (*Picea abies*), o Pinheiro-silvestre (*Pinus sylvestris*) e o Lariço (*Larix*). Na produção de madeira para serração, em particular para o setor da construção, é comum o recurso a este tipo de espécies [6].



a)

b)

c)

Figura 2.1 – Três espécies de madeira macia: a) Espruce-europeu (*Picea abies*); b) Pinheiro-silvestre (*Pinus sylvestris*); c) Lariço (*Larix*)

O processo de produção de madeira para serração pode ser dividido por várias fases. No que diz respeito ao Espruce-europeu (*Picea abies*), uma das mais utilizadas espécies acima referidas, o tempo de rotação (onde se procede à colheita) é de aproximadamente 80 anos em plantações controladas. Porém, ao longo do seu ciclo de vida, são desbastadas leve e frequentemente por forma a otimizar o seu crescimento. Após a sua colheita, procede-se à reflorestação, isto é, à plantação de novas árvores, reiniciando todo o ciclo. A fase de corte (ver Figura 2.2) é, de forma geral, concretizada através de cortes nítidos em árvores de idade semelhante, através de uma máquina de colheita florestal (*harvester* florestal), dotada da capacidade de medir o diâmetro de um tronco e de o cortar transversalmente, obtendo elementos com comprimento otimizado para as exigências do mercado, minimizando assim os desperdícios. Os troncos são então transportados por máquinas próprias para esse efeito (*forwarder/logger*) até ao acesso mais próximo, onde são armazenados até à chegada de um camião que os transportará até uma serração ou uma fábrica de pasta de papel, enquanto que os ramos são triturados em estilhas para a produção de combustível. Em termos de limites dimensionais, para efeitos de transporte e de tratamento na linha de produção, existe uma variação consoante o país em causa. Na Suécia, por exemplo, o comprimento máximo de um tronco é cerca de 5,5 metros, com um diâmetro não superior a 40 centímetros [6].



a)



b)

Figura 2.2 – Equipamentos florestais para silvicultura: a) *Harvester*; b) *Forwarder/Logger*

Já na serração, os troncos são diferenciados por classes de qualidade, comprimentos e diâmetros, permitindo a atribuição de um valor monetário em função de tais características e o pagamento à entidade proprietária da floresta. Após descascados, os troncos são submetidos a um detetor de metais e enviados para a linha de serragem, onde são primeiramente examinados para se obter uma ideia robusta da sua forma externa e, visando otimizar os padrões de corte *a posteriori*, são também

rastreados através de raios-X, onde é possível registar as suas propriedades internas. De seguida, os troncos são cortados em pranchas² e dispostos em lotes consoante as suas dimensões e qualidade. Por forma a reduzir o teor em água para níveis entre 12% e 18%, consoante a sua finalidade, as pranchas são empilhadas e conduzidas para um processo de secagem. Existem essencialmente duas formas de realizar este processo, sendo uma delas através de forno em forma de câmara e outra recorrendo a um forno em formato de túnel. Na primeira, as pranchas empilhadas são colocadas e fechadas no forno, possibilitando um controlo da temperatura e do teor em água que conduz a uma minimização no consumo de energia e uma otimização da qualidade do produto final. Por outro lado, o forno em formato de túnel funciona como um sistema contínuo, sendo um processo moroso em que as pranchas empilhadas são transportadas no seu interior, durante 5 a 7 dias. Por fim, após a secagem, as pranchas são desempilhadas, examinadas visualmente e distribuídas em diferentes categorias, passando ainda por um alisador de superfície, ganhando a sua forma final [6].

Caso o produto final seja destinado ao uso estrutural, são atribuídas, com base em parâmetros definidos a nível europeu, diferentes classes de resistência. Na maioria das situações, o material é classificado com base no seu valor de resistência à flexão, sendo ainda verificado se parâmetros como o módulo de elasticidade e a massa volúmica se encontram dentro dos valores limite estabelecidos. Todos os restantes parâmetros são determinados com base nestes, através das expressões indicadas na Tabela 2.1, definidas através da norma EN 338-2003 [7].

Tabela 2.1 – Determinação dos valores característicos das propriedades mecânicas da madeira macia segundo a norma EN 338-2003

Tensile strength parallel to grain	$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$
Compression strength parallel to grain	$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0,45}$
Compression strength perpendicular to grain	$f_{c,90,k} = 0,007 \rho_k$
Modulus of elasticity parallel to grain	$E_{0,05} = 0,67 E_{0,mean}$
Mean modulus of elasticity perpendicular to grain	$E_{90,mean} = E_{0,mean} / 30$
Mean shear modulus	$G_{mean} = E_{0,mean} / 16$
Mean density	$\rho_{mean} = 1,2 \rho_k$

² Existem vários padrões de corte, consoante a finalidade dos elementos, maioritariamente sob a forma retangular. São exemplos o corte por quadrantes, em função do ângulo das fibras, o corte direcionado para a classificação da madeira e o corte em função de uma dimensão em particular.

2.3 Sustentabilidade na Construção

2.3.1 Engenharia sustentável

“Increased consumption of raw materials in the construction industry affects the environment, economy, and society.” Chaturvedi e Ochsendorf, 2004

Sustentabilidade não consiste simplesmente na redução da pegada de carbono provocada pela nossa indústria. Os engenheiros de estruturas enfrentam no presente século desafios significativos, sendo um deles o ambiente a nível global. Este deve ser um aspeto prioritário num planeta onde os recursos naturais são finitos e tanto a população como a construção se encontram em crescimento. Existe, portanto, uma responsabilidade pela nossa parte em considerar uma sustentabilidade a nível económico, social e ambiental no dimensionamento de estruturas. A tendência à utilização do aço e cimento (ver Figura 2.3) a uma escala mundial reflete o crescente impacto das estruturas no ambiente, mais especificamente nas emissões de gases de efeito de estufa associadas a esses mesmos materiais. Existem vários cenários globais possíveis quando são assumidos comportamentos e tendências tecnológicas, económicas e sociais. No entanto, com o crescimento do consumo por pessoa, prevê-se um colapso de recursos naturais com inevitáveis consequências na qualidade de vida da população [8].

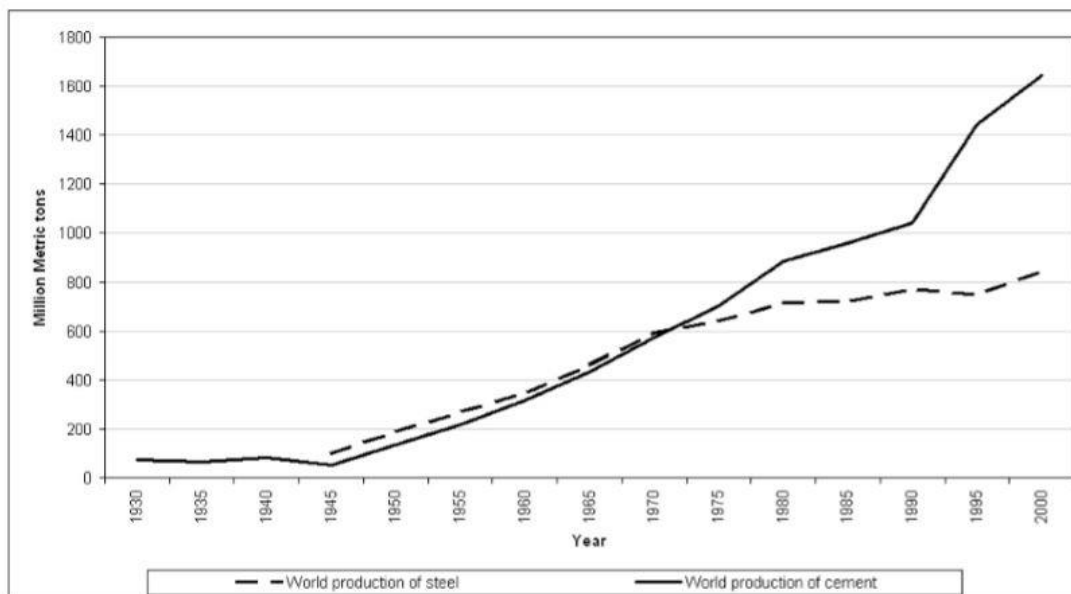


Figura 2.3 – Produção mundial de aço e cimento (Chaturvedi e Ochsendorf, 2004) [9]

A necessidade de enfrentar estes desafios tem sido, contudo, cada vez mais aceite no ramo da engenharia e construção, tornando-se não só num aspeto de ética, como também num objetivo transversal ao governo e à indústria, onde os profissionais representam um papel fundamental no desenvolvimento de novas soluções. Para tal, é necessária a compreensão da função do engenheiro civil e da sua relação com o mundo que o rodeia, adaptando o seu conhecimento e engenho à realidade que se experiencia, por mais desagradável que seja, que é uma realidade com recursos naturais limitados, acompanhada por preocupações ambientais e complexos problemas sem respostas simples e claras [8].

As emissões de CO₂, intimamente associadas ao fenómeno de aquecimento global, estão mais do que nunca a ser alvo de atenção por parte dos governos em todo o mundo. Contudo, enquanto alguns se limitam a respeitar os objetivos definidos pelo Protocolo de Quioto, outros procuram ir mais além, como o Reino Unido, que estabeleceu o objetivo de reduzir em 60% as emissões de CO₂ até ao ano 2050. O setor da construção, enquanto uma das principais fontes de emissão de CO₂ a nível global, deve assim procurar o desenvolvimento de soluções que promovam a sustentabilidade, o que implica uma participação do engenheiro nas várias partes do processo, desde o planeamento à construção em si. Naturalmente, tal postura exige um interesse por parte do mesmo na redução dos impactes ambientais, não só enquanto profissional, mas também como cidadão [8].

Existem diversas formas de mitigar o impacte de uma estrutura no ambiente. Aquando da especificação de materiais a utilizar na produção de uma estrutura, a preferência por materiais recuperados e reciclados ao invés da exploração de recursos naturais em escassez para posterior modificação e utilização, comum na construção tradicional, é uma das soluções possíveis. Na composição do betão, por exemplo, é cada vez mais comum a incorporação de materiais recuperados (como a adição de cinzas volantes) e estima-se que este tipo de solução seja cada vez mais empregue [8].

De forma semelhante, a otimização do ciclo de vida de uma estrutura pode, por exemplo, conduzir a um custo total inferior comparativamente ao que será originado quando se minimiza simplesmente o custo inicial da mesma, não tendo em consideração operações futuras de manutenção e desconstrução. Hoje em dia, já existem estruturas dimensionadas tendo em consideração este aspeto, sendo exemplo a ponte pedestre Traversina, projetada por Jürg Conzett (ver Figura 2.4), construída recorrendo a pequenas secções de madeira disponível nas imediações. Uma característica essencial nesta estrutura

foi a possibilidade de substituir qualquer uma das suas partes sem o auxílio de suporte adicional o que, tendo em conta a sua localização remota e de difícil acesso, possibilita a sua manutenção utilizando madeira local. Esta particularidade permitiu assim alcançar uma estrutura elegante, com um custo de ciclo de vida reduzido e um bom desempenho a nível ambiental [8].



Figura 2.4 – Ponte Traversina, Suíça, por Jürg Conzett, 1996

Numa realidade em que se começa a tornar evidente que a conceção estrutural não se encontra otimizada para a minimização dos custos do ciclo de vida da estrutura a nível económico e também de impacte ambiental, surge a necessidade de se criar uma visão mais holística por parte dos profissionais, professores e investigadores, visando um progresso na conceção e construção sustentáveis.

2.3.2 Madeira: um recurso sustentável

“Given a free choice, human beings prefer to live and work in buildings that feature visible and accessible timber. Timber’s sensual qualities: its distinctive colours, surface textures and aromas, speak to something fundamental in the human psyche. Metal and concrete fail to resonate in the same way; only stone has something of the same appeal. This preference may be hardwired into our genes, the legacy of countless generations over the millennia who have turned to timber for shelter and warmth, and who learned how to recognise and exploit the diversity of physical and chemical properties available in the world’s forests.” Michael Dickson e Dave Parker em Sustainable Timber Design, 2015

Nas primeiras décadas do século XXI, e com o estímulo da sustentabilidade, a madeira está a viver um período de renascimento. Apesar da preferência humana pelas qualidades da madeira enquanto produto natural, acima referidas, o recurso à madeira enquanto material estrutural entrou em declínio durante a Revolução Industrial, tendo sido substituída pelo aço, ferro e betão armado que, além de incombustíveis, ofereciam características mais previsíveis. No entanto, particularmente nas habitações, a procura por elementos de madeira exposta como vigas em carvalho ou pisos em pinho, demonstra ainda hoje o desejo humano em integrar a madeira como parte do que o rodeia [10].

Devido aos progressos na tecnologia da madeira, especialmente na área dos adesivos, conservantes e resistência ao fogo, tornou-se possível o fabrico de produtos industrializados como vigas e arcos em madeira lamelada colada (MLC), painéis em madeira lamelada cruzada (CLT) ou vigotas em I. Estes produtos são consideravelmente mais estáveis e previsíveis em comparação com as secções de madeira serrada tradicional, permitindo um incremento de confiança na sua utilização e no seu desempenho aquando do dimensionamento e análise de estruturas. O crescimento do seu domínio enquanto material estrutural está também associado à sua origem em florestas cada vez mais geridas de forma sustentável, permitindo às sociedades em praticamente todo o mundo o acesso a um material de construção renovável e versátil, encorajando desta forma a preservação florestal com benefícios para as populações locais [10].

Um aspeto a ter em consideração quando se fala em sustentabilidade de um material corresponde à energia incorporada no mesmo, desde o processo de extração da matéria-prima até à sua deposição, incluindo a energia utilizada em todas as fases do seu transporte e na construção em si (ciclo “*from cradle to grave*” ou “do berço ao caixão”). Uma parte significativa do consumo de energia no ciclo de vida de uma estrutura corresponde à energia incorporada nos seus constituintes, e comparativamente à produção dos materiais mais comuns na construção com um intenso recurso a combustíveis fósseis (em particular o aço e o alumínio), a madeira é caracterizada por um menor impacte no ciclo do carbono (Tabela 2.2). Ainda neste ponto, é importante lembrar que a madeira, além de não emitir quantidades relevantes de CO₂ em todo o seu processo de produção quando comparada com outros materiais na indústria como referido, tem ainda a capacidade de o retirar da atmosfera a uma escala elevada, sequestrando-o até que esta seja queimada (ver Tabela 2.3) [11, 12].

Tabela 2.2 – Combustível fóssil necessário na produção dos mais comuns materiais de construção
(adaptado de Ferguson et al., 1996) [13]

Material	Fossil fuel energy (MJ/kg)	Fossil fuel energy (MJ/m3)
Rough sawn timber	1.5	750
Steel	35	266000
Concrete	2	4800
Aluminium	435	1100000

Por fim, é importante referir que a ideia de que a colheita florestal conduz a uma eliminação perpétua das árvores enquanto principal fonte de absorção de CO₂, não vai de encontro à realidade. A capacidade de uma árvore em absorver carbono diminui com a sua idade³, sendo essencial um processo de reflorestação com uma periodicidade que permita tirar partido das suas capacidades, sem que, no entanto, seja comprometida a sua sustentabilidade [11].

Tabela 2.3 – Níveis de libertação e sequestro de CO₂ nos materiais de construção mais comuns
(adaptado de Ferguson et al., 1996) [13]

Material	Carbon released (kg/t)	Carbon released (kg/m3)	Carbon stored (kg/m3)
Rough sawn timber	30	15	250
Steel	700	5320	0
Concrete	50	120	0
Aluminium	8700	22000	0

2.3.3 Inovação em conceitos, ferramentas e projetos

A transição para uma política de baixo carbono oferece à nossa indústria uma série de oportunidades de crescimento. Preocupações a nível ambiental impulsionam uma transformação na forma como as estruturas são construídas, no modo como os materiais são utilizados e nos métodos aplicados. É portanto a altura indicada para a exploração de novas ideias, técnicas e ferramentas, fomentada pelo progresso tecnológico na área da madeira, visando uma otimização estrutural e construtiva que se possa refletir de forma positiva num futuro a curto, médio e longo prazo.

³ Uma plantação florestal sequestra, em média e por ano, entre uma a dez toneladas de carbono por hectare, por um período de aproximadamente 30 anos.

Entre inúmeros progressos já ocorridos nesta área, são apresentados neste ponto e de forma geral, um conceito, uma ferramenta e um projeto experimental que provam a dinâmica do setor.

2.3.3.1 *Passivhaus*

O conceito de *Passivhaus* (termo alemão) teve origem em 1991, com uma abordagem à conceção passiva de uma habitação em Darmstadt, Alemanha, pelo físico Wolfgang Feist em conjunto com Bo Adamson, tendo como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de uma casa de reduzido consumo energético. A experiência foi bem-sucedida tanto a nível de consumo de energia como de conforto e o conceito de casa passiva é, hoje em dia, um dos expoentes máximos em performance estrutural [14].

O princípio da *Passivhaus* (Passive House ou Casa Passiva) consiste no equilíbrio de três elementos: energia, qualidade e custo, tendo em atenção um comportamento eficiente a nível de aquecimento, arrefecimento e conforto térmico. Para maximizar tal desempenho, é necessária uma harmonia entre a fase de projeto e a fase de construção, onde as especificações e os detalhes estruturais representam um papel essencial para atingir o objetivo. Isolamento de alto desempenho, bom comportamento hermético, minimização de pontes térmicas e aproveitamento da energia solar através da orientação das janelas a Sul são os principais aspetos a ter em consideração na conceção deste tipo de casas. Deste modo, procura-se uma redução na operação e manutenção de aparelhos energéticos por parte dos ocupantes sendo, neste caso, o próprio edifício a realizar o trabalho [14].

No Reino Unido foram já construídas diversas habitações, denominadas de *Greenhouses* (ilustradas na Figura 2.5), certificadas com base nesta referência, permitindo aos seus ocupantes não só poupar até 90% em contas a nível energético, mas também usufruir de uma melhoria na qualidade do ar no seu interior. *Passivhaus* pode assim ser visto como um conceito de construção que se rege por um conjunto de princípios rigorosos e certificados que se provaram funcionais e eficazes ao longo do tempo através da sua eficiência energética e do seu carácter acessível (tendo em conta a redução nos custos de manutenção a longo prazo) e ecológico [14].



Figura 2.5 – Aplicação do conceito *Passivhaus*: *Sulgrave Gardens*, Reino Unido

2.3.3.2 *Life Cycle Assessment*

Life Cycle Assessment (LCA), ou Análise do Ciclo de Vida (ACV), previamente conhecido como *Life Cycle Analysis*, é um processo de compilação e avaliação de dados de entrada, de resultados e de potenciais impactes ambientais associados a um produto, ao longo do seu ciclo de vida, ou a uma atividade [15, 16]. O LCA surgiu nos anos 60 associado ao interesse na conservação e projeção da disponibilidade futura de energia e recursos e em 1997, com a crescente pressão para normalizar a sua metodologia, passou a ser certificado pela série de normas ISO 14000, sendo revisto e estruturado em 2006 por:

- BS EN ISO 14040 – *Principles and framework* [17];
- BS EN ISO 14044 – *Requirements and guidelines* [18],

onde a primeira norma (ISO 14040) se refere ao âmbito do LCA, incluindo as suas limitações, e a ISO 14044 se foca na preparação e no empreendimento de um estudo. Tal estudo é levado a cabo através de um processo que envolve a recolha e o tratamento de elevadas quantidades de informação relacionadas com um determinado produto ou atividade, onde o nível de precisão na informação obtida e suposições criadas aquando da falta desta condicionam a qualidade do estudo em causa. Para esse efeito, o LCA tem em conta os impactes durante a pré-produção (extração matéria-prima, por

exemplo), fabrico, distribuição, fase de serviço e desconstrução (ver Figura 2.6) [15, 16].

O LCA é hoje em dia reconhecido como uma ferramenta, ainda em desenvolvimento e aplicável em diversas áreas que, através da avaliação de conceitos complexos e subjetivos, permite a determinação de impactes ambientais em grande escala. De um modo mais objetivo, a determinação do impacte ambiental de um produto ou atividade recorrendo ao LCA, conduzida pelo *Building Research Establishment* (BRE) [19], é realizada tendo em conta os seguintes indicadores ou categorias:

- Alterações climáticas;
- Consumo de água;
- Consumo de recursos minerais;
- Redução da camada do ozono;
- Potencial de formação de smog
- Toxicidade humana;
- Ecotoxicidade para a água doce;
- Resíduos nucleares (alto nível);
- Ecotoxicidade para a terra;
- Eliminação de resíduos;
- Redução dos combustíveis fósseis;
- Potencial de eutrofização;
- Potencial de acidificação.

No entanto, como em todas as ferramentas, o LCA tem as suas limitações. O elevado custo associado à recolha de dados, dado o seu carácter moroso; a subjetividade e incerteza que conduzem à criação de extrapolações; a visão instantânea baseada somente na informação adquirida no decorrer do estudo e a não integração do aspeto social e económico da sustentabilidade na avaliação do impacte ambiental são algumas delas, promovendo a atração de algumas críticas [15].

No que diz respeito ao seu processo este é, de forma geral, dividido em quatro fases distintas:

- 1) Definição do objetivo e do âmbito do estudo, contextualizando-o;
- 2) Criação de um inventário, incluindo toda a informação relevante para o sistema (*inputs e outputs*);
- 3) Avaliação dos impactes ambientais, segundo indicadores definidos;
- 4) Interpretação de resultados.

No Reino Unido, a entidade BRE, acima referida, opera o sistema mais bem estabelecido de LCA no setor da construção. Mais particularmente na área da madeira, os princípios e critérios de avaliação do seu impacto durante o ciclo de vida, encontram-se descritos na compilação “*BRE Digest 470: Life cycle impacts of timber*” [20]. A existência desta entidade e a sua metodologia permitem uma abordagem única e consistente ao LCA de todas as categorias de produtos de construção, criando desse modo uma normalização que torna credível e eficaz a comparação entre os mesmos [15].



Figura 2.6 – Fases do processo de *Life Cycle Assessment* [20]

2.3.3.3 *LifeCycle Tower One*

A estrutura *LifeCycle Tower One* (LCT), localizada na cidade de Bregenz, Áustria, foi primeira estrutura experimental desenvolvida pela companhia Rhomberg Bau, no âmbito do projeto “Creative Renewable Energy & Efficiency”, tendo como finalidade demonstrar e desenvolver a viabilidade de um sistema de construção em madeira energeticamente eficiente e aplicado em edifícios altos, localizados em áreas urbanas com elevada densidade populacional. A estrutura foi concebida à luz do conceito *Passivhaus* e é composta por oito pisos, sendo os dois primeiros construídos em betão armado, contendo áreas de retalho, e os restantes construídos em madeira. O núcleo da estrutura é composto por pilares de madeira lamelada colada (MLC) e por paredes revestidas à prova de fogo [21, 22].

A construção em altura recorrendo à madeira como principal material estrutural apresenta vários obstáculos, sendo dois deles a resistência ao fogo e o comportamento acústico da estrutura. Nesse sentido, foram utilizados compósitos de madeira e betão como lajes, onde a camada de betão é prolongada sobre os pilares em madeira lamelada colada, dividindo-os por níveis, prevenindo desta forma a propagação vertical de fogo entre pisos (ver Figura 2.7). O recurso a lajes compósitas de madeira e betão permite também fazer face às exigências não só a nível térmico, mas também acústico. Outra medida desenvolvida para compensar a combustibilidade da madeira consistiu na instalação de um sistema de aspersores e de detetores de fumo, assim como no uso de elementos estruturais sem qualquer cavidade, prevenindo também desta forma a propagação de fumo e de fogo [23].



Figura 2.7 – Laje compósita de madeira e betão, *LifeCycle Tower One* [22]

No que diz respeito à sustentabilidade desta estrutura experimental, as principais diretrizes em fase de projeto consistiram na opção por elementos pré-fabricados, minimizando o tempo de construção; uma configuração e estrutura flexíveis, um bom comportamento energético e a minimização do impacto ambiental. Este último aspeto foi conseguido através do recurso à madeira como substituto dos materiais de construção convencionais, reduzindo as emissões de CO₂ em aproximadamente 320 toneladas e permitindo o sequestro de mais de 260 toneladas do mesmo [22].

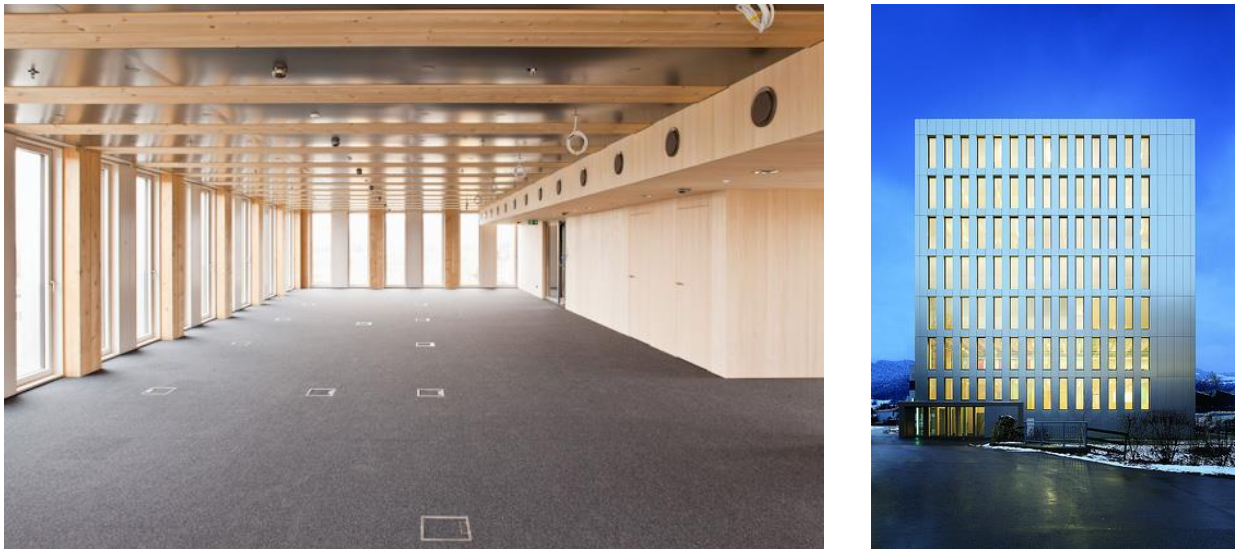


Figura 2.8 – Interior e exterior da estrutura *LifeCycle Tower One*, Bregenz, Áustria [21]

3 MADEIRA: COMPREENDER O MATERIAL

“To use wood with intelligence, we must first understand wood.” Frank Lloyd Wright, 1928

3.1 Estrutura da madeira

A madeira é um recurso anisotrópico oriundo da árvore e a sua estrutura apresenta-se otimizada para as circunstâncias às quais esta foi exposta durante o seu crescimento. Isto conduz a uma forma arredondada, de modo a resistir a intensas ações de vento; à criação de ramos para o suporte de folhas (ou agulhas) que fazem parte do processo de fotossíntese; à acumulação de elementos químicos no seu interior para fazer frente a eventuais situações de exposição a uma ameaça, bem como à produção de madeira de reação, no caso de árvores inclinadas, otimizando os seus esforços internos para um estado de equilíbrio. De modo a minimizar o risco de esmagamento por elevados esforços de compressão, a árvore desenvolve também ao longo do seu crescimento pré-esforços internos, denominados como tensões de crescimento [6]. Estes são alguns exemplos de como a árvore em si consiste numa estrutura otimizada autonomamente para o seu período de vida. No entanto, nem todas estas características são benéficas para a produção de madeira para uso estrutural, sendo para isso necessária uma compreensão da sua estrutura a um nível microscópico e respetiva influência no comportamento do material.

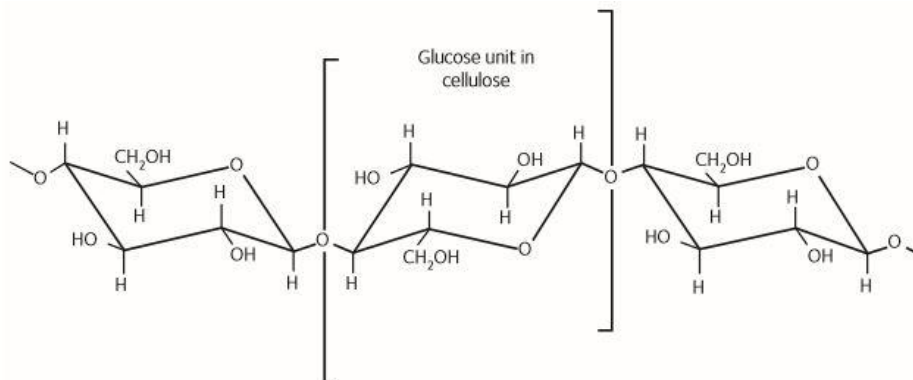


Figura 3.1 – Estrutura básica da molécula de celulose [6]

A madeira, sendo um compósito natural, é composta essencialmente por três elementos: carbono (50%), oxigénio (44%) e hidrogénio (6%) sob a forma de celulose, hemicelulose e lenhina. Nas espécies de madeira macia referidas no subcapítulo 2.2, as proporções destes constituintes são aproximadamente 40 a 45% de celulose, 25 a 30% de hemicelulose e 25 a 35% de lenhina, polímero tridimensional responsável por conferir rigidez, resistência e impermeabilidade a ataques externos. A

celulose, por sua vez, consiste num polímero de cadeia longa formado por unidades de glicose (ver Figura 3.1), em que o grupo hidroxilo (OH^-) presente nas extremidades de cada uma destas permite a formação de uma ponte de hidrogénio com o monómero seguinte, dando origem a microfibrilas insolúveis e compactas. A celulose, a lenhina e a hemicelulose, polímero semelhante à celulose, mas dotado de um menor número de ramificações, formam a parede celular da madeira [6].

O tipo de célula mais comum nas espécies de madeira macia é o traqueídeo, dotado de uma forma cilíndrica e alongada, com uma parede celular composta por quatro camadas distintas, com diferentes orientações a nível de filamentos (ver Figura 3.2). Na fina camada externa, também denominada por parede primária (P), estes apresentam-se aleatoriamente dispostos. No interior desta camada encontra-se a referida parede celular, constituída por três camadas, onde a primeira e terceira (S_1 e S_3) contém filamentos dispostos em variados ângulos, com uma tendência para uma disposição perpendicular à direção da célula no seu comprimento, e cuja principal função consiste em manter a sua forma. Entre estas, encontra-se uma outra camada mais espessa (S_2), que representa cerca de 85% da espessura total da parede celular, conferindo-lhe grande influência sobre as propriedades da célula no seu total, e cujos filamentos se apresentam orientados de forma aproximadamente paralela à direção longitudinal da célula. As células encontram-se ligadas por uma fina camada de lenhina, também denominada como lamela média, que funciona como um adesivo entre estas [6].

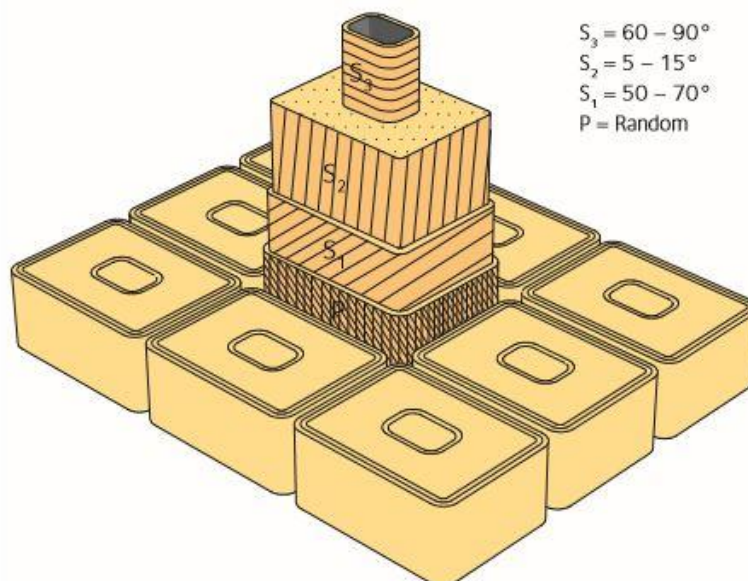


Figura 3.2 – Estrutura de uma célula de madeira [6]

Uma árvore em crescimento produz, essencialmente na estação de Primavera, novas células na zona entre o borne (*sapwood*) e a casca (*bark*), designada por câmbio vascular (*cambium*). Durante esse período, dada a necessidade de uma elevada capacidade de transporte de água e nutrientes estas, reconhecidas como células de lenho inicial (*earlywood* ou madeira de Primavera), são caracterizadas por largas cavidades e paredes finas ($2\ \mu\text{m}$). Por outro lado, nas estações de Verão e Outono, a necessidade de incrementar a sua resistência face a ações de vento e neve, conduz à produção de células com paredes mais espessas ($10\ \mu\text{m}$) e cavidades de menor dimensão, designadas por células de lenho final (*latewood*) (ver Figura 3.3) [6, 25]. É importante referir que a percentagem deste último tipo de células tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas, descritas neste capítulo, do produto final.

Na realidade, as únicas células realmente ativas, isto é, com capacidade para a divisão celular, encontram-se no câmbio vascular. Já na zona do borne, as células realizam o transporte de água e nutrientes, facilitado pelo seu carácter mais ou menos poroso, que dita a sua permeabilidade. No cerne (*heartwood*), área limitada pela medula (*pith*) e pelo borne, a árvore acumula substâncias para sua própria proteção face a ataques biológicos [6]. Esta zona, facilmente identificada em madeiras coníferas pela sua cor, confere também rigidez e suporte a todo o sistema.

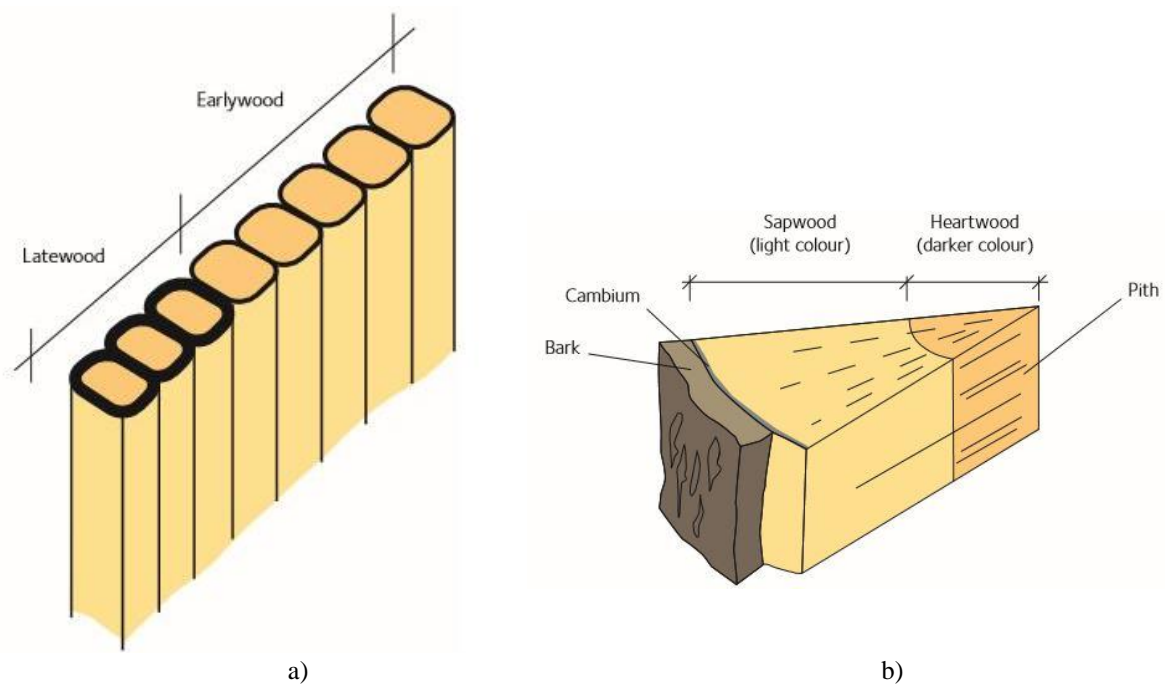


Figura 3.3 – Estrutura da madeira resinosa: a) Princípio de desenvolvimento da parede celular; b) Corte transversal de um tronco [6]

3.2 Características naturais da madeira

Como referido no subcapítulo anterior, a árvore consiste numa estrutura otimizada, por natureza, consoante as suas necessidades. Como tal, algumas das suas características, apesar de essenciais, são consideradas de um ponto de vista de utilização estrutural como defeitos, tais como:

3.2.1 Nós

Toda a árvore, para fins de respiração, transpiração e fotossíntese, necessita de folhas ou agulhas. A área exigida para que tais processos possam ocorrer é de tal dimensão que é necessária uma distribuição destes elementos através de ramos. Com o passar do tempo, a acumulação de material formando novas camadas em torno dos ramos e no interior do tronco, unidos pelo mesmo sistema de tecidos (xilema), consolida e fortalece a sua ligação, à qual se dá o nome de nó (ver Figura 3.4). A presença de nós tem consequências sobre as propriedades mecânicas da madeira para construção, particularmente pela distorção das fibras que se gera em torno deste, aumentando as deformações longitudinais e laterais quando sujeito à ação de cargas. A não continuidade na direção principal destas fibras tem, portanto, um impacto a nível de resistência do elemento em causa, com diferentes intensidades consoante o número, dimensão, forma e localização dos nós. Naturalmente, quanto menor for o número e a dimensão dos mesmos, maior será a qualidade desse elemento [6, 26].

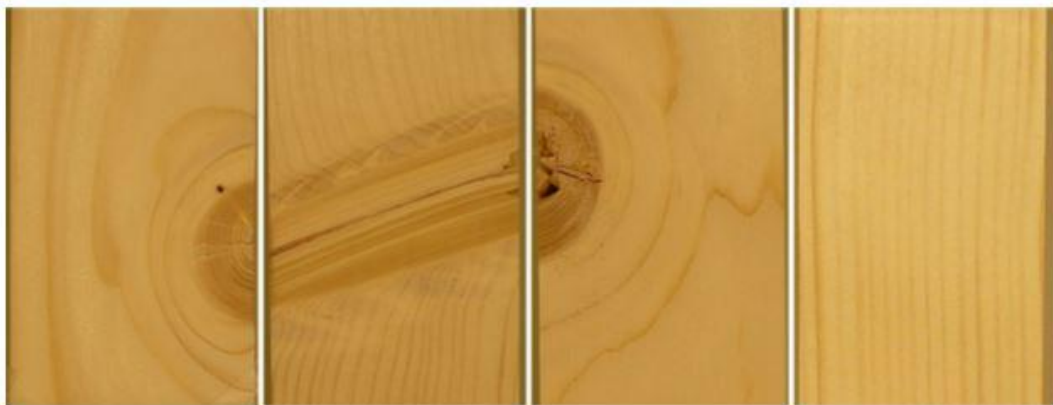


Figura 3.4 – Exemplo de um nó de aresta num espécime de madeira [6]

3.2.2 Ângulo das fibras

As fibras da madeira podem ter a tendência de se desenvolver sob a forma de espiral em torno do tronco, conferindo à árvore uma maior flexibilidade quando sujeita à ação do vento (ver Figura 3.5). No entanto, consoante o ângulo que as fibras formam relativamente à medula, cuja orientação é vertical, as propriedades da madeira são alteradas. Existe uma influência direta entre o incremento deste ângulo com a perda de resistência da madeira, principalmente a esforços de tração e compressão e, caso a inclinação seja demasiado elevada, poderão também ocorrer fenómenos de fendilhação e consequente desvalorização na sua classificação (ver Tabela 3.1) [6, 24].



Figura 3.5 – Fibras de pinheiro desenvolvidas sob a forma de espiral, em ambos os sentidos

Tabela 3.1 – Efeito do ângulo das fibras nas propriedades resistentes da madeira
(*Structural Timber Design to Eurocode 5 de acordo com BS EN 338-2003: Table 1*)

Slope of grain	Bending strength (%)	Compression parallel to grain (%)	Impact loading (%)
Straight grain	100	100	100
1 in 20 (3°)	93	100	95
1 in 10 (6°)	81	99	62
1 in 5 (11.5°)	55	93	36

3.2.3 Madeira de reação e madeira juvenil

Uma outra característica natural da madeira é a produção do chamado lenho de reação. A razão pela qual esta madeira é produzida consiste na tendência da árvore em manter a sua posição de equilíbrio

estático predeterminada geneticamente. Qualquer deslocamento que alguma parte desta sofra resulta na formação de madeira de reação, contrariando o esforço existente e fazendo com que o elemento deslocado volte à sua posição original [6]. A madeira de reação presente nas espécies coníferas é considerada como madeira de compressão, enquanto que a madeira de tração é associada a árvores folhosas. No âmbito deste relatório, interessa particularmente compreender a influência da madeira de compressão, uma vez que as espécies mais utilizadas para fins estruturais são as de madeira macia (coníferas). Uma das principais características da madeira de compressão consiste na sua reduzida permeabilidade e baixo módulo de elasticidade comparativamente à madeira comum, tornando-a mais frágil em termos de fratura. Tal deve-se ao facto das suas fibras se apresentarem curtas e de forma arredondada, dotadas de paredes celulares significativamente mais espessas, conduzindo à criação de espaços intercelulares que dificultam a ligação entre estas [6]. Esta característica, quando ocorre de forma severa, provoca uma assimetria nas características e no comportamento da peça, determinando a sua viabilidade enquanto elemento estrutural.

A denominada madeira juvenil (*juvenile wood*), por sua vez, é formada somente nos primeiros 5 a 20 anos de idade da árvore, estando presente nos primeiros anéis junto à medula. É caracterizada pela sua constante alteração a nível de dimensão, propriedades e organização celular, tornando-se mais imprevisível e, conseqüentemente, menos desejável relativamente à madeira adulta (*mature wood*). Propriedades como o comprimento e resistência das células, retração longitudinal e transversal, espessura da parede celular e percentagem de células do lenho final encontram-se, na madeira juvenil, ainda num estado de desenvolvimento (ver Figura 3.6) [6, 24]. Por outro lado, a madeira adulta apresenta maior estabilidade a nível das características acima apresentadas, tornando-se preferencial para a aplicação estrutural.

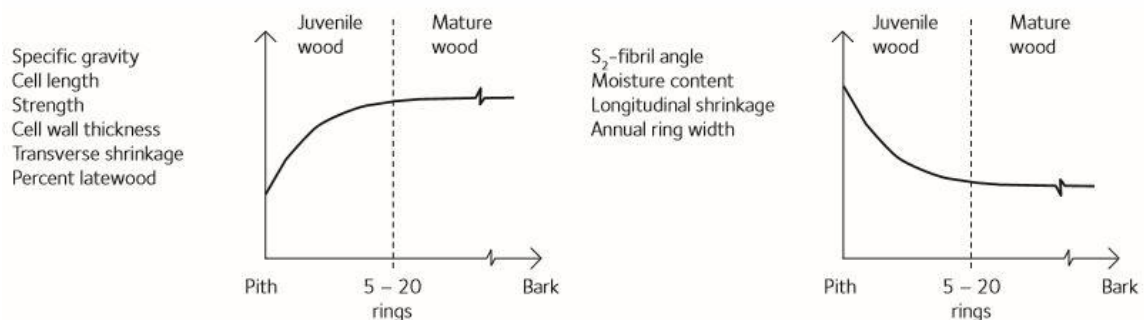


Figura 3.6 – Transição de propriedades da madeira juvenil para adulta [6]

3.3 Propriedades físicas

3.3.1 Teor em água

O teor em água representa um dos fatores externos com maior influência sobre as propriedades da madeira. Quando ocorre a entrada de água numa peça de madeira seca, as suas moléculas ligam-se, através dos grupos hidroxilos presentes na celulose, às paredes celulares. Quando já não existe a possibilidade de formar ligações às paredes, as moléculas de água começam a ocupar o interior das cavidades celulares. Todo este processo depende, no entanto, da humidade relativa do ar em seu redor [6]. O teor em água na madeira ou, por outras palavras, a quantidade de água presente no material, expressa-se de forma geral em percentagem relativa à sua massa seca, através da seguinte expressão:

$$t. a = \frac{m_h - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (3.1)$$

em que:

- $t. a$ teor em água , em %;
- m_h massa da madeira húmida;
- m_s massa da madeira após secar a 103°C durante 24 horas.

A água tanto é adsorvida como dessorvida pela madeira, contrariando a tendência que parte da população tem, pelo desconhecimento do comportamento do material, de assumir que a água é um aspeto fatal neste tipo de estruturas. É essencial compreender que ambos os processos ocorrem em simultâneo e que quando estes se igualam, isto é, quando o nível de adsorção e de dessorção é idêntico, atinge-se o chamado teor em água de equilíbrio, novamente em função da humidade relativa do ar [6, 24].

Aquando do processo de secagem controlada em fábrica, como referido no subcapítulo 2.2, é importante conhecer o destino das peças, procurando aproximar o melhor possível o valor do teor em água com que a peça sai da fábrica ao teor em água médio do local onde esta será instalada, evitando assim fenómenos de dilatação ou retração severos. A madeira, enquanto material, irá sempre adaptar-se ao ambiente que a rodeia e, quanto maior forem as discrepâncias entre ambos, mais moroso será o processo de adaptação.

No que diz respeito ao dimensionamento de estruturas de madeira, o principal critério relacionado com o teor em água é a classe de serviço. Tanto o Eurocódigo 5 [27] como o BS 5268-2 [28] definem três classes de serviço distintas, consoante as condições de exposição, nomeadamente a temperatura e a humidade relativa do ar. Na maioria dos casos, as estruturas são dimensionadas para a classe de serviço 1, caracterizada por um teor em água correspondente a uma temperatura de 20°C e por uma humidade relativa que não exceda o valor de 65% (caso exceda, por poucas semanas em cada ano), cuja utilização final do produto passa pela aplicação interna em edifícios permanentemente aquecidos (Tabela 3.2). Para tais condições, é aconselhado um teor em água em serviço⁴ que não exceda os 12% [29].

Tabela 3.2 – Classes de serviço especificadas no Eurocódigo 5 e no BS 5268-2 (TRADA, 2011)

Service Class		End use examples	Average in-service moisture content
1	Characterised by a moisture content corresponding to a temperature of 20°C and relative humidity of surrounding air exceeding 65% for a few weeks each year	Internal uses in continuously heated buildings	In most softwood will not exceed 12%
2	Characterised by a moisture content corresponding to a temperature of 20°C and relative humidity of surrounding air exceeding 85% for a few weeks each year	Covered and generally heated	Moist softwoods will not exceed 20%
		Covered and generally unheated	
3	Characterised by a moisture contents higher than those in Class 2	External uses, fully exposed	20% +

Outro conceito a referir diz respeito ao ponto de saturação das fibras (PSF), que corresponde ao teor em água presente quando as paredes celulares se encontram totalmente preenchidas pelas moléculas de água, mas as cavidades ainda se encontram vazias. Nas espécies anteriormente referidas, características da Europa, esse ponto ocorre aproximadamente aos 28% de teor em água. Valores inferiores a este conduzem à remoção da água ligada às paredes celulares, provocando uma progressiva retração da madeira à medida que esta seca e um incremento da sua resistência mecânica. Por outro lado, caso o teor em água aumente após atingir o ponto de saturação das fibras, onde as suas propriedades resistentes atingem o seu mínimo, ocorrerão fenómenos de dilatação na madeira. De modo a permitir uma melhor visualização da influência da água no comportamento da madeira, encontram-se ilustradas, na Figura 3.7, as várias fases da sua libertação progressiva, tendo início num ponto de saturação do material (esquerda), passando pelo ponto de saturação das fibras (centro), culminando na perda de água por parte das paredes celulares e sua consequente retração (direita) [6, 24, 29].

⁴ Madeira com valores de teor em água abaixo de 20% é suficientemente seca para prevenir degradação fúngica.

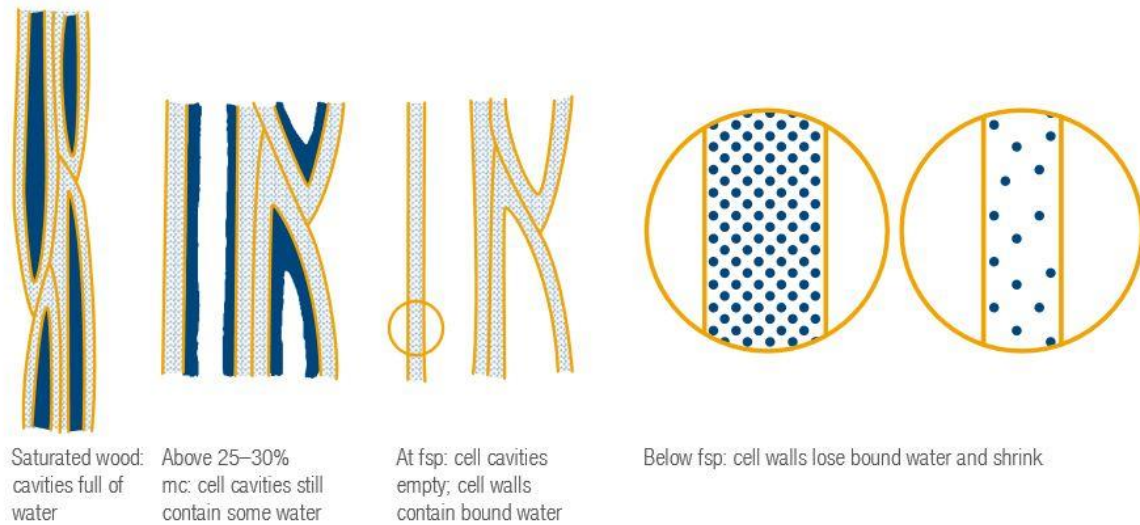


Figura 3.7 – Fases da libertação de água na madeira a nível celular (TRADA, 2011)

3.3.2 Retração e dilatação

Como referido no ponto anterior, a variação do teor em água na madeira provoca retração e dilatação da mesma, consoante este se encontre abaixo ou acima do ponto de saturação das fibras. A direção em que estes fenómenos ocorrem é maioritariamente determinada pela direção da camada da parede celular S2 (Figura 3.2), evidenciando a sua anisotropia. Uma vez que o ângulo que os seus filamentos formam com o eixo longitudinal da célula é, de forma geral, significativamente reduzido (5° a 15°), tanto a retração como a dilatação ocorrem essencialmente nas direções transversais (tangencial e radial). No entanto, a presença de madeira juvenil e de compressão, cujas camadas S2 apresentam uma inclinação mais acentuada, resulta numa maior retração na direção longitudinal (ver Figura 3.8) que, em peças significativamente longas, deverá ser tida em conta [6].

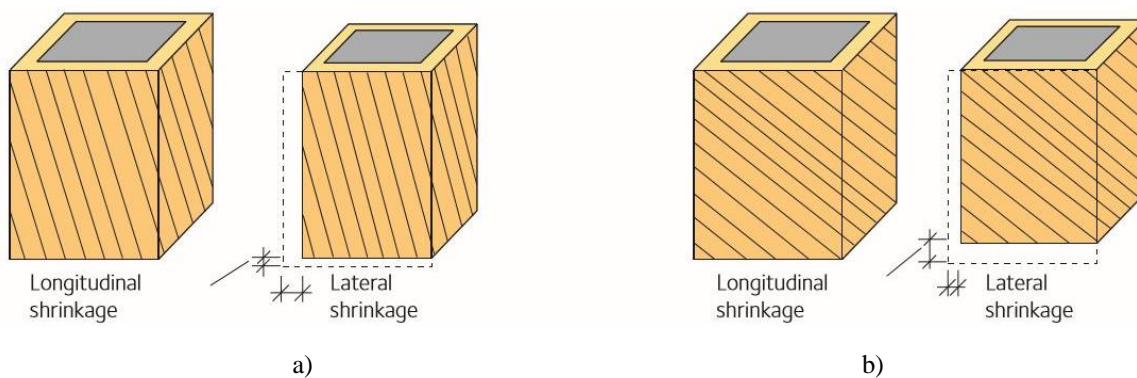


Figura 3.8 – Influência do ângulo das fibras na retração longitudinal e tangencial da madeira: a) em madeira adulta; b) na presença de madeira juvenil ou de compressão [6]

3.3.3 Distorção

A distorção é um fenómeno originado por alterações geométricas na secção transversal da madeira, dificultando a sua aplicação a nível estrutural. A variação da retração ao longo do tempo, a orientação dos anéis de crescimento e o ângulo das fibras são alguns dos fatores que desencadeiam este fenómeno. Existem essencialmente quatro modos de distorção: por encurvadura (*spring*), arqueada (*bow*), por torção (*twist*) e por meia cana (*cup*) (ver Figura 3.9) [6, 30].

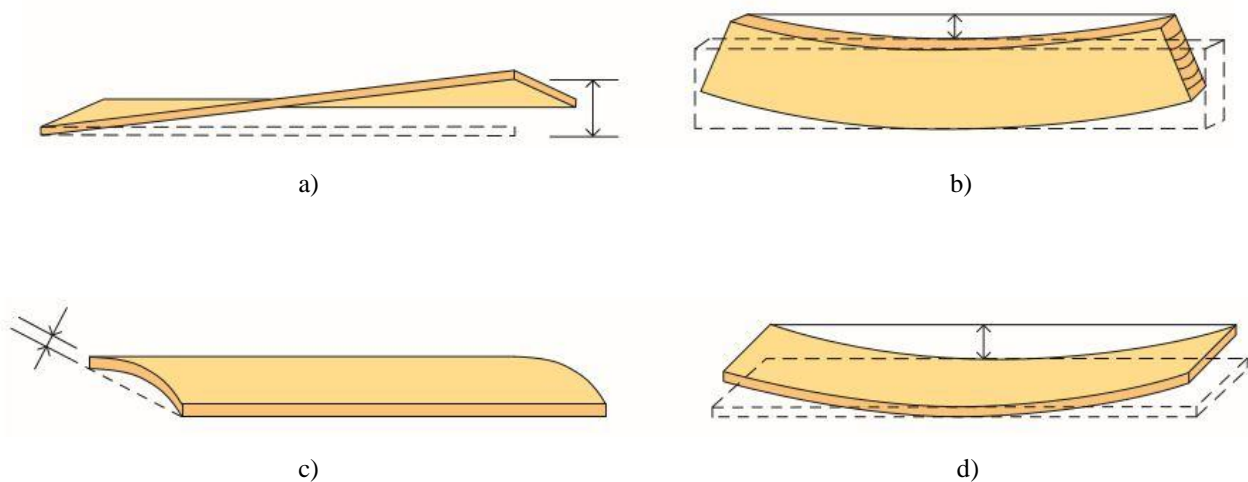


Figura 3.9 – Modos de distorção da madeira: a) *twist*; b) *spring*; c) *cup*; d) *bow* [6]

A distorção por encurvadura consiste no desvio vertical perpendicular ao plano do elemento de madeira em relação a uma linha reta entre as suas extremidades na direção longitudinal, enquanto que a distorção arqueada consiste, de forma semelhante, no desvio vertical no plano do elemento. Ambas as formas de distorção ocorrem não só por variações de retração longitudinal, mas também pela libertação de tensões na fase de corte do tronco. A distorção por torção, por sua vez, consiste numa deformação em forma de espiral desenvolvida segundo a direção longitudinal do elemento, onde o efeito combinado entre a curvatura de cada anel de crescimento, a retração transversal e a inclinação das fibras resulta na torção da peça, acentuada pela sua esbelteza. Este modo de distorção é o que carece de mais atenção no âmbito do uso da madeira na construção, dada a sua influência em elementos esbeltos frequentemente utilizados, como os montantes (*studs*). A distorção por meia cana (ou deformação em forma de canoa), por último, consiste num desvio vertical no plano do elemento em relação a uma linha reta entre as suas extremidades na direção transversal, devido principalmente à diferença entre os valores de retração tangencial e radial, aliada à forma circular dos anéis de

crescimento. Em termos de aplicação no setor da construção, este modo de distorção não causa, de forma geral, impacto significativo [6].

Existem, no entanto, várias formas de reduzir a intensidade destes fenómenos de distorção, principalmente na fase de secagem e corte da madeira em fábrica. Na secagem, o ajuste das condições às quais as peças são sujeitas, como a circulação do ar ou a aplicação de cargas sobre estas, pode mitigar a sua distorção, particularmente em situações em que o ângulo das fibras é significativamente elevado. Já nos padrões de corte da mesma, a não inclusão da medula nos elementos reduz também a probabilidade da ocorrência de distorção por torção [6].

3.3.4 Massa volúmica

A massa volúmica é a propriedade física da madeira que se encontra relacionada com a maioria das suas propriedades mecânicas e é expressa através da seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

em que:

- ρ massa volúmica, em kg/m³;
- m massa, em kg;
- V volume, em m³.

Uma vez que tanto o volume como a massa da madeira são dependentes do teor em água a massa volúmica é, por consequência, também dependente deste parâmetro, sendo definida em função do mesmo. Regra geral, recorre-se ao valor ρ_{12} para caracterizar um elemento de madeira na análise dos seus parâmetros de resistência, que corresponde ao volume e à massa da madeira com um nível de teor em água de 12%. Em média, nos países nórdicos, a madeira resinosa é caracterizada por uma massa volúmica entre 300 e 600 kg/m³ [6].

3.4 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas associadas à madeira, como a resistência à tração, à compressão e ao corte e a influência de fatores como o tempo e a temperatura variam consoante a presença de certas características naturais como os nós, a orientação das fibras ou a presença de madeira de reação e de madeira juvenil.

3.4.1 Resistência mecânica e rigidez

A madeira, sendo composta por células de forma cilíndrica e alongada, é caracterizada por uma variação de algumas das suas propriedades em função da direção considerada, isto é, por uma anisotropia. Como tal, aquando do estudo das suas propriedades resistentes, e de modo a que esta possa ser utilizada como elemento estrutural, é primordial compreender a diferença no seu comportamento quando sujeita a cargas com diferentes direções.

Na Figura 3.10 é possível verificar a existência de três direções (longitudinal (L), tangencial (T) e radial (R)) nas quais se desenvolvem esforços de tensão normais e de corte. Porém, na madeira produzida para construção, estas direções são reduzidas a tensão paralela à direção das fibras ($\sigma_{//}$ ou $\sigma_{//}$) e tensão perpendicular à direção das fibras (σ_{90} ou σ_{\perp}) [6].

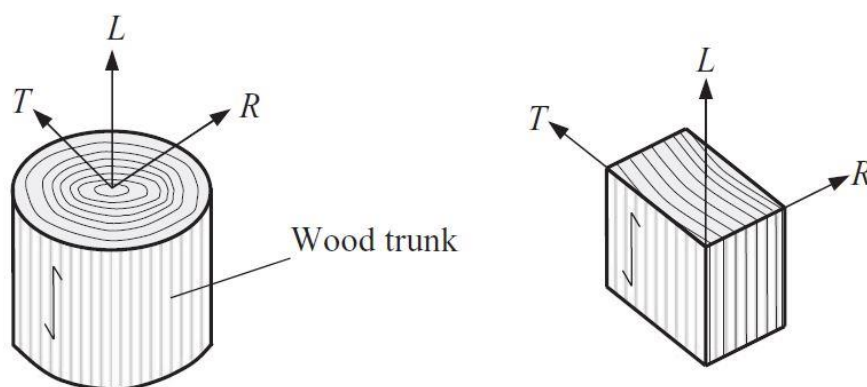





Figura 3.10 – Planos de corte nas três direções na madeira
(*Structural Timber Design to Eurocode 5*)

Como referido anteriormente, a determinação dos valores característicos de resistência, rigidez e massa volúmica média da madeira é realizada através de uma lista de equações que relacionam os valores característicos de resistência à flexão ($f_{m,k}$), massa volúmica (ρ_k) e módulo de elasticidade em flexão

paralela à direção das fibras ($E_{0,mean}$), com os restantes parâmetros, segundo a norma EN 338-2003 [7] (ver Tabela 2.1).

Na tabela abaixo apresentam-se os valores característicos (além dos que servem de base de cálculo para a determinação dos restantes) associados à resistência à tração paralela ($f_{t,0,k}$) e perpendicular ($f_{t,90,k}$) à direção das fibras; à compressão, de forma semelhante, paralela ($f_{c,0,k}$) e perpendicular ($f_{c,90,k}$) à direção das fibras e também ao corte ($f_{v,k}$). No que diz respeito a propriedades de rigidez, observam-se valores associados ao módulo de elasticidade em flexão paralela à direção das fibras correspondente ao quinto percentil ($E_{0,05}$), ao módulo de elasticidade em compressão ou tração perpendicular à direção das fibras ($E_{90,mean}$), bem como ao módulo de rigidez (G_{mean}). Por fim, são também apresentados valores correspondentes à massa volúmica média (ρ_{mean}). Todos estes parâmetros encontram-se dispostos por classes de resistência não só de espécies de madeira resinosa (C14 a C50), como também de espécies de madeira de folhosas (D30 a D70). No âmbito deste relatório, interessa particularmente a informação relativa às classes de resistência da madeira resinosa [24].

Tabela 3.3 – Propriedades de resistência e rigidez e valores de densidade para várias classes de resistência de madeira estrutural (*Structural Timber Design to Eurocode 5* de acordo com BS EN 338-2003: Table 1)

Strength class	Characteristic strength properties (N/mm ²)						Stiffness properties (kN/mm ²)				Density (kg/m ³)		 Bending parallel to grain: f_m and E_0 Shear: f_v and G	
	Bending	Tension	Tension	Compression	Compression	Shear	Mean	5%	Mean	Mean shear	Density	Mean		
	($f_{m,k}$)	0	90	0	90	($f_{v,k}$)	modulus of elasticity 0	modulus of elasticity 0	modulus of elasticity 90	modulus	(ρ_k)	density		
		($f_{t,0,k}$)	($f_{t,90,k}$)	($f_{c,0,k}$)	($f_{c,90,k}$)		($E_{0,mean}$)	($E_{0,05}$)	($E_{90,mean}$)	(G_{mean})		(ρ_{mean})	 Tension or compression parallel to grain: $f_{t,0}$, $f_{c,0}$ and E_0	
Softwood and poplar species	C14	14	8	0.4	16	2.0	7.0	4.7	0.23	0.44	290	350		 Tension or compression perpendicular to grain: $f_{t,90}$, $f_{c,90}$ and E_{90}
	C16	16	10	0.5	17	2.2	8.0	5.4	0.27	0.50	310	370		
	C18	18	11	0.5	18	2.2	9.0	6.0	0.30	0.56	320	380		
	C20	20	12	0.5	19	2.3	9.5	6.4	0.32	0.59	330	390		
	C22	22	13	0.5	20	2.4	10.0	6.7	0.33	0.63	340	410		
	C24	24	14	0.5	21	2.5	11.0	7.4	0.37	0.69	350	420		
	C27	27	16	0.6	22	2.6	11.5	7.7	0.38	0.72	370	450		
	C30	30	18	0.6	23	2.7	12.0	8.0	0.40	0.75	380	460		
	C35	35	21	0.6	25	2.8	13.0	8.7	0.43	0.81	400	480		
	C40	40	24	0.6	26	2.9	14.0	9.4	0.47	0.88	420	500		
C45	45	27	0.6	27	3.1	15.0	10.0	0.50	0.94	440	520			
C50	50	30	0.6	29	3.2	16.0	10.7	0.53	1.00	460	550			
Hardwood species	D30	30	18	0.6	23	8.0	10.0	8.0	0.64	0.60	530	640		
	D35	35	21	0.6	25	8.4	10.0	8.7	0.69	0.65	560	670		
	D40	40	24	0.6	26	8.8	11.0	9.4	0.75	0.70	590	700		
	D50	50	30	0.6	29	9.7	14.0	11.8	0.93	0.88	650	780		
	D60	60	36	0.6	32	10.5	17.0	14.3	1.13	1.06	700	840		
	D66	66	42	0.6	34	11.5	19.0	16.3	1.33	1.25	750	900		
	D70	70	42	0.6	34	13.5	20.0	16.8	1.33	1.25	900	1080		

Analisando a Tabela 3.3, é possível também verificar a discrepância entre as propriedades de resistência mecânica da madeira, tanto à tração como à compressão, paralelamente às fibras e perpendicularmente às mesmas. Esta diferença deve-se à variação de rigidez nas duas direções e, uma

vez que na direção perpendicular às fibras ($E_{90,mean}$) esta é significativamente inferior, as propriedades resistentes nessa direção são conseqüentemente afetadas, com especial ênfase na tensão por tração ($f_{t,90,k}$), que é entre 10 a 50 vezes inferior na direção perpendicular, nas espécies de madeira resinosa. Na figura 3.11 são ilustradas as propriedades de resistência mecânica da madeira resinosa em situações de carregamento axial puramente à compressão e à tração, em ambas as direções. Quando sujeita a uma tensão por tração paralela à direção das fibras, e apesar de apresentar elevada capacidade, a sua rutura é, de forma geral, significativamente frágil [6].

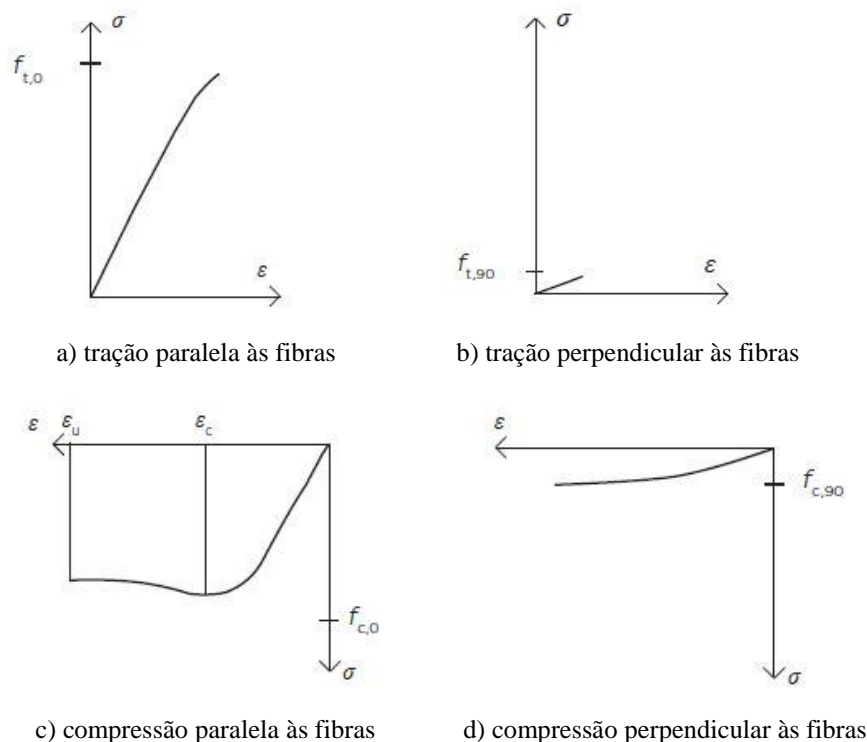


Figura 3.11 – Relações gerais tensão-extensão em madeira resinosa carregada axialmente [6]

3.4.2 Influência da duração da carga

A madeira sob a ação de cargas sofre uma significativa redução a nível de resistência ao longo do tempo. De entre as várias propriedades mecânicas, a resistência à flexão é a mais influenciada por este fator. De modo a compreender a relação entre a perda de resistência à flexão e a duração da carga aplicada, foi estabelecida uma curva nos anos 50, no laboratório *Forest Products Lab* em Madison, EUA, denominada de *Madison Curve* (ver Figura 3.12). Apesar de criticada por diversos autores e investigadores pelo seu carácter conservativo, onde estes defendem que a madeira enquanto elemento

estrutural com dimensões consideráveis para construção apresenta melhor comportamento comparativamente às amostras utilizadas nos testes que deram origem à *Madison Curve*, variando com a sua classe de resistência e intensidade da carga aplicada, esta relação resistência-tempo é maioritariamente aceite na Europa [6].

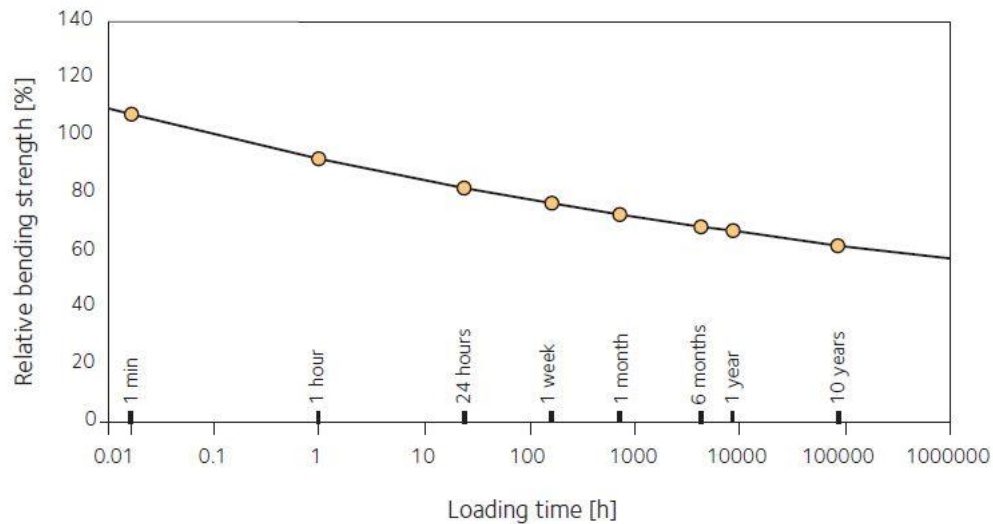


Figura 3.12 – Relação entre resistência à flexão (em %) e duração da aplicação da carga (em horas, h) [6]

De modo a ter em conta esta perda de resistência, são especificadas classes de duração de carga (*load duration classes*) segundo o EC5, 2.3.1.2 (ver Tabela 3.4). Na figura abaixo apresentada, podem ser também observados alguns exemplos de cargas associadas a diferentes classes de duração.

Tabela 3.4 – Definição das classes de duração de carga (*Structural Timber Design to Eurocode 5*)

Class	Period of time	Examples given in NA.2.1 of the UKNA to EC5
Permanent	> 10 years	Self-weight
Long term	6 months to 10 years	Storage loading (including in lofts) Water tanks
Medium term	1 week to 6 months	Imposed floor loading
Short term	<1 week	Snow Maintenance or man loading on roofs Residual structure after an accidental event
Instantaneous	Instantaneous	Wind Impact loading Explosion

Segundo o Eurocódigo 5, a influência da duração do carregamento e o teor em água são considerados em fase de projeto através de um só fator de modificação, o k_{mod} . Este parâmetro é atribuído em função da classe de serviço na qual a estrutura irá funcionar (caracterizada por um teor em água máximo) bem como da classe de duração de carga (ver Tabela 3.5). Deste modo, cada elemento estrutural poderá ter o seu próprio valor de k_{mod} , ainda que funcionando na mesma classe de serviço, consoante as cargas a que será sujeito [24, 27].

 Tabela 3.5 – Valores de k_{mod} para madeira e EWP [27]

Material	Standard	Service class	Load-duration class				
			Permanent action	Long term action	Medium term action	Short term action	Instantaneous action
Solid timber	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Glued laminated timber	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
LVL	EN 14374, EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Plywood	EN 636						
	Type EN 636-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	Type EN 636-2	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	Type EN 636-3	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
OSB	EN 300						
	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	OSB/3, OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	OSB/3, OSB/4	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90

3.4.3 Influência da temperatura e comportamento sob fogo

As propriedades resistentes e de rigidez da madeira são afetadas pela temperatura, tendendo a decrescer com o aumento da mesma. Esta influência não se faz sentir de forma significativa a temperaturas aproximadamente entre os -30°C e os 90°C não sendo, no entanto, aconselhável a sua exposição a temperaturas superiores a 70°C de forma contínua [6, 31].

Existe um equívoco comum relativo à resistência e segurança da madeira perante a ação do fogo, associado à não familiaridade e à falta de conhecimento em relação ao material. Apesar da madeira ser um material combustível, o seu desempenho sob fogo e a sua carbonização são previsíveis e mensuráveis, permitindo-nos a sua utilização de um ponto de vista estrutural [31]. Quando exposta ao fogo, a secção transversal da madeira é gradualmente reduzida a uma velocidade previsível,

denominada de taxa de carbonização, variável consoante a densidade da espécie. Contudo, a sua aptidão enquanto isolante térmico natural permite manter uma temperatura próxima à normal apenas uns milímetros abaixo da zona carbonizada, onde a madeira intacta mantém as suas propriedades resistentes originais (ver Figura 3.13). Esta previsibilidade permite, em fase de projeto, o dimensionamento de uma estrutura de madeira para um determinado período de resistência ao fogo (usualmente 60 minutos) [31].

Quando comparada com outros materiais dotados de maior condutibilidade térmica como o aço ou o alumínio, a madeira não tem a tendência de perder instantaneamente parte da sua capacidade resistente [31]. Numa situação de exposição ao fogo e na sua forma natural o aço, sendo um material não combustível irá derreter e entrar em rotura, enquanto que a madeira, apesar de combustível, irá carbonizar e manter a sua integridade. Com o desenvolvimento na área das ligações e respetivo detalhe direcionado para situações específicas, assim como na área dos produtos de madeira industrializados, tornou-se possível prevenir de uma forma mais eficiente problemas relacionados com a ocorrência de incêndio.

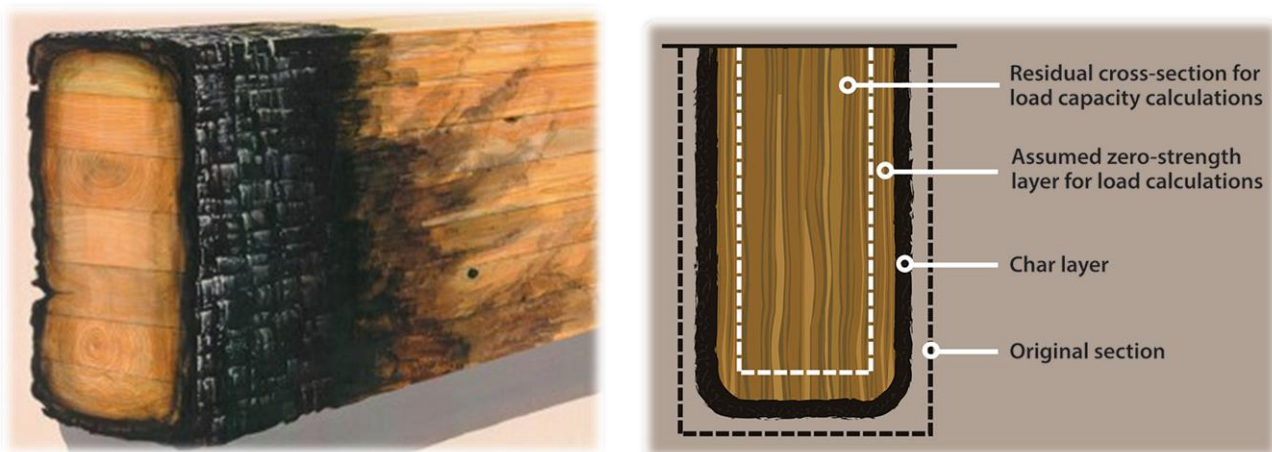


Figura 3.13 – Ilustração do comportamento da madeira sob ação de fogo [32]

3.4.4 Influência das dimensões

A madeira não é um material homogêneo e, devido às suas características naturais, existe uma variação nas suas propriedades resistentes, tanto longitudinalmente como transversalmente num elemento. Esta variação ocorre de forma aleatória, dificultando a criação de um padrão na sua distribuição. Como tal,

e tendo em consideração o carácter frágil em termos de rotura por tração associado à madeira, recorre-se usualmente à teoria do elo mais fraco (*weakest link theory*), através da distribuição de Weibull [33], onde o elemento é visto, quando sujeito a tensão por tração, como uma cadeia de elementos individuais com diferentes resistências, nas quais o valor mínimo ditará a capacidade resistente do elemento que o contém [24].

Dada a dificuldade em relacionar o volume das peças (variação em altura, largura ou comprimento) e a configuração do carregamento aplicado, com a sua capacidade resistente e distribuição de tensões, foi gerada uma incerteza que conduziu à simplificação na abordagem a estes efeitos por parte do EC5, desconsiderando alguns deles [27]. Para tal, foram incluídos fatores na determinação da capacidade resistente à tração e à flexão tendo em consideração as suas dimensões, tanto em elementos de madeira serrada, como em EWP (madeira lamelada colada e madeira micro-lamelada colada (*Laminated Veneer Lumber* ou LVL) ilustrados na Tabela 3.6. Deste modo, para a mesma classe de resistência, podemos ter membros com diferentes propriedades resistentes, em função das suas dimensões.

Tabela 3.6 – Valores de k_h , k_l e k_{vol} para madeira e EWP (*Structural Timber Design to Eurocode 5* de acordo com o EC5 - 3.2, 3.3, 3.4 e 6.4.3)

Material	Factor	Definitions/conditions	Characteristic or design value
Solid timber	For bending and tension: $k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0.2} \text{ or } 1.3 \right\}$	Characteristic density $\leq 700 \text{ kg/m}^3$ (i) Bending: reference depth $h = 150 \text{ mm}$. (ii) Tension: reference width (maximum cross sectional dimension) $h = 150 \text{ mm}$.	(i) Bending strength: $= k_h f_{m,k}$ (ii) Tensile strength parallel to the grain: $= k_h f_{t,0,k}$
Glued-laminated timber	For bending and tension and stress distribution: $k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0.1} \text{ or } 1.1 \right\}$ In the apex zone of a double tapered, curved and pitched cambered beam with all veneers parallel to the beam axis: $k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.2}$ In the apex zone of double tapered and curved beams: $k_{dis} = 1.4$ In the apex zone of pitched cambered beams: $k_{dis} = 1.7$	For the evaluation of k_h (i) Bending: reference depth $h = 600 \text{ mm}$. (ii) Tension: reference width (maximum cross sectional dimension) $h = 600 \text{ mm}$. For the evaluation of volume factor k_{vol} (i) Tension: reference volume $V_0 = 0.01 \text{ m}^3$. The stressed volume of the apex zone (in m^3) as defined in EC5, Figure 6.9, is V (see Figure 6.7). (NB: the value used for V should not be greater than $2V_b/3$ where V_b is the volume of the beam.)	(i) Bending strength: $= k_h f_{m,k}$ (ii) Tensile strength parallel to the grain: $= k_h f_{t,0,k}$ (i) Tensile strength perpendicular to the grain: $= k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d}$
LVL	For bending edgewise; tension and stress distribution: $k_h = \min \left\{ \left(\frac{300}{h} \right)^s \text{ or } 1.2 \right\}$ For length: $k_l = \min \left\{ (3000/\ell)^{s/2} \text{ or } 1.1 \right\}$ In the apex zone of a double tapered, curved and pitched cambered beam with all veneers parallel to the beam axis: $k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.2}$ In the apex zone of double tapered, curved beams and pitched cambered beams, the values for k_{dis} are as for glued-laminated beams.	For the evaluation of k_h (i) The size effect exponent s is obtained from EN 14374: $s = 2(\text{cov}) - 0.25$, where cov is the coefficient of variation of the test results. (ii) Bending: reference depth $h = 300 \text{ mm}$. For the evaluation of k_l (i) Tension: reference length $\ell = 3000 \text{ mm}$ and s is as defined as for k_h . For the evaluation of k_{vol} (i) Tension: reference volume $V_0 = 0.01 \text{ m}^3$. The stressed volume of the apex zone (in m^3) as defined in EC5, Figure 6.9, is V (see Figure 6.7). (NB: the value used for V should not be greater than $2V_b/3$ where V_b is the volume of the beam.)	(i) Bending strength: $= k_h f_{m,k}$ (i) Tensile strength along the grain: $= k_l f_{t,0,k}$ (i) Tensile strength perpendicular to the grain: $= k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d}$

3.4.5 Deformações a longo prazo

A duração do carregamento sobre a madeira tem influência não só nas suas propriedades resistentes (ver 3.4.2), como também na sua deformação instantânea e a longo prazo. A este fenómeno dá-se o nome de fluência e a forma como ocorre depende de fatores como a direção e intensidade da carga aplicada, temperatura, rigidez (quanto maior, menor será a deformação por fluência), teor em água (percentagens elevadas conduzem a uma maior deformação) ou a presença de nós (característica desfavorável pela redução do módulo de elasticidade) [6].

Para níveis de tensão ou carga aplicada relativamente baixos, a fluência pode ser representada por uma curva convexa, caracterizada por uma deformação elástica instantânea aquando da aplicação da carga, seguida de um aumento gradual da deformação elasto-plástica (ou viscosa) sob efeito da carga de intensidade constante seguida por, no instante da descarga, uma recuperação parcial da forma inicial do elemento. Uma vez que a madeira não é um material perfeitamente elástico, mesmo após a remoção dos esforços verifica-se a presença de uma deformação residual permanente (ver Figura 3.14) [6].

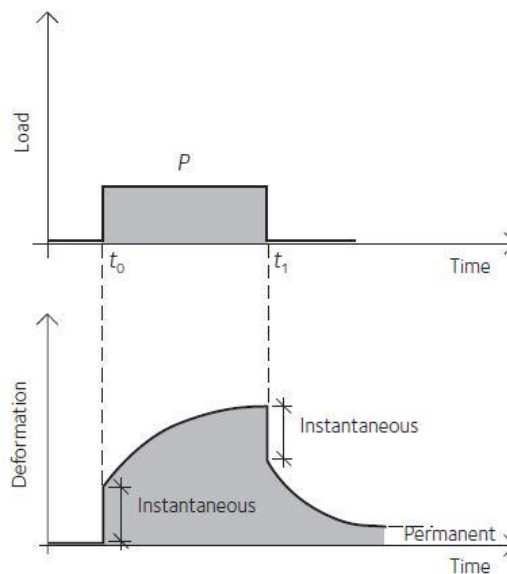


Figura 3.14 – Curva de fluência em função da carga aplicada e do tempo [6]

Relativamente aos produtos de madeira industrializados (EWP), as suas propriedades de fluência variam das da madeira serrada, sendo geralmente condicionadas pelas propriedades do adesivo ou cola que as formam [6].

Em fase de projeto, é importante ter em conta este fenómeno não só no caso de estruturas mistas, onde a diferença no comportamento de dois materiais distintos pode conduzir a dificuldades na sua compatibilização e funcionamento em conjunto, mas essencialmente no cálculo das deformações a longo prazo num Estado Limite de Serviço (ELS ou SLS, em inglês). Para tal, o EC5 estabelece uma relação (equação 3.3) entre a deformação instantânea (u_{inst}) e por fluência (u_{creep}) na presença de cargas permanentes, através de um fator de deformação, k_{def} (ver Tabela 3.7), que varia consoante o tipo de material sob esforço e o teor em água presente (classe de serviço) [24].

$$u_{creep} = k_{def} \cdot u_{inst} \quad (3.3)$$

Desta forma, torna-se possível determinar, através da seguinte expressão a deformação final (u_{fin}) que corresponde à soma das duas deformações referidas.

$$u_{fin} = u_{inst} + u_{creep} = u_{inst} \cdot (1 + k_{def}) \quad (3.4)$$

Tabela 3.7 – Valores de k_{def} para madeira e EWP [27]

Material	Standard	Service class		
		1	2	3
Solid timber	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Glued Laminated timber	EN 14080	0,60	0,80	2,00
LVL	EN 14374, EN 14279	0,60	0,80	2,00
Plywood	EN 636			
	Type EN 636-1	0,80	–	–
	Type EN 636-2	0,80	1,00	–
	Type EN 636-3	0,80	1,00	2,50
OSB	EN 300			
	OSB/2	2,25	–	–
	OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	–

3.5 Classificação

A variação da resistência, massa volúmica e rigidez da madeira, aliada ao facto de ser um material natural, conduzem a dificuldades no que diz respeito à atribuição de uma classe de resistência a um elemento desse material. No entanto, para que este possa ser utilizado de um ponto de vista estrutural, é necessária tal classificação, onde o elemento é primeiramente sujeito a um conjunto de procedimentos aprovados e certificados [24].

Presentemente, as propriedades resistentes da madeira podem ser determinadas de forma não destrutiva, através de métodos de classificação visual e por máquina. Tendo em conta a diversidade de espécies e a consequente dificuldade em encontrar uma normalização de parâmetros, ambos os métodos e respetivos requisitos encontram-se definidos de forma genérica nas seguintes normas, sendo posteriormente especificados, na Europa, consoante o país:

- EN 14081-1:2005 – *Timber Structures – Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross-Section. Part 1: General Requirements* [34];
- EN 14081-2:2005 – *Timber Structures – Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross Section. Part 2: Machine Grading, Additional Requirements for Initial Type Testing* [35].

3.5.1 Classificação visual

A técnica de avaliação visual das capacidades resistentes da madeira baseia-se numa relação simplista entre a presença de defeitos (nós, ângulo das fibras, bolsas de resina ou distorção, por exemplo), detetada visualmente, e o impacto nas propriedades mecânicas do elemento. Como tal, este método de classificação é caracterizado por uma incerteza que conduz a um défice na precisão com que é atribuída a classe de resistência. Contudo, tendo em mente a segurança estrutural, este tipo de avaliação pode conduzir a uma subestimação do elemento, em que este acaba por ser classificado abaixo das suas reais capacidades, impossibilitando uma otimização do produto para o fabricante ou produtor [6, 24]. Fatores como a experiência e o conhecimento do operador responsável pela análise visual dos elementos afetam o nível de eficácia do processo. Porém, hoje em dia existem técnicas de leitura com recurso a *scanners* que facilitam e melhoram a eficiência deste método [6].

3.5.2 Classificação por máquina

A classificação de peças de madeira por máquina baseia-se na relação entre rigidez e resistência, em que através da determinação de parâmetros como o módulo de elasticidade ou a massa volúmica, é possível atribuir valores correspondentes às propriedades resistentes da madeira de uma determinada região. Tal relação é definida recorrendo a análises e testes laboratoriais controlados de uma série de elementos de madeira oriundos do mesmo local (população de teste), que permitem a criação de um padrão das características dos mesmos, utilizado posteriormente na classificação de elementos semelhantes [24].

Existem várias formas de determinar o módulo de elasticidade neste tipo de avaliação, sendo uma das mais comuns o recurso a ensaios estáticos de flexão com carga/deformação controlada, onde a pressão exercida pela máquina produz incrementos na flexão do elemento [24]. Os valores correspondentes à deformação originada, ou a carga que conduziu a tal deformação, são então automaticamente medidos e comparados através de um computador com valores previamente estabelecidos (ver Figura 3.15), conduzindo de forma direta à atribuição da classe de resistência à peça. Este método, sendo mais preciso e não tão conservativo quanto o visual, resulta numa menor rejeição de elementos no final do processo. No entanto, a inspeção visual por parte do trabalhador na classificação por máquina é igualmente importante, uma vez que permite a deteção de alguns defeitos (não detetáveis pela máquina) que influenciam a capacidade resistente da peça [6, 24].

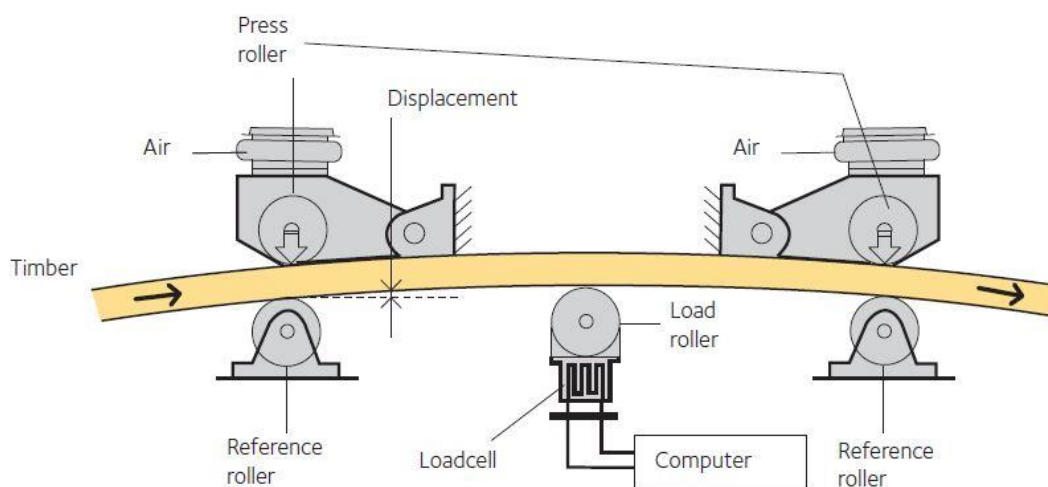


Figura 3.15 – Princípio de um ensaio estático de flexão num elemento de madeira [6]

4 PRODUTOS INDUSTRIALIZADOS E ESTRUTURAS MISTAS

4.1 Produtos de madeira industrializados (EWP)

A madeira serrada é limitada em termos de dimensões, devido não só às dimensões da própria árvore, como também a todo o processo industrial associado. Estes limites variam consoante o país, sendo em regra geral definidos por um comprimento máximo entre 5 a 6 metros e por uma altura máxima de aproximadamente 250 milímetros. Caso estas dimensões sejam insuficientes para o fim em questão, existe hoje em dia a possibilidade de recorrer a produtos de madeira industrializados (ou EWP). Estes produtos correspondem essencialmente a placas, lâminas ou fibras de madeira ligadas entre si através de um material aderente. Grande parte destes produtos foi criada e desenvolvida na América do Norte, nos últimos cem anos, até pela necessidade de compensar a escassez de madeira adulta, que conduziu à exploração de árvores com diâmetro e qualidade inferiores. Na figura abaixo encontram-se, por ordem cronológica do seu desenvolvimento, os vários EWP criados até hoje. Neste relatório serão descritos de forma mais pormenorizada produtos como MLC (*MLC*), OSB, *I-Joist* e CLT [6].

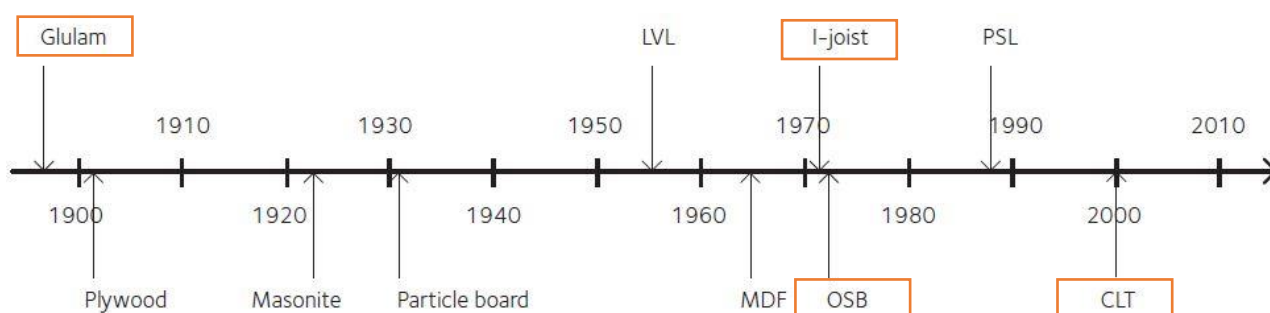


Figura 4.1 – Cronologia do desenvolvimento de EWP [6]

4.1.1 Madeira Lamelada Colada - MLC

O primeiro produto de madeira industrializado a surgir e um dos mais utilizados correntemente é o *MLC* ou, em português, a madeira lamelada colada (*MLC*). *MLC* consiste essencialmente na sobreposição de lamelas de madeira com, de forma geral, 30 a 45 milímetros de altura, já após secagem e classificação (sendo cada uma destas formada por várias placas de madeira unidas por ligações do tipo denteada, ou em inglês, *finger-joint*), através de uma cola durável e impermeável (ver Figura 4.2). As fibras de todas as camadas encontram-se orientadas paralelamente ao eixo longitudinal da peça, tornando-a ideal para um funcionamento unidirecional, isto é, enquanto pilar ou viga [6, 24].

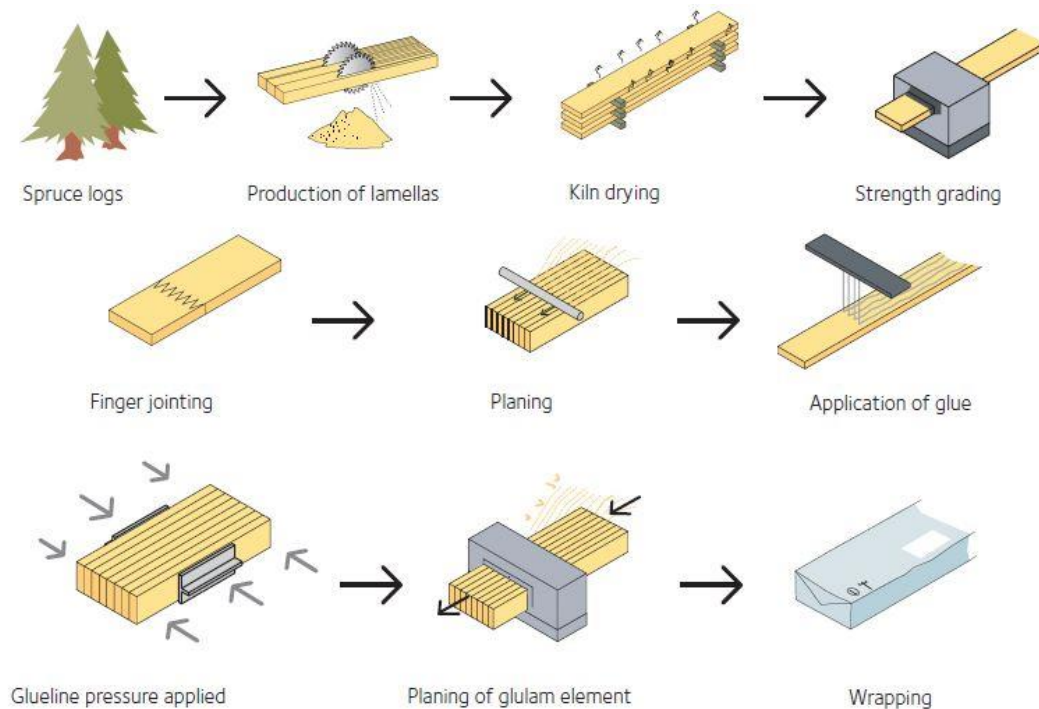


Figura 4.2 – Processo de fabrico de elemento lineares em MLC [6]

Existem dois tipos de MLC, a homogénea (*homogeneous*, h) e a combinada (*combined*, c). A diferença entre as duas denominações consiste nos valores de resistência das diferentes camadas que a compõem. Enquanto que no caso da homogénea todas as lamelas têm propriedades resistentes semelhantes, na produção de MLC combinada são utilizadas lamelas de resistência mais elevada nas zonas superior e inferior (zonas de maior esforço) e reduzida na zona central (ver Figura 4.3).

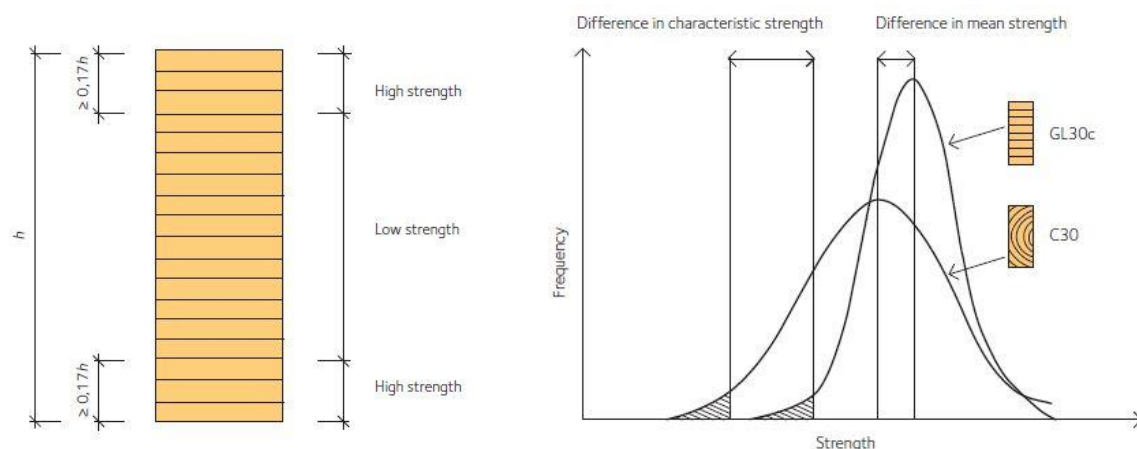


Figura 4.3 – À esquerda: Viga em MLC combinada; À direita: Função de distribuição de resistência em MLC combinada e madeira serrada [6]

A versatilidade é um dos seus pontos fortes, sendo possível conceber elementos complexos recorrendo a MLC, como arcos e outras formas menos ortodoxas, o que o torna num produto altamente apelativo de um ponto de vista não só funcional, mas também estético. Hoje em dia recorre-se a MLC não só na construção de edifícios habitacionais, como também de edifícios comerciais incluindo espaços abertos amplos e coberturas de arenas como polidesportivos, sendo muitas vezes deixado exposto dada a sua beleza natural. A sua relação peso-resistência torna-o num material mais atrativo que o aço e otimizado quando comparado com a madeira serrada, com a capacidade de vencer vãos na ordem dos 20 metros quando aplicado sob a forma de vigas em edifícios de escritórios amplos e na ordem dos 100 metros em forma de estrutura reticulada ou em arco misto (reforçado através da utilização de aço), usualmente concebidos como elementos de cobertura de recintos de grande área (ver Figura 4.4) [36].



Figura 4.4 – Em cima: Cobertura da arena *Richmond Olympic Oval*, Canadá, com arcos em MLC e aço [37]; em baixo: Estufa *Sheffield Winter Gardens*, Reino Unido, com arcos em MLC (esquerda); Torre de observação *Pyramidenkogel*, Áustria, com pilares em MLC (direita)

4.1.2 Painéis de fibras orientadas – OSB

Os painéis geralmente utilizados para reforço e revestimento estrutural de paredes e lajes são compostos por fibras de madeira orientadas (OSB) de forma a otimizar, à semelhança da MLC, o seu comportamento para a sua finalidade. Os painéis de OSB são compostos por finas lascas/fibras de madeira (0,8x13x100 mm) alongadas na direção paralela ao comprimento do painel nas camadas externas e orientadas de forma aleatória na camada interna (ver Figura 4.5). As fibras são primeiramente secas e unidas através de um adesivo (cola ou resina), sendo posteriormente prensadas a alta temperatura, conferindo-lhe densidade, resistência mecânica e durabilidade [6].

Desta forma, estes painéis são considerados como elementos estruturais em fase de dimensionamento, representando parte significativa na estabilidade face a ações horizontais, como a ação do vento, através da rigidez que estes conferem à parede ou à laje à qual estão fixos. Além disso, dada a sua facilidade em termos de transporte, aliada à simplicidade na sua ligação à estrutura através de parafusos, OSB é uma escolha comum enquanto revestimento em estruturas de aço leve (*Lightweight Steel Framing*) e de madeira, essencialmente no sistema estrutural *Timber Frame*.



Figura 4.5 – Painel de fibras orientadas em madeira – *Oriented Strand Board* (OSB)

4.1.3 *Open Metal Web Joist e I-Joist*

De entre os diversos EWP criados até à data, dois dos mais utilizados enquanto solução estrutural para pavimentos são as *I-Joists* e as *Open Metal Web Joists*. *I-Joist*, ou vigota em forma de **I**, é um produto de madeira industrializado que consiste no funcionamento de dois materiais em conjunto sendo, portanto, considerado um compósito. Esta vigota é composta por banzos em madeira serrada ou em

LVL (produto de princípio semelhante à MLC, mas produzido a partir de folheado (ou lâminas) de madeira entre 2 e 4 mm de espessura), em que um funciona à compressão e o outro à tração. Relativamente à alma da seção, esta é geralmente composta por um dos EWP fabricado em forma de painel, isto é, por OSB ou por *Plywood* (contraplacado) e encontra-se ligada aos banzos através de uma cola, sendo responsável pela resistência a esforços de corte no elemento (ver Figura 4.6) [6].



Figura 4.6 – Vigotas em forma de I (*I-Joists*)

Open Metal Web Joist (também denominada de *Posi-Joist* ou *Easi-Joist*), consiste numa vigota composta por banzos em madeira serrada e alma metálica aberta, incrementando a rigidez e resistência da secção. O recurso a este tipo de vigotas como solução estrutural para pavimentos torna-se aliciante pela facilidade na instalação de serviços como ar condicionado ou canalizações, através da sua alma metálica. Este tipo de produto permite também atingir maiores valores de vão quando comparado com vigotas em madeira serrada, mantendo uma boa relação peso-resistência através da combinação de ambos os materiais (ver Figura 4.7) [38].



Figura 4.7 – Vigotas com alma metálica aberta (*Open Metal Web Joist*)

4.1.4 *Cross-Laminated Timber* - CLT

Cross-Laminated Timber, ou madeira lamelada cruzada, é o mais recente dos EWP produzidos até à data e um dos mais utilizados na indústria da construção nos últimos quinze anos. CLT consiste, à semelhança da madeira lamelada colada, na sobreposição de camadas de madeira, com teor em água controlado, unidas através de cola. No entanto, a diferença entre estes dois produtos consiste na direção na qual essas camadas se encontram dispostas. Enquanto que, no caso da MLC, todas se encontram orientadas na direção paralela ao eixo longitudinal da peça, no caso do CLT existe uma perpendicularidade entre cada camada e as suas camadas vizinhas, perfazendo um total de 3, 5 ou 7 camadas, com 17 ou 35 mm de espessura cada, consoante se encontrem dispostas na direção transversal ou longitudinal do painel, respetivamente (ver Figura 4.8). Esta característica confere ao CLT uma estabilidade estrutural bem como uma capacidade de vencer vãos em duas direções, onde as suas camadas exteriores ditam a direção da carga a transmitir, tornando-o ideal para a construção de elementos como paredes (camadas externas na vertical) e lajes (camadas externas paralelas à direção do vão entre suportes) [39].

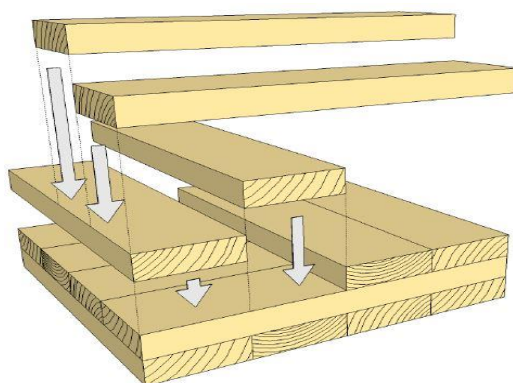


Figura 4.8 – Formação de um painel de CLT

Sendo um produto pré-fabricado e leve comparativamente ao aço ou betão, a sua utilização permite uma redução no tempo de construção bem como nos custos associados a fundações. Além disso, a sua capacidade resistente a ações laterais e a forças de compressão, torna o CLT numa opção inteligente na construção de edifícios altos com vãos extensos, como edifícios amplos de escritórios [40]. Como prova disso, existem hoje vários edifícios de renome pelo seu caráter inovador na indústria da construção, arquitetura e engenharia estrutural, sendo deles exemplo o *Forté* (ver Figura 4.9), primeiro edifício residencial de 10 pisos em CLT, completo em 2012, na Austrália, após um período de construção de 10 meses.



Figura 4.9 – Edifício em CLT *Forté*, Melbourne, Austrália

Outro exemplo da flexibilidade na utilização de CLT encontra-se na execução de um alpendre com uma área de cerca de 1150 m², parte constituinte do *Earth Sciences Building – University of British Columbia*, no Canadá, recorrendo a pilares em MLC como suporte, criando a noção de que todo o alpendre é constituído por um único elemento de CLT através da precisa ligação dos painéis (ver Figura 4.10). Além disso, recorreu-se também a este material para a execução de pisos intermédios e do telhado na ala Norte da estrutura com um total de 5 pisos [41].



Figura 4.10 – CLT e pilares em MLC evidenciados no alpendre e interior do *Earth Sciences Building*, *UBC*, Canadá

Uma outra característica relevante associada a este produto consiste na facilidade com que este é transportado e instalado no local da construção. Uma vez que os painéis de CLT são fabricados especificamente para a estrutura em questão, detalhes como as ligações entre estes, aberturas para janelas e portas ou adaptações para a instalação de serviços são tidos em conta na fase de dimensionamento e posterior produção em fábrica. Deste modo, é criada uma facilidade em termos de transporte dos elementos e montagem dos mesmos em campo, permitindo a execução de estruturas em localizações de difícil acesso e a uma velocidade significativamente elevada quando comparada a outras soluções estruturais e métodos de construção (ver Figura 4.11) [40].

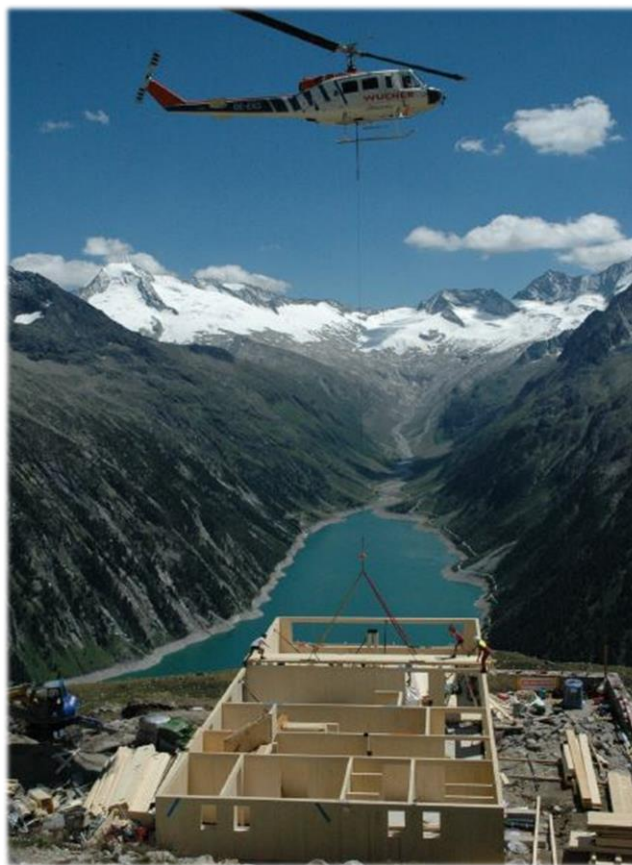


Figura 4.11 – Transporte por helicóptero para montagem simples e rápida de painéis em CLT num local remoto, na Áustria [39]

Do ponto de vista de resistência sísmica, os painéis em CLT apresentam, devido essencialmente à sua rigidez e estabilidade, um comportamento eficaz particularmente na resistência a ações horizontais. Sendo um sistema composto por pequenas e múltiplas ligações metálicas entre painéis, oferece bom comportamento dúctil e significativa capacidade de dissipação de energia. Vários ensaios foram já realizados no âmbito do estudo do comportamento de estruturas em CLT sob ações sísmicas, com

ênfase nas estruturas com mais do que um piso, sendo de salientar o ensaio realizado no ano 2007, no Japão, onde uma estrutura de 7 andares foi sujeita a 14 eventos sísmicos consecutivos na maior mesa sísmica existente (ver Figura 4.12), incluindo o sismo de Kobe (1995, de magnitude 7.2). Os resultados apresentaram-se favoráveis, com uma deformação lateral máxima de cerca de 237 mm no topo do edifício e um deslocamento máximo entre pisos de aproximadamente 38 mm, sem qualquer deformação residual [41]. A otimização da resistência a ações horizontais neste tipo de estruturas é conseguida através da exploração da ductilidade dos vários suportes e ligações, essencialmente entre painéis que formam a mesma parede (*half-lap joints*) e na ligação entre parede e laje (*steel brackets* e *hold-downs*). As restantes ligações devem ser sobredimensionadas de modo a possuir rigidez e resistência suficiente para que, na ocorrência de um evento sísmico, permaneçam intactas enquanto que as anteriormente referidas são sacrificadas [42]. Ainda neste ponto, é importante lembrar que, face à ação sísmica, a massa da estrutura representa um fator de elevada influência no seu comportamento durante o evento e, sendo o CLT um produto leve, é expectável um melhor desempenho comparativamente a soluções de peso superior.

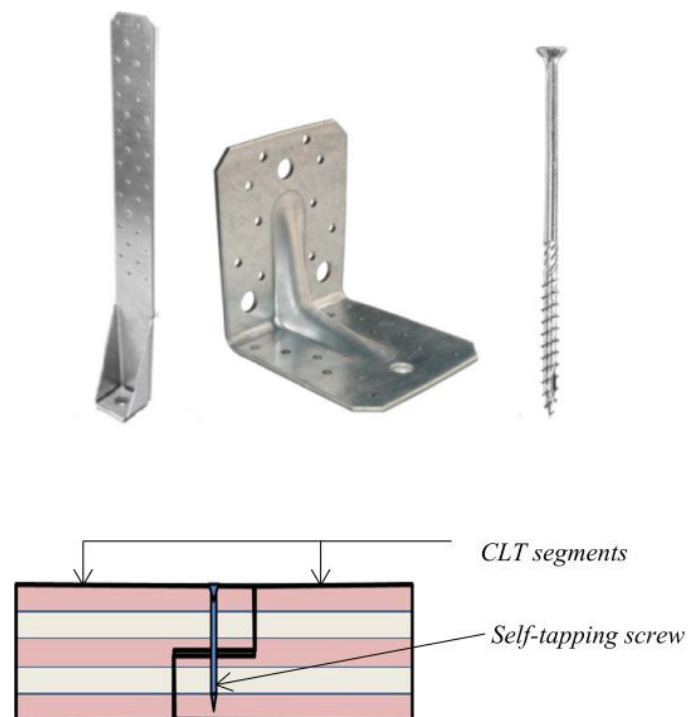


Figura 4.12 – À esquerda: estrutura em CLT no local dos ensaios sísmicos [41]; à direita: elementos de ligação e de suporte metálicos (em cima) e ligação *half-lap* (em baixo)

4.2 Estruturas mistas

Construção mista consiste na utilização simultânea de dois ou mais materiais, procurando explorar as suas vantagens a um nível arquitetónico e estrutural. Cada material tem os seus pontos fortes e as suas limitações, podendo funcionar de forma independente ou em conjunto com outros materiais [43]. No caso da estrutura mista, procura-se uma otimização estrutural através da eliminação dos pontos fracos de cada um, sendo primordial um sólido conhecimento *a priori* das suas propriedades físicas e mecânicas. A eficiência de uma solução estrutural mista depende assim, em grande parte, da nossa capacidade enquanto engenheiros de tirar partido das melhores características de cada material (entre outros, a madeira o betão e o aço) numa fase de conceção estrutural, tendo presente a relação qualidade-preço bem como o aspeto estético e sustentável do projeto em causa [44].

4.2.1 Combinação de materiais

Existem essencialmente três formas de sistemas mistos na construção: a nível **estrutural**, de **ligação** e **material**. O sistema misto estrutural consiste simplesmente na combinação de elementos de diferentes materiais na mesma estrutura, sendo exemplo as treliças cujo material dos membros a funcionar à tração é o aço, enquanto que os membros sujeitos a esforços de compressão são compostos por madeira (ver Figura 4.13) [43]. Outro exemplo deste tipo de solução consiste na utilização de vigas em aço num sistema de construção em madeira leve (*Timber Frame*), em zonas onde um elemento de madeira de dimensões adequadas não satisfaça as condições necessárias a nível de resistência.

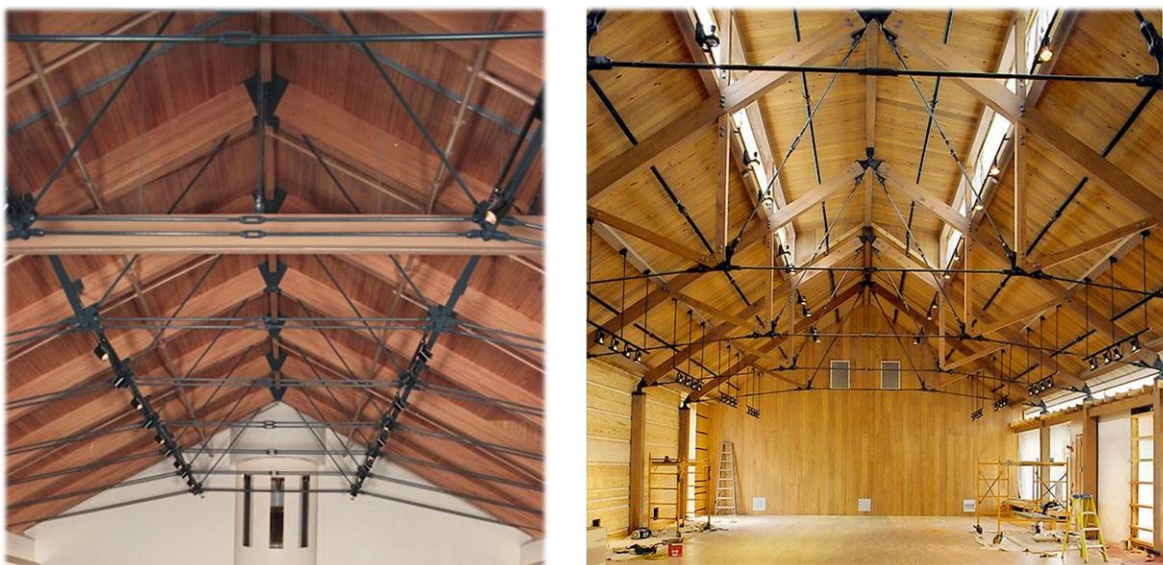


Figura 4.13 – Estruturas treliçadas mistas: treliça do tipo *Fink* (esquerda); treliça do tipo *Fan* (direita)

Ainda no sistema misto estrutural, na construção em altura, os pilares em MLC podem ser comparados com os pilares em aço, tanto em termos de resistência como de aspeto visual enquanto elementos expostos, sendo cada vez mais uma opção recorrente (ver Figura 4.14). Por outro lado, quando combinado com CLT na construção de edifícios dotados de espaços amplos, o aço representa uma boa solução para os elementos de viga e pilar, formando uma grelha estrutural, completa por painéis em madeira lamelada cruzada (CLT) enquanto paredes e lajes, criando soluções estruturais altamente competitivas com a tradicional solução em betão armado [44].



Figura 4.14 – Estrutura mista em MLC e aço: Torre de observação *Pyramidenkogel*, Áustria

Uma outra forma de sistema misto consiste na combinação de materiais a nível de ligação, particularmente na utilização simultânea de madeira e aço. Este tipo de solução surge, por exemplo, da necessidade de reforçar a ligação entre dois elementos de madeira visando um melhor comportamento global face a ações horizontais. Sendo este um tópico sob estudo, foi já desenvolvido em 2005, na *University of Canterbury*, em Christchurch, Nova Zelândia, um modelo conceptual de um sistema de ligação articulada dúctil entre viga e pilar em LVL, combinando aço em pós-tensão com dissipadores de energia, criando um sistema misto de melhor desempenho sísmico (Figura 4.15) [45].

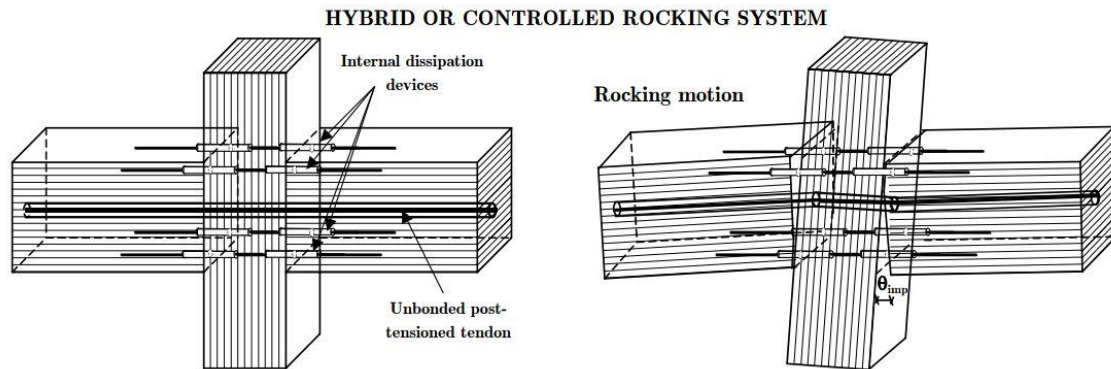


Figura 4.15 – Modelo de ligação articulada dúctil como sistema misto aplicado em LVL [45]

Existem inúmeras formas de ligar dois elementos em madeira através de conexões em aço, onde o conhecimento e versatilidade do engenheiro estrutural em relação às características de ambos os materiais representa um fator de extrema importância na adaptação de uma solução eficaz para cada ligação em particular. Apesar de já existirem soluções padronizadas neste âmbito, não existem duas estruturas iguais, e a necessidade de criar novos sistemas de ligação mista é permanente. Na figura seguinte encontram-se alguns exemplos de sistemas de ligação mistos, onde o elemento estrutural é a madeira (ou produtos de madeira industrializados) e a ligação é materializada em aço. É de salientar que o comportamento global neste tipo de estruturas é significativamente influenciado pelo modo como são dimensionadas as ligações, devendo estas ser estrategicamente posicionadas em função dos esforços a transmitir. Além disso, dada a sua complexidade em certos casos, este tipo de ligações tem um peso considerável no custo final da obra, reforçando a procura pela otimização na sua utilização.



Figura 4.16 – Sistemas de ligação e aço entre dois ou mais elementos de madeira

O modo de sistema misto a nível material, por sua vez, consiste na utilização de dois ou mais materiais aplicados no mesmo elemento. Este sistema assemelha-se ao conceito de compósito, no qual dois materiais diferentes encontram-se ligados, funcionando como uma só unidade de um ponto de vista estrutural. Um exemplo deste tipo de elemento são as lajes compósitas madeira-betão (ver Figura 2.7 - *LifeCycle Tower One*, como exemplo), onde uma ligeira camada de betão é unida através de conectores metálicos (para efeitos de esforço de corte) a vigas de madeira serrada ou MLC, oferecendo um melhor comportamento a nível acústico e de vibração a todo o sistema, mantendo uma eficiente relação peso-resistência (Figura 4.17) [6, 43].

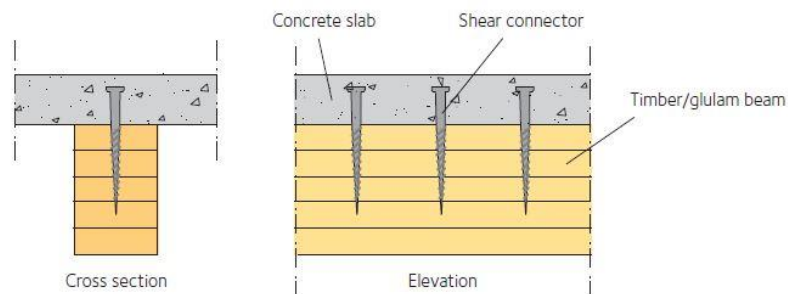
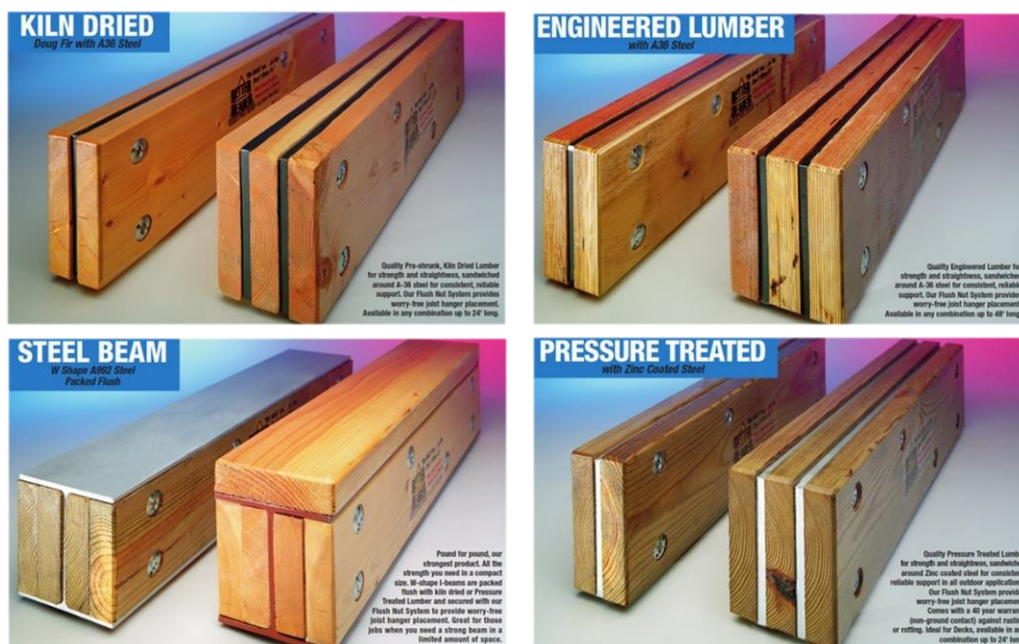


Figura 4.17 – Em cima: laje compósita madeira-betão com conectores metálicos [6];
em baixo: transporte de laje compósita, *LifeCycle Tower One*

Um outro exemplo deste modo de sistema misto, aplicado recorrentemente na construção leve em madeira (*Timber Frame*) de edifícios de habitação, consiste na união aparafusada de dois elementos de madeira a uma chapa de aço, em formato sanduíche, permitindo resistir a cargas superiores e vencer vãos mais longos comparativamente a uma viga formada totalmente por madeira, com a mesma secção transversal (ver Figura 4.18) [43]. A este elemento dá-se o nome de *flitch beam*, e pode ser adaptado em função do número e disposição das chapas de aço e da qualidade da madeira (serrada ou EWP).


 Figura 4.18 – Modelos típicos de *fitch beam* [46]

4.2.2 Vantagens da estrutura mista

Um dos caminhos na procura pela eficiência estrutural consiste na adoção de uma solução mista ao invés da tradicional exploração das vantagens de um só material [44]. Uma estrutura mista apresenta vantagens a vários níveis, como:

Resistência mecânica e desempenho sísmico

Enquanto que o aço tem elevada resistência à tração, a madeira assume um melhor comportamento quando sujeita a compressão, tornando-se numa boa opção para substituir o betão em estruturas mistas. De modo semelhante, enquanto que o aço, apesar do seu elevado impacte ambiental, pode ser utilizado no suporte a cargas elevadas num sistema estrutural em madeira, permitindo uma redução da secção transversal de elementos com elevada concentração de esforços na sua base, a madeira, por outro lado, oferece vantagens em termos de sustentabilidade ambiental bem como na redução do peso total da estrutura, conduzindo a uma redução de custos associados a fundações [43, 44].

A redução do peso da estrutura tem influência não só nos gastos a nível de fundações, mas também no comportamento da mesma face a um evento sísmico. Uma vez que as forças numa ação sísmica são proporcionais ao peso da estrutura, a redução deste, conseguida através da utilização de materiais mais

leves, como a madeira, conduzirá a um melhor desempenho por parte da estrutura. Por outro lado, o aço representa um papel fundamental neste âmbito, conferindo à estrutura uma certa ductilidade, explorada essencialmente nas zonas de ligação, permitindo que esta deforme sem que colapse. Esta flexibilidade por parte da estrutura é essencial quando sujeita a ações repetitivas como as sísmicas, permitindo uma dissipação de energia transferida pelo solo (ver Figura 4.19) [43].



Figura 4.19 – Sistema de contraventamento na estrutura mista *Earth Sciences Building, UBC, Canadá*

Resistência ao fogo

Na maioria dos países, a construção puramente em madeira é limitada em altura e área, devido principalmente à sua segurança em relação ao fogo. No entanto, existe uma maior liberdade quando a construção é realizada parcialmente através de um material não combustível, como o aço. Em fase de dimensionamento estrutural, a consideração das capacidades de ambos os materiais permite não só superar os limites definidos para estruturas em madeira, através da implementação do aço, mas também assegurar uma maior segurança e integridade estrutural através da resiliência por parte da madeira quando exposta ao fogo. Deste modo, uma combinação eficiente destes dois materiais conduz a uma redução da probabilidade de colapso, conferindo à estrutura um maior nível de segurança [43, 44]. O comportamento de ambos os materiais sob ação do fogo já se encontra descrito, de forma mais pormenorizada, no subcapítulo 3.4.3.

Durabilidade

Uma outra vantagem relacionada com as estruturas mistas consiste no incremento da sua durabilidade. Esta qualidade é conseguida particularmente através da presença de aço em estruturas de madeira, pela sua qualidade garantida na fabricação controlada e certificada. Por outro lado, sendo um material

natural, a madeira encontra-se sujeita a uma série de fatores como fissuras, possível apodrecimento pela presença de fungos, térmitas ou distorção sob várias formas, que exigem a aplicação de produtos para efeitos de proteção. Deste modo, é recorrente o recurso a elementos de aço na base dos pilares de madeira, especialmente quando expostos a condições de desgaste geral, choque e possível vandalismo, sendo exemplo os semi-arcos em MLC no terminal *Brentwood SkyTrain Station*, Canadá, protegidos através da ligação a elementos de aço na sua base (ver Figura 4.20) [43].

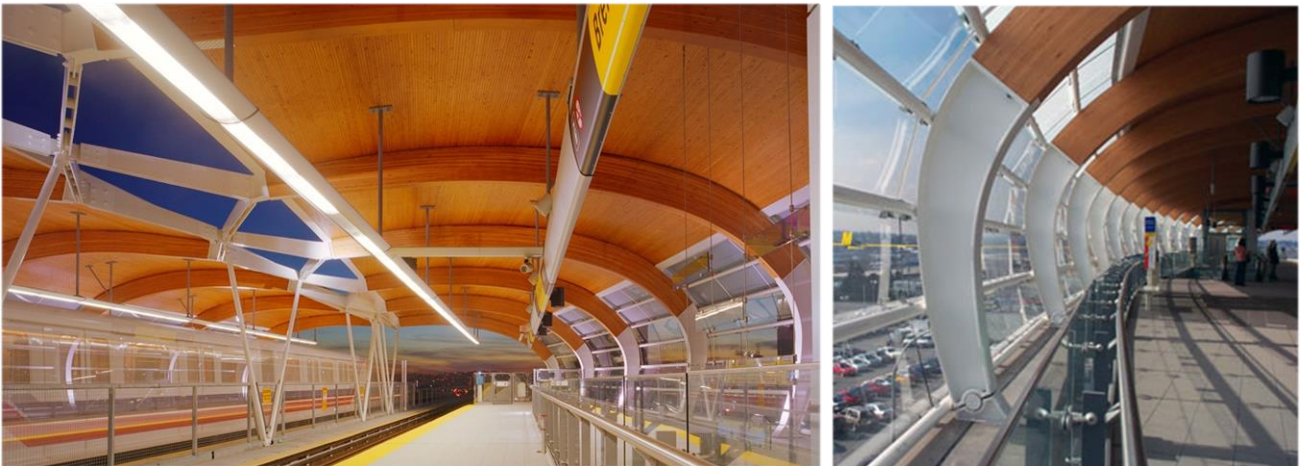


Figura 4.20 – Bases em aço implementadas nos semi-arcos em MLC, *Brentwood SkyTrain Station*, Canadá

Contudo, ainda que não sejam expectáveis choques ou desgaste de forma intensa no ambiente onde a estrutura se encontra inserida, é comum a utilização de pedestais em aço de altura relativamente reduzida, cuja função, além da transmissão de esforços do pilar para o substrato em betão, passa pelo isolamento do elemento de madeira relativamente à superfície do solo, evitando fenómenos de absorção de água e consequente degradação do mesmo caso estes permaneçam em contacto (ver Figura 4.21).

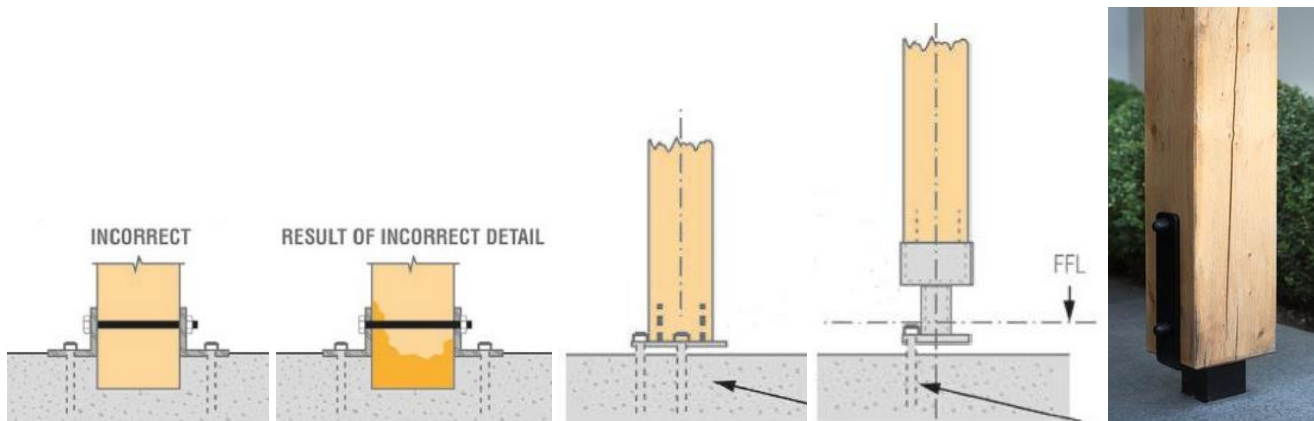


Figura 4.21 – Esquerda: detalhe incorreto de pilares de madeira em contacto com o solo; direita: detalhe correto da ligação pilar de madeira-substrato em betão, com exemplo ilustrativo [47]

4.2.3 Desafios em estruturas mistas

Apesar das vantagens associadas, as estruturas mistas apresentam ainda alguns desafios no que diz respeito à compatibilização de materiais com propriedades distintas. No caso de uma ligação aparafusada entre um elemento de madeira e um de aço, uma variação no teor em água causa alterações nas dimensões do primeiro, sendo para tal aconselhável que este seja composto maioritariamente por madeira adulta e não juvenil (ver capítulo 3.2.3), juntamente a uma proteção por galvanização (ou semelhante) do aço, e uma ligação onde os parafusos não perfurem a totalidade do elemento, permitindo margem para algum movimento [43].

Por outro lado, a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica de ambos os materiais origina, quando expostos a uma variação de temperatura, movimentos desproporcionais. Isto deve-se à facilidade por parte do aço em dilatar e contrair sob tais circunstâncias, enquanto que a madeira mantém a sua integridade, não se fazendo sentir um efeito tão acentuado [43]. Este fator tem um maior impacto em zonas de ligação viga-pilar, frequentemente materializadas em aço. Nesta situação, ainda que sob carregamento estático (sem variação de intensidade com o tempo), o aço perde resistência e rigidez quando exposto ao fogo, fazendo com que a ligação atinja facilmente a sua tensão de cedência. No entanto, avanços tecnológicos permitem hoje em dia o desenvolvimento não só de ligações com capacidade de absorção do movimento diferencial originado entre os dois materiais, mas também de ligações perfeitamente embebidas entre os elementos de madeira, sendo exemplo os conectores *Sherpa*, impedindo que numa situação de fogo estas se encontrem expostas e vulneráveis, mantendo ao mesmo tempo um aspeto esteticamente agradável, uma rapidez de execução em campo e valores de resistência previamente testados e bem conhecidos (ver Figura 4.22) [43, 48].

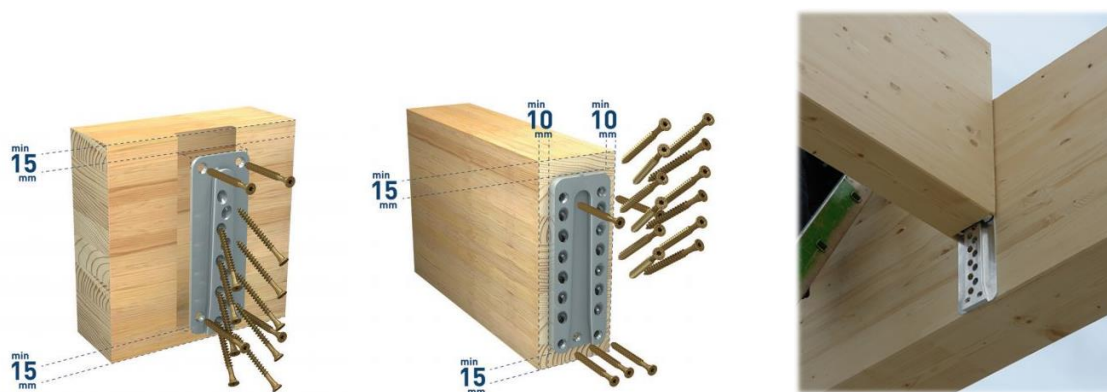


Figura 4.22 – Detalhe de um conector *Sherpa* na ligação entre duas vigas [48] com exemplo ilustrativo

5 SISTEMAS ESTRUTURAIS EM MADEIRA

As estruturas em madeira predominam maioritariamente nos países nórdicos, em parte devido à proximidade de áreas florestais. Este tipo de estruturas permite não só uma construção simples e rápida, através do recurso a elementos pré-fabricados, como também um bom comportamento a nível térmico. Além disso, a variabilidade nos sistemas estruturais em madeira tem vindo a aumentar, através da inovação de técnicas e do desenvolvimento de novos produtos, permitindo hoje em dia optar pelo sistema que mais se adequa às exigências do cliente [50].

5.1 Sistema modular

Um dos sistemas utilizados principalmente na construção repetitiva, como residências para estudantes ou hotéis, por exemplo, é o **sistema modular**, onde as paredes e as lajes são constituídas por painéis, combinados num elemento volumétrico, construído em fábrica e posteriormente transportado para o local da obra. Este sistema apresenta a vantagem não só de uma montagem simples e rápida em campo, mas também de permitir um maior controlo desde a fase de arquitetura e dimensionamento até à fase de execução do módulo, onde o arquiteto deve conhecer *a priori* as capacidades e limitações não só do sistema de construção, mas também do sistema de fabricação. Um exemplo de aplicação deste tipo de sistema pode ser observado no edifício *First Hotel Arlanda Airport*, em Estocolmo, Suécia, projetado pela ADEPT, com o total de 150 quartos ou módulos (ver Figura 5.1) [51, 52, 53].

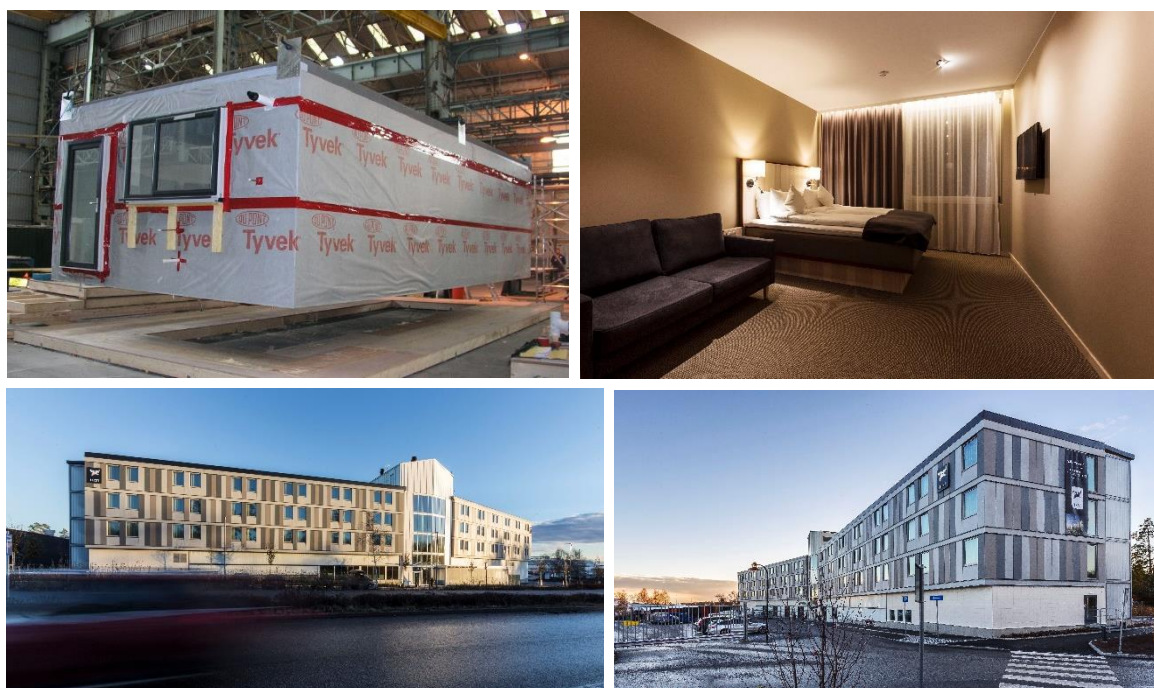


Figura 5.1 – *First Arlanda Hotel Airport*, Suécia: módulo em fábrica e aspeto final [51, 52]

5.2 Sistema pilar e viga

Um outro sistema de construção em madeira consiste no **sistema pilar e viga**. Este sistema é, de forma geral, aplicado em edifícios industriais, comerciais e arenas, não sendo tão recorrente como outros sistemas no mercado habitacional. Uma das características particulares deste sistema consiste na exposição dos elementos de suporte (pilares e vigas), que constituem uma grelha estrutural com o auxílio de ligações metálicas entre elementos, complementada por escoras diagonais como elementos de contraventamento [53]. A possibilidade de recorrer a elementos com secções transversais de maior área (através da utilização de produtos de madeira industrializados como MLC ou LVL), permite atingir comprimentos de vão superiores quando comparados com elementos de madeira de carvalho (*Oak*), também utilizada neste tipo de estruturas, tornando esta solução numa opção eficiente em edifícios de espaços amplos.

Um exemplo de aplicação deste princípio estrutural em espaços massivamente amplos é a cobertura da arena *Richmond Olympic Oval*, Canadá (ver Figura 4.4). Nesta estrutura, que permite vencer um vão de aproximadamente 100 metros, salienta-se neste ponto a utilização de um sistema de suporte primário de arcos em MLC, responsável pelo suporte de grande parte da carga total, complementado por um sistema secundário de vigas de menor secção transversal, apoiadas perpendicularmente sobre o primeiro, cuja função consiste no suporte do revestimento da cobertura. De um ponto de vista estrutural e económico, para que uma otimização seja conseguida neste tipo de projeto, é necessário ter em consideração ambos os sistemas em simultâneo (ver exemplo na Figura 5.2) [53].

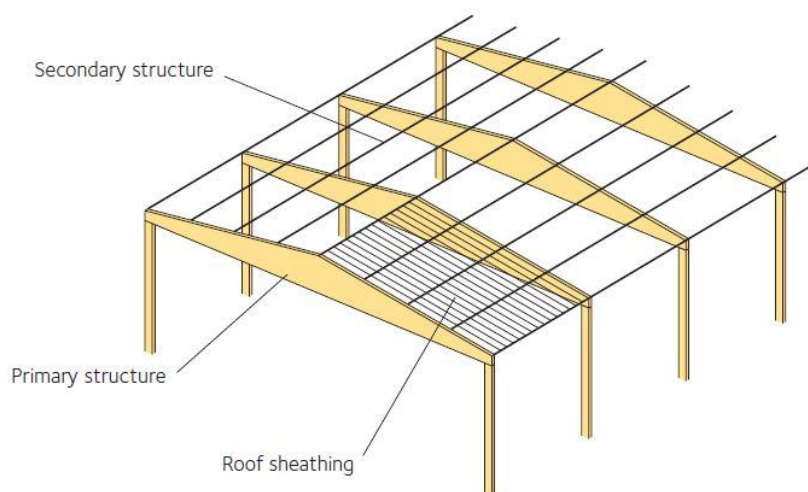


Figura 5.2 – Sistema primário, secundário e revestimento na formação de uma cobertura através do sistema pilar e viga [53]

Ainda nesta forma de construção, existem hoje em dia sistemas desenvolvidos por várias entidades na área, sendo exemplo o sistema *Trä8*, idealmente aplicado em edifícios de vários andares, desenvolvido em 2007 pela empresa Moelven Töreboda em parceria com *Lulea University of Technology*, na Suécia, com o objetivo de criar um método de construção em madeira simples, flexível e ainda eficaz (ver Figura 5.3) [54]. Este sistema consiste basicamente na combinação de pilares e vigas em MLC, com elementos de laje compostos também por MLC e LVL, materiais conhecidos pela sua elevada capacidade resistente, onde as vigas suportam um vão máximo de 8 metros e a estrutura atinge os 6 andares (altura máxima atingida por este sistema, até à data). A flexibilidade deste sistema encontra-se na possibilidade de recorrer a materiais como o aço (em elementos de contraventamento) ou o betão (caixas de elevadores ou de escadas) no âmbito da estabilidade estrutural, procurando a melhor solução para cada situação em particular [53, 54].



Figura 5.3 – Aplicação do sistema pilar e viga *Trä8* na construção em altura [53]

5.3 Sistemas planares

Os sistemas de construção planares, em madeira leve (*Timber Frame*) ou por painéis, são dos sistemas mais utilizados na construção em madeira. O sistema estrutural *Timber Frame* baseia-se na combinação de montantes, guias, vigotas e asnas, assentes sobre elementos de fundação em betão. Uma variante deste sistema consiste na denominada construção *Blockhaus* onde as paredes, neste caso, são formadas através da sobreposição de vigas de madeira, em que estas são deixadas expostas, conferindo um aspecto final peculiar à estrutura. O sistema de construção em madeira leve ou o sistema *Blockhaus* é utilizado frequentemente na área habitacional, sendo o sistema de construção por painéis (CLT, por exemplo) uma opção empregue não só nessa área mas também na construção em altura e em estruturas dotadas de vãos significativamente superiores, como edifícios de escritórios amplos (ver subcapítulo 4.1.4). Neste ponto são descritos de forma genérica os sistemas de construção *Blockhaus* e por painéis, descrevendo de forma mais detalhada o sistema de construção em madeira leve, no qual se baseou a maioria dos projetos elaborados pelo mestrando no decorrer do estágio [53, 55].

5.3.1 Sistema *Blockhaus*

De um modo simplista, o sistema de construção *Blockhaus* consiste essencialmente no posicionamento de vigas de secção retangular ou arredondada (formato de tronco) umas sobre as outras, formando elementos de parede, única ou dupla, assentes sobre uma fundação em betão. A estrutura é completa através de lajes formadas por vigotas em madeira (ver Figura 5.4) [55, 56].



Figura 5.4 – Sistema estrutural *Blockhaus* em habitações [55, 56]

5.3.2 Sistema por painéis

Este tipo de sistema pode ser aplicado sob mais do que uma forma. Um dos modos de aplicação deste sistema construtivo consiste na utilização de painéis isolados estruturais (SIP), formados por duas placas estruturais, geralmente em OSB, com uma espuma rígida isolante no seu interior. A sua utilização teve início nos EUA, pela necessidade de um melhor comportamento isolante e hermético a nível estrutural, conseguido através do recurso a poliuretano expandido ou EPS como isolante, complementado pela rigidez conferida através das placas OSB (ver Figura 5.5). Sendo um elemento pré-fabricado, as suas dimensões podem ser adaptadas em função da estrutura em questão, minimizando assim os desperdícios em obra [50].



Figura 5.5 – Esquerda: painel isolado estrutural (SIP); direita: construção através do sistema por painéis SIP [50]

Outro modo de aplicação deste género de sistema consiste na utilização dos previamente descritos painéis de madeira lamelada cruzada (CLT). Uma diferença entre estes dois tipos de construção reside no facto de, no caso da utilização de painéis em CLT, o isolamento da estrutura é realizado pelo exterior, em obra, enquanto que na construção em SIP, este está presente no interior do elemento estrutural. No entanto, e como já foi referido, a opção pelo CLT tem-se tornado cada vez mais comum, principalmente em estruturas onde a exigência de resistência estrutural é superior, como em escolas, apartamentos ou edifícios de escritórios com espaços amplos. No decorrer do estágio, foi iniciado um projeto pela ADEPT onde parte da estrutura de uma pista de gelo, de nome “*Cool Venues Ice Rink*”, em Cambridge, Reino Unido, será construída utilizando CLT (ver Figura 5.6). Nesta estrutura mista, com capacidade para acomodar cerca de 600 espectadores e mais de 500 patinadores [57], toda a laje que suporta as bancadas bem como o mezanino existente e as próprias bancadas serão construídas através de painéis CLT, de espessuras entre 100 e 200 mm, utilizando 3, 5 ou 7 camadas, em função

não só das cargas a que será sujeito cada painel, mas também de um período de resistência ao fogo de 60 minutos. Na seguinte figura encontra-se ilustrado o modelo geral da estrutura em SketchUp, juntamente com uma secção e um plano onde são evidenciados os elementos que irão compor a laje intermédia, no qual se pode facilmente verificar a localização dos painéis (em cor cinza). Ainda que não tenha ocorrido uma participação activa por parte do mestrando neste projeto, foi feito um acompanhamento diário do mesmo até ao término do período de mobilidade, permitindo assim uma melhor compreensão relativa à aplicação e funcionamento deste produto.

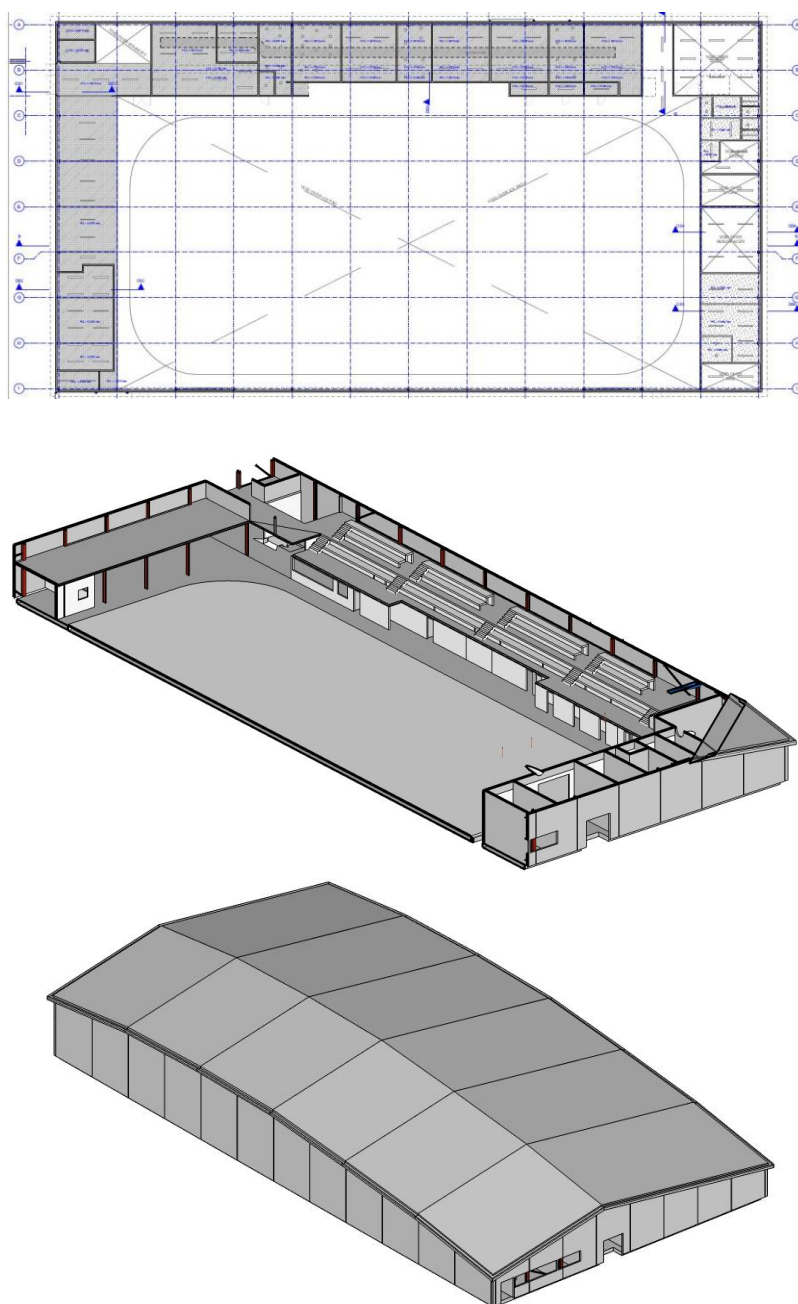


Figura 5.6 – Modelo em SketchUp e plano de lajes intermédias em CLT no projeto *Cool Venues Ice Rink*

5.3.3 Sistema em madeira leve

O sistema de construção em madeira leve (ou *Timber Frame*) corresponde ao sistema aplicado nos projetos elaborados no decorrer do estágio, pelo mestrando, apresentados no capítulo seguinte. Este sistema consiste de uma forma simples na utilização de montantes e vigotas, espaçados a uma determinada distância (usualmente 600, 400 ou 300 mm), em função das cargas a suportar. No caso dos montantes, os espaços entre estes são preenchidos por um material isolante e geralmente revestidos por painéis OSB com 9 mm de espessura, conferindo rigidez e resistência mecânica ao painel formado (ver Figura 5.7). Esta técnica é utilizada em grande escala na construção habitacional, desde um a seis ou sete pisos e, uma vez que os painéis podem ser pré-fabricados e transportados para o local da obra, deixando aberturas para a posterior instalação de portas e janelas, o tempo de construção é relativamente reduzido. De modo semelhante, as asnas que formam a estrutura de cobertura da maioria destes edifícios são também pré-fabricadas e transportadas diretamente para o local de construção onde, juntamente com os elementos que compõem as lajes intermédias e os painéis já no local, permitem a construção da superestrutura de uma habitação de um ou dois pisos em poucos dias [50, 53]. Na descrição deste sistema, é utilizado um projeto em que o mestrando participou no decorrer do estágio, servindo o seu modelo em SketchUp como referência na ilustração de alguns detalhes associados a este tipo de construção.

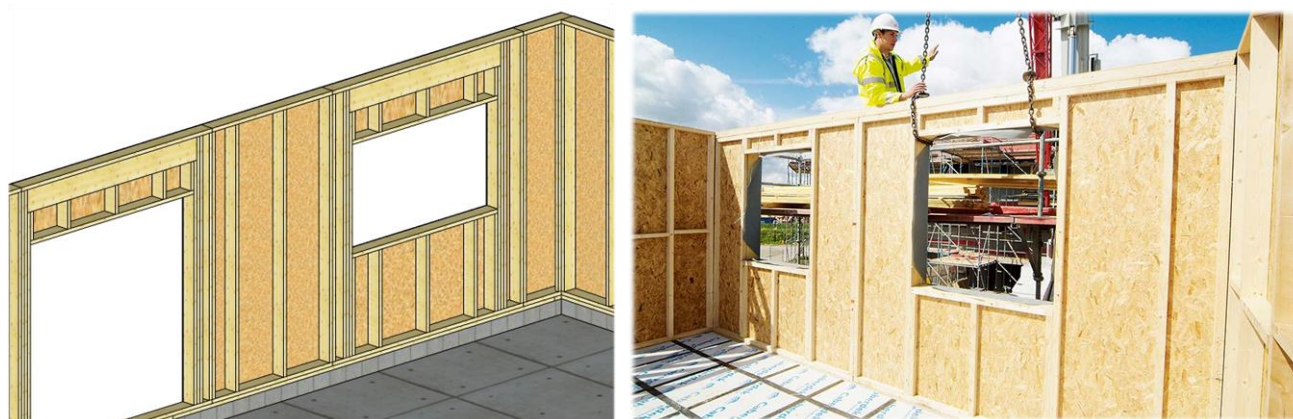


Figura 5.7 – Paredes formadas por painéis no sistema *Timber Frame* [50]

Em termos de faseamento construtivo, e no caso de se tratar de uma estrutura a erguer a partir do nível do solo (excluindo portanto anexos sobre estruturas existentes), são inicialmente executadas as fundações superficiais em betão onde pode ser, por um lado, criada uma plataforma ou ensoleiramento

geral ou, por outro, um conjunto de fundações lineares (compostas pelos denominados blocos de 7N, ou seja, com 7 MPa de resistência à compressão) ao longo do perímetro das paredes exteriores e interiores, complementadas por blocos de betão leve de altura entre os 100 e os 150 mm, distribuindo a carga pela área de contacto (ver Figura 5.8). Sendo este sistema estrutural caracterizado pela leveza da superestrutura, as cargas a transmitir ao solo não são tão intensas quando comparadas a outros sistemas, conduzindo a uma redução no volume de betão necessário na execução das fundações. Em termos de dimensionamento, compete ao engenheiro estrutural conceber a estrutura tendo em conta o seu aspeto económico, procurando reduzir ao máximo o número de paredes estruturais (parede resistente ou *load bearing wall*), o que se traduz numa redução a nível de fundações.

Após a execução dos elementos em betão são fixadas, através de pregos de disparo, as primeiras guias de madeira (também designadas por *sole plates*), de forma geral com 38 mm de altura, que servirão de base para a instalação dos painéis, separadas do primeiro por uma membrana impermeável (*damp-proof course* ou DPC) (ver Figuras 5.8 e 5.9).

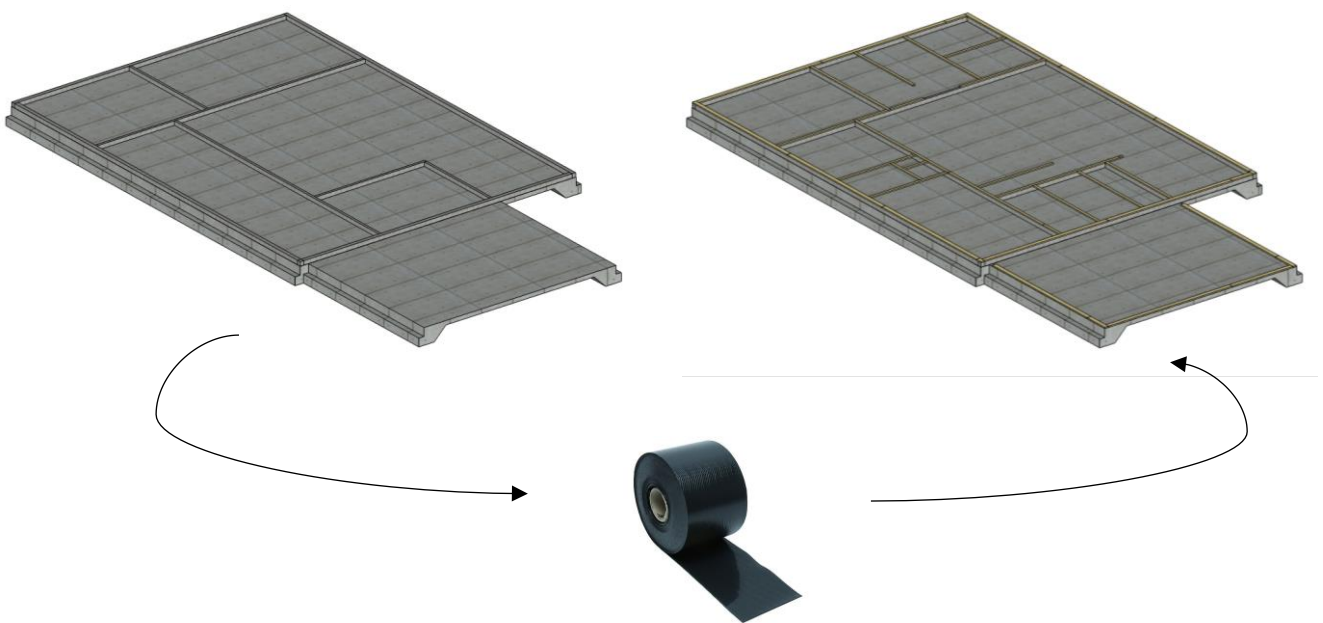


Figura 5.8 – Fundação da estrutura com blocos de betão leve antes (esquerda) e após (direita) a colocação da DPC e da primeira guia de madeira

Um dos fatores aos quais se deve a limitação em altura deste tipo de estruturas consiste na capacidade limitada da primeira guia de madeira instalada sobre o betão em resistir a esforços de compressão

perpendicular à direção das suas fibras, provocados pelo peso dos painéis estruturais acima desta. Em termos de revestimento, as paredes exteriores podem ser envolvidas por uma parede autoportante em tijolo ou pedra, construída a partir do solo como sistema independente, ou por outros sistemas de revestimento mais leve como revestimento em madeira, azulejos ou reboco, apoiados na estrutura em madeira. Ambos os modos de revestimento conferem à estrutura alguma resistência a ações horizontais, devendo ser devidamente identificados os materiais e respetivas características numa análise de estabilidade estrutural. No projeto de referência, o revestimento a executar consiste num sistema autoportante em tijolo com 100 mm de espessura (ver Figura 5.9).

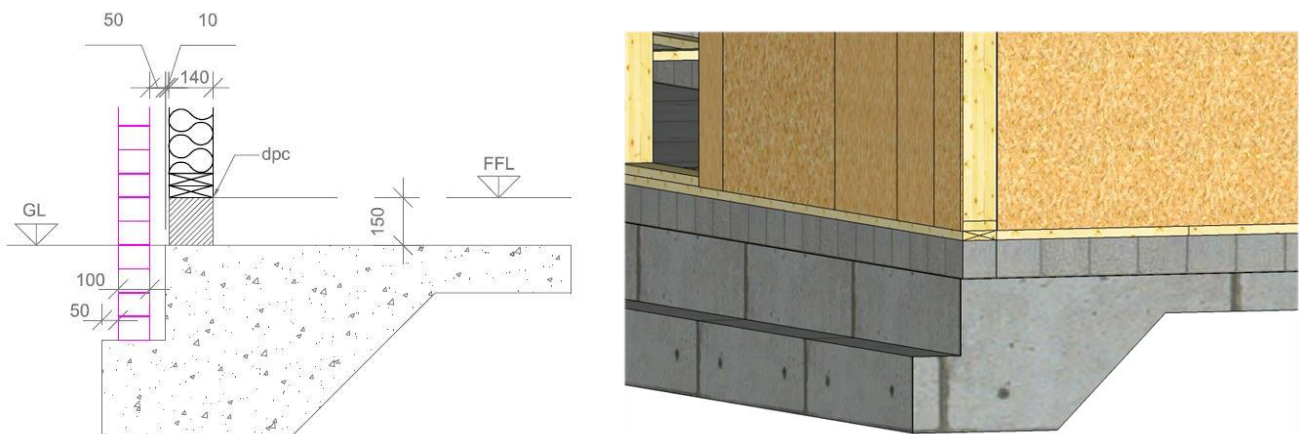


Figura 5.9 – Detalhe de uma fundação superficial no sistema *Timber Frame* em 2D (esquerda) e 3D (direita)

Relativamente às paredes neste sistema, estas podem ser **exteriores**, **interiores** ou **partilhadas** (que separam fogos), estruturais ou não estruturais. Por norma, todas as paredes exteriores e partilhadas são consideradas como estruturais, enquanto que as paredes interiores podem ser utilizadas como elemento de suporte ou simplesmente como uma partição, não sendo neste caso considerada como um elemento com capacidade de carga.

As paredes exteriores são geralmente constituídas por montantes com dimensões estandardizadas (de secção 38x140 mm), espaçados por 600 mm (máximo) e unidos por uma guia inferior e outra superior através de ligações aparafusadas. Pelo lado exterior são pregadas placas de OSB com 9 mm de espessura e pelo interior uma ou duas placas de gesso cartonado com 12,5 mm cada, formando assim um painel estrutural. No seu interior, entre os montantes verticais, é colocado um elemento isolante conferindo ao painel um melhor comportamento térmico e acústico. Entre a placa de OSB e o revestimento é deixada por norma uma cavidade livre de 50 mm para efeitos de ventilação. Estes

paineis são, após fabricados, transportados para o local da obra e assentes sobre a primeira guia de madeira (ver Figura 5.10).

As paredes interiores e partilhadas diferem das exteriores pela sua espessura, sendo neste caso comum a utilização de montantes de secção transversal 38x89 mm. Em termos de elementos de estabilização e contraventamento, a utilização de placas OSB varia com as especificações e exigências de cada cliente, sendo contudo necessária em alguns casos. Regra geral, são utilizadas nas paredes interiores uma ou duas placas de gesso cartonado em cada face da mesma (ver Figura 5.10).

As paredes partilhadas (ou *party walls*), por sua vez, consistem em duas paredes (usualmente designadas por *leafs*) de estrutura semelhante à parede interior, com a diferença de que, no caso das paredes partilhadas, ambas possuem uma placa OSB na sua face externa, deixando uma cavidade livre de 50 mm entre ambas as placas (ver Figura 5.10). Este tipo de paredes é utilizado na divisão de apartamentos pertencentes ao mesmo edifício, por exemplo, evitando não só a transmissão de vibrações entre estes, incrementando o seu comportamento acústico, mas também a propagação de fogo entre os mesmos.

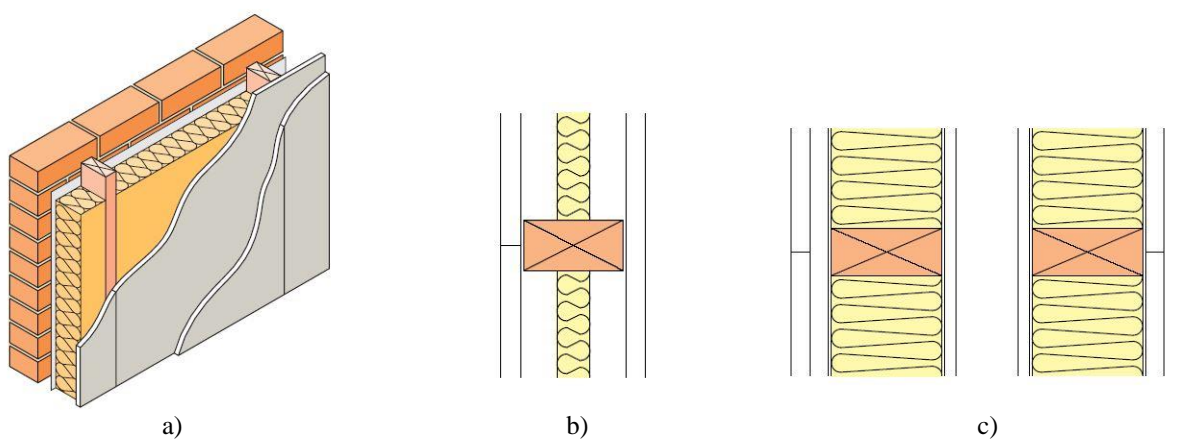


Figura 5.10 – Secções típicas de paredes no sistema Timber Frame: a) parede externa; b) parede interna; c) parede partilhada (*party wall*) [58]

Como já referido, para que um equilíbrio estrutural seja atingido, são necessários elementos para absorção de esforços na direção horizontal em cada painel, provocados por ações laterais como o vento. Para tal, além do recurso a placas de OSB, pregadas aos montantes, são utilizados elementos de fixação na guia inferior (geralmente parafusos) para transmissão dos esforços do painel para a primeira guia (*sole plate*), contrariando assim o efeito de derrubamento (ver Figura 5.11) [24].

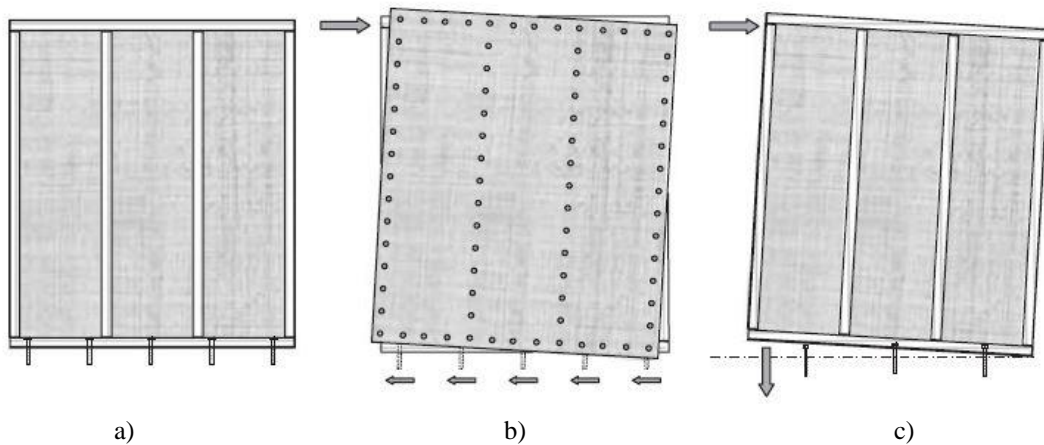


Figura 5.11 – Resistência a ações laterais: a) parede resistente; b) *racking*; c) derrubamento [24]

Após a montagem dos painéis, completos por lintéis em madeira ou EWP (ou vigas em aço, caso o vão a superar e as cargas a suportar assim o exigam) nas zonas de abertura, como janelas ou portas, é possível ter uma ideia geral da forma que a estrutura irá apresentar (ver Figura 5.12). Neste ponto, o piso térreo encontra-se praticamente construído e, caso se trate de uma estrutura de um só piso, são colocadas vigotas ou asnas, apoiadas nas paredes exteriores e em determinadas paredes interiores (estruturais), formando assim uma estrutura de cobertura.

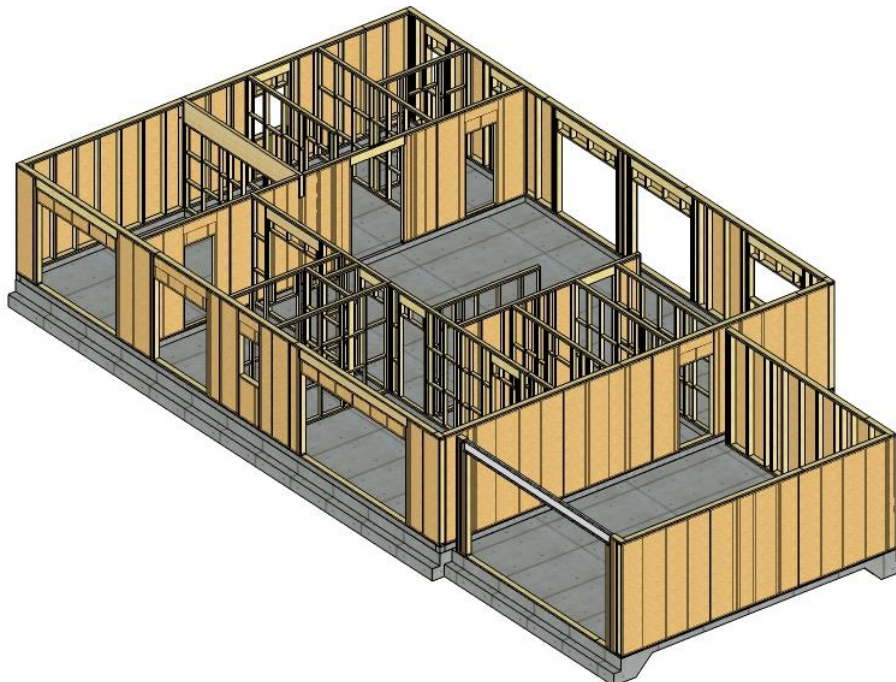


Figura 5.12 – Piso térreo de uma estrutura ainda sem cobertura, em *Timber Frame*

Existem diversas opções no que diz respeito à construção de pisos intermédios em habitações, desde vigotas de secção retângular puramente em madeira, até às *Open Metal Web Joists*, passando pelas *I-Joists* (ver subcapítulo 4.1.3). Todas estas soluções são, apesar das suas diferentes formas, semelhantes entre si, encontrando-se espaçadas (à semelhança dos montantes) por 300, 400 ou 600 mm e com capacidade de vencer vãos até os sete ou oito metros, em função das dimensões da sua secção transversal. O material isolante situa-se entre as vigotas, e todo o sistema é revestido inferiormente por duas placas de espessura entre os 12.5 e os 19 mm em gesso cartonado, fixadas através de parafusos às vigotas. Na face superior, são colocadas placas em *plywood* ou OSB, geralmente entre 15 e 22 mm de espessura, criando assim um piso (ver Figura 5.13) [59, 60].

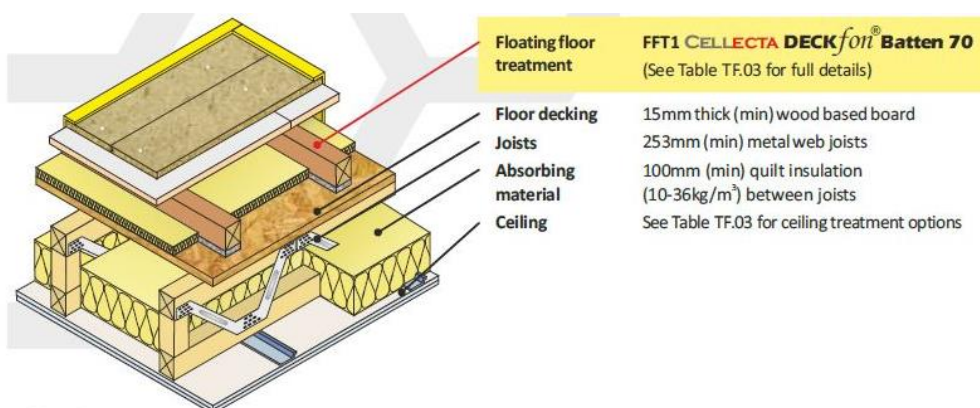
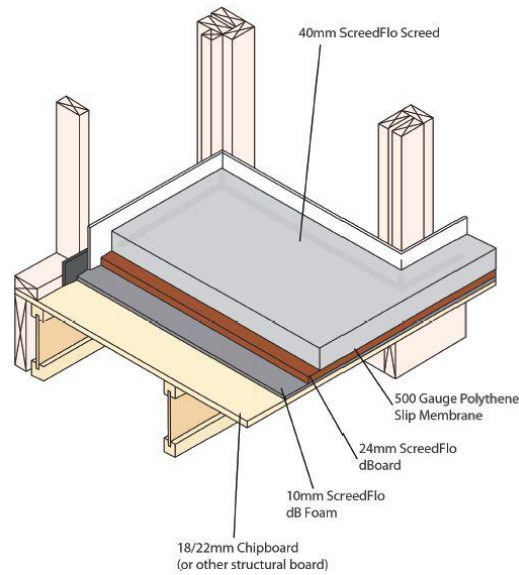
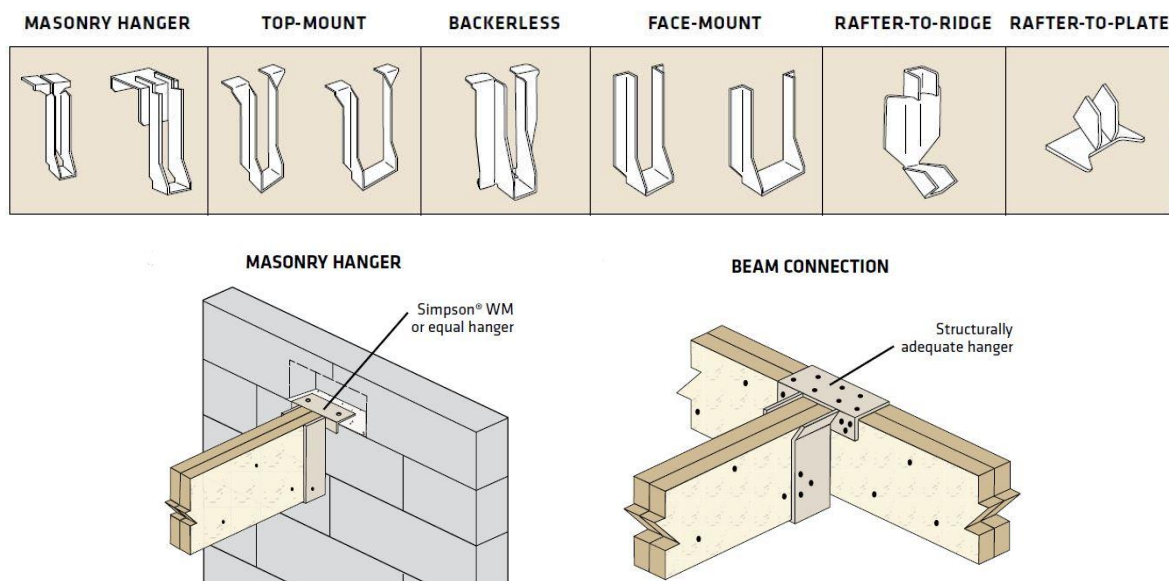


Figura 5.13 – Robust Detail E-FT-3 com opção de pavimento flutuante [60]

A escolha de um sistema tanto pode ser definida pelo cliente, como deixada ao critério dos engenheiros estruturais. Para facilitar a sua aplicação, existem inúmeros manuais de utilização com valores tabelados para cada tipo de vigota, permitindo desta forma uma rápida escolha em função do vão a vencer, da classe de serviço, bem como das cargas pontuais e distribuídas a suportar. De forma semelhante, foram criados os *Robust Details* [59], que consistem em soluções padronizadas e regulamentadas para aplicação em paredes e lajes neste sistema estrutural (ver Figura 5.13). No decorrer do estágio, as opções mais utilizadas foram as vigotas acima mencionadas, com variantes como *Finnframe* [61] e *LP SolidStart* [62] (modelos de vigotas em forma de **I**), assim como *Easi-Joists* [63] e *Posi-Joists* [64] (modelos com alma metálica aberta), incluindo a utilização de um sistema de reforço acústico de lajes intermédias de nome *Screedflo dB System* [65], composto por uma espuma com capacidade de resistência à compressão, por placas densas e impermeáveis colocadas sobre a primeira, por uma membrana de polietileno e uma camada de betonilha com 40 mm de altura, perfazendo uma espessura total de 74 mm, aplicada sobre as vigotas (ver Figura 5.14).


 Figura 5.14 – Princípio de aplicação do *Screeflo System* [65]

Para que seja possível a realização de uma ligação rígida entre vigotas perpendiculares entre si ou entre vigotas e as respetivas paredes (tanto de madeira como de alvenaria) onde estas se encontram apoiadas, é necessária a utilização de conectores, tipicamente em aço. Para tal, e uma vez que a variabilidade de modelos de vigotas é significativa, foram desenvolvidos vários tipos de conexões, permitindo uma adaptação a cada situação em particular, sendo ilustrados alguns na figura 5.15.


 Figura 5.15 – Conectores *Simpson Strong-Tie* e *ITW-Cullen BP* e exemplos de aplicação

Por fim, no que diz respeito à construção de uma cobertura no sistema *Timber Frame*, existem essencialmente dois tipos de cobertura distintos: a plana e a inclinada. No primeiro caso, a estrutura de cobertura assemelha-se a uma laje intermédia, através da utilização de vigotas espaçadas a uma determinada distância. Na segunda situação, recorre-se usualmente a asnas de madeira, formando uma estrutura triangular como cobertura. Existem, no entanto, diversos tipos de asna disponíveis, em função da forma como são dispostos alguns dos elementos que as constituem, como as pernas, os estribos e a linha, permitindo a criação de espaços habitáveis ou sótãos no seu interior. No exemplo de referência, pretende-se que parte da estrutura de cobertura seja acessível para arrumações, enquanto que outra parte deverá ser construída como um teto elevado, criando um espaço amplo no piso térreo com um pé-direito superior ao existente na restante área habitacional (ver Figura 5.16).

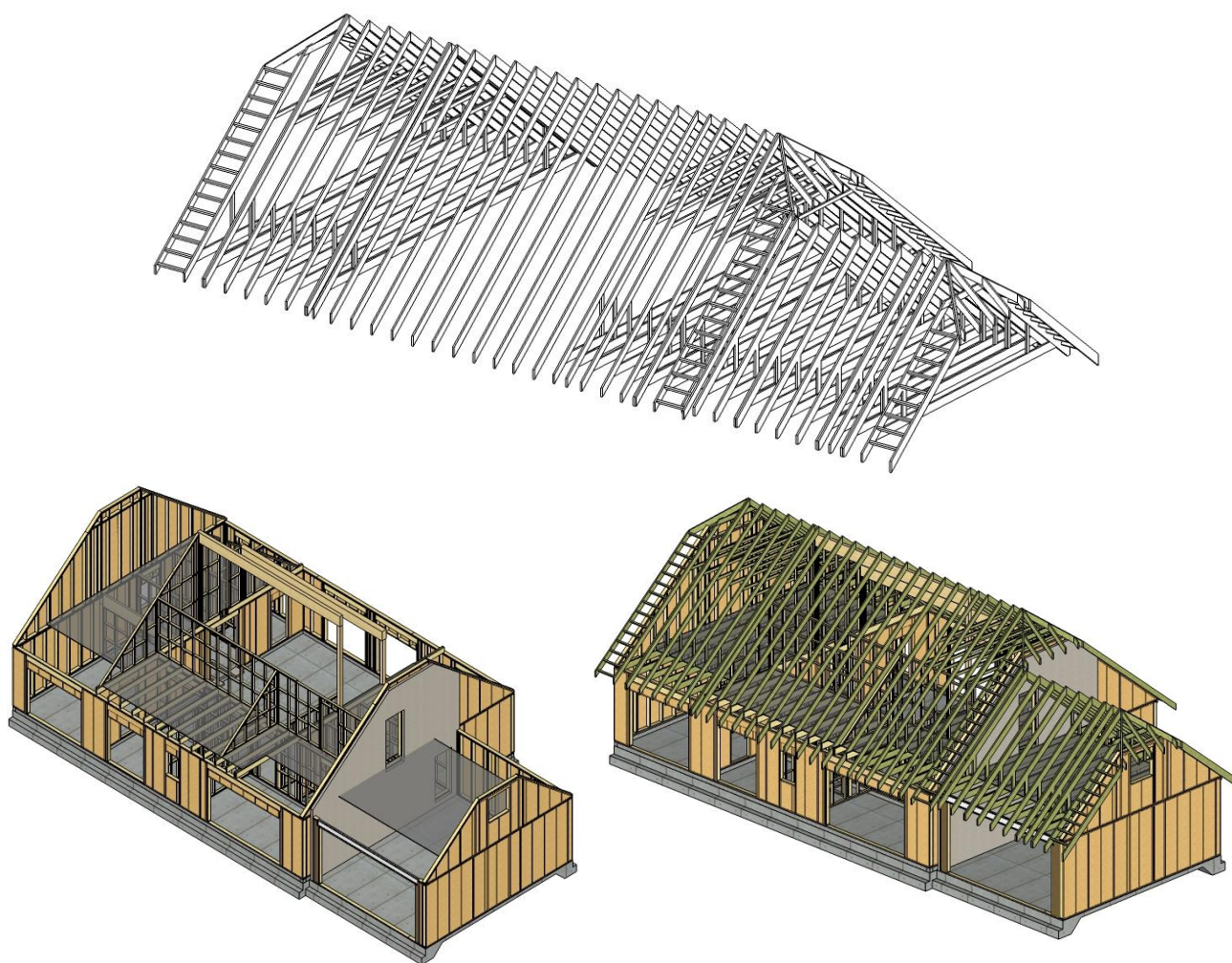


Figura 5.16 – Modelo em SketchUp da elevação do primeiro piso e instalação da cobertura, em *Timber Frame*

6 PROJETOS ELABORADOS

Neste capítulo são apresentados alguns dos projetos elaborados no decorrer do estágio. Apesar do mestrando ter participado em cerca de 44 diferentes projetos, apenas 5 destes foram conduzidos de início ao fim pelo mesmo, incluindo um contacto de forma autónoma com o cliente. Nos restantes 39, foi requerida ao mestrando a execução de variadas tarefas pontuais, no âmbito não só de dimensionamento estrutural mas também de *design* estrutural, com o intuito não só de aumentar a produtividade e eficácia da equipa, mas também de permitir uma adaptação gradual à forma como são abordados e elaborados tais projetos, essencialmente no sistema *Timber Frame*. Na ADEPT, é valorizada a simplicidade na abordagem e no desenvolvimento de um novo projeto, aliada a uma flexibilidade na procura de soluções para cada situação em particular, permitindo assim a conceção de um modelo estrutural de fácil leitura para o cliente.

Enquanto consultora de engenharia estrutural e *design*, a maior parte do volume de trabalho consiste em projetar superestruturas recorrendo ao sistema *Timber Frame*, sendo os restantes projetos complementares delegados a outras entidades. Regra geral são entregues à equipa, caso a proposta para a realização do projeto seja aceite, desenhos de arquitetura incluindo localização geográfica, planos gerais e secções referentes à estrutura em causa. Estes elementos, juntamente com uma série de especificações por parte do cliente, constituem os elementos iniciais do projeto, sendo com base nestes que todo o trabalho se desenvolverá a partir desse ponto.

Relativamente à filosofia de projeto, é seguida a família de normas inglesas BS 5268 (uso estrutural da madeira) e BS 6399 (carregamentos em edifícios). A principal diferença entre estas normas e o Eurocódigo 5 [27], que vem substituir as BS 5268, consiste na abordagem ao processo de dimensionamento. Por um lado, o Eurocódigo 5 fornece regras essenciais e fórmulas gerais, através de um princípio de dimensionamento por estados limite, enquanto que o BS 5268-2 [28], por sua vez, baseia-se numa abordagem mais familiar para o utilizador, através da definição de tabelas de fácil interpretação, com valores de resistência típicos em função das dimensões e da classe estrutural do elemento a verificar, conduzindo a uma aceitação ou rejeição da solução considerada. Todos os projetos foram desenvolvidos através da utilização uma folha de cálculo em Excel, criada pela ADEPT à luz das recomendações elaboradas pela TRADA (*Timber Frame Housing – Structural Recommendations*) e pela Structural Timber Association (*Structural guidance for Timber Frame*

Platform) e devidamente certificada. Referências às normas inglesas (e correspondentes secções nos Eurocódigos) são feitas, quando apropriado, ao longo da folha de cálculo.

Nos projetos de estabilidade estrutural desenvolvidos, o ponto de partida está na análise e formatação dos desenhos arquitetónicos recebidos, idealmente em AutoCAD, onde toda a informação desnecessária no âmbito deste tipo de projeto é descartada. Deste modo, é criado um modelo de marcações estruturais (*Initial Mark-Ups*) o mais simples possível permitindo uma análise clara da futura localização e funcionamento de todos os elementos resistentes. Neste modelo primário, é definida primeiramente a localização das paredes estruturais, exteriores, interiores (se necessário) e partilhadas (caso aplicável), tendo em consideração a planta de fundações fornecida. Com a posição das paredes e respetivas zonas de abertura como portas e janelas devidamente marcadas, é então possível determinar a direção na qual se irão desenvolver as vigotas, caso se trate de uma laje intermédia ou de uma cobertura plana, ou as asnas, caso se trate de uma cobertura inclinada. Esta escolha depende não só dos suportes existentes (paredes), mas também da espessura máxima da laje, definida pelo cliente. Por vezes, o dimensionamento estrutural das vigotas e asnas não é incluído nos serviços requeridos à ADEPT, sendo realizado por uma terceira parte. Nesse caso, é necessária alguma informação (geralmente nas especificações do cliente) referente às suas características, permitindo uma correta simulação da carga originada pelas mesmas sobre os painéis. Com este modelo criado, é então possível inserir os dados de entrada (*inputs*) na referida folha de cálculo. Destes *inputs* fazem parte informações relativas a:

- **Carregamento (*Loading*)**

Nesta folha são inseridos os valores correspondentes à massa volúmica e espessura (quando aplicável) dos vários materiais constituintes das lajes intermédias, coberturas planas ou inclinadas (incluindo o ângulo de inclinação) e paredes, incluindo revestimentos e respetivas excentricidades em relação à face dos montantes. É necessária aqui dar especial atenção aos valores de altura das paredes considerados, bem como do espaçamento entre montantes e vigotas, uma vez que estes devem ser coerentes com as folhas de cálculo que se seguem. Os valores de carregamento permanente (*dead load*) e imposto (sobrecargas ou *live load* – usualmente 1.5 kN/m^2 como carga distribuída e 1.4 kN como carga pontual no caso de atividades domésticas ou residenciais, segundo a BS 6399-1 [66]) obtidos nesta folha a partir dos dados inseridos têm como unidade o kN/m^2 (ou kPa) e, no caso das paredes, é também determinado o valor do carregamento linear correspondente (kN/m).

- **Ação do vento (*Wind Loading*)**

A determinação do impacto do vento sobre uma estrutura não é um processo simples. Uma vez que a ação do vento é considerada uma ação dinâmica, i.e. a pressão que esta provoca na estrutura varia em função da direção e velocidade do seu movimento, o seu efeito deve ser analisado como tal. Isto conduz a diferentes valores de pressão associados a diferentes partes de uma estrutura. Como tal, é necessário primeiramente conhecer a localização do edifício (ver anexo I.1) e o ângulo que este faz com o Norte. Além disso, é também necessário definir qual a sua fachada longa, que corresponde ao seu comprimento (*elevation side*) e a curta, que corresponde à sua largura (*gable side*), tendo em conta o formato da cobertura a utilizar.

Quando se trata de uma cobertura de duas águas, uma das mais comuns na construção em madeira, unidas por uma cumeeira (*ridge*), essa cumeeira desenvolve-se na fachada longa, sendo as paredes perpendiculares (*gables*) elevadas até à mesma (ver Figura 6.1- a). Neste caso importa conhecer, para a determinação da carga provocada pelo vento, as cotas às quais se situam o beiral (*eaves*) e a cumeeira.

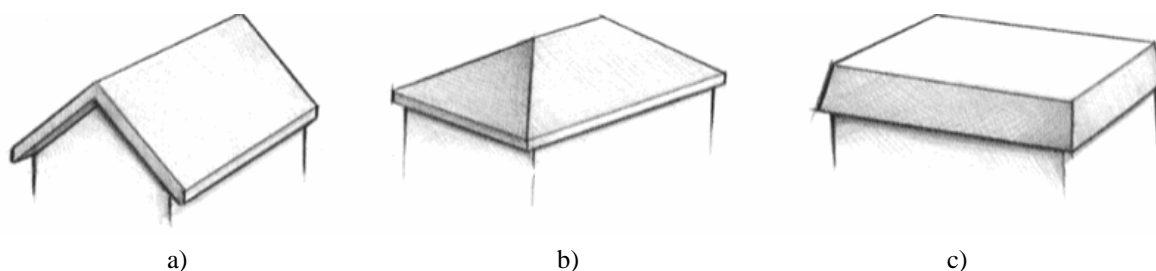


Figura 6.1 – Exemplos de coberturas: a) *gable roof* (duas águas); b) *hip roof* (quatro águas); c) *mansard roof*

Segundo a BS 6399-2 [67], existem essencialmente dois métodos para simular a ação do vento numa estrutura: o método geral (*standard method*) e o método direcional (*directional method*). O primeiro método permite representar a ação do vento através de cargas estáticas equivalentes ortogonais para direções do vento normais às faces da estrutura. Contudo, para que este possa ser aplicado é, por um lado, assumido que a estrutura em causa não se encontra sujeita a excitações dinâmicas (a atividade sísmica no Reino Unido é pouco significativa) e, por outro, aplicado um fator de ampliação dinâmica (C_r), em função da altura do edifício a partir da superfície (H) e do tipo de edifício a projetar (K_b). A norma inglesa BS 6399-2 define os referidos parâmetros (ver anexo I.2) e fornece uma tabela com os possíveis valores do fator K_b (ver Tabela 6.1), sendo utilizado o valor correspondente ao sistema *Timber Frame* (0,5). Além deste, existem ainda fatores aplicados em função da altitude do local de

construção, da distância mais curta do local em relação ao mar, da probabilidade de ocorrência de velocidades de vento superiores à considerada, de direção e de sazonalidade, para o caso de trabalhos temporários (sendo os dois últimos geralmente considerados iguais à unidade). Este método, sendo conservativo, pode no entanto ser utilizado em simultâneo com o método direcional, criando assim um método híbrido. A forma mais comum de hibridez destes métodos consiste na consideração de uma velocidade do vento efetiva (V_e) determinada pelo método geral, associada a coeficientes de pressão determinados pelo método direcional. Esta forma de aplicação destina-se aos casos em que a estrutura possui uma forma bem definida mas a sua exposição local não é clara. Deste modo, é possível obter valores mais precisos em termos de pressão dinâmica, conduzindo assim a uma análise menos conservativa [67].

Tabela 6.1 – Fator de modificação associado ao tipo de edifício, K_b [67]

Type of building	K_b
Welded steel unclad frames	8
Bolted steel and reinforced concrete unclad frames	4
Portal sheds and similar light structures with few internal walls	2
Framed buildings with structural walls around lifts and stairs only (e.g. office buildings of open plan or with partitioning)	1
Framed buildings with structural walls around lifts and stairs with additional masonry subdivision walls (e.g. apartment buildings), buildings of masonry construction and timber-framed housing	0.5

Relativamente à orientação do edifício, o ângulo de referência corresponde ao ângulo formado entre o Norte e a normal à fachada longa (*elevation side*). Enquanto que no método geral, são obtidos geralmente valores de pressão dinâmica para ângulos de 0°, 90°, 180° e 270° (como ângulos de referência, ver Figura 6.2) na utilização do método híbrido, é possível obter valores entre os 0° e os 330° (em que 0° neste caso corresponde ao Norte), em incrementos de 30°. Este último método tem a vantagem de permitir a consideração de elementos obstrutivos (como edifícios) adjacentes à estrutura em análise, o que conduz a uma redução dos valores de pressão dinâmica obtidos na direção do obstáculo. O cenário mais pessimista corresponde ao maior valor de pressão obtido e, no Reino Unido, dada a sua posição geográfica, corresponde geralmente ao valor associado a um ângulo de 240°.

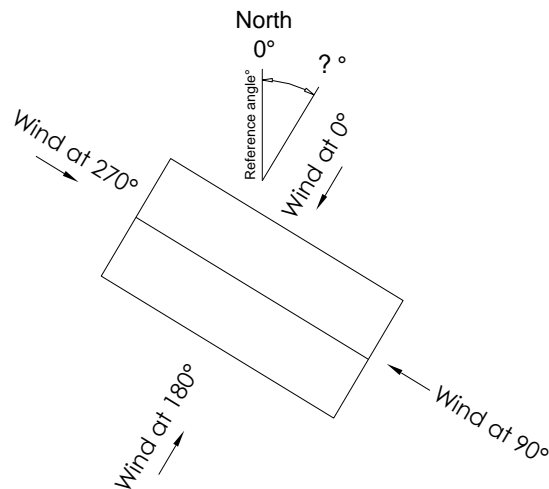


Figura 6.2 – Ângulo de referência no método geral de análise da ação do vento (adaptado da folha de cálculo descolvida pela ADEPT Consulting (UK))

Para uma correta avaliação da ação do vento, é necessário também ter em consideração os acima mencionados coeficientes de pressão, que dependem das dimensões e da forma do edifício. Existem coeficientes de pressão externa (C_{pe}) e interna (C_{pi}), podendo ser associados a paredes e coberturas. De uma forma simplista, estes coeficientes permitem dividir tais elementos em diferentes áreas, simulando assim o decréscimo gradual da força provocada pelo vento ao longo dos painéis numa fachada dada a sua capacidade resistente, incluindo fenómenos de sucção originados por pressão interna (ver Figura 6.3). Deste modo, uma vez que nem todas as paredes e elementos de cobertura se encontram sujeitos à mesma intensidade desta ação, a aplicação dos referidos coeficientes permite uma avaliação mais precisa do carregamento, a aplicar em cada caso em particular (na verificação de uma viga, por exemplo, a carga a aplicar com origem na ação do vento irá variar consoante a sua localização na estrutura).

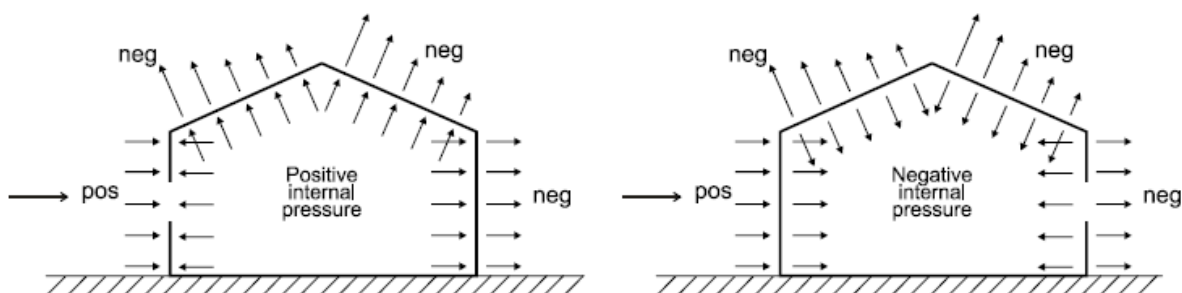







Figura 6.3 – Efeito de sucção provocado pela ação do vento [68]

• **Estabilidade global (*Overall Stability*)**

Nesta folha, são verificados os fenómenos de deslizamento (*sliding*), derrubamento (*overturning*) e levantamento (*uplift*) a nível global da estrutura. Para tal, segundo a BS 5268 (secção 6.1) [69], é necessário determinar o seu peso próprio bem como a contribuição da alvenaria (caso exista) que a reveste, sendo estes os responsáveis pela resistência ao momento de derrubamento. A resistência ao deslizamento é realizada através de forças de fricção ou atrito entre os painéis que formam as paredes e a respetiva fundação, sendo utilizado um coeficiente de atrito igual a 0,4 com a utilização de membrana impermeável. Caso esta resistência seja insuficiente para fazer face às forças horizontais atuantes, como o vento, recorre-se à utilização de elementos de fixação adicionais ou reduz-se o espaçamento dos existentes.

A presença de elementos de alvenaria em torno da estrutura funciona como um escudo de proteção contra a ação do vento. Para ter em conta a sua presença, recorre-se à exploração do fator de modificação (K_{100}), através do qual é reduzida a carga provocada pela ação do vento. Este fator é determinado em função da área de aberturas nas paredes ($0.45 \leq K_{100} \leq 1$), pela norma BS 5268 (secção 6.1), através da seguinte tabela (aqui ilustrada somente até 3 pisos).

Tabela 6.2 – Fator de modificação K_{100} [67]

Number of storeys	Percentage of loaded wall occupied by openings ^a	K_{100}		
				
		^(a) For masonry walls with buttresses or returns as defined in 3.2.3.1 and 3.2.3.2 and not greater than 9 m centre to centre ^b 	^(a) For masonry walls with buttresses or returns as defined in 3.2.3.1 and 3.2.3.2 at one end only and wall length not greater than 4.5 m ^c 	For masonry walls without buttresses or returns ^d
1 and 2	0	0.45	0.60	0.75
	10	0.50	0.64	0.78
	20	0.56	0.68	0.80
	30	0.61	0.72	0.83
	40	0.66	0.76	0.85
	50	0.71	0.80	0.88
	60	0.77	0.84	0.90
	70	0.82	0.88	0.93
>70	1.00	1.00	1.00	
3	0	0.50	0.68	0.85
	10	0.55	0.71	0.87
	20	0.60	0.74	0.88
	30	0.65	0.78	0.90
	40	0.70	0.81	0.92
	50	0.75	0.84	0.93
	60	0.80	0.87	0.94
	70	0.85	0.91	0.96
>70	1.00	1.00	1.00	

• **Contraventamento (*Lower and Upper Floors Racking Resistance*)**

A ação do vento, acima descrita, provoca esforços de corte no plano dos painéis que formam as paredes. Quando estas são utilizadas como estruturais ou resistentes, é necessário ter em conta a transmissão de carga oriunda desta ação horizontal, por parte da laje para as mesmas, onde a tendência é de que estas acompanhem o movimento da laje na direção da força aplicada (ver Figura 6.4). Para contrariar este efeito, além do recurso a escoras diagonais, e como anteriormente referido, são utilizadas placas de OSB na face externa da parede, fixadas por pregos. Nesta folha de cálculo, à luz da BS 5268 (secção 6.1), são inseridos vários parâmetros referentes a cada parede resistente como o seu comprimento e altura, área de aberturas, peso próprio, bem como a contribuição das placas de revestimento primárias (OSB nas paredes externas e, se necessário, nas internas), secundárias (placas de gesso cartonado ou *plasterboard*) e da alvenaria, caso aplicável. Deste modo, além da resistência ao deslizamento conferida pelas fixações inferiores, é também conferida estabilidade ao painel. Ainda neste ponto, devem ser especificados parâmetros referentes às fixações a utilizar, nomeadamente o seu diâmetro e espaçamento.

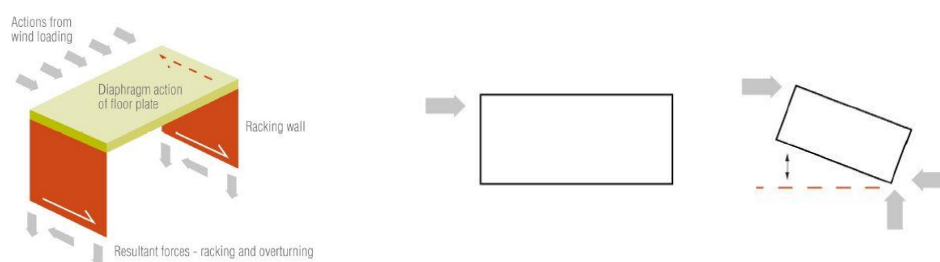


Figura 6.4 – Transferência de forças laterais de uma laje para paredes resistentes [70]

Um aspeto a ter em conta na avaliação do comportamento das paredes, consiste na presença de aberturas nas mesmas. Regra geral, em fase de projeto, estas são divididas nas zonas de abertura, uma vez que a pequena porção de painel que se encontra sobre o lintel não tem influência significativa na transmissão de esforços. Esta divisão é opcional mas, de forma geral, conduz a melhores resultados.

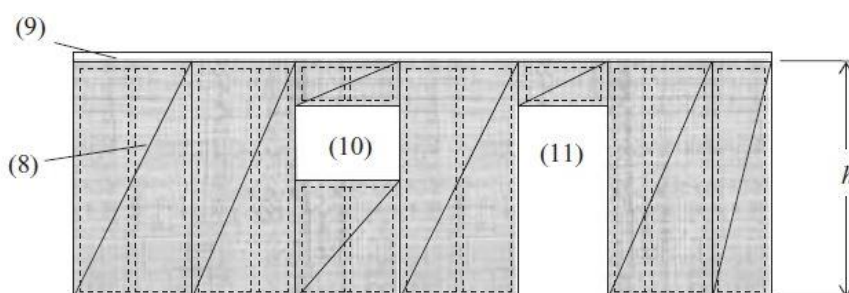


Figura 6.5 – Parede formada por vários painéis e com duas zonas de abertura (adaptado de [24])

(Legenda: 8 – painel; 9 – guia conectora; 10 – janela; 11 – porta)

- **Montantes (Stud Design)**

O dimensionamento das paredes está intimamente ligado ao dimensionamento dos montantes, sendo este o seu principal elemento constituinte. Para tal, é inserida neste ponto informação relativa às suas dimensões (mais especificamente a sua altura e largura), incluindo a distância entre eixos dos mesmos (geralmente 600 mm), ao piso no qual se encontra, ao tipo de carga que sobre ele atua (normalmente laje intermédia ou cobertura) e ao tipo de parede que este constitui (externa, interna, partilhada). É também aqui associada a cada montante, a parede correspondente na análise de contraventamento (*racking resistance*), através de uma referência numérica que invoca os dados obtidos nessa verificação. Genericamente, os montantes são dimensionados com uma classe de resistência C16 (resistência característica à flexão de 16 MPa).

Um cuidado a ter no preenchimento desta folha consiste na ordem com que se processa o dimensionamento dos montantes, sendo primeiro dimensionados os do piso superior e só depois os do piso inferior, permitindo assim a simulação da carga originada pelos primeiros sobre os segundos. De forma geral, a verificação da estabilidade destes elementos é determinada pela combinação de esforços normais (pela carga gravítica do seu peso próprio e pela carga produzida por uma parede situada sobre estes) e de flexão (pela ação horizontal do vento e pelo suporte de vigotas ou asnas). Além disso, são também verificados fenómenos de encurvadura lateral dos montantes, provocada por ação das cargas axiais onde, neste caso, é considerado um comprimento efetivo igual ao seu comprimento real (ver Figura 6.6). Deste modo, a análise torna-se ligeiramente conservativa, uma vez que não é considerada a rigidez fornecida pela fixação parcial dos montantes à guia inferior.

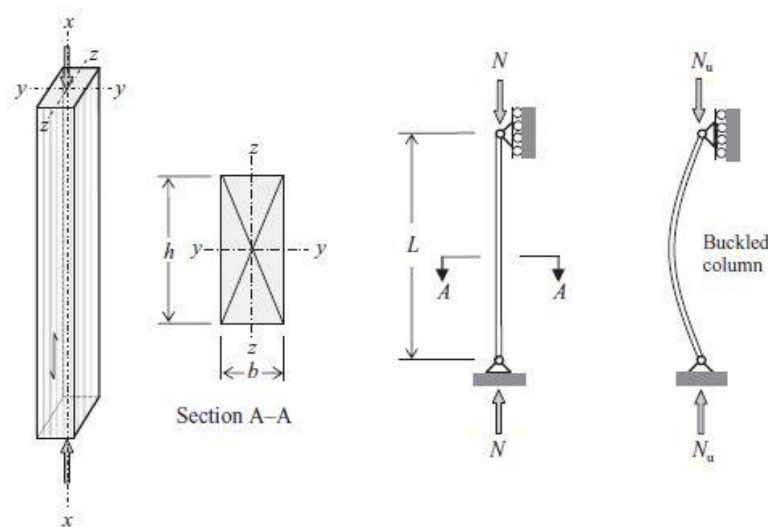


Figura 6.6 – Encurvadura lateral de um pilar ou montante [24]

- **Vigotas (*Solid Joists / I-Joists Design*)**

As vigotas consistem em elementos horizontais que constituem as lajes no sistema de construção *Timber Frame*, cujos principais esforços às quais são sujeitas são esforços de flexão (ver Figura 6.7). Para o seu dimensionamento, importa conhecer não só o vão que estas irão vencer, mas também a localização dos elementos de suporte. No caso da existência de suportes intermédios, como paredes internas, as vigotas podem ser dimensionadas como elementos contínuos sobre estes ou como dois elementos distintos (neste último caso, não é originado um momento fletor negativo na zona de suporte intermédio). O formato das vigotas a utilizar depende das especificações do cliente e, de forma geral, corresponde a uma secção retangular (*solid joists*) ou a uma forma em **I** (*I-Joists*) caracterizadas por uma altura (*depth*) limitada. À semelhança do dimensionamento de montantes, estes elementos encontram-se por norma espaçados por 600 mm podendo, caso necessário, ser reduzido até 400, 300 ou 200 mm, consoante as cargas a suportar (a existência ou não de paredes internas no piso imediatamente acima pode ditar este espaçamento).

Em termos de requerimentos a nível de projeto, é possível afirmar que vigotas mais longas (entre os 5 e os 6 metros) tendem a entrar em rotura por flexão ou por vibração (frequência mínima segundo a BS 6399-1 de modo a evitar fenómenos de ressonância: 8.4 Hz), enquanto que vigotas mais curtas (entre 1 e 3 metros) sujeitas a cargas pontuais significativas, tendem a entrar em rotura por esforço de corte. Nos restantes casos, é o esforço por flexão que geralmente dita o comportamento estrutural destes elementos.

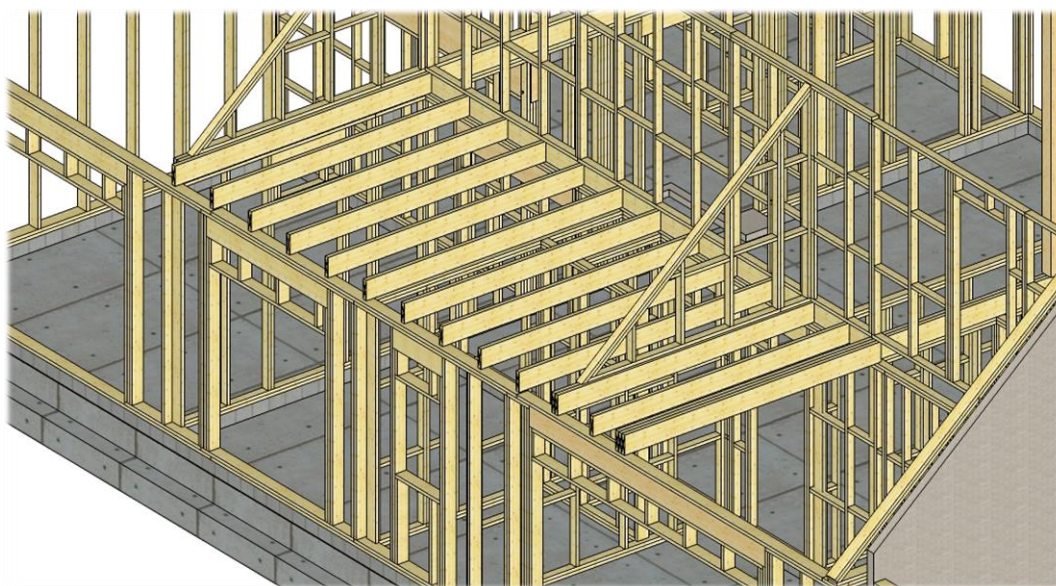


Figura 6.7 – Vigotas em madeira serrada espaçadas por 600 mm, utilizadas no projeto de referência

- **Vigas (*Timber, Steel and Flitch Beam Design*)**

Para o dimensionamento de vigas, incluindo lintéis nas zonas de abertura, vigas de cumeeira e madres suportando pernas (ou varas), geralmente em madeira serrada (C16 ou C24) ou em MLC, é necessária informação de entrada relativa ao seu comprimento, à distância entre pontos de amarração e às cargas que sobre esta actuam, incluindo possíveis cargas pontuais (montantes) e distribuídas (paredes) oriundas de pisos superiores.

À semelhança do caso de vigotas, é verificada a capacidade resistente de vigas a esforços de flexão e ao corte, comparando valores de projeto obtidos com valores admissíveis, em função da secção e classe de resistência da opção escolhida. Novamente, as dimensões destes elementos são limitadas em função da espessura da laje (em altura), caso estas se encontrem inseridas na mesma, ou da espessura da parede, caso se trate de um lintel ou de uma viga incorporada na parede não resistente (Figura 6.8).

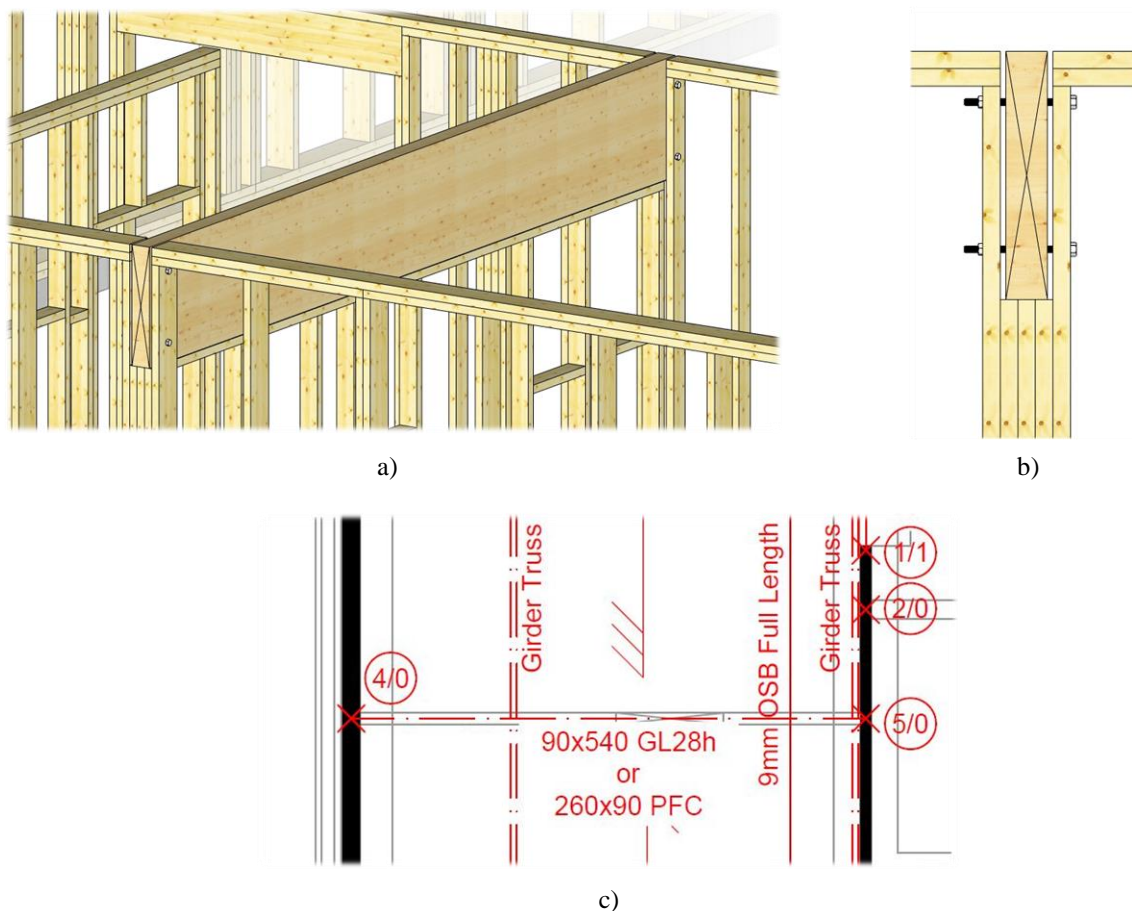


Figura 6.8 – Viga em MLC utilizada no projeto de referência: a) localização da viga, inserida numa parede interna; b) secção transversal; c) marcação estrutural 2D

O recurso a elementos em aço é geralmente deixado como última opção. No entanto, em alguns casos, uma viga em madeira serrada ou em MLC não satisfaz as condições necessárias para que possa ser utilizada estruturalmente dentro das dimensões permitidas. Nestas situações, opta-se por uma solução em aço (usualmente um perfil UB ou UC) que resista aos esforços em questão, sem exceder as referidas dimensões (ver Figura 6.9). Contudo, é fornecida ao cliente uma opção em madeira, deixando ao seu critério a escolha por uma das soluções estruturais.

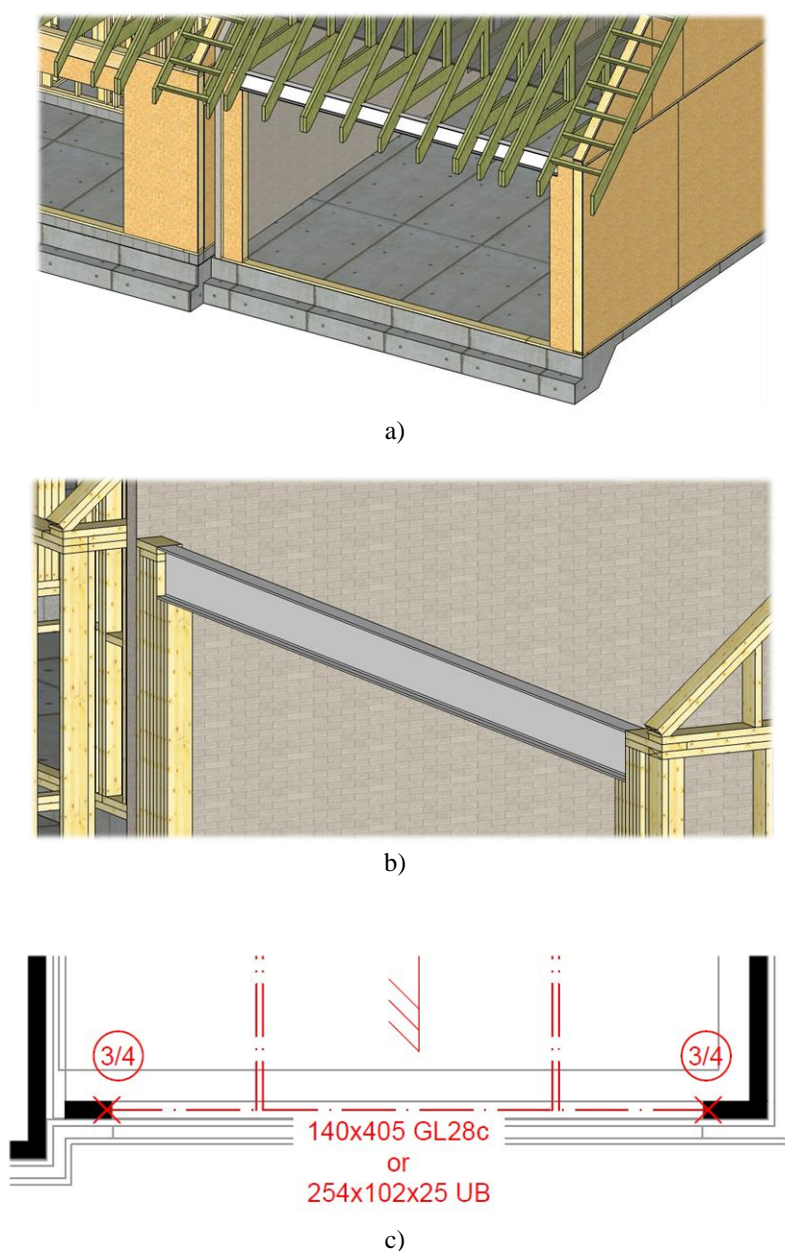
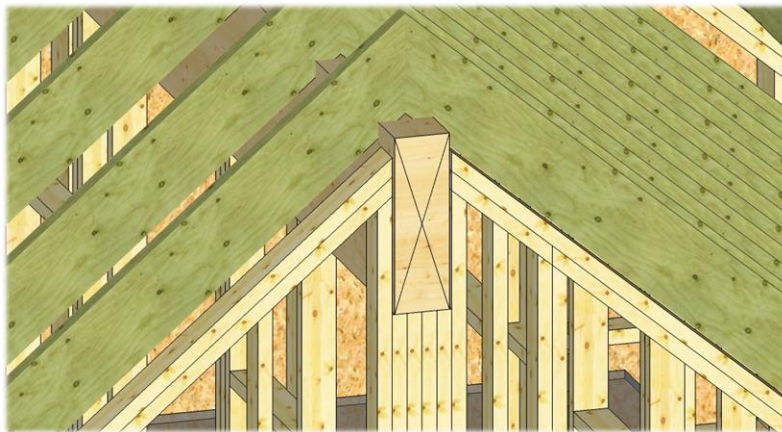


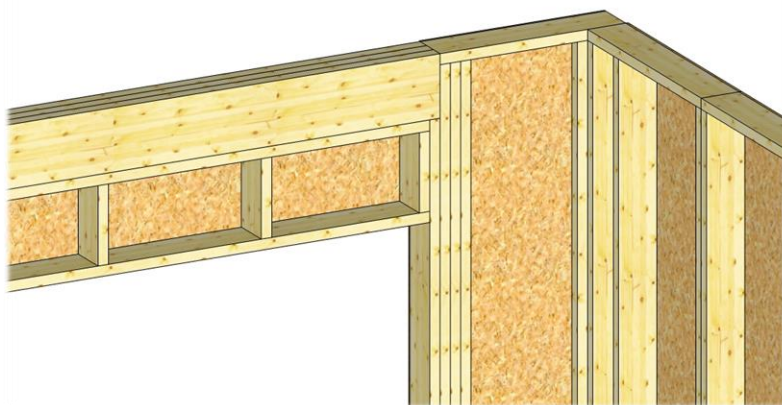
Figura 6.9 – Viga em aço utilizada no projeto de referência: a) localização da viga, suportando a cobertura; b) localização da viga na parede externa; c) marcação estrutural 2D

- **Montantes curtos (*Cripple Stud Design*)**

Os montantes curtos (ou *cripple studs*), são montantes cuja principal função é o suporte de vigas numa estrutura em *Timber Frame* (ver Figura 6.10). Como tal, para que seja possível dimensionar estes elementos, é necessário identificar qual a extremidade da viga que este suporta, uma vez que existe a possibilidade de esta ter reações diferentes, consoante as cargas a que se encontra sujeita. Caso as reações sejam semelhantes, este dimensionamento é feito somente para um dos lados, sendo utilizado o mesmo número de montantes curtos do lado oposto da viga. Este tipo de montantes é por norma acompanhado por pelo menos um montante de altura superior (*full height stud* ou simplesmente *stud*).



a)



b)

Figura 6.10 – Montantes curtos no projeto de referência: a) como suporte de uma viga de cumeeira;
b) como suporte de um lintel numa zona de abertura

- **Guia conectora (*Headbinder*)**

Neste sistema de construção é recorrente a utilização de uma guia conectora (ou *headbinder*) fixada sobre a guia superior dos painéis (visível nas Figuras 6.5 e 6.8 – a) e b)). A utilização deste elemento permite a não coincidência da posição das vigotas/asnas com os montantes nas quais descarregam, partindo do princípio geralmente aceite neste sistema construtivo de que duas guias, de secção transversal 38x89 mm, têm capacidade resistente suficiente para transmitir a carga oriunda das vigotas/asnas para os montantes adjacentes. Na ausência desta guia, é definido um limite máximo de afastamento entre a vigota/asna e o montante adjacente, equivalente a metade da largura da vigota/asna. Na análise da capacidade resistente da guia conectora a esforços de corte e flexão, em função essencialmente do vão das vigotas/asnas e do respetivo carregamento, caso esta seja insuficiente, os montantes deverão então ser posicionados diretamente sob as primeiras para uma correta transmissão das suas forças de reação.

- **Fixações dos painéis e da primeira guia (*Panel and Sole Plate Fixings*)**

A utilização de elementos de fixação tem por objetivo transmitir esforços de corte horizontais entre a base dos painéis e a primeira guia (*sole plate*), bem como entre a primeira guia e a laje de betão. Para tal, no primeiro caso, é escolhida uma solução com um determinado diâmetro e comprimento, em função do esforço de corte obtido com base na análise de resistência a ações laterais, ou contraventamento (*racking walls resistance*). Regra geral, opta-se por modelos de pregos com um diâmetro de 3 mm e um comprimento de 90 mm, sendo o seu arranjo (uma única linha ou em pares) e o espaçamento entre estes adaptados consoante a resistência ao corte necessária (normalmente entre 300 e 150 mm). No segundo caso, isto é, na análise da resistência ao corte horizontal entre a primeira guia e a laje de betão, é verificado se existem fixações adequadas na referida interface, de modo a transmitir os esforços provocados pelas ações laterais. Nesta situação, ao invés de pregos, são utilizadas ligações aparafusadas com determinado diâmetro e comprimento (geralmente entre 5 e 7 mm de diâmetro e entre 75 e 125 mm de comprimento), em função não só dos esforços a resistir, mas também do tipo de substrato utilizado na fixação.

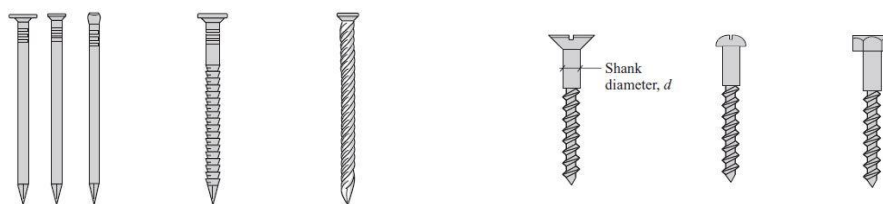


Figura 6.11 – Fixações de painéis e guias no sistema *Timber Frame*: pregos (esquerda) e parafusos (direita) [24]

6.1 Extensão de um primeiro andar em Llandysul, País de Gales

O primeiro projeto desenvolvido inteiramente pelo mestrando no decorrer do estágio, consistiu numa simples extensão de um primeiro andar numa habitação. De seguida, são apresentados alguns dados gerais referentes ao projeto, incluindo especificações e desenhos arquitetónicos fornecidos pelo cliente, sendo também descritas algumas das suas particularidades. Por fim, é apresentado o produto final através de desenhos onde são ilustradas cargas pontuais e lineares, marcações estruturais e referências, acompanhados pelos cálculos referentes à superestrutura em *Timber Frame* e por uma folha de registo de desenhos e edições. Esta ordem de apresentação é aplicada de forma idêntica nos restantes projetos.

Projeto nº: 3072

Cliente: Melingoed Ltd.

Localização: Hafod, Bancyffordd, Llandysul, SA44 4SD, País de Gales

Data de entrega: 15/02/2017

6.1.1 Arquitetura e especificações

Neste projeto, foram entregues inicialmente à ADEPT esboços arquitetónicos referentes à estrutura em madeira a projetar (ver Anexo II.1). Estes esboços contém informação relativa não só às dimensões dos painéis e aberturas definidas, mas também em relação à estrutura de cobertura desejada. Neste último ponto, foi definida a utilização de pernas (ou caibros) de secção 47x197 mm, com classe de resistência C24 e espaçados por 600 mm. Além disso, foi também especificada uma carga produzida pelas telhas de 0.575 kN/m² e um peso próprio da cobertura de 0.685 kN/m². Contudo, e em parte pela incerteza relativa ao modelo de telhas a instalar, foram considerados valores acima dos indicados no dimensionamento da estrutura. Quanto aos montantes, foi também especificada pelo cliente uma secção transversal de 200x38 mm, conferindo uma maior espessura total às paredes comparativamente à secção standardizada para os montantes constituintes de paredes exteriores (140x38 mm).

6.1.2 Cálculos estruturais

Para proceder a uma análise de estabilidade desta extensão, excluindo a laje de suporte (laje intermédia entre a estrutura existente e a extensão a conceber), foram considerados os seguintes carregamentos:

- **Cobertura:** 2.333 kN/m² (carga em plano; cobertura com uma inclinação de 30°)
- **Paredes exteriores:** 0.296 kN/m² (3.65 m de altura e 223.5 mm de espessura)
- **Ação do vento:** 1.150 kN/m² (em ambas as direções, 0° e 90°, através do método geral)
 - Altitude do local: 210 m
 - Altura do beiral (*eaves*): 2.65 m
 - Altura da cumeeira (*ridge*): 4.17 m
 - Localização: **campo**/cidade
 - Velocidade do vento efetiva (V_e): 43.32 m/s (distância ao mar = 20.5 km)

Em termos de estabilidade global, a exploração do fator de modificação k_{100} não foi necessária, uma vez que o peso próprio da estrutura (54.68 kN), aliada à resistência oferecida pelas fixações adicionais, é suficiente para impedir a ocorrência de deslizamento e derrubamento da estrutura e levantamento da cobertura. Neste ponto, as forças atuantes e respetivos valores de resistência são os seguintes:

- **Força de deslizamento:** 24.99 kN
- **Resistência ao deslizamento:** 12.08 kN (resistência friccional) + 36.49 kN (fixações adicionais) com um coeficiente de fricção igual a 0.4 (DPC)
- **Momentos de derrubamento:** 89.04 kNm (fachada longa); 73.01 kNm (fachada curta)
- **Resistência ao derrubamento:** 164.05 kNm (fachada longa); 68.36 kNm (fachada curta)⁵
- **Força total de levantamento:** -24.49 kN
- **Resistência ao levantamento:** 54.68 kN

Em termos de contraventamento, a resistência da extensão é conferida através de duas paredes resistentes na fachada curta e uma na fachada longa, constituídas por uma placa de OSB e por uma placa de gesso cartonado com 11 e 12.5 mm de espessura, respetivamente, fixadas por pregos com um diâmetro de 2.80 mm, espaçados por 150 mm em ambas as direções, conduzindo aos seguintes valores:

- **Força do vento (*racking force*) na fachada curta (*gable*):** 12.43 kN
- **Contraventamento (*racking resistance*) na fachada curta:** 19.55 kN

⁵ A fachada do edifício existente, situada na face esquerda da extensão, confere estabilidade em termos de derrubamento a esta última na presença de ações horizontais, como o vento, quando estas atuam na sua fachada curta.

- **Força do vento (*racking force*) na fachada longa (*elevation*): 7.87 kN**
- **Contraventamento (*racking resistance*) na fachada longa: 13.92 kN**

Neste projeto, foram dimensionadas somente cinco vigas, em que quatro funcionam como lintéis nas zonas de abertura para janelas, e uma como cumeeira, funcionando como suporte dos caibros que formam a cobertura. Enquanto que os lintéis foram dimensionados enquanto elementos de madeira, a viga de cumeeira corresponde a um perfil em aço UB, previamente especificado pelo cliente. As secções e classe das vigas utilizadas são as seguintes:

- **2/200x47 mm / C16** (duas placas com 200x47 mm de secção transversal)
- **3/200x47 mm / C16** (três placas com 200x47 mm de secção transversal)
- **254x146x31 UB / S275** (perfil em aço)

Como explicado anteriormente, de modo a suportar as extremidades das vigas, transmitindo as suas reações para a estrutura imediatamente abaixo ou para a fundação, são utilizados montantes curtos (*cripple studs*). Neste caso, para as primeiras quatro vigas, foram utilizados, em cada extremidade, um montante curto de secção 200x47 mm, acompanhado por um montante normal (*stud*), com classe de resistência C16. Por outro lado, como suporte da viga de cumeeira em aço, foram utilizados em cada extremidade dois montantes de secção 75x200 mm, aparafusados entre si, criando um suporte com 150 mm de largura no total. Além disso, na zona de ligação entre a extensão e a estrutura existente, de modo a suportar a cobertura, é fixada uma viga de borda (*ledge beam* ou *ledger*) com secção transversal 3/47x197 mm (três placas), da classe de resistência C24, fixada à parede existente com parafusos Tapcon 6.35x95 mm, espaçados por 300 mm entre centros. Relativamente às fixações entre painéis e guias, optou-se por pregos com 3 mm de diâmetro e 90 mm de comprimento (3x90 mm), espaçados por 150 mm entre centros numa fila única, conferindo uma resistência ao corte de 2.30 kN/m. Todos os cálculos estruturais encontram-se disponíveis de uma forma mais detalhada no Anexo II.2.

6.1.3 Apresentação final (Marcações estruturais, cargas, referências e detalhes)

Após todo o processo de dimensionamento estrutural, são finalizadas as peças desenhadas para posterior entrega ao cliente. Destas peças fazem parte: um desenho onde são evidenciadas as cargas lineares (paredes) e pontuais (montantes curtos) da estrutura, de nome ***Line & Point Loads***; um

esquema com todas as referências utilizadas na folha de cálculo (para guia do engenheiro estrutural), incluindo numeração de paredes, vigas, montantes curtos e direção do desenvolvimento das lajes intermédias e coberturas, com o nome de **References**; um desenho com as marcações estruturais, onde são especificadas as secções dos lintéis e das vigas em geral, o número e a localização dos montantes curtos em cada carga pontual e o modelo e disposição de vigotas a utilizar (no caso de lajes), ou asnas (no caso de coberturas), incluindo o respetivo espaçamento. A esta última peça desenhada dá-se o nome de **Structural Mark-Ups**. Enquanto que o esquema de referências não é relevante para o cliente, o primeiro desenho (*Line & Point Loads*) contém informação necessária para a execução de fundações, enquanto que as marcações estruturais são essenciais para a equipa responsável pela construção da estrutura. Regra geral, a marcação de elementos em aço é feita em azul (sendo exemplo a viga de cumeeira acima mencionada) enquanto que os elementos em madeira são representados com a cor vermelha. No desenho de cargas lineares e pontuais, ambas são divididas em carga permanente (*dead load*) e sobrecarga (*imposed load* ou *live load*), sendo ainda evidenciada a carga linear em cada parede correspondente à componente vertical da ação do vento (ver Figura 6.12). As peças desenhadas referidas neste projeto encontram-se no Anexo II.2.

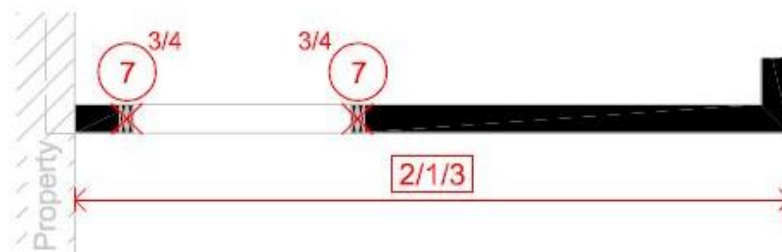


Figura 6.12 – Duas cargas pontuais de 7 kN (3 kN de carga permanente e 4 kN de sobrecarga) correspondentes às reações do lintel na zona de abertura; carga linear (permanente/sobrecarga/vento) em kN/m ao longo da parede

6.2 Nova moradia em Rowlands Gill, Inglaterra

Projeto nº: 3081

Cliente: Karlin Timber Frame Ltd.

Localização: Holmside, Stirling Lane, Rowlands Gill, NE39 1PS, Inglaterra

Data de entrega: 17/02/2017

6.2.1 Arquitetura e especificações

Este projeto consiste numa moradia de dois pisos, complementada por uma sala de estar (*lounge*) bem como uma garagem. Foi requerido à ADEPT a elaboração dos cálculos estruturais assim como das cargas pontuais e lineares correspondentes à estrutura de dois pisos e à sala de estar, sendo o dimensionamento da garagem delegado a outra entidade. Em termos de informação inicial, é possível ver no Anexo III.1 os desenhos arquitetónicos, incluindo o detalhe de fundação e primeira laje. Os cálculos estruturais referem-se à superestrutura em madeira (*Timber Frame*) acima desta primeira laje. O único requisito em particular neste projeto, consiste na utilização de vigotas metálicas com alma aberta (*Open Metal Web Joists*) com cerca de 300 mm de altura e espaçadas por 400 mm entre centros, formando a laje intermédia entre os dois pisos da moradia, dimensionadas e certificadas pelo fabricante.

6.2.2 Cálculos estruturais

Para proceder a uma análise de estabilidade desta moradia, excluindo o dimensionamento da laje intermédia acima referida bem como das asnas que formam a cobertura, foram considerados os seguintes carregamentos:

- **Laje intermédia:** 2.28 kN/m² (carga permanente: 0.778 kN/m²; sobrecarga: 1.500 kN/m²)
- **Cobertura:** 2.333 kN/m² (carga em plano; cobertura com uma inclinação de 30°)
- **Paredes exteriores:** 0.348 kN/m² (2.40 m de altura e 174 mm de espessura)
- **Paredes interiores resistentes:** 0.485 kN/m² (2.40 m de altura e 114 mm de espessura)
- **Paredes interiores não resistentes:** 0.27 kN/m² (valor considerado por defeito)
- **Ação do vento:** direção 0°= **0.683** kN/m²; direção 90°= **0.927** kN/m², pelo método híbrido)

- Altitude do local: 55 m
- Altura do beiral (*eaves*): 4.20 m
- Altura da cumeeira (*ridge*): 6.90 m
- Localização: **campo/cidade**
- Velocidade do vento efetiva (V_e): 39.27 m/s (distância ao mar = 23 km)

Em termos de estabilidade global, foi neste caso explorado o fator de modificação k_{100} em ambas as direções da estrutura, conduzindo a uma redução na pressão provocada pela ação do vento na estrutura, tendo em conta a existência de alvenaria autoportante em torno de toda a moradia . Neste ponto, as forças atuantes e respetivos valores de resistência são os seguintes:

- **Fator de modificação k_{100} :** 0.60 (na fachada longa ou *eaves elevation*)
- **Fator de modificação k_{100} :** 0.52 (na fachada curta ou *gable elevation*)
- **Peso próprio da estrutura:** 276.38 kN
- **Força de deslizamento:** 36.23 kN
- **Resistência ao deslizamento:** 88.62 kN (resistência friccional) + 56.01 kN (fixações adicionais) com um coeficiente de fricção igual a 0.4 (DPC)
- **Momentos de derrubamento:** 356.33 kNm (fachada curta); 366.95 kNm (fachada longa)
- **Resistência ao derrubamento:** 1400.28 kNm (fachada longa); 1231.97 kNm (fachada curta)
- **Força total de levantamento:** -54.84 kN
- **Resistência ao levantamento:** 276.38 kN

No que diz respeito ao contraventamento do **piso térreo** da estrutura, este é conferido através de quatro paredes resistentes à ação do vento na fachada curta e seis na fachada longa constituídas, além dos montantes e do isolamento típicos, por uma placa de OSB e por uma placa de gesso cartonado com 9 e 12.5 mm de espessura, respetivamente, fixadas por pregos com um diâmetro de 2.80 mm, espaçados por 150 mm em ambas as direções, conduzindo aos seguintes valores:

- **Força do vento (*racking force*) na fachada curta (*gable*):** 29.26 kN
- **Contraventamento (*racking resistance*) na fachada curta:** 45.87 kN
- **Força do vento (*racking force*) na fachada longa (*elevation*):** 30.55 kN
- **Contraventamento (*racking resistance*) na fachada longa:** 42.89 kN

Relativamente ao **primeiro piso** da moradia, existem duas paredes resistentes na fachada curta e três na fachada longa, compostas de forma semelhante às do piso térreo, conduzindo aos seguintes valores em termos de contraventamento:

- **Força do vento (*racking force*) na fachada curta (*gable*):** 18.92 kN
- **Contraventamento (*racking resistance*) na fachada curta:** 29.04 kN
- **Força do vento (*racking force*) na fachada longa (*elevation*):** 21.19 kN
- **Contraventamento (*racking resistance*) na fachada longa:** 51.76 kN

Neste projeto, todas as paredes foram dimensionadas com um espaçamento entre montantes (de classe de resistência C16) de 600 mm. No entanto, uma vez que a guia conectora não apresenta resistência suficiente, os montantes que formam a parede interna resistente com referência **[07]** situada no piso térreo (ver Anexo III.2 – Referências ou Marcações Estruturais), deverão ser dispostos de forma coincidente com as vigotas da laje intermédia que neles descarregam. Caso contrário, o espaçamento entre os mesmos deverá ser reduzido para 400 mm (devidamente anotado nas Marcações Estruturais).

Relativamente à **cobertura** na zona da estrutura que contém dois pisos, esta é formada por caibros suportados nas paredes exteriores e em duas vigas de cumeeira em MLC com aproximadamente 9 m de comprimento, sendo necessário um suporte intermédio (montantes curtos) em ambas. Tais suportes foram posicionados no interior de paredes não resistentes no primeiro piso de modo a que não se encontrem visíveis (montantes curtos de referência **104** e **107**, ver Anexo III.2 – Referências). As reações destes suportes são transmitidas para o piso inferior, sendo uma delas coincidente com uma parede interna resistente **[08]** junto às escadas, que transmitirá a respetiva reação para a fundação, enquanto que outra será suportada por uma viga em aço (referência **B 1.03**) incorporada na laje intermédia, que por sua vez se encontra suportada por uma parede externa e uma interna. Quanto à cobertura da zona de um só piso (sala de estar ou *lounge*), esta é composta por três asnas principais ou reforçadas (*girder trusses*, formadas pela ligação de duas ou três asnas que funcionam como um só elemento), unidas por duas vigas de cumeeira e complementadas por caibros e asnas comuns. Duas das asnas principais encontram-se suportadas por uma parede externa e pelos lintéis em MLC situados sobre as zonas de abertura (referência **B 1.20**) que dão acesso ao exterior, sendo a terceira asna reforçada apoiada num pilar em forma de tubo estrutural de secção quadrada em aço (140x140x5 SHS S275, referência **28**), situado entre os dois lintéis. Esta cobertura é também caracterizada por uma área

em consola, formando um alpendre na fachada Norte da estrutura, onde se encontram as referidas aberturas. Dada a complexidade do carregamento nesta zona, as vigas com referência **B 1.17** até **B 1.20** foram dimensionadas no software de cálculo **Tedds**, pertencente à **Tekla Structures**. Os cálculos estruturais destes elementos encontram-se juntamente com os restantes, no Anexo III.2.

Relativamente às fixações entre painéis e guias, optou-se em ambos os pisos por pregos com 3 mm de diâmetro e 90 mm de comprimento (3x90 mm), espaçados por 300 mm entre centros numa fila única, conferindo uma resistência ao corte de 1.15 kN/m. Na fixação da primeira guia ao substrato em betão, optou-se por parafusos **Fischer Hammerfix N8x120Z**, com um espaçamento e disposição idênticos às fixações entre guias.

6.2.3 Apresentação final (Marcações estruturais, cargas, referências e detalhes)

Todas as peças desenhadas associadas a este projeto encontram-se no Anexo III.2. A título de curiosidade, nesta estrutura de dois pisos foi obtida uma carga pontual máxima ao nível da fundação de 45 kN (montantes com a referência **19**), equivalente a aproximadamente 4500 kg, demonstrando a leveza associada a este tipo de construção (*Timber Frame*) e a consequente redução de custos em termos de fundações.

Neste caso, tratando-se de uma estrutura de dois pisos, o número de peças desenhadas será superior relativamente ao projeto anterior, tendo sido produzidos neste caso desenhos de referências e marcações estruturais para cada um dos pisos.

6.3 Extensão da escola primária Lanchester E.P. em Durham, Inglaterra

Projeto nº: 3095

Cliente: Karlin Timber Frame Ltd.

Localização: Lanchester, Durham, DH7 0HU, Inglaterra

Data de entrega: 27/02/2017

6.3.1 Arquitetura e especificações

Este projeto consiste na extensão de uma escola primária, cujo espaço será destinado a duas salas de aula com 60 m² de área cada e dois escritórios para fins de administração. Foi requerido à ADEPT a elaboração dos cálculos estruturais bem como das cargas pontuais e lineares correspondentes à estrutura de um único piso, excluindo a cobertura. Em termos de informação inicial, é possível ver no Anexo IV.1 os desenhos arquitetónicos fornecidos pelo cliente, incluindo a estrutura de cobertura plana previamente dimensionada. Deste modo, é possível simular com uma maior precisão a carga produzida pelas vigotas sobre as paredes da estrutura. Para esta estrutura foi também especificado um revestimento das fachadas por painéis **Trespa**, tipicamente utilizados como elemento decorativo exterior.

6.3.2 Cálculos estruturais

Para proceder a uma análise de estabilidade desta extensão, excluindo o dimensionamento da cobertura acima referida, foram considerados os seguintes carregamentos:

- **Cobertura plana:** 1.750 kN/m² (carga permanente: 1.000 kN/m²; sobrecarga: 0.750 kN/m²)
- **Paredes exteriores:** 0.597 kN/m² (3.00 m de altura e 184 mm de espessura)
- **Paredes interiores resistentes:** 0.485 kN/m² (2.40 m de altura e 114 mm de espessura)
- **Paredes interiores não resistentes:** 0.27 kN/m² (valor considerado por defeito)
- **Ação do vento:** direção 0°= **0.840** kN/m²; direção 90°= **0.565** kN/m², pelo método híbrido)
 - Altitude do local: 123 m
 - Altura do beiral (*eaves*) = Altura da cumeeira (*ridge*): 3.84 m
 - Localização: **campo/cidade**

- Ângulo de referência da estrutura: 60°
- Velocidade do vento efetiva (V_e): 37.03 m/s (distância ao mar = 26 km)

Em termos de estabilidade global e à semelhança do projeto anterior, foi explorado o fator de modificação k_{100} em ambas as direções da estrutura, conduzindo a uma redução na pressão provocada pela ação do vento na estrutura, tendo em conta a existência de alvenaria autoportante em torno de toda a moradia . Neste ponto, as forças atuantes e respetivos valores de resistência são os seguintes:

- **Fator de modificação k_{100} :** 0.84 (na fachada longa ou *eaves elevation*)
- **Fator de modificação k_{100} :** 0.80 (na fachada curta ou *gable elevation*)
- **Peso próprio da estrutura:** 367.63 kN (incluindo 10.27 kN contribuídos pelo revestimento)
- **Força de deslizamento:** 57.22 kN
- **Resistência ao deslizamento:** 85.06 kN (resistência friccional) + 163.29 kN (fixações adicionais) com um coeficiente de fricção igual a 0.4 (DPC)
- **Momentos de derrubamento:** 889.97 kNm (fachada curta); 366.95 kNm (fachada longa)
- **Resistência ao derrubamento:** 1880.44 kNm (fachada curta); 5293.91 kNm (fachada longa)
- **Força total de levantamento:** -154.97 kN
- **Resistência ao levantamento:** 367.63 kN

No que diz respeito ao contraventamento da estrutura, este é conferido através de oito paredes resistentes à ação do vento na fachada curta e seis na fachada longa, sendo duas destas últimas consideradas resistentes somente para o efeito de contraventamento (designadas por *racking walls*, com referência [RW14] e [RW15], ver Anexo IV.2 - Referências). As paredes exteriores são constituídas, além dos montantes e do isolamento típicos, por uma placa de OSB e por uma placa de gesso cartonado com 9 e 12.5 mm de espessura, respetivamente (no caso das paredes interiores, uma placa de gesso cartonado por face, não sendo utilizadas placas OSB), fixadas por pregos com um diâmetro de 2.80 mm, espaçados por 150 mm em ambas as direções, conduzindo aos seguintes valores:

- **Força do vento (*racking force*) na fachada curta (*gable*):** 6.39 kN
- **Contraventamento (*racking resistance*) na fachada curta:** 54.23 kN
- **Força do vento (*racking force*) na fachada longa (*elevation*):** 28.61 kN
- **Contraventamento (*racking resistance*) na fachada longa:** 46.41 kN

Neste projeto, todas as paredes foram dimensionadas com um espaçamento entre montantes (de classe de resistência C16) de 600 mm. No entanto, uma vez que a guia conectora não apresenta resistência suficiente, os montantes que formam as paredes internas resistentes com referência [11], [12] e [13] (ver Anexo IV.2 – Referências), deverão ser dispostos com um espaçamento de 400 mm, de modo a suportarem a carga produzida pela cobertura plana que neles descarrega.

Na zona de ligação entre o corredor pertencente à extensão e a estrutura existente, de modo a suportar as vigotas que constituem a cobertura, são fixadas vigas de borda com secção 45x300 mm, da classe de resistência **GL28c** e **GL24c** (MLC combinada), fixada à parede existente com duas linhas de parafusos Tapcon 6.35x95 mm, espaçados por 600 mm. Nas marcações estruturais (Anexo IV.2), encontra-se escrita uma nota onde é indicada a resistência mínima da parede a suportar as referidas vigas. Ainda na mesma área, é possível observar uma viga de secção 2/45x300 GL24c (duas placas em MLC, referência **B 1.13**), apoiada numa das suas extremidades sobre a viga de borda, com o objetivo de suportar uma pequena parede vertical que forma um degrau na cobertura (ver Figura 6.13).

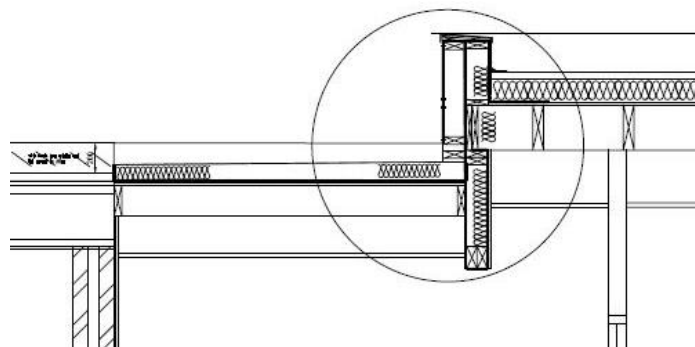


Figura 6.13 – Detalhe do desnível existente na cobertura da estrutura

Relativamente às fixações entre painéis e guias, optou-se por pregos com 3 mm de diâmetro e 90 mm de comprimento (3x90 mm), espaçados por 150 mm entre centros numa fila única, conferindo uma resistência ao corte de 2.30 kN/m. Na fixação da primeira guia ao substrato em betão, optou-se por parafusos Tapcon 6.35x95 mm, com um espaçamento entre centros de 350 mm numa fila única.

6.3.3 Apresentação final (Marcações estruturais, cargas, referências e detalhes)

Todas as peças desenhadas associadas a este projeto, incluindo a folha de registo da entrega das mesmas ao cliente, encontram-se no Anexo IV.2.

6.4 Extensão em altura e lateral de um edifício em Kettering, Inglaterra

Projeto nº: 3101

Cliente: MTE Timber Frame Specialists

Localização: Clarendon House, 12 Station Road, Kettering, NN15 7HH, Inglaterra

Data de entrega: 07/03/2017

6.4.1 Arquitetura e especificações

Este projeto consiste numa extensão de um edifício de 4 pisos (incluindo o piso térreo), sobre o qual será criado um 5º piso (ou 4º andar) com 6 apartamentos e acrescentados lateralmente outros três no 1º, 2º e 3º andares (ver Figura 6.14). Neste caso, foi entregue à ADEPT um conjunto de especificações por parte do cliente (MTE), incluindo as secções e os materiais tipicamente utilizados pelos mesmos (ver Anexo V.1). Além disso, foi também especificada uma cobertura formada por vigotas de madeira serrada com cerca de 235 mm de altura. Enquanto que na extensão lateral a cobertura consiste numa laje plana que irá suportar uma varanda ao nível do 5º piso, na extensão em altura a cobertura consiste num telhado mansarda (*mansard roof*), formado por elementos de aço soldado (*cranked steel*) e complementados pelas vigotas. Quanto à formação das lajes intermédias e cobertura plana da extensão lateral, foram especificadas vigotas **Masonite** em forma de I, com 240 mm de altura.

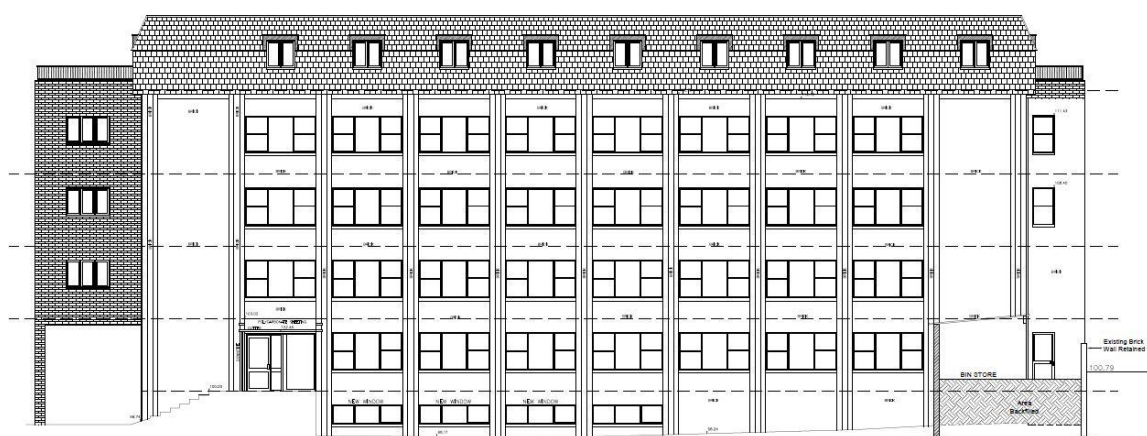


Figura 6.14 – Alçado Norte/Oeste proposto (extensões revestidas em telha, no topo e em alvenaria, à esquerda)

6.4.2 Cálculos estruturais

A análise de estabilidade da extensão lateral foi conduzida na totalidade pelo mestrando, enquanto que no caso da extensão em altura não foram produzidos cálculos referentes ao piso (laje situada entre o 4º e o 5º piso), tendo sido atribuídos a uma outra entidade. Deste modo, tal só foi possível após serem obtidas e entregues ao cliente as cargas pontuais e lineares ao nível da base da extensão.

A filosofia de cálculo neste projeto foi idêntica à descrita nos projetos anteriores, sendo dispensada neste caso a apresentação dos cálculos estruturais realizados para ambas as extensões. Contudo, é possível encontrar no Anexo V.2 os cálculos referentes aos elementos de aço que formam a cobertura do 4º andar, produzidos através do software de cálculo **CADS Analyse3D MAX**, incluindo um desenho em detalhe do posicionamento dos mesmos relativamente às paredes que os suportam, bem como do corte do seu banzo superior (ou extensão da alma e banzo inferior) de modo a permitir uma ligação entre estes e a vigas de madeira que os sucedem no mesmo alinhamento (*Cranked Steel Detail*). O objetivo da utilização destes elementos consiste na materialização de um desnível característico deste tipo de cobertura, através da união de dois perfis em aço com direfentes direções por soldadura, resultando numa zona de cobertura inclinada e uma plana. Estes elementos, em conjunto com vigas posicionadas ao longo do perímetro da estrutura, conferem a forma final desejada (ver Figura 6.15).

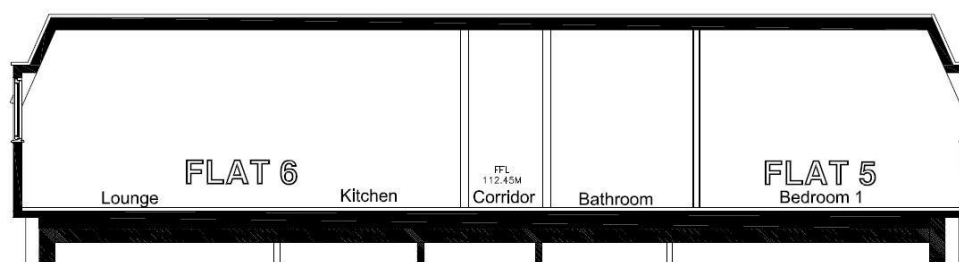


Figura 6.15 – Secção transversal da extensão em altura, evidenciando a forma da cobertura

6.4.3 Apresentação final (Marcações estruturais, cargas, referências e detalhes)

À semelhança dos projetos anteriores, são apresentadas no Anexo V.2 todas as peças desenhadas elaboradas no âmbito deste projeto, incluindo as habituais cargas pontuais e lineares, referências e marcações estruturais relativas a ambas as extensões. Nas peças desenhadas referentes à extensão em altura, é possível observar as paredes partilhadas referidas no subcapítulo 5.3.3, que neste caso dividem os apartamentos (ou *flats*) 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

7.1 Considerações finais

A realização deste estágio permitiu essencialmente uma abordagem e compreensão, por parte do mestrando, relativas a um tipo de construção menos comum em Portugal. O facto de este ter sido desenvolvido num outro país, conduziu a uma necessidade de adaptação em relação à filosofia e postura de trabalho no local. Além disso, no decorrer do estágio, foi possível compreender a importância de uma abordagem flexível, simplista e eficaz na indústria da construção. Tendo em conta a constante competitividade inerente a este mercado, associada a uma crescente procura particularmente na área habitacional, é imperativa a procura de soluções de rápida execução, baixo custo e alto conforto, conduzindo assim à construção em madeira como uma opção aliciante.

Enquanto consultora de engenharia estrutural, um dos objetivos na ADEPT consiste na entrega dos projetos de estabilidade no menor espaço de tempo possível, permitindo ao cliente dar início à fase contrutiva. Desta forma, e com o auxílio da folha de cálculo desenvolvida internamente (referida no capítulo 6 do presente relatório), torna-se possível o desenvolvimento e entrega de projetos de pequena escala num só dia útil.

Sendo a construção em madeira a primeira escolha como material de construção nos países nórdicos, em parte devido ao seu fácil acesso (na presença de florestas), nos países mais quentes esta ainda não tem o mesmo impacto, sendo continuamente visível a escolha do betão e aço como primeiras opções. Contudo, e pelas razões evidenciadas ao longo deste relatório, começa a existir novamente uma tendência na utilização deste material natural para fins estruturais, sendo expectável uma maior procura pelo mesmo na construção nacional e internacional.

7.2 Perspetivas futuras

Comparativamente ao dimensionamento de estruturas em betão armado, a construção em *Timber Frame* pode ser mais standardizada e simplificada, tanto a nível de cálculos como em termos de peças desenhadas. Contudo, é de salientar que no espaço de 6 meses o mestrando não obteve todo o conhecimento associado a este tipo de estruturas, mas sim os seus princípios genéricos. Como tal, para uma melhor compreensão do seu funcionamento em conjunto com outros materiais, será necessário no

futuro um estudo mais aprofundado na área das ligações entre elementos, sendo esta uma das partes responsáveis pelo sucesso a nível de estabilidade e resistência de um sistema estrutural leve.

Ainda neste ponto, uma área a explorar diz respeito à combinação de diferentes materiais, tanto a nível de um único elemento, como a nível da estrutura global. Como referido no capítulo 4, existem ainda inúmeros desafios no que diz respeito à compatibilização de diversos materiais para uso estrutural. Sugere-se aqui um estudo mais intensivo nesta área, onde novas soluções deverão ser testadas e aplicadas, com o objetivo de aproveitar as melhores valências de cada material e, simultaneamente, mitigar os seus pontos fracos.

Por fim, e sendo este um dos desafios na construção em madeira leve, sugere-se o desenvolvimento de trabalhos com ênfase na construção em altura (edifícios com mais de 6 ou 7 pisos), visando superar as limitações presentemente existentes (resistência ao esmagamento das guias inferiores ou contraventamento, como exemplos) neste sistema construtivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADEPT Consulting (UK) (<http://www.adeptco.co.uk/services/structural-engineering-services>) (consultado em 27/04/2017)
- [2] ADEPT Consulting (UK) (<http://www.adeptco.co.uk/services/structural-detailing-services>) (consultado em 27/04/2017)
- [3] ADEPT Consulting (UK) (<http://www.adeptco.co.uk/about-us>) (consultado em 27/04/2017)
- [4] Stalnakker, Judith J., Harris, Ernest C. (1989) *Structural Design in Wood*, Springer Science+Business Media New York
- [5] Reece, Phillip O. (1967), *Timber in Construction: Chapter 6 - Development of modern timber structures* (pp. 84-85)
- [6] Johansson M. (2015) *Design of timber Structures – Volume 1, Chapter 2*, Swedish Forest Industries Federation, Stockholm
- [7] British Standards Institution (2003) *BS EN 338-2003: Structural timber - Strength classes*
- [8] Ochsendorf, J.A. (2005) *Sustainable Engineering: The Future of Structural Design*, Massachusetts Institute of Technology
- [9] Chaturvedi, S., Ochsendorf, J. (2004) *Global Environmental Impacts due to Cement and Steel*, Structural Engineering International, Zurich (pp. 198-200)
- [10] Dickson, M., Parker, D. (2015) *Sustainable Timber Design*, Routledge
- [11] Australian Government (2004) *The Environmental Properties of Timber - Summary Report*, FWPRDC
- [12] CEI-Bois (2006) *Tackle Climate Change: Use Wood*, European Confederation of Woodworking Industries
- [13] Ferguson, I., La Fontaine, B., Vinden, P., Bren, L., Hateley, R., Hermesec, B. (1996) *Environmental Properties of Timber*, FWPRDC
- [14] Radar Communications Ltd (Autumn 2016) *Structural Timber Magazine - Issue 9* (pp. 52-53)
- [15] TRADA Technology (2016) Wood Information Sheet 4-33, *Life Cycle Assessment*
- [16] European Commission - Joint Research Centre: LCA Tools, Services and Data (http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=43) (consultado em 28/04/2017)
- [17] British Standards Institution (2006) *BS EN ISO 14040:2006: Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework*

- [18] British Standards Institution (2006) *BS EN ISO 14044:2006: Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines*
- [19] Building Research Establishment (<http://bregroup.com/about-us>) (consultado em 28/04/2017)
- [20] Building Research Establishment (2002) *Digest 470: Life cycle impacts of timber*
- [21] ARUP (<http://www.buildup.eu/en/practices/cases/lifecycle-tower-one-building>) (consultado em 28/04/2017)
- [22] ARUP (http://www.arup.com/projects/lifecycle_tower) (consultado em 28/04/2017)
- [23] ARUP (http://www.arup.com/projects/lifecycle_tower/details) (consultado em 28/04/2017)
- [24] Porteous, J., Kermani, A. (2013) *Structural Timber Design to Eurocode 5*, 2nd Edition, Blackwell Publishing Ltd.
- [25] Klock, U., Sulato de Andrade, A. (2013) *Química da Madeira*, 4ª Edição, Curitiba
- [26] Oscarsson, J., Olsson, A., Enquist, B. *Wood Sci Technol* (2012) *Strain fields around knots in Norway spruce specimens exposed to tensile forces*, Springer-Verlag
- [27] European Committee for Standardization (2004) *EN 1995 1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General Common rules and rules for buildings*
- [28] British Standards Institution (2002) *BS 5268-2:2002 – Structural Use of Timber. Part 2: Code of Practice for Permissible Stress Design, Materials and Workmanship*
- [29] TRADA Technology (2011) Wood Information Sheet 4-14, *Moisture in timber*
- [30] Szücs, C.A., Terezo, R.F., Valle, Â., Moraes, P.D. (2015) *Estruturas de Madeira*, Florianópolis
- [31] TRADA Technology (2012) Wood Information Sheet 2/3-28, *Introducing Wood*
- [32] White, R.H., Woeste, F.E. (2013) *Post-Fire Analysis of Solid-Sawn Heavy Timber Beams, Structural Performance* (<http://www.structuremag.org/?p=1129>) (consultado em 11/05/2017)
- [33] Weibull, W. (1951) *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*, ASME Journal of Applied Mechanics, Stockholm, Sweden (pp.293-297)
- [34] British Standards Institution (2005) *EN 14081-1:2005: Timber Structures – Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross-Section – Part 1: General Requirements*
- [35] British Standards Institution (2005) *EN 14081-2:2005: Timber Structures – Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross Section – Part 2: Machine Grading, Additional Requirements for Initial Type Testing*
- [36] Apawood (<https://www.apawood.org/commercial-building-design>) (consultado em 13/05/2017)

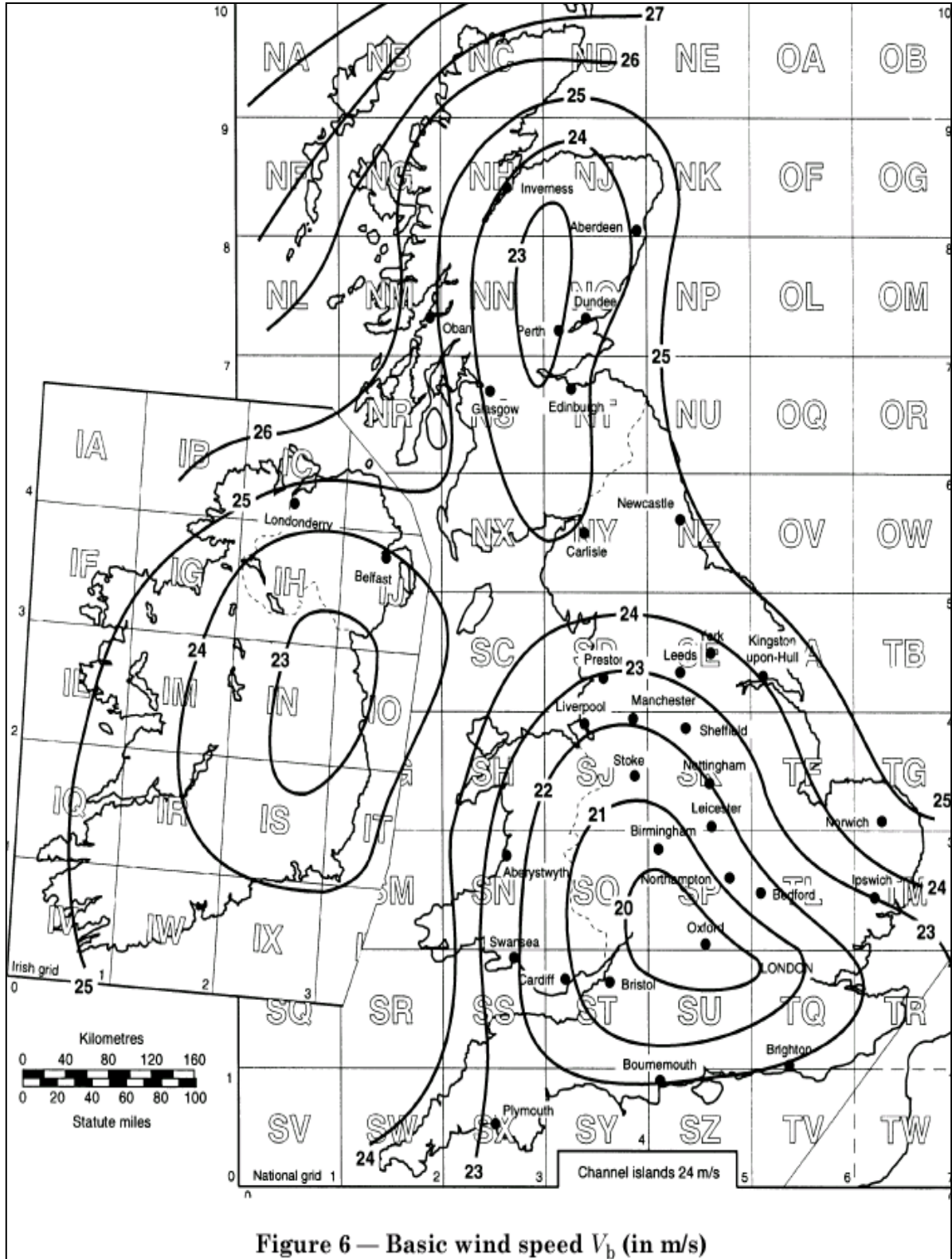
- [37] Structurecraft (<https://structurecraft.com/projects/richmond-olympic-oval>) (consultado em 13/05/2017)
- [38] Merronbrook (<http://www.merronbrook.co.uk/products-and-services/floor-joists>) (consultado em 13/05/2017)
- [39] TRADA Timber Industry Yearbook (2016) *A short introduction to cross-laminated timber*
- [40] Woodworks (<http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/IS-CLT.pdf>) (consultado em 20/05/2017)
- [41] Evans, L. (2013) *Cross Laminated Timber: Taking wood buildings to the next level*, reThink Wood, American Wood Council and FPInnovations
- [42] Woodworks (<http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/CLT-Popovski.pdf>)
- [43] Khorasani, Y., Siadat, Z. (2010) *Steel Timber Hybrid Structures*, UBC
- [44] B&K (<http://www.bkstructures.co.uk/solutions/products/cross-laminated-timber>)
- [45] Pampanin, S., Palermo, A., Buchanan, A., M. Fragiaco, Deam, B. (2006) *Code provisions for seismic design of multi-storey post-tensioned timber buildings*, ICRCB
- [46] Flitch Beams (<http://www.betterheader.com>) (consultado em 20/05/2017)
- [47] Structural Timber Association (2014) *Glued laminated timber structures - Part 2: construction and connection details*
- [48] Sherpa Connector (<http://en.sherpa-connector.com/dl/montageanleitung.pdf>) (consultado em 21/05/2017)
- [50] HomeBuilding (<https://www.homebuilding.co.uk/how-to-choose-a-timber-frame-system>) (consultado em 21/05/2017)
- [51] ADEPT Consulting (UK) (<http://www.adeptco.co.uk/structural-solutions/modular-solutions>) (consultado em 24/05/2017)
- [52] Forta Medical (<http://www.fortamedical.com/projects/project-3>) (consultado em 24/05/2017)
- [53] Lidelöw, H. (2015) *Design of timber Structures – Volume 1, Chapter 8*, Swedish Forest Industries Federation, Stockholm
- [54] (<http://www.moelven.com/se/Aktuellt/Mediarum/Reportagearkiv/Tra8--ett-smart--system>) (consultado em 26/05/2017)
- [55] Rothoblaas (2013) *Handbook for wooden buildings*
- [56] Blockhaus (<https://www.blockhaus.com.br/index.php/sistema-construtivo>) (consultado em 27/05/2017)

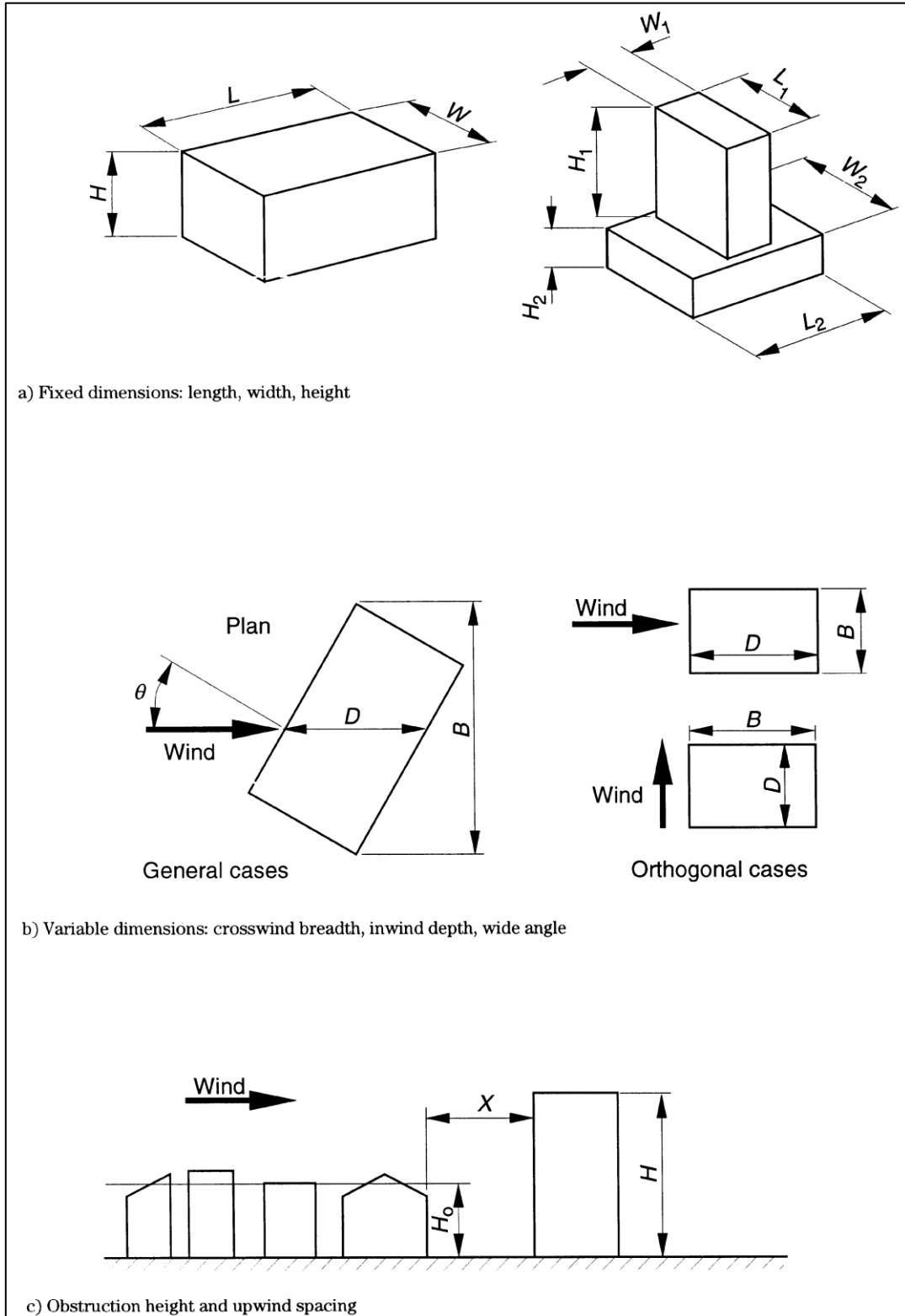
-
- [57] Cambridge Ice Arena (<https://cambridgeicearena.com/project/design>) (consultado em 27/05/2017)
- [58] *HRMO sector guide 3 - Timber Frame Solutions* (www.british-gypsum.com/high-rise) (consultado em 28/05/2017)
- [59] Robust Details (<http://www.robustdetails.com/the-handbook/selecting-your-robust-details>) (consultado em 28/05/2017)
- [60] (www.robustdetails.com/the-handbook/selecting-your-robust-details/timber-floors/e-ft-3) (consultado em 28/05/2017)
- [61] MetsäWood (2016) *Finnframe Floor System Brochure*
- [62] LP SolidStart EWP (2013) *Technical Guide for Residential Floors and Roofs*
- [63] Wolf Systems (2015) *Easi-joist Technical Guide 6th Edition*
- [64] MiTek Industries Ltd, Issue 6, *The World of Posi Technology: The Posi-Strut Technical Handbook*
- [65] Screedflo, *Screedflo dB System – brochure*
- [66] British Standards Institution (1996) *BS 6399-1: 1996 – Loading for buildings – Part 1: Code of practice for dead and imposed loads*
- [67] British Standards Institution (1997) *BS 6399-2: 1997 – Loading for buildings – Part 2: Code of practice for wind loads*
- [68] British Standards Institution (2005) *BS EN 1991-1-4:2005 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – wind actions*
- [69] British Standards Institution (1996) *BS 5268-6.1: 1996 – Structural use of timber – Part 6: Code of practice for timber frame walls – Section 6.1: Dwellings not exceeding four storeys*
- [70] Structural Timber Association (2014) *Timber frame structures – platform frame construction – part 2*

ANEXOS

ANEXO I

Mapas e Tabelas Auxiliares

I.1
Velocidade base do vento consoante a localização [BS 6399-2: 1997 – cl. 2.2.1]

Figure 6 — Basic wind speed V_b (in m/s)

I.2
Definições básicas das dimensões de um edifício [BS 6399-2: 1997 – cl. 1.5.2]


ANEXO II

Projeto 3072

II.1

Desenhos arquitetónicos fornecidos pelo cliente

II.2

Cálculos e Marcações estruturais, Cargas pontuais e lineares, Referências e Folha de Registo

ANEXO III

Projeto 3081

III.1

Desenhos arquitetónicos fornecidos pelo cliente

III.2

Cálculos e Marcações estruturais, Cargas pontuais e lineares, Referências e Folha de Registo

ANEXO IV

Projeto 3095

IV.1

Desenhos arquitetónicos fornecidos pelo cliente

IV.2

Cálculos e Marcações estruturais, Cargas pontuais e lineares, Referências e Folha de Registo

ANEXO V

Projeto 3101

V.1

Desenhos arquitetónicos fornecidos pelo cliente

V.2

Cálculos e Marcações estruturais, Cargas pontuais e lineares, Referências e Folha de Registo