



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

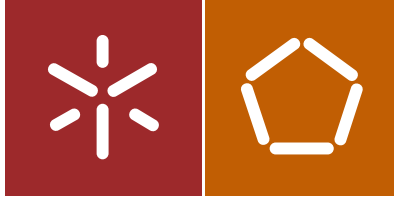
Bruno Domingos Ribeiro Araújo Dimensionamento de estruturas de madeiras usando o programa TimberTech

Bruno Domingos Ribeiro Araújo

Dimensionamento de estruturas de  
madeiras usando o programa TimberTech

UMinho | 2016

dezembro de 2016



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Bruno Domingos Ribeiro Araújo

Dimensionamento de estruturas de  
madeiras usando o programa TimberTech

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Jorge Branco  
Dr. Mauro Andreolli

## AGRADECIMENTOS

Encontrando-me numa das últimas etapas do meu percurso académico, marcada por um ciclo de aprendizagens, que me irá abrir portas para o mercado de trabalho, não poderia deixar de agradecer:

Ao **Professor Doutor Jorge Branco**, professor do Departamento de Engenharia Civil; pela orientação, pelo apoio, pela disponibilidade, pelos conhecimentos partilhados, por me levar a refletir sempre nas minhas opções e por me estar sempre a desafiar;

Ao **Eng<sup>o</sup> Mauro Andreolli** conjuntamente com a sua equipa, orientadora cooperante da valência do pré-escolar, pela forma como colaborou, pela disposição que teve sempre comigo, nas minhas dúvidas que iam surgindo e pelas suas sinceras opiniões do seu programa TimberTech, que possibilitaram ter as melhores atitudes e as melhores ações;

À **equipa de Professores do DEC da Universidade do Minho**, onde desenvolvi a minha licenciatura e o meu mestrado, pela forma como me acolheram e se mostraram disponíveis para tudo o que fosse necessário;

À minha **Família**, principal “combustível emocional” desta fase da minha vida, por me motivar e encorajar quando o cansaço era elevado, pela motivação, por me apoiar em tudo e se preocupar verdadeiramente comigo, enfim, por estarem sempre do meu lado e estarem sempre disponíveis;

À **Ana**, amiga e namorada, pela sua compreensão, pelo seu cuidado, pela dedicação e pelo conforto, foi sem dúvida a pessoa que mais me acalmou e encorajou para a eliminação de todos os obstáculos, adoro-te;

Aos **Verdadeiros amigos**, pelos momentos em que partilhamos conhecimentos que nos fizeram crescer como pessoas e como futuros profissionais, pelos momentos em que os “Trabalhos” deram lugar a momentos descontraídos, pela boa disposição e por simplesmente me ouvirem;

A todos aqueles com quem convivi, trabalhei e cresci, a todos aqueles que tiveram a sua influência durante a concretização deste sonho, a todos aqueles que contribuíram para me tornar no que sou hoje: o meu mais sincero **OBRIGADO**.

Este trabalho foi parcialmente financiado no âmbito Código dos Contratos Públicos, LOTE 3ES2 – Escola Secundária de Loulé e Olhão.

## RESUMO

A madeira lamelada colada cruzada, mais conhecida internacionalmente por cross-laminated timber (CLT), é um produto lamelado bidimensional de madeira, utilizado na construção, normalmente composto por um número ímpar de camadas, dispostas ortogonalmente e rigidamente ligadas. A sua elevada resistência no plano e fora do plano permitem-lhe numerosas aplicações, em elementos de pisos, paredes, vigas e diafragmas.

No que diz respeito às suas propriedades mecânicas enquanto elemento estrutural, importa fazer a distinção no que se refere às ações no plano e ortogonais ao plano. No caso de ações ortogonais ao plano a definição das suas propriedades mecânicas e os valores de resistência estão bem consolidados. Já no caso de ações no plano, algumas prestações mecânicas ainda são alvo de estudos, sendo claro que os valores utilizados são conservativos. O mesmo é válido para CLT sob esforços de corte no plano. Assim, nesta dissertação, são apresentados e discutidos vários métodos disponíveis para a verificação de elementos de CLT, dando algum relevo aos aplicáveis ao comportamento no plano.

Na presente dissertação são retratados alguns aspetos importantes no dimensionamento de estruturas de madeira, alguns programas disponíveis (RFEM 5, Calculatis e TimberTech) para o realizar e também alguns tipos de madeiras. Através de várias pesquisas entre normas e diversos artigos, foi possível reunir aspetos importantes para o dimensionamento de painéis CLT.

Por fim, é realizado o dimensionamento de edifícios em madeira lamelada colada cruzada. A realização deste dimensionamento é feita a partir do programa Timber Tech Buildings. Este calcula, valida e analisa todos os elementos estruturais, através de modelos numéricos baseados em resultados de diversos ensaios e pesquisas, tornando-o um programa fiável, no que diz respeito ao comportamento dos edifícios à ação sísmica, por exemplo. Além disto, este programa tem a capacidade de cobrir alguns aspetos específicos que estão ausentes nas normas correntes, bem como apresentar relatório de cálculo do projeto onde são apresentadas as quantificações das ações, as peças desenhadas, os processos de cálculo e as verificações da segurança dos elementos estruturais e das ligações onde são satisfeitas as normas europeias, entre elas o Eurocódigo 5 (BSI, 2009) parte 1-1: Regras gerais- Regras comuns e regras para edifícios e a Norma Técnica das Construções Italianas de 2008 (Ministero delle Infrastrutture, Ministro dell'interno, & Capo del dipartimento della protezione civile, 2008).

Palavras-Chave: Dimensionamento, CLT, ações no plano, ações ortogonais ao plano, Timber Tech.



## **ABSTRACT**

Cross-laminated timber (CLT) is a two-dimensional laminated timber product used in construction, usually composed of an odd number of layers, arranged orthogonally and rigidly bonded. Its high resistance in plane and out of plane allow numerous applications, in elements of floors, walls, beams and diaphragms.

With regard to their mechanical properties as a structural element, it is important to distinguish between actions in plane and orthogonal to plane. In the case of actions orthogonal to plane the definition of their mechanical properties and resistance values are well consolidated. In the case of actions in plan, some mechanical services are still being studied, and it is clear that the values used are conservative. The same is true for CLT under shear stresses in the plane. Thus, in this dissertation, several methods available for the verification of CLT elements are presented and discussed, giving some emphasis to those applicable to the behavior in plane.

In the present dissertation some important aspects are sketched in the design of timber structures, some programs available to realize it and also some types of timber (RFEM 5, Calculatis and TimberTech). Through several surveys between standards and several articles, it was possible to gather important aspects for the design of CLT panels.

Finally, the construction of buildings in cross-laminated timber is carried out. The realization of this design is made from the program Timber Tech Buildings. This calculates, validates and analyzes all the structural elements, through numerical models based on the results of several tests and researches, making it a reliable program, with regard to the behavior of the buildings to the seismic action, for example. In addition, this program has the capacity to cover certain specific aspects that are absent from ordinary standards, as well as to present a project calculation report showing the actions quantifications, drawings, calculation processes and safety checks of the Structural elements and connections where European standards are met, including Eurocode 5 (CEN, 2009) part 1-1: General rules - Common rules and rules for buildings and the Technical Standard for Italian Buildings 2008 (Ministero delle Infrastrutture et al., 2008).

Keywords: Design, CLT, in plane, out of plane, Timber Tech.





# ÍNDICE

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Motivação.....	3
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Organização da dissertação.....	4
2. Dimensionamento de estruturas de madeira.....	5
2.1. Tipos de madeira.....	5
2.1.1. Madeira maciça.....	5
2.1.2. Madeira lamelada colada.....	6
2.1.3. Madeira lamelada colada cruzada.....	7
2.2. Regulamentação aplicável.....	8
2.3. Princípios básicos.....	9
2.3.1. Variáveis básicas e parâmetros de resistência e de rigidez.....	9
2.3.2. Princípios para a verificação da segurança em relação aos estados limite.....	13
2.4. Programas de cálculo disponíveis.....	17
2.4.1. Programa RFEM 5.....	18
2.4.2. Programa TimberTech.....	19
2.4.3. Programa Calculatis.....	20
2.4.4. Exemplos de aplicação dos programas.....	21
2.5.2. Conclusão sobre os programas TimberTech, RFEM 5 e Calculatis.....	26
3. Dimensionamento de elementos simples de madeira lamelada colada e maciça.....	29
3.1. Verificação da segurança da estrutura.....	29
3.1.1. Dimensionamento de elementos a forças axiais.....	29
3.1.2. Dimensionamento de elementos à flexão.....	31
3.1.3. Estabilidade dos elementos.....	31
3.1.4. Corte.....	32
3.1.5. Torção.....	34

3.1.6. Deformação .....	34
3.1.7. Vibração .....	35
3.2. Folha de cálculo vs TimberTech .....	36
4. Dimensionamento de estruturas em CLT .....	39
4.1. Características de painéis CLT segundo a EN 16351 .....	39
4.2. Rigidez de flexão .....	41
4.3. Rigidez axial .....	43
4.4. Rigidez de corte .....	43
4.5. Efeito rolling shear .....	46
4.7. Fundações.....	47
4.7.1. Ligações .....	48
4.8. Pavimentos CLT .....	48
4.8.1. Flexão.....	49
4.8.2. Corte (ações ortogonais ao plano).....	50
4.8.3. Compressão perpendicular ao fio.....	52
4.8.4. Ligações .....	58
4.8.5. Cálculo de estados limite de serviço .....	59
4.9. Paredes CLT.....	63
4.9.1. Compressão.....	63
4.9.2. Estabilidade das paredes CLT.....	65
4.9.3. Flexão.....	66
4.9.4. Corte (ações no plano) .....	67
4.9.5. Corte (ações ortogonais ao plano).....	73
4.9.6. Rigidez horizontal da parede.....	74
4.9.7. Ligações .....	77
4.10. Vigas CLT.....	78
4.10.1. Flexão.....	81

4.10.2. Corte (ações no plano).....	82
4.11. Elementos de diafragmas.....	90
4.11.1. Métodos de análise .....	96
4.11.2. Método de Truss Equivalente para diafragmas de madeira.....	97
4.11.3. Regras gerais do método das treliças.....	97
4.11.4. – Propriedades diagonais em casos para painéis regulares ou painéis irregulares. .....	100
4.12. TimberTech vs Calculatis.....	105
5. Exemplo de uma moradia CLT .....	109
5.1. Habitação térrea.....	109
5.2. Edifício de quatro pisos .....	112
6. Conclusões e futuros desenvolvimentos.....	117
6.1. Conclusões gerais .....	117
6.2. Propostas para futuros desenvolvimentos.....	118
Referências bibliográficas .....	119
Anexos.....	121
Anexo I – Cálculo do programa TimberTech relativo ao corte no plano.....	121
Anexo II – TimberTech vs Stora Enso .....	124
Anexo III – Modelo de cálculo do edifício térreo .....	128



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Madeira resinosa, (LNEC E31).....	5
Figura 2.2 – Madeira folhosa, (LNEC E31). ....	6
Figura 2.3 – Madeira lamelada colada, (Portilame, 2016) .....	7
Figura 2.4 – Direções principais de uma peça de madeira (Coutinho, 1999).....	10
Figura 2.5 – Componentes da flecha. ....	15
Figura 2.6 – Restauração da capela da Solidão em Lugo,Espanha .....	22
Figura 2.7 – Pavilhão de desportivo “Salvador Allende” em Cavezzo, Itália.....	23
Figura 2.8 – Modos de vibração do edifício, projeto Series: a) valores experimentais b) valores da modelação no programa TimberTech. ....	24
Figura 2.9 Moradia familiar, Schilde, Bélgica .....	24
Figura 2.10 – Jyväskylä, Finlândia.....	25
Figura 2.11 – Residência para estudantes em Trondheim, Noruega. ....	26
Figura 3.1 – (a) Elemento com uma componente de tensão de corte paralela ao fio (b) Elemento com ambas as componentes de tensão perpendicular ao fio (rolling shear), EC5.....	33
Figura 3.2 – Vigas com um entalhe nos apoios, EC5.....	33
Figura 4.1 – Exemplo de painéis CLT com 3 camadas, EN 16351 (CEN, 2015). ....	39
Figura 4.2 – Exemplo de painéis CLT com 5 camadas, com as 2 camadas exteriores colocadas paralelas ao fio, EN 16351(CEN, 2015).....	40
Figura 4.3 – Exemplo de painéis de CLT, que inclui um painel base, EN 16351(CEN, 2015). ....	40
Figura 4.4 – Influência nas camadas CLT com uma carga vertical. ....	42
Figura 4.5 – Coeficiente de correção de corte $\kappa$ para uma relação $G_0 / G_r = 10$ que dependendo de $t_0 / t_{CLT}$ - soluções analíticas e valores dos painéis correntes avaliados pelo CLTdesigner, onde $t_0$ é a soma das espessuras de todas as camadas com $\alpha = 0^\circ$ (Harris et al., 2014). ....	44
Figura 4.6 Efeito Rolling Shear (FPInnovations, 2011).....	47
Figura 4.7 – Ligações com espaçamento entre 300-500mm. ....	48
Figura 4.8 – A distribuição das tensões normais de uma secção transversal do elemento CLT para um carregamento de flexão ortogonal ao plano assumindo $E_{90,lay.} = 0$ .....	50
Figura 4.9 – Painel de 3 camadas (esquerda), tensões de corte na camada longitudinal (centro) e rotura por corte na camada longitudinal (direita). ....	51
Figura 4.10 – Painel de 3 camadas (esquerda), tensões de corte na camada transversal (centro) e rotura por corte na camada transversal (direita). ....	51

Figura 4.11 – Distribuição de tensão de corte sobre a secção transversal de um elemento CLT carregado para fora do plano, assumindo $E_{90, lay} = 0$ : camadas longitudinais como camadas superiores (esquerda); Camadas transversais como camadas superiores (direita).....	52
Figura 4.12 – Diagrama de tensões normais e de corte na secção transversal.....	52
Figura 4.13 – Lajes CLT e pilares.....	55
Figura 4.14 – Determinação do comprimento de contacto efetivo, figura 6.3 c do EC5.....	55
Figura 4.15 – Determinação das linhas dos perímetros de controlo com $\alpha=35^\circ$ , carga ao centro (esquerda) e carga no canto (direita), Mestek (2011). ....	55
Figura 4.16 – Determinação das linhas dos perímetros de controlo carga ao centro e carga no canto, aumentando 30 mm, (Wallner-Novak, 2013).....	56
Figura 4.17 – Valores de $k_{c,90,CLT}$ para painéis sob uma carga linear com um valor de resistência característica para compressão perpendicular ao plano, $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$ , (Harris et al., 2014). ....	57
Figura 4.18 – Valores de $k_{c,90,CLT}$ para painéis sob uma carga linear com um valor de resistência característica para compressão perpendicular ao plano, $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$ , (Harris et al., 2014). ....	57
Figura 4.19 – Half-lapped (esquerda) e Single surface spline (direita), (FPInnovations, 2011). ....	58
Figura 4.20 – Single Internal spline (esquerda) e Double surface spline (direita).....	58
Figura 4.21 – Tube connection system (esquerda) e Hook type of connection system (direita). ....	58
Figura 4.22 – Double internal spline.....	59
Figura 4.23 – Ilustração de uma secção transversal de uma parede comprimida. ....	65
Figura 4.24 – Carga concentrada ao longo do comprimento, $w_p$ , num local, $p$ , da parede CLT, a carga efetiva $w_{ef}$ , à distribuição das tensões, $\sigma_x$ , ao longo da altura do diafragma, $h$ , (COST, 2016). ....	66
Figura 4.25 – Elemento CLT RVE e RVSE, (Bogensperger et al., 2010).....	68
Figura 4.26 – Mecanismo I – corte (esquerda) e mecanismo II – torção (direita), (Bogensperger et al., 2010).....	69
Figura 4.27 – Modos de rotura I na secção completa (esquerda), modos de rotura II na secção efectiva (meio) e modos de rotura III (direita) em painéis CLT sujeitas a forças transversais na direção do plano (da esquerda para a direita) ....	69
Figura 4.28 – Distribuição do esforço de corte, tensões normais de corte e tensões de torsão na interface de colagem. ....	72

Figura 4.29 – Distribuição da força horizontal através dos painéis CLT e das ligações (angle brackets e hold-down ou tie-down), até aos apoios.....	75
Figura 4.30 – Representação dos fatores que influenciam a resistência horizontal de uma parede perante uma força horizontal, (Tomasi, 2015). .....	77
Figura 4.31 – Ligações entre paredes butt-strap (esquerda) e parafusos washer head (meio e direita).....	78
Figura 4.32 – Interação das tensões corte e tensões perpendiculares ao fio, (Steiger & E Gehri, 2010).....	79
Figura 4.33 – Paredes monolíticas, com lintéis encaixados. ....	80
Figura 4.34 – Paredes com lintéis encaixados.....	80
Figura 4.35 – Ilustração de lintel, parede e piso (esquerda), secção transversal de um lintel (meio), tensões de flexão de uma viga (direita).....	82
Figura 4.36 – Distribuição das tensões de corte nas lamelas de uma secção transversal de uma viga CLT de três camadas dentro das lamelas transversais: tensões de corte nas lamelas longitudinais, $t_{xz,long}$ , (à esquerda) e tensões de corte nas lamelas transversais, $t_{xz,cross}$ , (direita) ((Marcus Flaig & Blass, 2013))......	84
Figura 4.37 – Vista lateral e a secção transversal da viga CLT com 4 camadas carregadas no plano (topo) e forças internas na viga em lamelas individuais e nas áreas de cruzamento (M Flaig & Blaß, 2012).....	85
Figura 4.38 – Exemplo de ligação entre as paredes e um piso.....	90
Figura 4.39 – Divisão de uma parede racking em diafragmas de parede.....	91
Figura 4.40 – Esforços atuantes: a) num painel de parede; b) na estrutura reticulada c) na placa do EC5.....	92
Figura 4.41 – Exemplo de um conjunto de painéis de parede contendo uma abertura e um painel de largura menor (3), EC5. ....	93
Figura 4.42 – Exemplo de um conjunto de painéis de parede constituído por vários painéis de parede, do EC5. ....	94
Figura 4.43 – Determinação da ação vertical equivalente $q_i$ e das reações resultantes de ações verticais e horizontais, EC5.....	95
Figura 4.44 – Geometria do piso irregular com os típicos componentes diafragmas (Moroder, 2016).....	96
Figura 4.45- Painel de corte com rigidez de ligação e diagonal da treliça equivalente (Moroder, 2016).....	98

Figura 4.46 – Pós-cálculo para a determinação das forças de cada tramo (modificado de ((Kessel & Schönhoff, 2001))).	98
Figura 4.47 – Múltiplas diagonais. a) subdivisões mxn regulares ou para b) subdivisões irregulares (Moroder, 2016).	100
Figura 4.48 – Exemplo de um diafragma irregular com abertura e re-entrant de cantos (Moroder, 2016).	102
Figura 4.49 – Exemplo de diagonais para um modelo de treliças equivalentes possível (Moroder, 2016).	102
Figura 4.50 – Painel de diafragma maciça e sua idealização no modelo de treliça equivalente em caso de múltiplas diagonais (Moroder, 2016).	103
Figura 4. 51 – Distribuições de tensão de um diafragma irregular. a) tensões de corte $n_{xy}$ (FEM); b) tensões normais $n_{xx}$ e forças em “chord beams” e “strut beams”(FEM), c) tensões de corte (treliça equivalente) e d) forças em “chord beams” e “strut beams” (treliça equivalente) (Moroder, 2016).	104
Figura 4. 44 – Estrutura simples, TimberTech.	108
Figura 5.1 – Modelação do edifício (superior) e distribuição das tensões axiais nas paredes (carga permanente G1) (inferior).	109
Figura 5.2 – Biblioteca para pavimentos de painéis CLT.	110
Figura 5.3 – Biblioteca para perfis metálicos.	111
Figura 5.4 – Bibliotecas e caraterísticas das ligações hold-down.	111
Figura 5.5 – Bibliotecas e caraterísticas das ligações angle brackets.	112
Figura 5.6 – Modelação do edifício (superior) e distribuição das tensões axiais nas paredes (carga permanente G1) (inferior).	113



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classe de duração das ações, EC5. ....	10
Tabela 2.2 – Exemplos de correspondência entre as ações, EC5. ....	11
Tabela 2.3 – Tabela do $k_{mod}$ , (Harris, Ringhofer, & Schickhofer, 2014). ....	12
Tabela 2.4 – Tabela do $k_{def}$ , (Harris et al., 2014). ....	12
Tabela 2.5 – Exemplos de valores limites para as flechas de vigas. ....	15
Tabela 2.6 – Coeficientes parciais, $\gamma_M$ , recomendados para as propriedades dos materiais (BSI, 2009) e (Harris et al., 2014). ....	17
Tabela 4.1 – Parâmetros p e q baseados num estudo numérico, (Harris et al., 2014). ....	46
Tabela 4.2 – Fator de redução $K_{CLT,P}$ , (Harris et al., 2014). ....	46
Tabela 4.3 – Determinação do módulo de corte reduzido, $G_{xy}^*$ , para $t/a = 1:4$ e $G_{xy} = 650 \text{ N/mm}^2$ , (Harris et al., 2014). ....	46
Tabela 4.4 – Valor característico da resistência à compressão na direcção perpendicular ao fio, $f_{c90,k}$ , (Bogensperger & Augustin, 2011). ....	54
Tabela 4.5 – Valores de $k_m$ , para diferentes condições de apoio (Harris et al., 2014). ....	61
Tabela 4.6 – Frequências críticas, $f_{crit}$ , para as exigências altas e exigências normais. ....	61
Tabela 4.7 – Valores limite para o critério de rigidez, $w_{crit}$ , 1kN, para exigências altas e exigências normais. ....	62
Tabela 4.8 Coeficientes de Fourier e as frequências de excitação. ....	63
Tabela 4.9 – Valores recomendados para o rácio de amortecimento, $\zeta$ , dependendo do tipo de construção do piso ....	63
Tabela 4.10 – Valores críticos de aceleração de vibração, $a_{crit}$ , para exigências altas e normais ....	63
Tabela 4.11 – Resistência ao corte por torsão e a resistência ao rolling shear nas de cruzamento avaliadas a partir de ensaios de flexão de acordo com a CUAP 03.04 / 06 ....	73
Tabela 4.12 – Valores ensaiados da resistência ao corte por torsão e da resistência ao rolling shear nas áreas de cruzamento entre as lamelas e os respetivos autores. ....	89
Tabela 4.13 – Métodos de análise para diafragmas de madeira ....	96
<i>Tabela 4. 14 Propriedades do painel:</i> ....	102
Tabela 4.15 – Caraterísticas do piso. ....	106
Tabela 4.14 – Verificações do piso. ....	106
Tabela 4.15 – Caraterísticas da parede. ....	107
Tabela 4.16 – Verificações do parede. ....	107

Tabela 5.1 Encurvadura nas paredes CLT, mais solicitados.....	114
Tabela 5.2 Compressão perpendicular ao fio em paredes CLT, mais solicitados .....	114
Tabela 5.3 Corte no plano em paredes CLT, mais solicitados.....	114
Tabela 5.4 Flexão nos pisos, mais solicitados .....	114
Tabela 5.5 Corte nos pisos, mais solicitados .....	115
Tabela 5.6 Diafragmas do edifício.....	115
Tabela 5.7 Análise modal.....	115

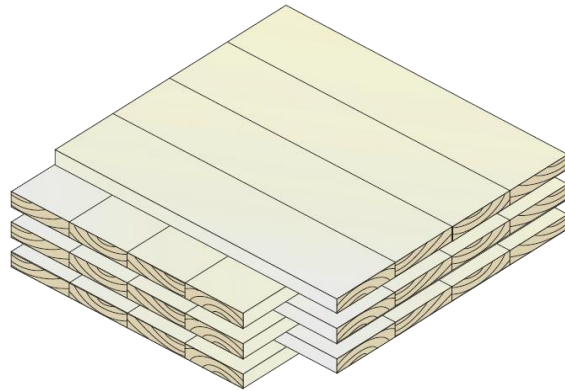
## 1. INTRODUÇÃO

O interesse na utilização da madeira enquanto material de construção tem vindo a crescer num mundo que tem procurado promover a sustentabilidade e a reabilitação. As suas características enquanto material estrutural são únicas: relação peso próprio/resistência superior à de betão armado e de aço; resistência ao fogo; rapidez na construção (pré-fabricação); excelente comportamento aos sismos e boa eficiência térmica e acústica. Estas são algumas das razões que contribuem para que a madeira se assuma cada vez mais como uma boa solução para a construção.

Sendo a madeira um material natural, a indústria da fileira da madeira sempre teve a necessidade de desenvolver derivados da madeira que de alguma forma suprissem uma ou várias limitações naturais da madeira enquanto material de construção. Entre os vários derivados desenvolvidos, principalmente a partir do século XX, importa salientar a madeira lamelada colada cruzada.

A madeira lamelada colada cruzada, internacionalmente designada por cross-laminated timber (CLT), é um produto inovador, que nasceu em Zurique, Suíça, em 1990, mas foi desenvolvido posteriormente na Áustria através da cooperação entre a indústria e a universidade. Uma das empresas pioneiras no fabrico de CLT foi a empresa austríaca, *KLH*, fundada por Heimo de Monte e Wolfgang Weirer, em 1998, depois de vários anos de pesquisa e estudos desenvolvidos em parceria com a Graz University of Technology. Com o objetivo principal potenciar, ainda mais, a eficiência das estruturas de madeira, principalmente, a construção em altura. Desde logo, os painéis CLT pretendem suprir algumas lacunas inerentes à natureza da madeira, como é o sua menor resistência na direção perpendicular ao fio e fraca resistência ao corte.

Este material baseia-se na colagem de várias camadas de tábuas (lamelas) de madeira utilizado na produção de madeira lamelada colada, mas que, no caso do CLT, cola camadas sucessivas com tábuas dispostas ortogonalmente. Os painéis variam entre 3 a 8 camadas, mas geralmente são constituídas por um número ímpar de camadas (3, 5 e 7 camadas), são usadas madeiras de resinosas, para exposições ambientais classificadas como classe de serviço 1 e 2 e têm uma secção simétrica, ver Figura 1.1



*Figura 1.1 – Disposição das camadas dos painéis CLT.*

Os painéis CLT têm Aprovação Técnica Europeia (*ETA-06/0138 – European Technical Approval*) já que as suas características mecânicas ainda não se encontram completamente definidas pela normalização (Eurocódigo 5 e normas referentes ao material propriamente dito). Porém, existe já regulamentação relativa aos requisitos impostos à produção do CLT uma nova norma do produto, que foi recentemente, nomeadamente, a EN 16351 (CEN, 2015). Ao longo desta dissertação serão dimensionados elementos estruturais para diferentes tipos de madeira, começando pela madeira maciça e madeira lamelada colada e, por fim, introduz a madeira lamelada colada cruzada

## **1.1. Enquadramento**

Com uma maior abertura da comunidade técnica para a utilização de estruturas de madeira, houve a necessidade de criar uma versão do Eurocódigo 5 (BSI, 2009), que garantiu um crescimento na utilização do produto de madeira na construção. Contudo, quando este foi concluído, não existiam experiências e pesquisas suficientes sobre a madeira lamelada colada cruzada, impossibilitando a referência deste produto na EC5. Desde então, as referências usadas para os cálculos dos painéis CLT têm sido inquiridos em relatórios científicos, manuais nacionais ou aprovações técnicas europeias e em alguns anexos nacionais da EC5.

Algumas empresas de programas de cálculo tiveram a necessidade de apostar e investir em estruturas de madeira. Um dos exemplos é uma startup da Universidade de Trento (Itália), que tem vindo apostar na área das estruturas de madeira ao desenvolver o programa TimberTech Buildings, um programa de cálculo de estruturas de madeira em 3D. O TimberTech calcula,

valida e verifica estruturas compostas por qualquer madeira ou derivado da madeira (madeira lamelada colada, madeira lamelada colada cruzada, madeira micro laminada, etc.).

O presente trabalho pretende sintetizar o contexto do dimensionamento de elementos estruturais de madeira (paredes, vigas e lajes de CLT; vigas e pilares de madeira lamelada colada).

## **1.2. Motivação**

A realização desta dissertação visa proporcionar a clarificação de algumas dúvidas que possam existir sobre o dimensionamento de estruturas de madeira lamelada colada cruzada (CLT). Assim, muitas das dúvidas que estavam inerentes ao cálculo de dimensionamento de estruturas em CLT serão esclarecidas e tratadas nesta dissertação.

Esta dissertação tem como intuito eliminar algumas barreiras para o dimensionamento de painéis CLT, bem como harmonizar e registar várias informações realizadas que possibilitam obter alguns resultados das várias investigações e, portanto, simplificar, esclarecer e orientar um engenheiro de estruturas.

Quanto ao programa TimberTech, a lacuna referente à inexistência de um relatório técnico de cálculo em português será colmatada.

## **1.3. Objetivos**

O principal objetivo inerente a esta dissertação passa pela iniciação ao cálculo de estruturas de madeira utilizando um programa de cálculo automático, o TimberTech. Para o efeito, depois de uma revisão dos métodos de cálculo disponíveis, analisam-se e calculam-se várias estruturas, aumentando a complexidade, de elementos mais simples (vigas, pilares) a estruturas completas, como são os edifícios.

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação vai permitir que o programa TimberTech passe a incluir uma memória de cálculo em Português acessível a todos os utilizadores do programa. E, tendo em conta o crescimento que se observa no sector das estruturas de madeira, a utilização e a divulgação do programa, torna-se um importante marco comercial para a empresa, e contribui para a promoção da construção em madeira, nomeadamente, aquela recorrendo a elementos de CLT. Com este trabalho procura-se demonstrar as potencialidades a aplicação dos produtos de madeira nas estruturas, desde simples estruturas a edifícios em altura. Para tal, recorre-se ao programa de cálculo automático TimberTech. Através da utilização deste programa, exemplificar-se-á o dimensionamento de vários elementos em madeira, em madeira

lamelada colada e em CLT. No caso particular das estruturas em CLT, para além de elementos simples de lajes, paredes e vigas, são apresentados os dimensionamentos de duas moradias. Procurando a simplicidade, ao longo desta dissertação apresentam-se os cálculos dos esforços obtidos pelo TimberTech sempre, e apenas, para a combinação de carga mais desfavorável.

#### **1.4. Organização da dissertação**

O documento está dividido em seis capítulos principais, de forma a responder aos objectivos traçados.

No Capítulo 1 apresenta-se o enquadramento do trabalho, definindo os objectivos a alcançar e aborda-se a motivação que norteia a realização desta dissertação.

No Capítulo 2, abordam-se alguns princípios básicos, entre os quais as regulamentações aplicadas relativamente ao dimensionamento de estruturas de madeira, bem como alguns factores de modificação que este possui. Por fim, referem-se alguns programas de cálculo disponíveis para o dimensionamento de estruturas de madeira, dão uma maior atenção, ao programa de cálculo TimberTech.

Já no Capítulo 3 apresenta-se o dimensionamento de elementos simples de madeira lamelada colada e maciça e, analisando os procedimentos assumidos por este programa de cálculo, ao confrontar os resultados com um dimensionamento segundo o EC5 realizado por intermédio de folhas de cálculo, Excel. Por seu lado, no Capítulo 4 apresenta-se o cálculo de elementos de madeira lamelada colada cruzada.

No Capítulo 5 analisam-se e discutem-se dois exemplos de moradias em CLT, apresentando o seu cálculo através do programa TimberTech.

Por fim, no Capítulo 6 resumem-se as principais conclusões obtidas e apresentam-se alguns juízos sobre futuros desenvolvimentos.

## 2. DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

A madeira é um material relativamente resistente e leve comparativamente com os outros materiais que a construção civil usa, nomeadamente, o betão e o aço.

Neste capítulo serão abordados três tipos de madeira - a madeira maciça, a madeira lamelada colada (MLC) e a madeira lamelada colada cruzada (MLCC) - e os seus vários coeficientes que podem minorar ou majorar as propriedades físicas, as resistências e a rigidez da madeira e, assim, realizar um dimensionamento de elementos de madeira económico e seguro.

Por fim, analisam-se alguns programas de cálculo automático existentes no mercado, destacando o programa TimberTech que será utilizado nos capítulos seguintes.

### 2.1. Tipos de madeira

#### 2.1.1. Madeira maciça

A madeira maciça é uma solução convencional que não sofre qualquer transformação mecânica. A madeira pode ser resinosa ou folhosa. As madeiras resinosas têm um crescimento mais rápido (cerca de 30 anos para cortar a árvore). Nestas circunstâncias, torna-se uma madeira menos densa e com menores capacidades resistentes. São madeiras mais baratas, devido ao seu ritmo de abate, e apresentam normalmente uma baixa durabilidade, a menos que sejam adequadamente tratadas. Alguns exemplos de madeiras resinosas são o pinheiro bravo, o pinheiro branco, o cipreste ou o cedro, ver Figura 2.1.

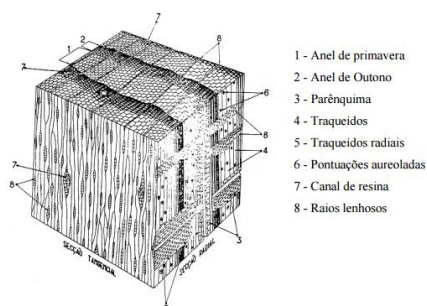


Figura 2.1 – Madeira resinosa, (LNEC E31).

As madeiras folhosas têm um crescimento mais lento que as resinosas - cerca de 100 anos para cortar a árvore. Nestas circunstâncias, torna-se uma madeira mais densa e com capacidades resistentes mais elevadas que as madeiras resinosas. São madeiras muito mais complexas na estrutura celular que as resinosas. A sua elevada densidade leva a uma maior dependência de

medidas preventivas para assegurar a boa qualidade de durabilidade. A elevada densidade ocorre devido à disposição das fiadas radiais que leva ao confinamento das fibras no sentido radial, ver a Figura 2.2. Alguns exemplos de madeira folhosa são o carvalho, o castanheiro ou a faia.

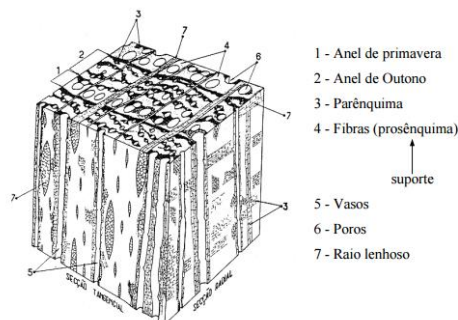


Figura 2.2 – Madeira folhosa, (LNEC E31).

Segundo Graça (2007), as madeiras de densidade mais baixa, resinosas e folhosas leves, apresentam uma menor resistência ao fendimento. Já a madeira de densidade mais elevada, resinosas mais pesadas e folhosas, tem uma maior resistência ao fendimento.

As classes de resistência mecânica definidas na norma europeia EN 338 (CEN, 2009): “*Structural Timber–Strength classes*”, encontram-se divididas em *C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 e C50*, para as madeiras resinosas, e *D30, D35, D40, D50, D60 e D70*, para as folhosas.

### 2.1.2. Madeira lamelada colada

Para combater algumas limitações que a madeira apresenta por ser um material natural, celular, heterogéneo e anisotrópico, desenvolveram-se ao longo dos tempos vários processos de transformação e produção de elementos de madeira. Um dos derivados que resultou deste processo de melhoramento é a madeira lamelada colada, conhecida como *Glulam*, ver Figura 2.3.





*Figura 2.3 – Madeira lamelada colada, (Portilame, 2016)*

O processo consiste em cortar a madeira em lamelas e colar as faces das lamelas entre si, para que os fios das lamelas fiquem paralelos entre si e paralelos ao eixo longitudinal. Este processo permite, assim, diminuir a influência dos defeitos na resistência da madeira e atingir grandes comprimentos através das finger-joints.

A partir desta transformação consegue-se não só uma maior segurança, comparativamente com elementos de madeira maciça, tornando os defeitos da madeira mais uniformes (os nós e o fio diagonal), mas também uma facilidade de secagem, devido à menor espessura das lamelas.

As madeiras lameladas coladas, normalmente, possuem espessuras entre 19 e 45 mm e 1,5 e 5m de comprimento, com a possibilidade de serem ligadas por juntas dentadas longitudinalmente. Peças retas ou curvas, secções constantes ou variáveis e disposição horizontal e vertical nas lamelas, são possíveis o que garante uma grande flexibilidade e variedade de elementos, sejam vigas ou pilares.

A norma EN 14080 (CEN, 2013) refere dois tipos de madeira lamelada colada: a madeira lamelada colada homogénea e a madeira lamelada colada combinada. Se as secções transversais das lamelas são da mesma classe de resistência, então, designa-se por homogénea; se as secções transversais apresentam uma combinação de diferentes diferentes classes de resistência, então, designa-se por combinada.

As combinações das lamelas são descritas na norma portuguesa NP EN 1194:2002 (IPQ, 2002).

### **2.1.3. Madeira lamelada colada cruzada**

A madeira lamelada colada cruzada (CLT), pretende ultrapassar algumas limitações da madeira lamelada colada, principalmente, a diferença que existe na resistência em diferentes direções.

O CLT, assumindo-se como um “upgrade” da madeira lamelada colada, veio mudar o paradigma sobre as madeiras no que toca à possibilidade de construção em altura.

Os painéis CLT possuem entre 3 a 8 camadas, sendo estas simétricas e ortogonais. São utilizadas em estruturas ou elementos de madeira inseridos em ambientes que podem ser classificados como pertencentes à classe de serviço 1 e 2, sendo desaconselhado a classe de serviço 3. Para este processo se concretizar, é usada uma cola em poliuretano entre as interfaces das camadas dos painéis. Estes painéis têm normalmente espessura entre os 60 a 300mm (320 e 340 respectivamente para as fabricantes Stora Enso e BirderHolz) e com 16.5m de comprimento e 2.95m de largura (dimensões máximas), sendo exigido um corte de precisão por controlo numérico (CNC). São painéis prefabricados e relativamente leves, o que permite que a execução da estrutura seja rápida e económica.

É sempre essencial a consulta das tabelas dos fabricantes, nomeadamente a respectiva *ETA*, para o dimensionamento das estruturas de CLT. Qualquer propriedade da resistência e rigidez é assegurada pelo próprio fabricante, cuja produção é regulado pela nova norma 16351:2015 - *Timber structures – Cross-laminated timber – Requirements*.

## **2.2. Regulamentação aplicável**

A regulamentação aplicada para o cálculo de estruturas em madeira é o EC5, EN 1995-1-1 – Eurocódigo 5: Projeto de estruturas de madeiras- Parte 1-1: Regras gerais – Regras comuns e regras para edifícios. A regulamentação tem como objetivo harmonizar e eliminar algumas barreiras para o dimensionamento de madeiras, ao registar várias informações para o dimensionamento de diversos produtos, ficando de fora a referência da madeira lamelada colada cruzada. Contudo a nova versão desta norma já contemplará elementos de CLT.

O Eurocódigo EC5 tem apenas os requisitos para a resistência, a aptidão ao uso e a durabilidade das estruturas. Não informa acerca de aspetos construtivos, de classes de resistência de variados materiais, do dimensionamento e da resistência ao sismo. Em contrapartida, têm sido implementadas normas europeias que tratam diversos assuntos relacionados com a madeira e que desempenham um papel importante na complementação do EC5, por exemplo, para as classes de resistência para madeira maciça, a EN 338; para as regras de quantificação das propriedades físicas e mecânicas da madeira maciça ou lamelados colados, a EN 408 e para os requisitos da madeira lamelada colada cruzada, a EN 16351, já que as propriedades mecânicas de cada painel são facultadas pelo produtor.

O Eurocódigo 5: Projeto de estruturas de madeira - parte 1-1: Regras gerais – Regras comuns e regras para edifícios, é constituído por 10 capítulos: 1. Generalidades; 2. Bases para o projeto; 3. Propriedades dos materiais; 4. Durabilidade; 5. Bases para a análise estrutural; 6. Estados

limite últimos; 7. Estados limite de serviço; 8. Ligações com ligadores metálicos; 9. Composições e sistemas estruturais; e 10. Disposições construtivas e controle.

Outra norma que importa considerar é a DIN 1052, norma Alemã que muitos programas de cálculo usam devido ao seu maior desenvolvimento em alguns tópicos, comparativamente ao EC5.

A DIN 1052 é mais detalhada em tópicos como: a fluência da deformação por corte, o valor máximo da largura do banzo devido ao efeito de corte e ao enfunamento, finger joints e elementos compósitos.

No anexo B, tanto na norma DIN 1052 como na norma EC5 abordam as secções compostas, apresentando vários modelos de cálculo para elementos compostos de diferentes secções transversais, sendo a DIN 1052 mais completa. Por fim, a DIN 1052 contém algumas aprovações técnicas para os painéis CLT.

## **2.3. Princípios básicos**

### **2.3.1. Variáveis básicas e parâmetros de resistência e de rigidez**

Os parâmetros de resistência e de rigidez são influenciados pelas propriedades mecânicas da madeira. O conhecimento das propriedades mecânicas da madeira permite fazer uma escolha mais eficaz das espécies de madeira a utilizar, de acordo com as aptidões naturais da madeira. Todo o parâmetro de resistência e de rigidez da madeira difere segundo os três eixos principais: longitudinal, radial e tangencial. As fibras da madeira são dispostas na direção longitudinal, ver Figura 2.4. Estas têm um comportamento diferente dependendo da direção a que as fibras estão a ser solicitadas.

A resistência da madeira na direção paralela à fibra é elevada devido à densidade e à continuidade da fibra na direção longitudinal. Na direção perpendicular à fibra (radial e tangencial) existem vazios entre as fibras, que levam a uma menor resistência da madeira.

Quando a madeira é solicitada paralelamente às fibras, as forças agem paralelamente ao comprimento das fibras. As fibras, devem ser solicitadas perpendicularmente, conferindo uma grande resistência à madeira. A madeira é um material ortotrópico, pois apresenta propriedades de resistência diferentes consoante a direção.

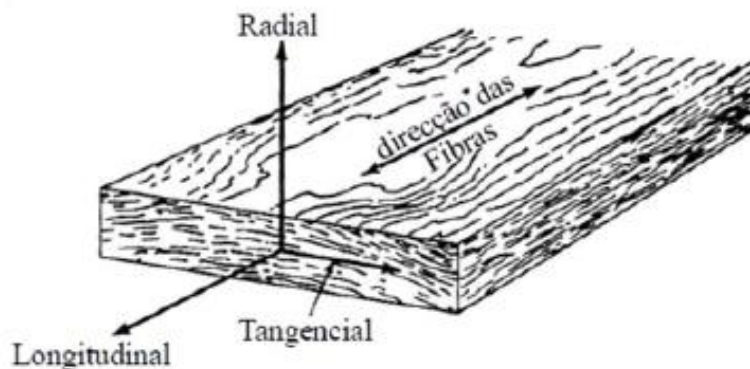


Figura 2.4 – Direções principais de uma peça de madeira (Coutinho, 1999).

No entanto, esta não será a única preocupação para o cálculo da resistência e da rigidez da madeira. A solicitação da carga na estrutura, a sua grandeza, a duração e a direção condicionam muito a resistência e a rigidez da madeira. O EC5 refere como se devem proceder a estas influências nas propriedades da resistência e a rigidez da madeira.

As ações que atuam no projeto de madeira devem ser quantificadas através do EC1, **EN 1991- Eurocódigo 1- Ações em estruturas** – Parte 1-1: Ações gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios, documento europeu para definir as ações.

O EC5 faz também referência às classes de duração das ações, ver Tabela 2.1. São classificações de duração para várias ações a que a estrutura está sujeita, sendo escolhida a classe de duração com menor de duração das várias cargas solicitadas.

Tabela 2.1 – Classe de duração das ações, EC5.

Classe de duração das ações	Ordem de grandeza da duração acumulada do valor característico da ação
Permanente	superior a 10 anos
Longa duração	6 meses - 10 anos
Média duração	1 semana - 6 meses
Curta duração	inferior a uma semana
Instantânea	

Exemplos de correspondência entre as ações e as classes de duração, ver Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Exemplos de correspondência entre as ações, EC5.

<i>Classe de duração das ações</i>	<i>Exemplos de ações</i>
<i>Permanente</i>	<i>peso próprio</i>
<i>Longa duração</i>	<i>produtos armazenados</i>
<i>Média duração</i>	<i>sobrecargas em pavimentos, neve</i>
<i>Curta duração</i>	<i>neve, vento</i>
<i>Instantânea</i>	<i>vento, ação de acidente</i>

A direção a que as cargas são solicitadas e o teor da humidade têm influência na obtenção das resistências, da rigidez e das propriedades da madeira. O EC5 divide os materiais em classes de serviço, que têm como fator a humidade relativa e a temperatura do ambiente. Passa-se a citar as seguintes classes de serviço consideradas pelo EC5:

- ✓ A classe de serviço 1 é caracterizada por um teor em água dos materiais correspondente a uma temperatura de 20°C e a uma humidade relativa do ar ambiente superior a 65% apenas durante algumas semanas por ano.
- ✓ A classe de serviço 2 é caracterizada por um teor em água dos materiais correspondente a uma temperatura de 20°C e a uma humidade relativa do ar ambiente superior a 85% apenas durante algumas semanas por ano.
- ✓ A classe de serviço 3 é caracterizada por condições climáticas conduzindo a valores do teor em água dos materiais superiores aos da classe de serviço 2.

No cálculo da resistência, da rigidez e das propriedades de madeira, devemos ter em atenção os seguintes parâmetros de correção que verificam os aspetos mencionados acima, como também outros aspetos relevantes.

$k_{mod}$  - Parâmetro de correção das propriedades para diferentes tipos de madeiras, tendo em conta a duração das ações e a classe de serviço, ver Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Tabela do  $k_{mod}$ , (Harris, Ringhofer, & Schickhofer, 2014).

Material	Norma	Classe de serviço	Classe de duração das ações				
			Ação permanente	Ação de longa duração	Ação de média duração	Ação de curta duração	Ação instantânea
Madeira maciça	EN 14081-1	1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
Madeira lamelada colada	EN 14080	2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
Madeira lamelada colada	EN 14080	3	0.50	0.55	0.65	0.70	0.90
Madeira lamelada colada cruzada	prEN 16351	1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
Madeira lamelada colada cruzada	prEN 16351	2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10

$k_{def}$  – Parâmetro de deformação que a fluência do elemento causa. Depende do tipo de material usado e da classe de serviço que o elemento está sujeito, ver Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Tabela do  $k_{def}$ , (Harris et al., 2014).

Material	Norma	Classe de serviço			
		1	2	3	
Madeira maciça	EN 14081-1	0.60	0.80	2.00	
Madeira lamelada colada	EN 14080	0.60	0.80	2.00	
Madeira lamelada colada cruzada	prEN 16351	$>7s^*$	0.8	1.0	-
		$\leq 7s^*$	0.85	1.10	-

\*número de camadas

$k_h$  – Parâmetro de correção de tamanho (efeito de volume) das secções que são solicitadas à resistência característica à flexão e/ou à resistência à tração paralela ao fio, tendo em conta o tamanho de referência do EC5 para diferentes tipos de madeiras, ver as equações das cláusulas 3.2(3) e 3.3(3) do EC5, para madeira maciça e madeira lamelada colada

$k_{c,90}$  – Fator que maximiza o valor de cálculo da resistência à compressão perpendicular ao fio da madeira. Este fator tem em conta a configuração do carregamento, a possibilidade de fendimento e o grau de deformação por compressão, que toma o valor de 1.0, exceto nos casos indicados nas cláusulas 6.1.5(3) à 6.1.5(6), que pode tomar como valor máximo 4.0. Este fator depende da espessura, da configuração de carga, da divisão, da transmissão da carga e do local de contato da carga, consultar cláusula 6.1.5 do EC5.

$k_v$  – Fator de redução ao corte em vigas com entalhes ou orifícios. A necessidade de entalhes ou orifícios em vigas serve para acomodar detalhes de fixação, tais como calhas, secções reduzidas e ligações com outros membros. As concentrações de alta tensão ocorrem nos locais dos entalhes e orifícios. O efeito de concentrações de tensões ao corte, com uma secção transversal retangular e onde a direção do fio é essencialmente paralela, deve ser considerado, tomando o valor mínimo 1.0, consultar cláusula 6.5.2(2) do EC5.

$k_n$  – Fator importante que se relaciona com o fator de redução ao corte nas vigas  $k_v$ , que diferencia o tipo de madeira, consultar cláusula 6.5.2(2) do EC5.

$K_u$  ou  $K_{ser}$  – Módulo de deslizamento para os estados limite último e para os estados limite de utilização, respetivamente. Estes parâmetros são utilizados para estimar a rigidez das ligações. Estas representam uma influência nas deformações das ligações e deverá ser tida em conta no cálculo da rigidez ou através de valores de deslizamento prescritos em função do nível dos esforços na ligação.

De referir que o método dos estados limites será abordado no próximo ponto da dissertação.

### **2.3.2. Princípios para a verificação da segurança em relação aos estados limite**

Qualquer projeto de estruturas deve obedecer ao dimensionamento estrutural do EC0, **EN 1990-Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas**. Como o nome indica, o regulamento apresenta as regras de base para qualquer projeto que utiliza um outro Eurocódigo.

As ações aplicadas na estrutura, mencionadas acima, devem satisfazer o método dos estados limite último e estados limite de utilização, descritos nas cláusulas 2.2.2 e 2.2.3 do EC5, respetivamente, para, assim, satisfazer a segurança e o uso da estrutura. Os estados limite que

os Eurocódigos referem são situações críticas (limite) provocadas por diversas ações aplicadas na estrutura, onde deixa de satisfazer as exigências iniciais de projeto. Os modelos de cálculo para diferentes estados limite devem ter em conta a cláusula 2.2.1(1)P EC5.

As verificações dos estados limite último são situações de rotura estrutural (danos graves) que comprometem a segurança de bens e de pessoas.

O método dos estados limite último consiste em comparar, para cada estado limite relevante, uma grandeza atuante  $E_d$  (efeito de ação) com uma grandeza resistente  $R_d$ , onde a condição seguinte deve ser satisfatória.

$$E_d \leq R_d \quad (2.1)$$

As verificações dos estados limite de utilização são situações de utilização estruturais que comprometem a utilização específica da estrutura. Dito de outro modo, são danos de menor gravidade, que não comprometem a segurança de bens e de pessoas, mas sim o funcionamento da estrutura, o seu aspeto e o conforto das pessoas.

O método dos estados limite de utilização consiste em comparar, para cada estado limite relevante, uma grandeza atuante  $E_d$  (efeito de ação) com um valor limite do critério de utilização  $C_d$ , onde a condição seguinte deve ser satisfatória:

$$E_d \leq C_d \quad (2.2)$$

Os efeitos das ações que devemos verificar são a deformação e a vibração da estrutura, segundo as cláusulas 7.2 e 7.3 do EC5, respetivamente.

### ▪ **Verificação à deformação**

Na ausência de requisitos especiais para a deformação de edifícios, é habitual adotar valores limites para minimizar o risco de danos de elementos não-estruturais e de acabamentos frágeis, tais como tetos rebocados, além de efeitos estético e visual.

Os limites de controlo para a deformação devem ser acordados com o cliente para cada projeto. A orientação relativa a valores limite para as vigas são dadas na Tabela 2.5.



Tabela 2.5 – Exemplos de valores limites para as flechas de vigas.

	$W_{inst}$	$W_{net,fin}$	$W_{fin}$
Viga sobre dois apoios	$\ell/300$ a $\ell/500$	$\ell/250$ a $\ell/350$	$\ell/150$ a $\ell/300$
Viga em consola	$\ell/150$ a $\ell/250$	$\ell/125$ a $\ell/175$	$\ell/75$ a $\ell/150$

A deformação calculada em qualquer caso, relativa à "deformação final net", como define a cláusula 7.2 (1) do EC5, deve ser determinada a partir da equação (7.2), ou seja, não pode ultrapassar o valor do critério de utilização (limites recomendados das flechas), ver a Figura 2.5.

O cálculo do efeito da deformação consiste no cálculo da flecha aparente final e instantânea (inicial), através da equação 2.32. para os elementos estruturais viga, laje ou pavimento, ver a Figura 2.5.

$$w_{net,fin} = w_{ins} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c \quad (2.3)$$

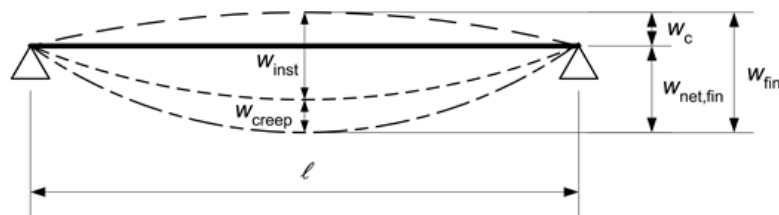


Figura 2.5 – Componentes da flecha.

É de referir que a madeira, contrariamente aos outros materiais utilizados na indústria da construção civil, tem um comportamento de deformação por corte que deve ser tido em conta, ao somar a deformação por corte com a deformação por flexão.

### ▪ Verificação à vibração

Em geral, as mais importantes vibrações em estruturas de madeira são instaladas por máquinas ou induzidas pela atividade humana.

As vibrações causadas por máquinas devem seguir a cláusula 7.3.2. do EC5 por referência ao apêndice do ISO 2631-2, assumindo um fator multiplicador de 1,0 para determinar os níveis

aceitáveis de vibração. Para as restantes vibrações, deve ser considerada a cláusula 7.3.3 do EC5 em relação aos pavimentos de habitações.

As avaliações qualitativas e quantitativas da aceitação de vibrações estruturais são complexas. As vibrações estão sujeitas a muitos fatores, tais como, a proximidade de uma fonte de vibração e a direção da fonte. A verificação das vibrações depende da frequência, da aceleração, da velocidade e do deslocamento induzido da vibração.

Para os pavimentos de habitações para frequência fundamentais de vibração inferior ou igual a 8 Hz, o EC5 aconselha um estudo específico. Já para frequências superiores a 8 Hz, o EC5 indica como devemos proceder para a verificação dos pavimentos de habitações de madeira. O critério de aceitação é dado nas equações 7.3 e 7.4 indicadas no EC5, as quais são apresentadas a seguir e devem ser satisfeitas.

$$\frac{w}{F} \leq a \text{ mm/kN} \quad (2.4)$$

$$v \leq b f_1 \xi^{-1} \quad (2.5)$$

No capítulo 2 do EC5 encontramos aspetos importantes que devem ser respeitados para a segurança da estrutura de madeira, tal como os coeficientes parciais,  $\gamma_M$ , para os respetivos materiais utilizados. A este propósito, ver Tabela 2.6, que indica como devemos determinar valores característicos das propriedades dos materiais, bem como a forma de avaliar as ações que atuam nas estruturas.

Tabela 2.6 – Coeficientes parciais,  $\gamma_M$ , recomendados para as propriedades dos materiais (BSI, 2009) e (Harris et al., 2014).

Combinações fundamentais:	
Madeira maciça	1,3
Madeira lamelada colada	1,25
Madeira lamelada colada cruzada	1,25
LVL, contraplacado, OSB	1,2
Aglomerado de partículas de madeira	1,3
Aglomerado de fibras de madeira duro	1,3
Aglomerado de fibras de madeira semi-duro	1,3
Aglomerado de fibras de madeira de média densidade (MDF)	1,3
Aglomerado de fibras de madeira brando	1,3
Ligações	1,3
Ligadores em placas metálicas perfuradas	1,25
Combinações de acidente	1,0

## 2.4. Programas de cálculo disponíveis

Cada vez mais existem programas disponíveis para o cálculo e para o dimensionamento de estruturas de madeira. Estes programas têm de estar sempre atualizados, no que toca a novas soluções de madeira, como por exemplo as ligações *X-RAD*. Uns são mais direcionados para estruturas simples e outros para estruturas mais complexas. Consoante o grau de complexidade que as estruturas de madeira apresentam, os programas têm de ser capazes de obter resultados fiáveis. Caso o programa não seja apropriado para a estrutura em análise, a sua modelação através do programa de cálculo pode transformar-se num processo penoso.

Nesta dissertação serão abordados três programas de cálculo automático, o RFEM 5, o TimberTech e o Calculatis. O primeiro é um programa geral para estruturas de madeira que usa o método de elementos finitos, o segundo é um programa de cálculo desenvolvido especialmente para o dimensionamento de estruturas em zonas sísmicas e o último é uma ferramenta online disponibilizada por um produtor de CLT.

### 2.4.1. Programa RFEM 5

O Programa RFEM 5 é um programa 3D de elementos finitos para o cálculo e para o dimensionamento de estruturas. É apropriação da empresa Dlubal Software, fundada em 1987 e sediada na República Checa. É utilizado com o intuito de definir qualquer estrutura, qualquer material e qualquer carga para os sistemas estruturais planos e espaciais, constituídos por lajes, paredes, cascas e barras. É ainda possível criar sistemas combinados, modelar sólidos e elementos de contacto. O programa RFEM 5 tem vários módulos - estruturas de betão armado, aço, alumínio, madeira, e vidro, torres e mastros, ligações, análise dinâmica e sistemas de condutas.

Entre os módulos disponíveis, destaca-se o módulo de estruturas de madeira.

Este módulo dimensiona e analisa estruturas de madeira, respeitando o Eurocódigo 5 e a DIN 1052 entre outras para madeiras. Aqui existe uma biblioteca de vários tipos de madeiras, por exemplo, madeira maciça, LVL, OSB, madeira lamelada colada, entre outras. A partir desta biblioteca de madeiras, regido por um grupo de normas, podemos criar elementos estruturais em CLT, através de múltiplas camadas de madeira lamelada, gerando, assim, uma biblioteca com vários tipos de elementos estruturais. Através do Módulo adicional RF-LAMINATE obtêm-se uma biblioteca de elementos CLT provenientes de vários produtores, como acontece com a biblioteca do programa TimberTech Buildings.

Dentro deste módulo, existe um apoio de módulos adicionais, dando oportunidade ao programa de fazer uma análise dinâmica de estruturas de madeira, de calcular as frequências próprias e os modos próprios, de analisar vibrações forçadas, de gerar forças laterais equivalentes para sismos, segundo o espectro do método de resposta multimodal, acompanhado por animações e por múltiplas cores.

O Módulo adicional RF-/JOINTS Timber – Steel to Timber dimensiona ligações indiretas unidas através de chapas de aço, de cavilhas, de parafusos e de pregos. O dimensionamento é realizado de acordo com a norma EC5 (incluindo vários anexos nacionais).

As ligações acarretam uma importância para as estruturas de madeira, pois é neste local que existe uma maior concentração de tensões, que, por sua vez, leva a uma diminuição da secção, tornando num local que requer cuidado. O programa faz as verificações, as quais são resumidas numa tabela e representadas em conjunto com a geometria das ligações. São listados todos os detalhes de verificação relevantes. Portanto, de forma imediata, são ilustradas as dimensões e as propriedades de materiais importantes para a construção das ligações e existe, ainda, a possibilidade de integrá-las no relatório de impressão disponível.

O Módulo adicional RF-LAMINATE efetua a análise de deformações e as verificações de tensões de superfícies laminadas. Este é o módulo adicional que é adequado para o dimensionamento de madeira lamelada colada cruzada. Como já foi referido acima, o usuário pode definir a composição e o número de camadas ou pode escolher uma secção dos elementos CLT na biblioteca de vários produtores, sendo que, imediatamente a seguir, o programa vai criar uma matriz de rigidez geral local para as respetivas superfícies do elemento estrutural criado.

Existe alguma complexidade para a determinação da matriz de rigidez de uma estrutura. Quando esta estrutura é constituída por elementos estruturais que utilizam colas, como a madeira lamelada colada, o cálculo da rigidez torna-se uma complexidade. No entanto, a rigidez assume-se como uma propriedade importante para o dimensionamento de uma estrutura, principalmente para as ações sísmicas. Logo o usuário deve sempre escolher as secções dos elementos de CLT da biblioteca em que o módulo adicional RF-LAMINATE possui dos vários produtores.

O módulo adicional RF-TIMBER Pro procede ao dimensionamento de barras e de conjuntos seguindo várias normas. Efetua, também, a verificação das tensões, bem como a estabilidade das barras. Produz a verificação quer das barras para os estados limite último e para os estados limite de utilização, quer da resistência ao fogo, usando a norma alemã DIN 1052. Por sua vez, é permitida uma otimização automática das secções.

### **2.4.2. Programa TimberTech**

O programa TimberTech é um programa de cálculo estrutural 3D para analisar, calcular e verificar estrutura de madeira. No final, é dada a hipótese de obter um relatório de cálculo detalhado em *word*.

Tem como objetivo atender a todas as necessidades de um projeto através da importação e exportação da geometria da estrutura em formado DXF e, assim, satisfazer cada vez mais os usuários, devido à sua constante evolução.

O programa tem como referência o Eurocódigo 5, auxiliado por diversos Anexos Nacionais. Este programa usufrui de várias bibliotecas de matérias de madeira (madeira maciça, XLAM, OSB, LVL, CLT e ligações). Além disto, é possível utilizar perfis de aço em qualquer estrutura. Os modelos numéricos que o programa incorpora são resultado da experiência e da pesquisa realizadas no campo da Universidade de Trento. O programa analisa qualquer aspeto específico, mesmo aqueles que não se registam na legislação em vigor.

---

Para a obtenção desta mais-valia, a experiência e o trabalho de pesquisa são fundamentais. Isto porque fez com que o programa realize uma boa aproximação entre o comportamento do modelo (esquematiza as paredes) e a própria estrutura real. Tal conduz a uma correta avaliação, em particular na avaliação da rigidez da parede lateral, que é difícil de alcançar, uma vez que depende da contribuição de vários fatores (deformações de corte dos painéis, deformações das ligações entre os painéis, movimento de corpo rígido) que custa calcular e definir no modelo. O forte do programa é, então, a possibilidade de modelar estruturas de paredes de corte, usando madeira lamelada colada cruzada CLT e sistemas de paredes entramadas com modelos numéricos, desenvolvidos na Universidade de Trento

De realçar que o TimberTech tem um excelente desempenho nos resultados na área sísmica. Este facto torna o programa muito vantajoso para as estruturas de madeira, sendo este âmbito caracterizado pela sua complexidade.

A regulamentação que o programa usa para eliminar algumas barreiras para o dimensionamento de estruturas de madeira são várias, desde os Eurocódigos até às normas italianas. No caso das normas italianas, o programa recorre ao código técnico italiano (*D.M. Infraestruturas de 14 Janeiro de 2008*), e coopera com o decreto de Lei 02 de Fevereiro de 2009 n.617, com destaque para o cálculo das cargas e ações da neve, do vento, sísmica e para a limitação de desvios entre os pisos que o programa explora. Quanto às normas europeias, o programa analisa através dos Eurocódigos 0, 3, 5 e 8 e, ainda, das Normas Europeias 338, 1194, 14080 e 10025. Porém, evidencia claramente o Eurocódigo 5.

### **2.4.3. Programa Calculatis**

Esta ferramenta online, que a fornecedora em produtos de madeira Stora Enso disponibiliza, tem como objetivo ajudar os seus clientes a dimensionar estruturas de madeira simples. O Calculatis analisa e verifica elementos estruturais simples para o estado limite último, a resistência ao fogo e estados limites de utilização.

Os elementos estruturais que calcula são: vigas contínuas, painéis CLT, rib decks, pisos com material de madeira e de betão e painéis de duplas consolas. Também inclui a análise de pilares, de vigas e de lintéis. Além do projeto estrutural, também tem módulos para a física dos edifícios e para a análise higrotérmica e acústica. Para a maior parte da conceção estrutural, o Calculatis aplica o conceito da teoria Timoshenko (principalmente para os elementos lineares, tais como vigas) e o método gammas,  $\gamma$ , para a análise da secção transversal do elemento CLT (principalmente para os painéis). Tudo isto de acordo com várias normativas atuais.

O Calculatis permite verificar as equações do estado limite último e do estado limite de utilização (deformação), incluindo também a verificação de condições de fogo e de vibração. É possível analisar diferentes soluções de secções transversais com combinações de camada múltipla (com diferentes números de espessura ou camadas e materiais diferentes). Possibilita que o software otimize a secção transversal, fornecendo soluções diferentes que verificam os estados limite.

Após a análise, os resultados são compilados sob a forma de relatórios de resumo que integram cada verificação e o nível de utilização do painel CLT.

Este programa de cálculo está disponível em: < <https://calculatis.clt.info/> >.

#### 2.4.4. Exemplos de aplicação dos programas

Os exemplos dos programas RFEM5, TimberTech e Calculatis foram retirados das respectivas página de internet.

- RFEM5 – < <https://www.dlubal.com/pt/download-e-informacao/referencias/projetos-de-clientes/>>;
- TimberTech – < <http://www.timbertech.it/>>;
- Calculatis – < <http://www.clt.info/en/projekte/>>;

##### ▪ RFEM 5

**Restauração da capela Solidão em Lugo, Espanha.** A antiga estrutura da cobertura da capela baseava-se em treliças apoiadas de forma simples nos muros da igreja. A solução adotada foi a substituição das barras de madeira maciça por madeira lamelada e para a cobertura foi adotado um painel CLT de cinco camadas. O dimensionamento em painéis CLT, permitiu obter maior altura do espaço interior.

A cobertura foi modelada ao interligar adequadamente elementos de barra e superfície. Foi necessário estudar a disposição das fibras mais fortes dos painéis CLT em função dos esforços. Foram também utilizadas funções avançadas do RFEM 5 para simular a transferência de carga dos painéis CLT até aos pilares inferiores através de superfícies rígidas.

As junções entre os painéis CLT foram simuladas com articulações lineares adequadamente calibradas e os resultados foram utilizados para dimensionar a disposição dos parafusos das intersecções dos painéis de canto, fortemente condicionada pela convergência de esforços internos e geometria complicada.

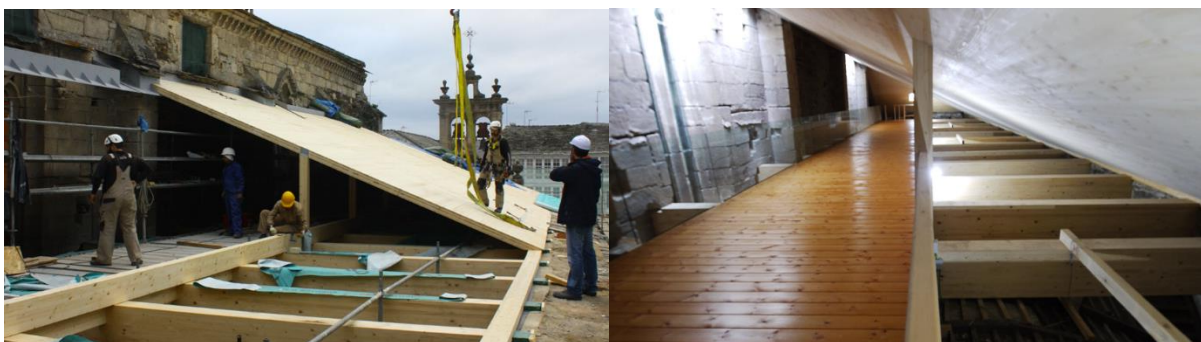
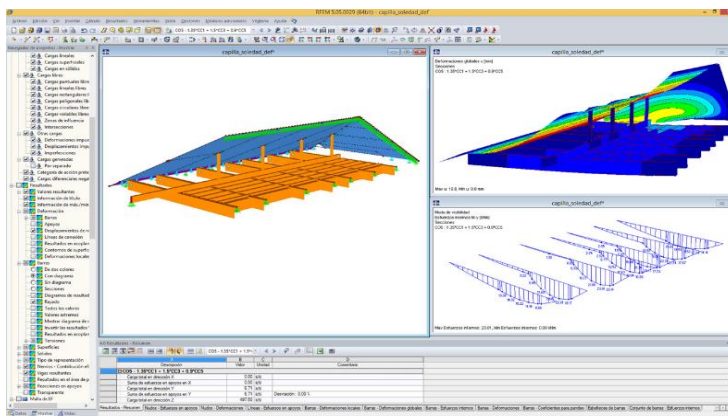


Figura 2.6 – Restauração da capela da Solidão em Lugo, Espanha

**Pavilhão de desportivo “Salvador Allende” em Cavezzo, Itália.** É um novo edifício que veio substituir o antigo pavilhão, o qual ficou danificado depois de este sofrer, em 2012, um sismo. O material principal é a madeira, com o objetivo de tornar a estrutura mais leve e reabrir o pavilhão o mais cedo possível.

O espaçamento entre os pórticos de madeira lamelada colada é de 6.50 m. O contraventamento na direção horizontal é assegurado através de painéis CLT.

Para obter a maior precisão da estrutura e para uma análise de ações dinâmicas, foram utilizadas molas rotacionais nas ligações. O cálculo da rigidez da mola levou o programa RFEM 5 a ter um comportamento real.



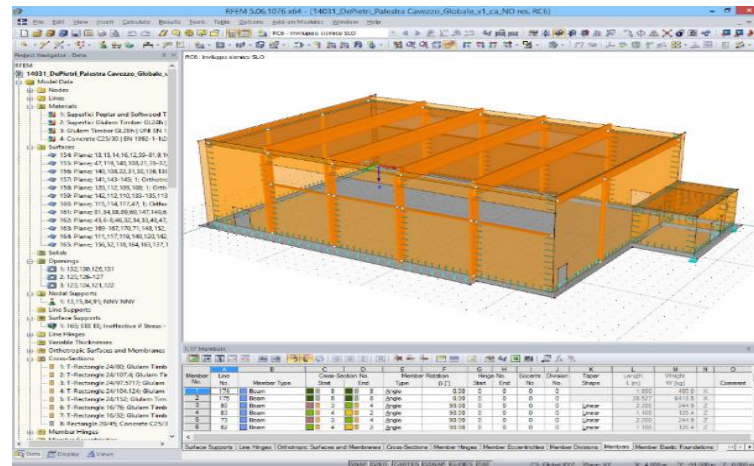


Figura 2.7 – Pavilhão de desportivo “Salvador Allende” em Cavezzo, Itália.

## ▪ TimberTech

Edifício com 3 andares ensaiado na mesa sísmica do *LNEC* e modelado pelo programa TimberTech, constituído por painéis de 3 camadas nas paredes e por painéis de 5 camadas nos pisos. As transmissões das forças de tração e de corte são suportadas pelas ligações hold-down e angle brackets, respetivamente. A seguinte figura compara os três primeiros modos de vibração, obtidos a partir de modelos experimentais e de modelo numéricos do programa TimberTech, que podemos verificar uma boa aproximação dos valores.

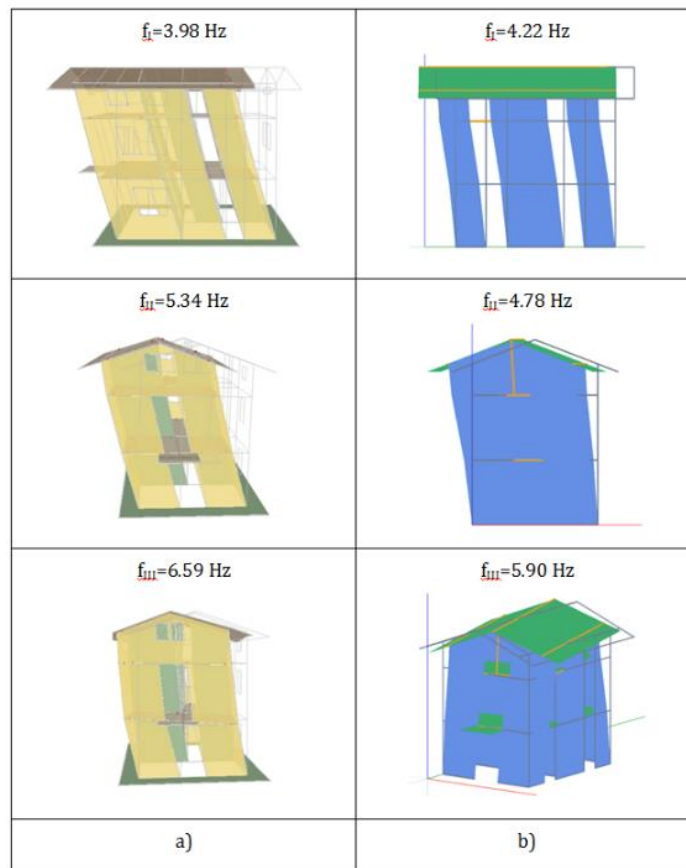


Figura 2.8 – Modos de vibração do edifício, projeto Series: a) valores experimentais b) valores da modelação no programa TimberTech.

## ▪ Calculatis

**Morada unifamiliar em Schilde, Bélgica.** Construída pelo gabinete de arquitetos BuildingSecrets, utiliza um pequeno volume de painéis CLT de 98 m<sup>3</sup> nas paredes internas e externas, no teto, no telhado e nas escadas exterior, com um tempo de 5 meses.



Figura 2.9 Moradia familiar, Schilde, Bélgica

A **OOPEA**, gabinete de arquitetos finlandeses criou um bloco residencial de 8 andares inteiramente de madeira em Jyväskylä Kuokkala, Finlândia, denominado '*puukuokka*' (enxada de madeira). O edifício é constituído por elementos modulares pré-fabricados. Estes foram criados em colaboração com o departamento de planeamento da cidade de Jyväskylä com a ideia de oferecer preços acessíveis, soluções ecoeficientes e adaptáveis às necessidades da habitação ocupante. São 58 apartamentos que garantem a vida sustentável, através da utilização de materiais de construção renováveis, bem como fontes de energia. De referir a utilização de 1700m<sup>3</sup> de painéis CLT.



*Figura 2.10 – Jyväskylä, Finlândia*

**Moholt 50/50** é o nome do projeto de construção mais recente em Trondheim, Noruega. Para um complexo de residência para estudantes, apresenta cinco prédios de madeira com nove andares cada. Este projeto foi construído com um volume de 6.500 m<sup>3</sup> de CLT, entregues em 75 cargas de camiões e 50 vagões de mercadorias pela fábrica Stora Enso em Ybbs (Áustria) até Trondheim (Noruega), com um tempo total de construção de apenas nove meses para completar as residências mais um edifício de biblioteca e uma escola. Além das vantagens técnicas, como o período de construção curto e a alta funcionalidade, a construção em madeira também tem um efeito claramente positivo sobre a qualidade de vida naquele prédio. O uso de elementos pré-fabricados garante um alto padrão de qualidade e minimiza atrasos e outros

problemas durante o processo de construção. Os elementos cúbicos modulares - caixilhos de madeira compensada - são adaptáveis, leves e prontos para instalar. E, conseqüentemente, a estrutura serve tanto como um elemento de suporte de carga e de reforço, como para proporcionar uma barreira de vapor e de isolamento térmico parcial. O método de construção significa menos junções e menos material do que nas construções em madeira convencionais, ao mesmo tempo que o risco de defeitos de instalação é reduzido.



*Figura 2.11 – Residência para estudantes em Trondheim, Noruega.*

### **2.5.2. Conclusão sobre os programas TimberTech, RFEM 5 e Calculatis**

Os três programas abordados anteriormente são muitos diferentes entre si. O Calculatis é um programa básico que serve para dar algum apoio aos clientes da Stora Enso e foi com esse objetivo que foi criado.

Já o programa RFEM 5 e o TimberTech têm um outro poder de cálculo, sendo possível fazer uma breve comparação. O programa TimberTech tem uma vasta gama de elementos estruturais de vários tipos de madeira e de aço. Estes elementos estruturais foram posteriormente pesquisados e ensaiados para o programa conseguir obter modelos com uma maior realidade nos resultados estruturais.

Acontece a mesma coisa no que se refere às ligações. A TimberTech tem uma biblioteca com mais alternativas, onde podemos obter ligações de diferentes empresas. É, sem dúvida, uma mais-valia para o programa.

O programa RFEM 5 exige uma maior disponibilidade do usuário, pois a entrada de dados é muito complexa, desde as combinações de carga até aos resultados da estrutura.

No que toca à capacidade de estruturas mistas, o RFEM 5 torna-se uma boa escolha, devido aos módulos que possui: estruturas de betão armado, vidro, madeiras, aço, alumínio, entre outros.

Já com o programa TimberTech apenas são consideradas estruturas mistas madeira-aço. Os dois programas têm um bom conceito no que toca ao BIM, visto que existe uma boa troca de dados entre os modelos do engenheiro, do arquiteto e do construtor através de ficheiros IFC, DXF, por exemplo. Ambos podem dimensionar estruturas complexas; porém será mais fácil modular estruturas de madeira no programa TimberTech, devido às razões enumeradas acima.

O programa TimberTech é um programa que está constantemente a ser atualizado a partir de várias pesquisas e ensaios para cobrir algumas abordagens do programa em falta, que faz com que este processo seja demorado.



### 3. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS SIMPLES DE MADEIRA LAMELADA COLADA E MACIÇA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o dimensionamento de estruturas simples de madeira lamelada colada e de madeira maciça. Considera-se oportuno referir que as ligações não serão aqui consideradas. Para o efeito, foi elaborada uma folha de cálculo para dimensionar estruturas simples tendo por base o EC5 e recomendações disponíveis para o cálculo destas estruturas. O objectivo final foi o de permitir validar os procedimentos e os cálculos que os programas de cálculo automático realizam, comparando os resultados com aqueles obtidos pela folha de cálculo.

Neste capítulo, abordam-se as principais verificações a realizar no caso de estruturas de madeira, através da análise de alguns elementos simples de madeira (vigas e pilares) dimensionados através da folha de cálculo, e que por fim, são ainda analisados utilizando o programa TimberTech para efeitos de comparação.

#### 3.1. Verificação da segurança da estrutura

##### 3.1.1. Dimensionamento de elementos a forças axiais

O critério de segurança para a tração paralela ao fio é verificado através da cláusula 6.1.2 do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (3.1)$$

O valor de cálculo da tensão atuante de tração paralela ao fio tem de ser inferior ou igual ao valor de cálculo da tensão resistente de tração paralela ao fio. Este último valor pode ser muito conservativo, ou seja, o efeito volume,  $k_h$ , já acima referido, pode aumentar a tensão resistente de tração paralela ao fio para elementos com largura menor do que a de referência do EC5, 150 mm e 600 mm, relativo a madeiras maciças e com densidade característica menor ou igual que 700 Kg/m<sup>3</sup> e madeira lamelada colada, respetivamente. A tensão resistente de tração paralela ao fio deve ser corrigida da seguinte forma:

$$f_{t,0,d} \leq k_h \frac{k_{mod} \times f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (3.2)$$

- Para madeira maciça:

$$k_h = \min \left\{ \left( \frac{150}{h} \right)^{0.2} \right. \quad (3.3)$$

- Para madeira lamelada colada:

$$k_h = \min \left\{ \left( \frac{600}{h} \right)^{0.1} \right. \quad (3.4)$$

É de notar que o aumento máximo da resistência é de 30% para madeiras maciças e de 10% para madeiras lameladas coladas. Este último caso deve-se ao facto de a madeira lamelada colada ter um processo de transformação que diminui a influência dos defeitos e na densidade.

O critério de segurança para a tração perpendicular ao fio é verificado através da cláusula 6.1.3 do EC5, o qual não prevê a solicitação direta da madeira e a tração perpendicular às fibras é uma situação que ocorre apenas em peças curvas e em ligações entre vigas principais e secundárias mal-executadas em madeira. É então importante uma conceção e uma pormenorização estrutural adequada, para que não seja solicitado o elemento à tração perpendicular ao fio.

O critério de segurança para a compressão paralela ao fio é verificado através da cláusula 6.1.4 do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (3.5)$$

O valor de cálculo da tensão atuante de tração paralela ao fio tem de ser inferior ou igual ao valor de cálculo da tensão resistente de compressão paralela ao fio. De notar que, para esta verificação, devemos verificar, para elementos esbeltos, a encurvadura, que é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_{crit} \times f_{c,0,d} \quad (3.6)$$

Em que,  $k_{crit}$  é o coeficiente que tem em conta a redução da resistência à flexão devida à encurvadura



O critério de segurança para a compressão perpendicular ao fio é verificado através da cláusula 6.1.5 do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \times f_{c,90,d} \quad (3.7)$$

O valor de cálculo da tensão de compressão na zona de contacto perpendicular ao fio tem de ser inferior ou igual ao valor de cálculo da resistência à compressão perpendicular ao fio.

O valor de cálculo da resistência à compressão perpendicular ao fio da madeira pode ser calculado tendo em conta um fator de configuração do carregamento,  $k_{c,90}$ , que toma o valor de 1.0, exceto nos casos que o Eurocódigo retrata, em que toma valor máximo 4.0, como já foi referido acima. Este valor máximo com vista a evitar deformações indesejáveis na estrutura, mas também porque as ligações podem ser brutalmente afetadas.

### 3.1.2. Dimensionamento de elementos à flexão

O valor de cálculo da tensão atuante da flexão tem de ser inferior ou igual ao valor de cálculo da tensão resistente de flexão. O critério de segurança para a flexão simples é dado pela seguinte expressão:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (3.8)$$

Já o critério de segurança para a flexão desviada é verificado através da cláusula 6.1.6 do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.9)$$

$$k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.10)$$

As equações têm de ser satisfatórias. Admite-se, para secções retangulares, uma redução da redistribuição de tensões,  $k_m$ , apenas numa das componentes do momento fletor.

### 3.1.3. Estabilidade dos elementos

Instabilidade lateral (bambeamento) pode levar à rotura do elemento solicitado à compressão, à flexão ou à combinação de compressão e de flexão. Este fenómeno de instabilidade manifesta-se em secções esbeltas fletidas, tanto para pilares, como para vigas, o que possibilita a origem da encurvadura no plano perpendicular ao carregamento dos elementos.

O critério de segurança para os pilares solicitados à compressão ou à combinação de compressão e de flexão com esbelteza relativa menor ou igual a 0.3 nas duas direções do eixo  $y$  e  $z$ , simultaneamente, são verificados através da cláusula 6.2.4 (1) do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.11)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.12)$$

Para todos os outros casos, o critério de segurança para os pilares solicitados à flexão ou uma combinação de compressão e de flexão é verificado através da cláusula 6.3.3 (3) do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.13)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.14)$$

O critério de segurança para as vigas solicitadas à flexão ou uma combinação de compressão e de flexão é verificado através da cláusula 6.3.3 (6) do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (3.15)$$

No caso de só existir momento em relação ao eixo de maior resistência, podemos calcular através da seguinte expressão:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \quad (3.16)$$

Cada componente é influenciada por uma redução, nas últimas expressões. No caso da componente à flexão, a redução deve-se à encurvadura,  $k_{crit}$ , e para a componente à compressão, a redução é devido à instabilidade lateral,  $k_c$ , fenómeno que ocorre devido às imperfeições e defeitos de fabrico.

### 3.1.4. Corte

Os esforços de corte ocorrem quando existe um carregamento no elemento, provocando um momento fletor. Este adquire componentes de tensão paralela ao fio, ver Figura 3.1(a) e componentes de tensão perpendiculares ao fio para haver um equilíbrio, ver Figura 3.1(b).

O critério de segurança para elementos solicitados ao corte para as componentes paralela e perpendicular ao fio é verificado através da cláusula 6.1.7 (1) do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (3.17)$$

É de referir que a resistência ao corte, no EC5, não tem em conta a fissuração do elemento.

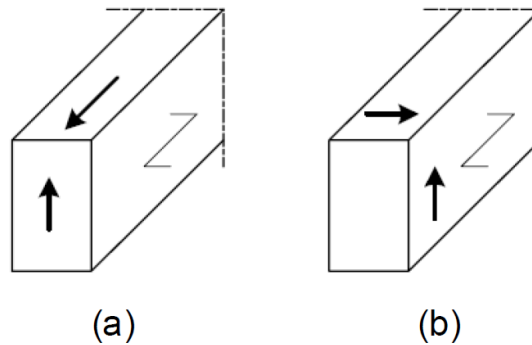


Figura 3.1 – (a) Elemento com uma componente de tensão de corte paralela ao fio (b) Elemento com ambas as componentes de tensão perpendicular ao fio (rolling shear), EC5.

O efeito rolling shear é explicado na secção 4.5.

Para elementos de secção retangular com entalhes nos apoios das vigas, ver Figura 3.2, o critério de segurança relativo a elementos solicitados ao corte para as componentes paralelas ao fio é influenciado por uma redução,  $k_v$ , e  $h_{ef}$ . É verificado através da cláusula 6.5.2 (2) do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\sigma_d = \frac{1.5V}{b \times h_{ef}} \leq k_v \times f_{v,d} \quad (3.18)$$

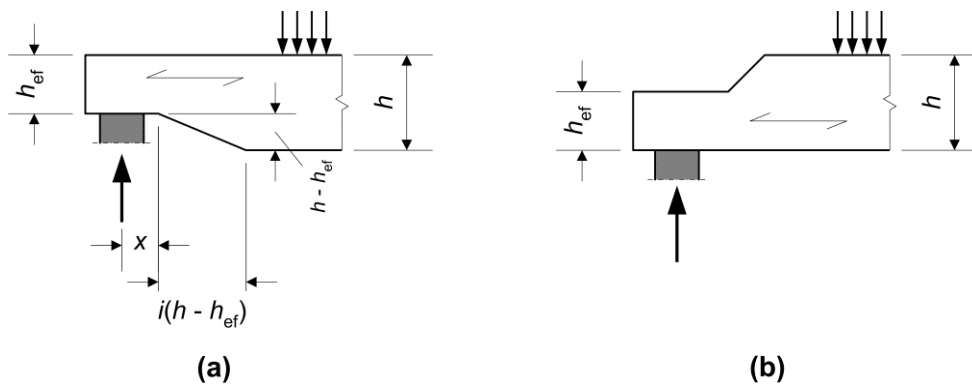


Figura 3.2 – Vigas com um entalhe nos apoios, EC5.

### 3.1.5. Torção

A torção está condicionada pela baixa resistência de tração perpendicular ao fio na madeira, não um esforço muito comum nas estruturas de madeira.

O critério de segurança para elementos solicitados à torsão é verificado através da cláusula 6.1.8 do EC5 e é dado pela seguinte expressão:

$$\sigma_{tord,d} \leq k_{shape} \times f_{v,d} \quad (3.19)$$

A resistência à torsão é afetada por um fator,  $k_{shape}$ , que depende da forma da secção do elemento, ver a seguinte expressão 6.15 do EC5.

### 3.1.6. Deformação

A deformação dos elementos é avaliada através da flecha máxima, mas também pelo deslizamento nas ligações. A este último, ver a cláusula 7.1 do EC5, este regulamento não faz qualquer limitação; pelo contrário, o EC5 atribui limitações à deformação, ver a cláusula 7.2 do mesmo. Sendo um material visco elástico, a madeira apresenta uma elevada fluência, se as condições ambientais e a duração das ações assim o proporcionarem. Por vezes, a madeira atinge uma deformação final, o dobro da deformação instantânea, principalmente se usarmos a madeira para condições correspondentes à classe de serviço 3 (mais grave). Esta fluência está representada no fator de deformação,  $k_{def}$ , da tabela 3.2 do EC5.

A deformação final tem uma componente de deformação instantânea, outra componente de deformação por fluência e uma componente de contraflecha, que são calculadas pela expressão 2.3.

O EC5, para estruturas com comportamento linear elástico e constituídas por elementos e ligações com o mesmo comportamento à fluência, assume uma relação entre a deformação instantânea e deformação por fluência, igual à seguinte expressão:

$$u_{creep} = k_{def} \times u_{inst} \quad (3.20)$$

Então, para estruturas que cumpram as condições acima, a deformação é determinada pela expressão:

$$u_{fin} = u_{inst} + u_{creep} = u_{inst}(1 + k_{def}) \quad (3.21)$$

Podemos calcular a deformação, apenas dando atenção à ação de flexão, para outros materiais, por exemplo o aço e o betão-armado. Já para os elementos de maderas devemos ter em conta à

acção de corte que é significativa e, então, devemos calcular a deformação tendo em consideração à flexão e ao corte.

A deformação devido à flexão pode ser determinada utilizando as equações padrão para vários casos de carga em vários sistemas estruturais.

A deformação devido ao corte é o módulo de distorção,  $G$ , e a posição e a intensidade das cargas, apresentadas pelas (Young, WC., Budynas, 2002) e (Council of Forest Industries of British Columbia, 1970).

Para exemplificar uma viga simplesmente apoiada, o cálculo das deformações instantâneas pode ser feito seguindo as seguintes equações:

$$u_{inst} \approx \frac{5WL^3}{384E_d I} + 3 \frac{WL}{20bhG_d} \quad (3.22)$$

ou é possível estimar através da seguinte equação:

$$u_{inst} \approx \frac{0.104ML^3}{E_d I} + \frac{M_{máx}}{bhG_d} \quad (3.23)$$

### 3.1.7. Vibração

Segundo o EC5 deve-se verificar as vibrações tendo em conta a rigidez prevista e o coeficiente de amortecimento modal  $\xi = 0,01$  (isto é, 1%), para o elemento ou para a estrutura. A cláusula 7.3 do EC5 indica os limites das vibrações em pavimentos de habitação, sendo uma verificação importante para o bom funcionamento da estrutura e a mais difícil de calcular, devido aos vários fatores que já foi mencionado no capítulo 2.

As seguintes regras destinam-se a pavimentos com frequência fundamental superior a 8Hz e, para valores inferiores, o EC5 diz que deve ser feito um estudo mais rigoroso para, assim, poder evitar uma possível ressonância.

A verificação do estado limite de vibração é dada pelas seguintes condições das equações 2.4 e 2.5.

A primeira condição consiste em confirmar a ausência de movimentos para frequências baixas (inferior a 8 Hz), que são originadas pelos passos.

A segunda condição serve para limitar a magnitude da resposta transitória ao impacto do pé no pavimento.

As constantes  $a$  e  $b$  estão relacionadas e são recomendadas nos anexos nacionais ou na figura 7.2 do EC5, e admitimos que o pavimento está sujeito apenas ao peso próprio e a outras ações permanentes.

### 3.2. Folha de cálculo vs TimberTech

Nesta seção apresenta-se, a título de exemplo, a comparação entre o cálculo de um pilar em madeira maciça e de uma viga de madeira lamelada colada utilizando a folha de cálculo que segue as recomendações do EC5 e o programa TimberTech.

*Tabela 3.1 – Características do pilar.*

Pilar	
Classe	C24
Cl.de serviço	1
Área	200x200 mm <sup>2</sup>
Altura	2.8 m
Força	32.35 kN

*Tabela 3.2 – Verificações do pilar.*

	Folha de cálculo	TimberTech
$K_{c,y}$	0.88	0.81
$K_{c,z}$	0.88	0.81
$\sigma_{c,0,d}$ (MPa)	0,82	0.84
$f_{c,0,d}$ (MPa)	12.92	12.92
Estabilidade	7%	8%

Tabela 3.3 – Características da viga.

Viga	
Classe	GL28
Cl.de serviço	1
Área	200x300 mm
Largura	5 m
Transverso	32.82 kN
Momento	41.18 kN/m

Tabela 3.4 – Verificações da viga.

	Folha de cálculo		TimberTech	
$K_{crit}$	1.0		1.0	
$\sigma_{m,d}$ (MPa)	11.82		11.62	
$f_{m,d}$ (MPa)	18.34		17.92	
Verificação à flexão	64%		65%	
$K_{cr}$	0.67		0.67	
$\sigma_{v,d}$ (MPa)	1.1		1.1	
$f_{v,d}$ (MPa)	2.05		2.05	
Verificação ao corte	54%		54%	
$\sigma_{c,90,d}$ (MPa)	0.51		_(1)	
$f_{c,90,d}$ (MPa)	1.92		_(1)	
Corte perpendicular	27%		_(1)	
Deformação inst	11.8 mm	71%	10.6 mm	64%
Deformação final	16.9 mm	85%	15 mm	76%

- (1) O programa timberTech mostra os resultados do corte para as verificações mais condicionantes e neste caso, as verificações mais condicionantes foram ao corte normal.

Como se pode constatar, os valores de ambos (folha de cálculo e TimberTech) têm um erro absoluto muito pequeno cerca de 10% e 11%, para a limites de deformação instantânea (1/300) e limites deformação final (1/250), respetivamente . É de referir que, quanto ao coeficiente de instabilidade do pilar, existe alguma discrepância, bem como relativamente à resistência de flexão para as vigas, que pode ter sido afetado pelo factor de altura,  $k_h$ . No entanto, são erros

aceitáveis, tal como os erros para as deformações nas vigas, que podem ser explicados pelas aproximações das equações na obtenção das deformações instantâneas usado pelas folhas de cálculo, ver secção 3.1.6.



## 4. DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM CLT

Este capítulo visa abordar e proporcionar alguma clarificação sobre algumas dúvidas que possam existir sobre o dimensionamento de estruturas de madeira lamelada colada cruzada (CLT).

A sua capacidade para resistir a forças no plano ou fora do plano serão abordados, bem como o efeito rolling shear e os métodos de cálculo da rigidez dos painéis CLT.

Este capítulo é suportado por várias pesquisas que vão ser referidas ao longo deste, com vista a harmonizar e registar várias investigações realizadas, e, assim, clarificar e orientar um engenheiro de estruturas para o dimensionamento dos pavimentos, paredes e vigas em CLT.

### 4.1. Características de painéis CLT segundo a EN 16351

Os painéis CLT têm de ser constituídos, no mínimo, por 3 camadas (lamelas) de madeira. As camadas podem ser constituídas com o recurso a diferentes espécies de madeira mas o mais normal é utilizar-se apenas uma espécie de madeira sendo o abeto aquela mais comum.

A norma EN 16351 aconselha camadas com espessuras,  $t_l$ , entre 12 a 45 mm (60 mm, dependendo da posição da camada) e larguras,  $w_l$ , entre 40 e 300 mm.

Devido às tensões de rolling shear em camadas de CLT num carregamento para fora do plano, é aconselhável uma largura mínima de  $w_l \geq 4 t_l$ ; caso contrário, uma redução da resistência ao rolling shear tem que ser considerada, ver a secção 4.2.

As seguintes imagens mostram as regras para a constituição de painéis CLT, segundo a EN 16351.

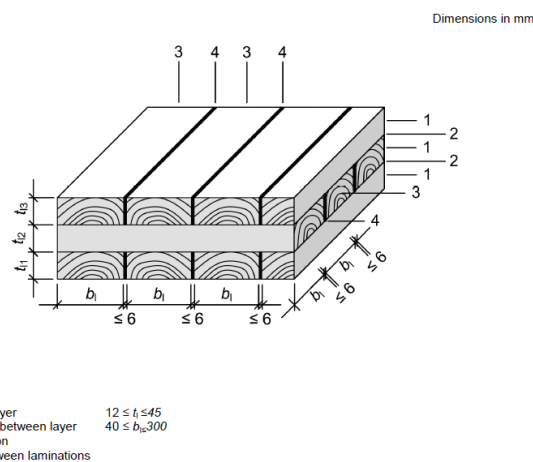


Figura 4.1 – Exemplo de painéis CLT com 3 camadas, EN 16351 (CEN, 2015).

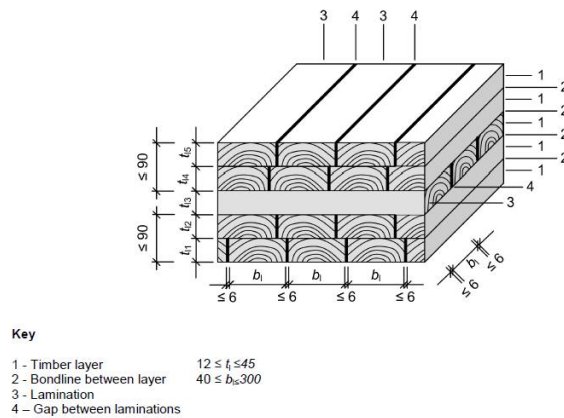


Figura 4.2 – Exemplo de painéis CLT com 5 camadas, com as 2 camadas exteriores colocadas paralelas ao fio, EN 16351(CEN, 2015).

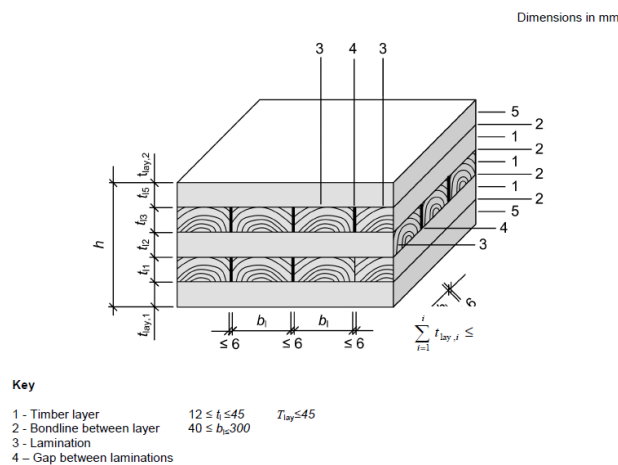


Figura 4.3 – Exemplo de painéis de CLT, que inclui um painel base, EN 16351(CEN, 2015).

Para camadas curvadas, a máxima espessura das camadas,  $t_l$ , é influenciada pela curvatura,  $r$ , de menor laminação e valor característico da resistência à flexão das juntas das extremidades, em que deve ser cumprida a seguinte expressão:

$$t_l \leq \frac{r}{250} \left( 1 + \frac{f_{m,j,d,c,k}}{80} \right) \text{ em mm} \quad (4.1)$$

A espessura final,  $t_{lay}$ , de qualquer painel base deve ser inferior ou igual a 45 mm.

Do ponto de vista estrutural, devemos atender a alguns aspetos relevantes para um bom comportamento no funcionamento dos painéis CLT:

I. A secção transversal deverá ser avaliada considerando a deformação por esforço transversal que ocorre nas lamelas transversais ao plano de flexão;

II. Possibilidade de distribuição de cargas em duas direcções ortogonais, considerando a configuração dos estratos e as dimensões do painel;

III. Grande estabilidade dimensional, devido à restrição provocada pela colagem e pela disposição ortogonal dos estratos;

IV. Utilização em Classes de Serviço 1 e 2 e o desaconselhamento da utilização em Classe de Serviço 3, já que é uma classe com condições climáticas que podem conduzir à descolagem entre camadas no caso de cargas elevadas.

## 4.2. Rigidez de flexão

A rigidez de flexão torna-se difícil de calcular devido à disposição das camadas e das interfaces coladas (efeito rolling shear, ver secção 4.5). Esta rigidez de flexão é calculada através de uma redução de inércia efetiva. Porém, foram desenvolvidos vários métodos para a determinação da rigidez efetiva. Uns dos métodos, e o mais utilizado na Europa, é um método simples “Mechanically Jointed Beams Theory”, conhecido como método de “gamma”. Este, que consta no anexo B do Eurocódigo 5, define um fator de eficiência de conexão,  $\gamma_i$ , com o qual é possível obter a inércia efetiva da secção transversal que está a atuar. Existem outros dois métodos desenvolvidos - o Composite Theory (k-method) e o Shear analogy method (conhecido como método de Kreuzinger). O primeiro é a derivação do método de dimensionamento de painéis de contraplacado, onde se utiliza um fator,  $K$ , para correção da inércia efetiva; o segundo é uma regressão matemática que considera os diferentes módulos de elasticidade e os módulos de corte de camadas individuais para, praticamente, qualquer configuração de painéis. O Shear Analogy é considerado o método mais completo para o cálculo de CLT, mas também o mais complexo, uma vez que exige análises numéricas.

No dimensionamento de elementos de CLT, o programa TimberTech, assim como muitos outros, usa o método disponibilizado pelo EC5, o método “gamma”.

A rigidez de flexão pode ser calculada pelo anexo B do EC5, como se demonstra, mas com uma adaptação através do fator  $\gamma_i$ , em que se substitui as componentes  $S_i$  e  $K_i$  da equação do anexo B do EC5 pelas componentes  $G_R$  (módulo de rigidez do rolling shear) e  $b$  (espessura total do painel CLT);

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \times E_i \times A_i \times h}{G_R \times L^2 \times b}} \quad (4.2)$$

O coeficiente de eficiência,  $\gamma_i$ , toma valor de 0 para não ligações e 1 para ligações rígidas. Os valores típicos dos painéis CLT variam entre 0.85 e 0.99.

Assim, com estas transformações, o método gamma torna-se uma aproximação coerente ao considerar o efeito rolling shear ( $G_R, b$ ). Por conseguinte, o rolling shear reduz a capacidade de resistência do painel na direção contrária ao plano de trabalho das lamelas atuantes.

O cálculo da rigidez de flexão efetiva para fora do plano é:

$$EI_{eff} = \sum (E_i \times I_i) + \sum (\gamma_i \times E_i \times A_i \times a_i^2) \quad (4.3)$$

Uma observação a referir é que, independentemente da constituição do painel, ou seja, com 3 das 5 camadas resistindo ao carregamento, Figura 4.4 (acima), ou com 2 das 5 camadas resistindo ao carregamento, Figura 4.4 (abaixo), o valor de inércia do elemento é sempre o mesmo, mas terá uma menor estabilidade, pois só 2 das 5 camadas resistem ao carregamento, e um maior efeito de rolling shear, pois 3 camadas são perpendiculares à direção do carregamento, que faz com que a inercia efetiva é diferente conforme as disposições das camadas ou diferente conforme as cargas solicitadas ao painel. Como já foi referido, é importante o projetista ter em consideração estes requisitos para decidir a melhor posição das camadas para os diferentes carregamentos a que o painel pode estar sujeito.

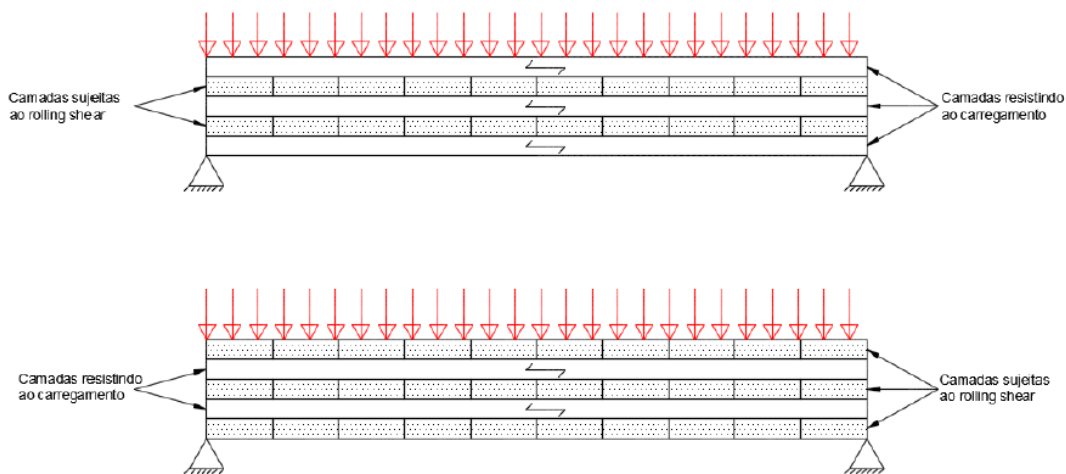


Figura 4.4 – Influência nas camadas CLT com uma carga vertical.

### 4.3. Rigidez axial

Como no caso de  $k_{CLT}$ , as camadas transversais de CLT também devem ser consideradas para calcular a rigidez axial. A rigidez axial,  $EA_{ef} = D_x$ , (rigidez na direção  $x$ ) para um membro linear, é dada na seguinte equação.

$$k_{CLT} = (EA)_{ef} = D_x = \sum_{i=1}^n E_i \times A_i \quad (4.4)$$

No caso de um painel carregado no plano, com  $E_{90} = 0$ , os valores de rigidez  $D_x$  ver equação 4.5 e  $D_y$  ver equação 4.6, são baseados na secção transversal eficaz. Consequentemente, apenas as lamelas que estão orientadas na direção específica são tidas em conta.

$$D_x = E_{0,mean} \times \sum_{i=1}^n t_{i,x} \quad (4.5)$$

$$D_y = E_{0,mean} \times \sum_{i=1}^n t_{i,y} \quad (4.6)$$

Onde a rigidez axial na direção  $x$ ,  $D_x$ , é influenciado pelo somatório de todas espessura da camada  $i$  com direção da fibra paralela à direção  $x$ ,  $t_{i,x}$ , e pelo valor médio do módulo de elasticidade paralelo às fibras.

A rigidez axial na direção  $y$ ,  $D_y$ , é influenciado pelo somatório de todas espessura da camada  $i$  com direção da fibra paralela à direção  $y$ ,  $t_{i,y}$ , e pelo valor médio do módulo de elasticidade paralelo às fibras.

### 4.4. Rigidez de corte

- **Rigidez de corte no plano**

A rigidez ao corte de um elemento CLT carregado no plano,  $S_{xy}$ , é dado pela equação 4.7, e depende do módulo de corte efetivo,  $G^*$ , da espessura do elemento CLT,  $t_{CLT}$ , e da largura das tábuas,  $a$ . O módulo de corte eficaz é dado na equação 4.8, que tem um fator de ajuste especificado,  $\alpha_T$ .

$$S_{xy} = G^* \times t_{CLT} \quad (4.7)$$

$$G^* = \frac{G_{0,mean}}{1 + 6 \times \alpha_T \times \left(\frac{t}{a}\right)^2}, \alpha_T = 0.32 \times \left(\frac{t}{a}\right)^{-0.77} \quad (4.8)$$

Onde o módulo de corte efetivo,  $G^*$ , é influenciado pelo valor médio do módulo de corte,  $G_{0,mean}$ , pela espessura das camadas (média),  $t$ , e pela largura da placa ou distância entre placas (média),  $a$ .

### ▪ Rigidez de corte fora do plano

A rigidez ao corte de elementos CLT carregados para fora do plano,  $S_{CLT}$ , é dado na equação 4.9, e depende da rigidez ao corte,  $S_{tot}$ , e do coeficiente de correção do corte,  $k$ . Para as camadas longitudinais e transversais, os módulos de corte a usar são o módulo de corte,  $G_{CLT}$ , e o módulo de corte perpendicular ao fio,  $G_r, CLT$ , respetivamente.

$$S_{CLT} = S_{tot} \times k \quad (4.9)$$

$$S_{tot} = \sum (G_i \times b_i \times t_i) = \sum (G_i \times A_i) \quad (4.10)$$

$$k = \frac{1}{S_{tot} \times \frac{1}{k_{CLT}^2} \times \int_{t_{CLT}} \frac{S^2(z, E(z))}{G(z) \times b(z)} dz} \quad (4.11)$$

O fator do corte,  $k$ , pode ser determinado graficamente.

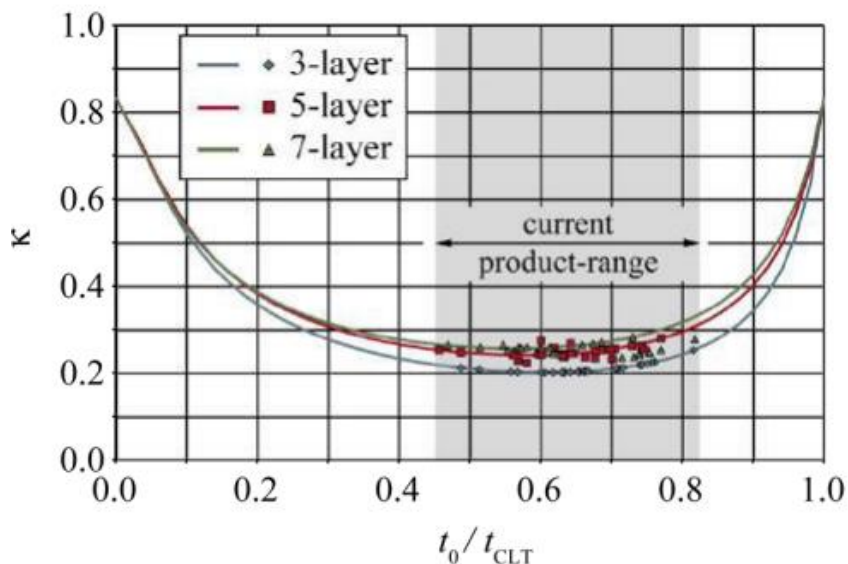


Figura 4.5 – Coeficiente de correção de corte  $\kappa$  para uma relação  $G_0/G_r = 10$  que dependendo de  $t_0/t_{CLT}$  - soluções analíticas e valores dos painéis correntes avaliados pelo CLTdesigner, onde  $t_0$  é a soma das espessuras de todas as camadas com  $\alpha = 0^\circ$  (Harris et al., 2014).

Onde a rigidez de corte total,  $S_{tot}$ , é influenciado pelo somatório dos módulos de corte de camada camada  $i$  ( $G_i$  ou  $G_{r,i}$ ),  $G_i$ , vezes a área das camadas  $i$ ,  $A_i$ .

O coeficiente de correção do corte,  $k$ , é dado pela largura da camada  $i$ ,  $b_i$ , pela espessura da camada  $i$ ,  $t_i$ , pelo momento estático dependendo da coordenada  $z$ ,  $S(z, Ez)$ , pelo módulo de corte dependendo da coordenada  $z$ ,  $G(z)$  e pela largura da secção transversal dependendo da coordenada  $z$ ,  $b(z)$ .

### ▪ Rigidez de torção

A rigidez de torção,  $D_{xy}$ , de um painel homogêneo com material ortotrópico, é definida de acordo com a equação 4.12. Para validar esta equação, o módulo de corte,  $G_{xy}$ , deve ser tomado como constante sobre toda a espessura,  $t_{CLT}$ . Esta equação só é válida para elementos CLT compostos por placas com colagem adesiva entre as tábuas da mesma camada e sem fissuras. Senão, a rigidez de torção tem de ser reduzida seguindo as equações 4.13 e 4.14. O número de camadas e a geometria das tábuas são os parâmetros de influência. No caso de diferentes larguras e espessuras de painéis, devem ser utilizados valores médios para  $a$  e  $t$ .

$$D_{xy} = G_{xy} \times \frac{t_{CLT}^3}{12} \quad (4.12)$$

$$D_{xy}^* = G_{xy}^* \times \frac{t_{CLT}^3}{12} = K_{CLT,P} \times G_{xy} \times \frac{t_{CLT}^3}{12} = K_{CLT,P} \times D_{xy} \quad (4.13)$$

$$K_{CLT,P} = \frac{1}{1 + 6 \times \alpha_{FIT} \times \left(\frac{t}{a}\right)^2}, \text{ em que } \alpha_{FIT} = \left(\frac{t}{a}\right)^q \quad (4.14)$$

onde a rigidez de torção dos elementos CLT reduzida para elementos sem ligação nas faces laterais e/ou com as fissuras,  $D_{xy}^*$ , é influenciado pelo módulo de corte reduzido para elementos CLT sem ligação nas faces laterais e/ou com as fissuras,  $G_{xy}^*$ , e a espessura do painel CLT,  $t_{CLT}$ . Que por sua vez a  $D_{xy}^*$ , é influenciado por um factor de redução para rigidez de torção,  $K_{CLT,P}$ , que por sua vez é influenciado pelas espessuras,  $t$  e largura,  $a$ , das camadas e por um factor de redução,  $\alpha_{FIT}$ .

Alguns valores de estudos numéricos são representados nas seguintes tabelas.

Tabela 4.1 – Parâmetros  $p$  e  $q$  baseados num estudo numérico, (Harris et al., 2014).

Parâmetro	3 camadas	5 camadas	7 camadas
$p$	0.89	0.67	0.55
$q$	-0.67	-0.74	-0.77

Tabela 4.2 – Fator de redução  $K_{CLT,P}$ , (Harris et al., 2014).

t/a	$K_{CLT,P}$		
	3 camadas	5 camadas	7 camadas
1:6	0.67	0.70	0.73
1:5	0.61	0.65	0.69
1:4	0.54	0.59	0.63
1:3	0.45	0.5	0.54

Tabela 4.3 – Determinação do módulo de corte reduzido,  $G_{xy}^*$ , para t/a = 1:4 e  $G_{xy} = 650$  N/mm<sup>2</sup>, (Harris et al., 2014).

t/a	$G_{xy}^*$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3 camadas	5 camadas	7 camadas
1:4	~350	~380	~410

#### 4.5. Efeito rolling shear

A composição lamelar do CLT permite suportar cargas no plano e ortogonais ao plano. Como a sua estrutura é orientada ortogonalmente, as camadas adjacentes são carregadas para fora do plano e existe um esforço de corte na camada perpendicular à aplicação da força, denominado de efeito rolling shear, Figura 4.6.

O efeito rolling shear tem uma elevada importância na resistência do painel. Existe uma tendência de as lamelas “rolar” uma sobre as outras, o que, por sua vez, faz com que o painel perca estabilidade. Este efeito é considerado com a redução da inércia efetiva.

Na prática, um painel irá resistir às cargas verticais conforme a posição do painel CLT, isto é, se o painel de laje tiver 5 camadas, o painel terá 3 das 5 camadas a trabalhar a favor da resistência e as outras 2 camadas vão ter influência ao efeito do rolling shear, quanto mais espessas estas duas camadas mais influência o rolling shear terá, ver a secção 4.8.2. É papel do



projetista de estruturas definir qual a melhor configuração de camadas, tanto para lajes, como para paredes.

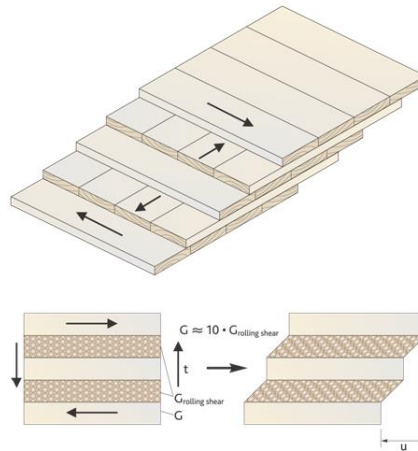


Figura 4.6 Efeito Rolling Shear (FPInnovations, 2011).

## 4.7. Fundações

As fundações são elementos estruturais que têm como missão transmitir as cargas verticais da estrutura para o solo. Por este elemento estrutural estar em contato com o solo e com o edifício, pode ser criado uma ponte de ligação da humidade do solo com o resto do edifício. Então, devemos ter algum cuidado com este facto.

As boas práticas dizem que as fundações das construções de madeira devem ser construídas em betão, através de laje ou por sistemas de vigas. E para evitar o contacto da fundação com o resto de estrutura, podemos usar diferentes soluções, como uma camada superior de betão ou uma camada de madeira com elevada durabilidade e até usar uma fita de selagem na fundação.

Em casos que a estrutura esteja acima do nível do terreno, a camada superior pode ser excluída. A ligação entre a fundação e as paredes CLT é um aspeto muito importante para a estrutura ter um bom comportamento, quando solicitada por cargas horizontais. Sendo os painéis CLT muito rígidos, as ligações têm de ser flexíveis.

As ligações para a fundação são de elevada importância para o cálculo sísmico da estrutura, devido à possibilidade de deslizamento horizontal dos painéis e ao agravamento que existe nos cantos dos painéis “*rocking movement*”.

Para contactos diretos entre a fundação e os painéis CLT, utilizam ligações hold-down perto das extremidades e aberturas e angle-brackets ao longo dos painéis CLT. Em caso da existência

de uma camada de madeira, utiliza-se na mesma as ligações hold-down, mas pode ser necessário utilizar mais placas metálicas e angle-brackets para a ligação entre os painéis CLT e a estrutura de fundação.

#### 4.7.1. Ligações

Existem vários tipos de soluções para vários tipos de ligações. Uma das ligações mais usadas é o hold-down que evita a elevação da estrutura. Os hold-downs estão ligados às paredes do painel de CTL através da utilização de parafusos de enroscar ou pregos (com aderência melhorada), e para a fundação de betão, devemos colocar varões de aço com roscas em orifícios pré perfurados cheios de cimento ou cheios de argamassa de epóxi. Os diâmetros dos varões variam entre os 12 a 18 mm e os diâmetros dos parafusos e dos pregos variam entre 3 a 6 mm. Estes diâmetros vão depender do número de pregos e de varões utilizados.

Habitualmente faz-se combinações de ligações, usando hold-downs nas extremidades e angle-brackets ao centro ou ao longo do comprimento da parede, espaçados entre 300 mm e 500 mm ou suportes mais pequenos que sejam capazes de transmitir e distribuir cargas, ver Figura 4.7.



*Figura 4.7 – Ligações com espaçamento entre 300-500mm.*

#### 4.8. Pavimentos CLT

Os pavimentos CLT têm capacidade para resistir às ações verticais e, especialmente, às ações horizontais. Logo, devemos fazer uma análise criteriosa à estabilidade, à flexão, à compressão, ao corte e às ligações para as forças de corte (ações verticais) e para as forças de tração (ações

horizontais). Desta forma, os estados limite devem ser cumpridos (estados limite último, estados limite de utilização, estados limite de danos).

#### 4.8.1. Flexão

A resistência à flexão é verificada através da seguinte expressão, em que todos os elementos CLT carregados ortogonalmente ao plano têm de verificar a seguinte condição. O valor de cálculo das tensões normais máximas de flexão,  $\sigma_{max,d}$ , sobre a extremidade tem de ser inferior ou igual ao valor de cálculo das tensões resistentes à flexão,  $\sigma_{m,CLT,d}$ .

$$\frac{\sigma_{max,d}}{f_{m,CLT,d}} \leq 1 \quad (4.15)$$

Para calcular as tensões máximas,  $\sigma_{max,d}$ , temos de ter em conta a orientação das camadas, os materiais de cálculo nas tensões,  $E$ , e o valor da rigidez de flexão,  $EI_{eff}$ , ver secção 4.3.

$$\sigma_{(z)} = \frac{M}{EI_{eff}} \times z \times E(z) \quad (4.16)$$

Se os módulos de elasticidade,  $E$ , das camadas forem todas iguais, podemos simplificar a equação (4.4.16):

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{W_{eff}} \quad (4.17)$$

O módulo da secção efetiva,  $W_{eff}$ , pode ser calculado da seguinte forma (de acordo com a ETA-06/0138):

$$W_{eff} = \frac{J_{eff}}{\frac{h}{2}} \quad (4.18)$$

Onde  $h$  é a espessura média do painel e o momento efetivo de inércia é:

$$J_{eff} = \sum (J_i) + \sum (\gamma_i \times A_i \times a_i^2) \quad (4.19)$$

Os elementos CLT têm dificuldades em transferir tensões normais entre as camadas cruzadas. É possível dizer-se que o cálculo das tensões de flexão em camadas longitudinais aumenta e as

tensões de flexão transversal têm valor igual a 0, pelo que o painel CLT permanece sempre do lado da segurança.

Com estas referências, a distribuição das tensões de flexão de uma secção transversal do elemento CLT para um carregamento para fora do plano pode ser calculado de acordo com a teoria de Timoshenko para o cálculo das propriedades de flexão, a qual assume  $E_0 = E_{0,l,mean}$  e supõe que  $E_{90,lay} = 0$ , fazendo com que as tensões de rolling shear sejam constantes, já que as tensões de flexão tem como valor 0, ver a Figura 4.8.

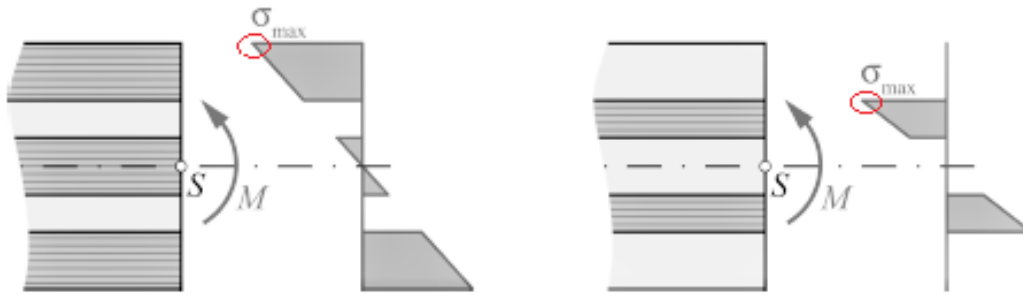


Figura 4.8 – A distribuição das tensões normais de uma secção transversal do elemento CLT para um carregamento de flexão ortogonal ao plano assumindo  $E_{90,lay} = 0$

#### 4.8.2. Corte (ações ortogonais ao plano)

A resistência ao corte é verificada através da cláusula da seguinte expressão, em que todos os elementos CLT carregados para fora do plano têm de verificar a seguinte condição. O valor de cálculo das tensões máximas de corte,  $\sigma_d$ , sobre a secção transversal tem de ser inferior ou igual ao valor de cálculo das tensões resistentes ao corte,  $f_{v,d}$ .

$$\sigma_d \leq f_{v,d} \quad (4.20)$$

As secções transversais destes painéis devem ser avaliadas considerando que a deformação por esforço transversal ocorre nas lamelas transversais ao plano de flexão, Figura 4.8. Tal ocorre devido à elevada estabilidade dimensional, provocada pela colagem ortogonal.

A distribuição dos esforços de corte nas camadas transversais e longitudinais sobre a secção transversal de elementos CLT carregados para fora do plano pode ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\sigma_{(z)} = \frac{V \times \int_{A_0} E(z) \times z \times dA}{K_{CLT} \times W(Z_0)} \quad (4.21)$$

Se os módulos de elasticidade,  $E$ , das camadas forem todas iguais, podemos simplificar a equação 4.21, como é demonstrado nas seguintes equações:

Para tensões de corte longitudinais, ver Figura 4.9.

$$\sigma_d = \frac{V \times S_{eff}}{J_{eff} \times b} \quad (4.22)$$

Para tensões de corte transversais, ver Figura 4.10.

$$\sigma_d = \frac{V \times S_i}{J_{eff} \times b} \quad (4.23)$$

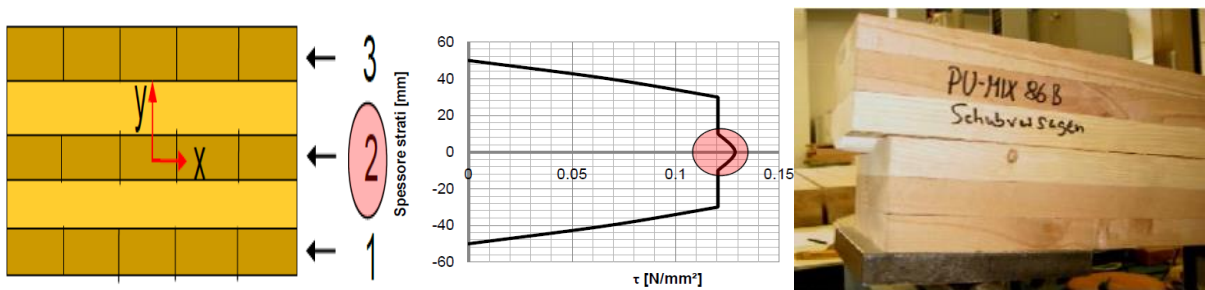


Figura 4.9 – Painel de 3 camadas (esquerda), tensões de corte na camada longitudinal (centro) e rotura por corte na camada longitudinal (direita).

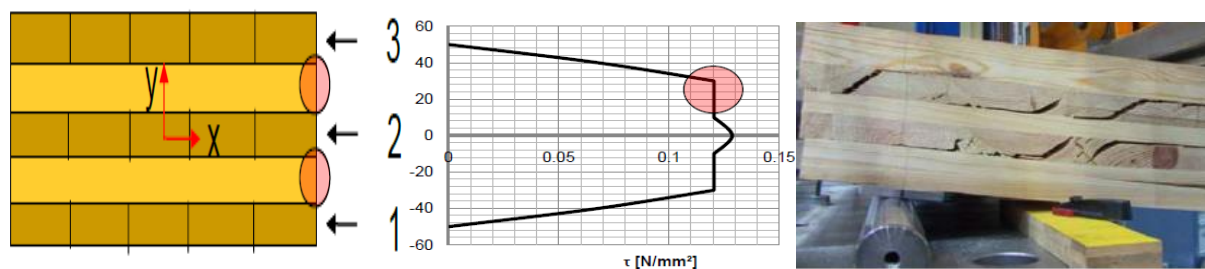


Figura 4.10 – Painel de 3 camadas (esquerda), tensões de corte na camada transversal (centro) e rotura por corte na camada transversal (direita).

Sendo  $E_{90, lay} = 0$ , as tensões de rolling shear são constantes em vez de serem parabólicas nas camadas cruzadas e os esforços de corte são sempre máximos no centro de gravidade do elemento, independentemente de as camadas superiores serem longitudinais ou transversais, ver Figura 4.11. No entanto, devido à estrutura ser ortogonal, as seguintes equações têm de ser satisfeitas:

- Verificação ao corte normal:

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x,d}}{f_{v,d}} \leq 1 \quad (4.24)$$

- Verificação ao rolling shear:

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x,d}}{f_{r,d}} \leq 1 \quad (4.25)$$



Figura 4.11 – Distribuição de tensão de corte sobre a secção transversal de um elemento CLT carregado para fora do plano, assumindo  $E_{90, lay} = 0$ : camadas longitudinais como camadas superiores (esquerda); Camadas transversais como camadas superiores (direita).

A Figura 4.12 esquematiza os diagramas de tensões atuantes na secção transversal de um painel CLT. Ao centro estão representadas as tensões normais, onde é notória a ausência da rigidez de flexão nos estratos transversais; já à direita consta a representação das tensões de corte, as tensões de corte com componentes perpendiculares ao fio da madeira e as tensões de corte “normais” com componentes perpendiculares e paralelas ao fio da madeira.

A deformação provocada pelo esforço de corte do rolling shear nos estratos ortogonais à direção principal de flexão, que corresponde a um carregamento relativo entre os estratos longitudinais, leva a uma perda de rigidez de flexão, dependendo do número de estratos, da espessura do painel e da relação da largura e da espessura dos estratos de madeira  $w/t_l$ .



Figura 4.12 – Diagrama de tensões normais e de corte na secção transversal.

### 4.8.3. Compressão perpendicular ao fio

A resistência à compressão perpendicular ao fio é verificada através da cláusula 6.1.5 do EC5, em que todos os elementos CLT carregados para fora do plano têm de verificar a seguinte

condição. O valor de cálculo das tensões de corte sobre a secção transversal tem de ser inferior ou igual ao valor de cálculo das tensões resistentes à compressão.

$$\sigma_{c,90,d} \leq K_{c,90} \times f_{c,90,d} \quad (4.26)$$

O valor de cálculo da resistência à compressão perpendicular ao fio do elemento CLT para um carregamento axial para fora do plano pode ser calculado tendo em conta um fator de configuração do carregamento,  $K_{C,90}$ , que toma o valor de 1.0, exceto nos casos retratados no Eurocódigo. Este coeficiente tem influência nas quantidades das camadas, na configuração de carga, na divisão e na transmissão da carga, bem como no local do contacto da carga. É notória a importância que este fator tem, merecendo já uma nova regulamentação.

Existem dois fenómenos importantes associados a esta verificação da capacidade resistente da compressão perpendicular ao fio nos pavimentos. São eles: o esmagamento nos apoios e o punçoamento.

#### ▪ **Esmagamento nos apoios**

As estruturas de madeira, como qualquer outro tipo de estruturas, devem verificar um possível esmagamento nos apoios, devido a um aumento de esforços da compressão perpendicular ao fio. Este tipo de esforço dá-se principalmente nas zonas de apoio das vigas, onde se concentra grande parte da carga numa pequena área, que tem de ser capaz de transmitir a reação sem sofrer deformações importantes ou rotura.

O esmagamento nos apoios é satisfeito quando a condição da equação 4.26 é verificada.

#### ▪ **Punçoamento**

As estruturas de madeira, cada vez mais, usufruem de uma arquitetura desafiadora e moderna, que exige soluções para as cargas das lajes CLT, com vista a transmitir os valores de esforços de corte elevados para pequenas zonas e, assim, não ocorrer a rotura da laje por punçoamento. Este tipo de “perfuração” das lajes pelos pilares, Figura 4.13, é de elevada importância, sendo, por isso, igualmente relevante a verificação do punçoamento em painéis CLT.

A verificação do punçoamento é satisfeita quando a condição da equação 4.26 é verificada:

em que:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \quad (4.27)$$

A área de contacto efetiva perpendicular ao fio,  $A_{ef}$ , é a área do controlo de linha do perímetro, que é determinado tendo em conta um comprimento efetivo paralelo ao fio,  $l_{ef}$ , identificado nas cláusulas 6.1.5(3) à 6.1.5(6), do EC5.

Estas cláusulas do EC5, assumem uma carga ao longo de um ângulo  $\alpha=18.4^\circ$  (1:3), Figura 4.14, este ângulo depende, se estamos perante apoios simples ou apoios contínuos,.

Como já foi referido, a EC5 não tem em conta os estudos de painéis CLT. Todavia, os painéis CLT apresentam um bom comportamento na distribuição dos esforços ao longo do painel devido à existência das camadas perpendiculares em comparação com outros tipos de madeira. A última versão do EC5 , (2009-07-01),  $A_{ef}$ , calcula a área do controlo de linha do perímetro, com incremento de 30 mm para cada aresta, como *Wallner-Novak (2013)*, assume um valor de 30 mm para cada lado da zona de contacto, Figura 4.16. Sendo a versão que está em vigor é do ano 2005.

Existem estudos de lajes sem e com reforço para o punçoamento em painéis CLT. Mestek (2011) assume uma carga ao longo de um ângulo  $\alpha=35^\circ$ (uma média das distribuições das camadas  $15^\circ$  e  $45^\circ$ ), ver a Figura 4.15. Tal faz com que o EC5 e *Wallner-Novak* seja muito conservadores. Os painéis de CLT ao possuírem camadas (layers) ortogonais favorecem a distribuição de esforços que nem o betão, nem o aço conseguem.

O valor característico resistência à compressão na direção perpendicular ao fio,  $f_{c,90,k}$ :

*Tabela 4.4 – Valor característico da resistência à compressão na direcção perpendicular ao fio,  $f_{c,90,k}$ , (Bogensperger & Augustin, 2011).*

	$f_{c,90,k}$	%	observação
pesquisas	2.25	100	-
EN 1194:1999	2.7	120	para GL24h
EN 14080:2015	2.5	111	para todas as classes de resistência GLT





Figura 4.13 – Lajes CLT e pilares

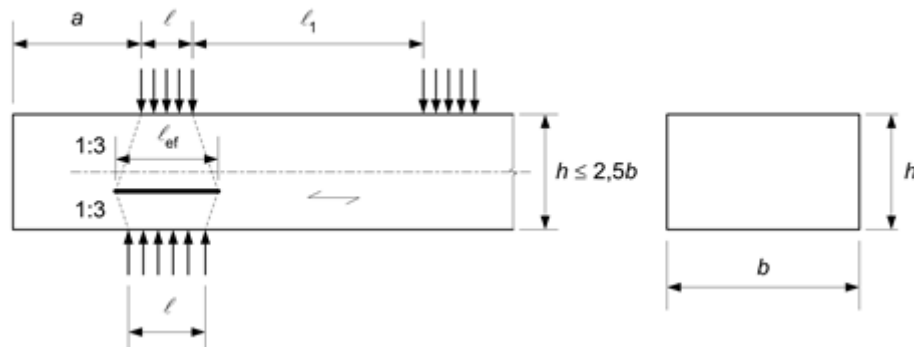


Figura 4.14 – Determinação do comprimento de contacto efetivo, figura 6.3 c do EC5.

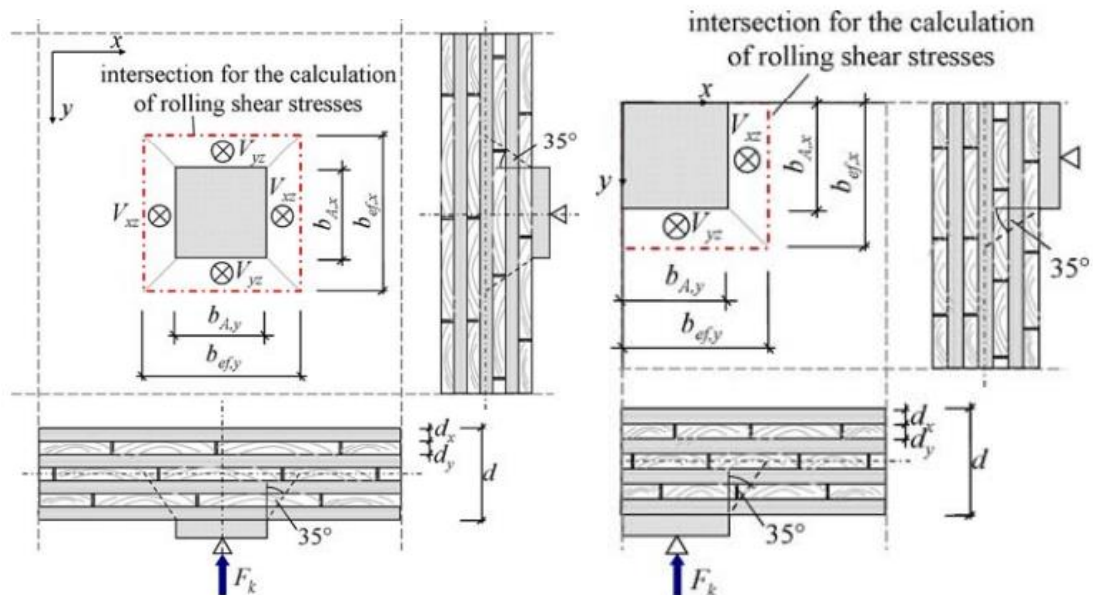


Figura 4.15 – Determinação das linhas dos perímetros de controlo com  $\alpha=35^\circ$ , carga ao centro (esquerda) e carga no canto (direita), Mestek (2011).

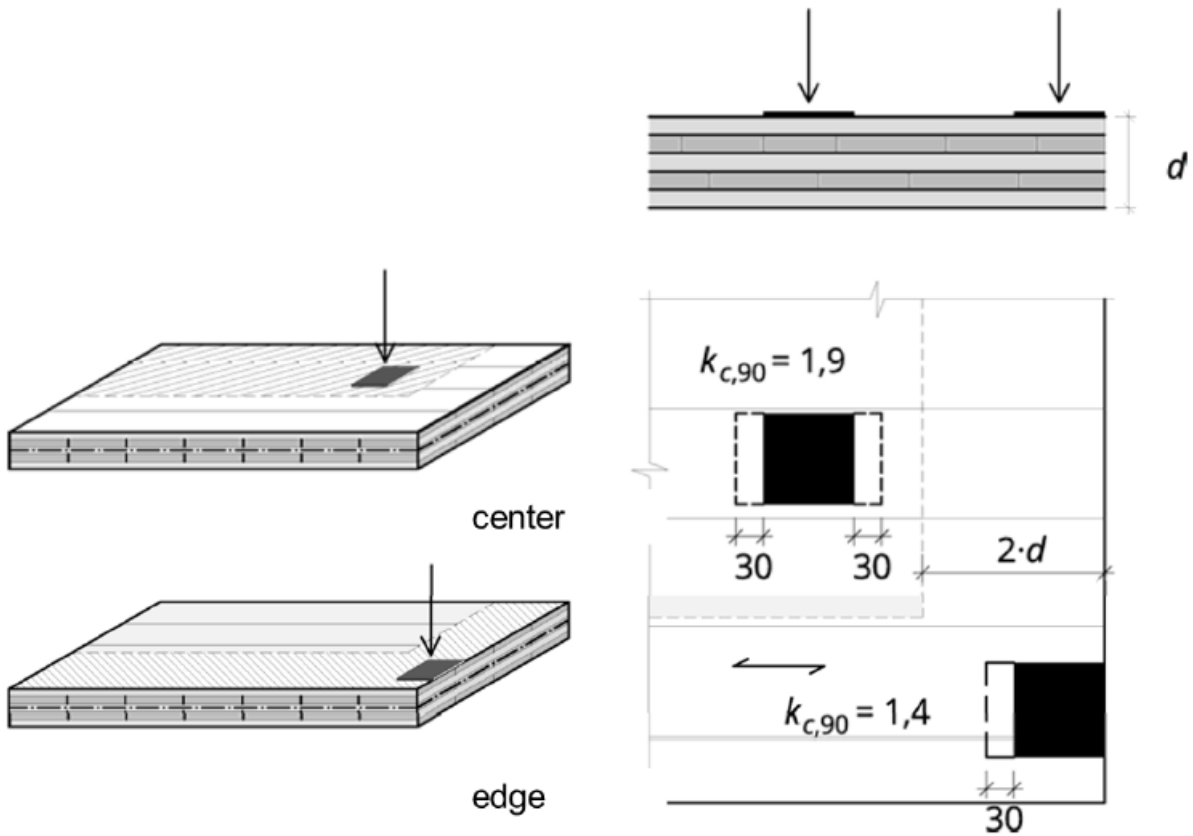


Figura 4.16 – Determinação das linhas dos perímetros de controlo carga ao centro e carga no canto, aumentando 30 mm, (Wallner-Novak, 2013).

Alguns valores obtidos pelos respetivos autores e por diferentes cargas, são apresentados nas Figura 4.17 e Figura 4.18

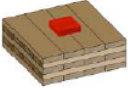



load situation		$k_{c,90,CLT}$
	central	1.8
	boundary, parallel to fibre direction of surface layer	1.5
	boundary, perpendicular to fibre direction of surface layer	1.5
	edge	1.3

Figura 4.17 – Valores de  $k_{c,90,CLT}$  para painéis sob uma carga linear com um valor de resistência característica para compressão perpendicular ao plano,  $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$ , (Harris et al., 2014).

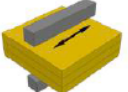
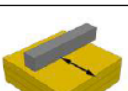
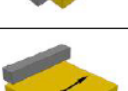
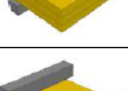
load situation		$k_{c,90,CLT}$
	central parallel to main direction	1.3
	central, perpendicular to fibre direction of surface layer	1.8
	boundary, parallel to fibre direction of surface layer	1.0
	boundary, perpendicular to fibre direction of surface layer	1.5

Figura 4.18 – Valores de  $k_{c,90,CLT}$  para painéis sob uma carga linear com um valor de resistência característica para compressão perpendicular ao plano,  $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$ , (Harris et al., 2014).

É de referir que o programa TimberTech usa o método *Wallner-Novak* para determinar a área de contacto efetivo paralelo ao fio. O comprimento efetivo,  $l_{ef}$ , é igual ao comprimento real,  $l$ , aumentando 30 mm para cada lado da zona de contacto, mas nunca mais de  $l$  ou  $l/2$ , ver a Figura 6.2 do EC5. O valor de  $K_{c,90}$  toma valor de 1.0, menos quando se aplicam para membros em

suportes contínuos, desde que  $l_1 \geq 2h$  (ver a Figura 6.2 do EC5), os valores são os seguintes: 1,25 para madeira maciça; e 1,5 para madeiras lameladas coladas.

#### 4.8.4. Ligações

As ligações entre os painéis horizontais são feitas através das seguintes figuras.

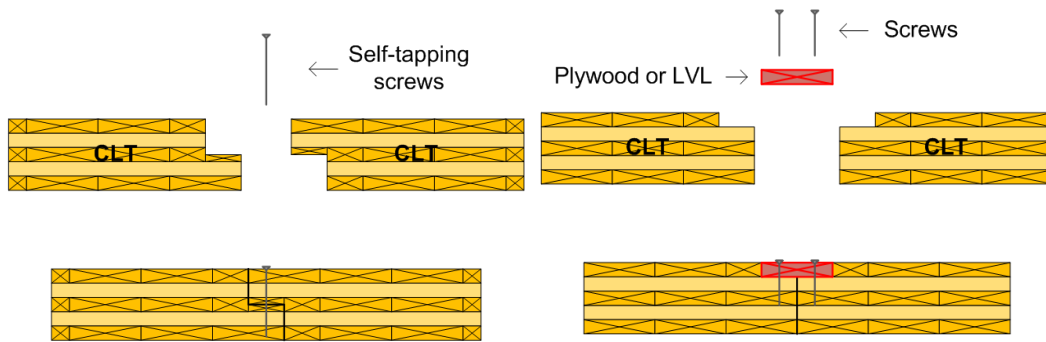


Figura 4.19 – Half-lapped (esquerda) e Single surface spline (direita), (FPInnovations, 2011).

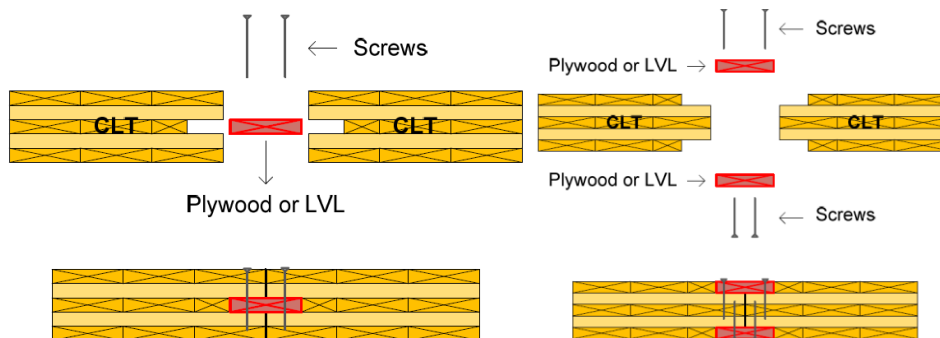


Figura 4.20 – Single Internal spline (esquerda) e Double surface spline (direita).

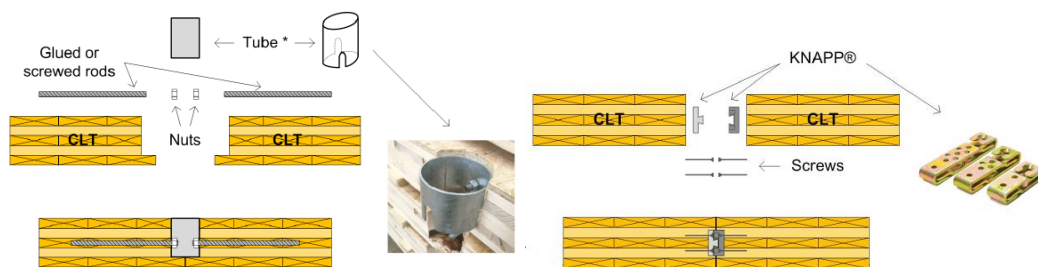


Figura 4.21 – Tube connection system (esquerda) e Hook type of connection system (direita).



Figura 4.22 – Double internal spline.

As ligações dos painéis das paredes com os painéis dos pavimentos devem ser consideradas semelhantes às ligações utilizadas para as fundações, utilizando um sistema de ligação que impede o deslizamento e/ou o levantamento dos painéis de parede. Angle-brackets com parafusos ou pregos podem ser utilizados para prevenir o deslizamento, enquanto hold-downs são considerados para evitar o levantamento. No entanto, no caso dos hold-downs, estes são usados em pares (um no topo do painel do piso e outro na base do painel do piso) ligados por uma amarração de parafusos ou parafusos roscados.

Existem a solução de usar chapas metálicas.

#### 4.8.5. Cálculo de estados limite de serviço

Para elementos CLT carregados para fora do plano é importante verificar as deformações. Como já foi referido, devido às camadas transversais flexíveis, torna-se essencial incluir também deformações causadas por corte, através da seguinte equação:

$$w = \frac{1}{K_{CLT}} \times \int (M \times \bar{M}) dx + \frac{1}{S_{CLT}} \times \int (V \times \bar{V}) dx \quad (4.28)$$

A deformação máxima, de um único vão sob carga uniformemente distribuída, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$w\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times K_{CLT}} + \frac{q \times l^2}{8 \times S_{CLT}} \quad (4.29)$$

Os valores de rigidez,  $K_{CLT}$  e  $S_{CLT}$ , podem ser calculados de acordo com a equação 4.3 e equação 4.9.

Assim como as deformações instantâneas no tempo,  $t = 0$ , as deformações finais e as deformações finais net,  $t = \infty$ , devem ser verificadas, ver secção 3.1.6. As deformações finais são calculadas através da equação 4.29 e as deformações finais net levam em consideração os efeitos de longo prazo, causados pela fluência. Devido às camadas cruzadas e, conseqüentemente, ao rolling shear, em CLT, o fator de deformação,  $k_{def}$ , Tabela 2.4, é maior do que para madeira maciça ou madeira laminada colada (GLT).

Além do cálculo da deformação, devemos calcular a vibração para aos estados limite de serviço. No âmbito de um projecto de investigação, no *Centre of Competense holz.bau bau forschungs Gmbh*, foram analisados e comparados os seguintes métodos: o método de verificação de vibrações de acordo com o Eurocódigo 5; as sugestões de Hamm / Richter e uma versão modificada do mesmo. Os resultados são diferentes. Isto porque os valores limites são baseados na opinião altamente subjetiva da pessoa que conduz o teste e a quantificação da influência das condições de apoio (por exemplo, rótulas, semi-rígidos, fixos, lajes suportadas por uma viga, etc). Atualmente, tais investigações estão em curso no *Centre of Competense holz.bau forschungs Gmbh*.

Todos estes métodos verificam a frequência natural, os critérios de rigidez, a aceleração e a velocidade de vibração. Este último importante para pisos leves, que é o caso de CLT.

As frequências naturais de uma viga simplesmente apoiada são calculadas pela seguinte equação:

$$f_{m,beam} = \frac{k_m}{2\pi \times l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_{l,ef}}{\bar{m}}} \quad (4.30)$$

$(EI)_{l,ef}$  Rigidez efetiva à flexão na direção longitudinal

O fator,  $k_m$ , assume diferentes condições de apoio e modos próprios em consideração. Os valores do primeiro modo próprio são os valores apresentados na seguinte tabela, os restantes podem ver em (Harris et al., 2014).

Tabela 4.5 – Valores de  $k_m$ , para diferentes condições de apoio (Harris et al., 2014).

Condições de suporte	Km
Extremidades articuladas	$\pi^2=9.87$
Extremidades fixadas	22.4
Fixo/ livre (consola)	3.52

Devemos considerar um fator,  $k_{f_2}$ , se tivermos perante vários vãos:

$$k_{f_2} = -5.3828 \times \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right)^5 - 19.7305 \times \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right)^4 + 10.3840 \times \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right)^3 - 1.9017 \times \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right)^2 - 0.5879 \times \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right) + 1.5537 \quad (4.31)$$

Dependendo da razão  $l_{min}/l_{max}$ , este fator está entre 1,0 e 1,5.

Tabela 4.6 – Frequências críticas,  $f_{crit}$ , para as exigências altas e exigências normais.

Método aplicado	Exigências altas	Exigências normais
EC5	8 Hz	
Hamm / Richter	8 Hz	6 Hz
Hamm / Richter modificado	8 Hz	6 Hz

Para o critério de rigidez, deve calcular-se a deformação vertical instantânea máxima causada por uma força estática concentrada vertical,  $F = 1 \text{ kN}$ , em qualquer ponto do piso, tendo em conta a distribuição da carga, e compará-la com o valor limite,  $w_{crit}$ .

Novamente, a flexibilidade de corte e de flexão devem ser tidas em conta ao calcular a deformação. Para uma viga simplesmente apoiada, a deformação máxima,  $w(F, b_F)$ , pode ser calculada através da equação 4.32 e a distribuição da carga será considerada pela largura efetiva, de acordo com a equação 4.33.

$$w(F, b_F) = \frac{F \times l^3}{48 \times (EI)_{l,ef} \times b_F} \times \sqrt{\frac{F \times l}{4 \times (GA)_{ef} \times b_F}} \quad (4.32)$$

$$b_F = \frac{l}{1.1} \times \sqrt{\frac{(EI)_{b,ef}}{(EI)_{l,ef}}} \quad (4.33)$$

Tabela 4.7 – Valores limite para o critério de rigidez,  $w_{crit}$ , 1kN, para exigências altas e exigências normais.

Método aplicado	Exigências altas	Exigências normais
EC5*	1 mm	2 mm
Hamm / Richter	0.25 mm	0.5 mm
Hamm / Richter modificado		

\* EC5 permite valores limites variáveis para o critério de rigidez, mas é recomendável manter dentro destes valores limite.

A aceleração da vibração é necessária ser verificada quando a frequência natural,  $f_1$ , está entre a frequência crítica,  $f_{crit}$ , e a frequência mínima  $f_{min} = 4,5$  Hz. Esta aceleração deve ser menor do que uma aceleração crítica,  $a_{crit}$ , ver Tabela 4.10.

A aceleração de vibração é calculada através da seguinte equação:

$$\alpha = \frac{0.4 \times \left( \frac{F_0 \times \alpha_{i,f_1}}{M_{gen}} \right)}{\sqrt{\left( \left( \frac{f_1}{f_f} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left( 2 \times \xi \times \frac{f_1}{f_f} \right)^2}} \quad (4.34)$$

$$M_{gen} = M \times \frac{1}{2} \times b_F, \text{ com } b_F \leq \frac{b}{2} \quad (4.35)$$

$M_{gen}$  massa efetiva da laje (generalizada)

$f_f$  frequência de excitação

$f_1$  frequência natural

$\alpha_i$ , coeficiente de Fourier para a oscilação parcial harmónica predominante

$F_0 = 700$  N

$\zeta$  amortecimento modal



Tabela 4.8 Coeficientes de Fourier e as frequências de excitação.

Frequências naturais $f_1$ [HZ]	$\alpha_{i,f1}$	$f_f$
$4.5 \leq f_1 \leq 5.1$	0.20	$f_1$
$5.1 \leq f_1 \leq 6.9$	0.06	$f_1$
$6.9 \leq f_1 \leq 8.0$	0.06	6.9

Tabela 4.9 – Valores recomendados para o rácio de amortecimento,  $\zeta$ , dependendo do tipo de construção do piso

Tipo de construção do pavimento	Rácio de amortecimento $\xi$	
	Suporte por 2 lados	Suportado por 4 lados
Construção com pisos leves ou sem pisos	2.0 %	2.5 %
Construção de pisos pesados	2.5 %	3.5 %

Tabela 4.10 – Valores críticos de aceleração de vibração,  $a_{crit}$ , para exigências altas e normais

EC5	Exigências altas	Exigências normais
Hamm / Richter	0.005 m/s <sup>2</sup>	0.10 m/s <sup>2</sup>
Hamm / Richter modificado		

## 4.9. Paredes CLT

Existem várias tipologias de paredes CLT, desde aberturas em paredes ou paredes em consola. As paredes CLT têm capacidade para resistir às ações verticais e especialmente às ações horizontais. Logo, devemos fazer uma análise criteriosa tal como fazemos para os pavimentos CLT.

### 4.9.1. Compressão

A resistência à compressão para os membros carregados concêntricos e axialmente no plano tem de verificar a seguinte condição. A multiplicação da área efetiva da secção transversal,

$A_{net,ef}$ , paralelo à direção da força e o valor de cálculo da resistência à compressão paralela ao fio,  $f_{c,0,CLT,net,d}$ , tem de ser inferior ou igual ao valor de cálculo da força normal,  $N_d$ .

$$\frac{N_d}{A_{net,ef} \times f_{c,0,CLT,net,d}} \leq 1 \quad (4.36)$$

Para elementos delgados carregados em compressão, a possibilidade de uma rotura, devido à encurvadura lateral, tem de ser considerada. Para este caso, existem dois métodos de cálculo que permitem avaliar os elementos delgados:

- A verificação de acordo com o método da viga equivalente;
- A verificação de acordo com a teoria de segunda ordem.

Para a verificação do primeiro método, a resistência do painel de compressão é reduzida a um fator de instabilidade, como já foi referido na secção 3.1.3, que deve validar a seguinte expressão:

$$\frac{N_d}{K_c \times A_{net,ef} \times f_{c,0,CLT,net,d}} \leq 1 \quad (4.37)$$

A força de compressão é reduzida pelo coeficiente que tem em conta a instabilidade lateral,  $K_c < 1.0$ , o qual é calculado de acordo com a cláusula 6.3.2.(3) do EC5. Este coeficiente considera a instabilidade em função da esbelteza relativamente à secção transversal e à qualidade da produção,  $\beta_c$ . Já a esbelteza relativa depende da carga de encurvadura elástica ideal,  $n_{cr}$ , e é calculada pela seguinte fórmula:

$$n_{cr} = \frac{K_{CTL,05} \times \pi^2}{l_k^2 \times \left( 1 + \frac{K_{CTL,05} \times \pi^2}{S_{CTL,05} \times l_k^2} \right)} \quad (4.38)$$

Esta equação considera também a flexibilidade de corte, relevante para os painéis CTL. O percentil de 5% da rigidez de flexão,  $K_{CTL,05}$ , e da rigidez de corte,  $S_{CTL,05}$ , é calculado por meio de  $E_{0,lay,05}$ ,  $G_{lay,05}$  e  $Gr_{lay,05}$ , percentil de 5% do módulo de elasticidade no sentido da fibra e do módulo de distorsão de corte e rolling shear, respetivamente.

Por fim, temos de verificar a teoria de segunda ordem, que tem em conta o equilíbrio do sistema da deformação, os efeitos da deformação induzida em forças e os momentos internos. Existe uma combinação de forças normais,  $N_d$ , que interage com o momento de flexão,  $M_d$ . Neste caso, tem de ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\left( \frac{N_d}{A_{net,ef} \times f_{c,0,CLT,net,d}} \right)^2 + \frac{M_d^2}{W_{ef} \times f_{m,CLT,d}} \leq 1 \quad (4.39)$$

#### 4.9.2. Estabilidade das paredes CLT

As paredes solicitadas no plano têm os esforços que são absorvidos pelos estratos verticais, transmitindo tensões paralelas ao fio da madeira. Com esforços deste tipo, o dimensionamento é condicionado pela verificação à instabilidade por encurvadura, devido ao facto de as paredes CLT serem condicionados pelos esforços ao corte e pelos esforços à flexão, principalmente, por esforços de corte.

A verificação da estabilidade de um painel CLT da parede pode ser realizada através da seguinte equação:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1.0 \quad (4.40)$$

As tensões de compressão de cálculo podem ser calculadas através da seguinte equação, que é a razão entre a totalidade da carga vertical,  $N_{vert}$ , e a área da secção transversal eficaz da parede,  $A_{net}$ , ver Figura 4.23.

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{vert}}{A_{net}} \quad (4.41)$$

As tensões de flexão de cálculo podem ser calculadas através da seguinte equação, que é a razão entre o momento de flexão,  $M$ , e o módulo da secção efetiva,  $W_{eff}$ , ver equação 4.4.45:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{W_{eff}} \quad (4.42)$$

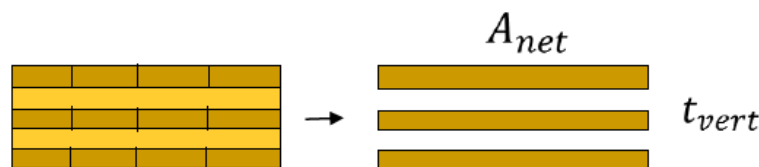


Figura 4.23 – Ilustração de uma secção transversal de uma parede comprimida.

É de referir que as cargas concentradas apresentam distribuições da carga como figura abaixo, é uma análise que está sendo investigada (COST, 2016), mas que mais uma vez deparamos que tem de haver uma enorme investigação para podermos explorar ao máximo as vantagens destes painéis.

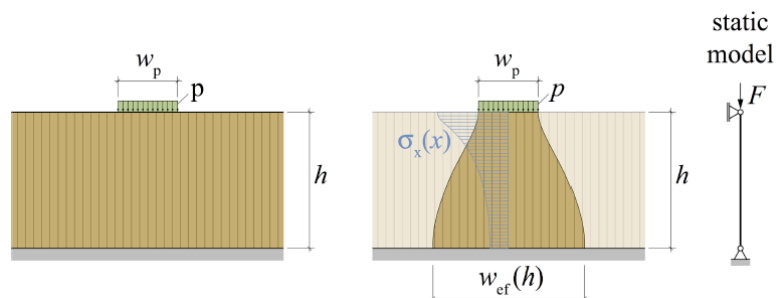


Figura 4.24 – Carga concentrada ao longo do comprimento,  $w_p$ , num local,  $p$ , da parede CLT, a carga efetiva  $w_{ef}$ , à distribuição das tensões,  $\sigma_x$ , ao longo da altura do diafragma,  $h$ , (COST, 2016).

As cargas concentradas no plano sobre diafragmas CLT, tem uma distribuição das tensões igual à Figura 4.24,. Como podemos verificar existe um aumento da largura efetiva,  $w_{ef}$ , que faz com que as tensões baixam radicalmente ao longo da parede.

A largura efetiva é condicionada pelas propriedades do material, da secção transversal e das condições de apoio.

Em painéis com aberturas, o lintel formado é analisado como uma viga, desprezando as lamelas verticais.

### 4.9.3. Flexão

Verificando a seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{max,d}}{f_{m,CLT,d}} \leq 1 \quad (4.43)$$

Se os módulos de elasticidade,  $E$ , das camadas forem todas iguais, podemos utilizar a seguinte equação para o cálculo das tensões de flexão,  $\sigma_{m,d}$ .

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{W_{eff}} \quad (4.44)$$

O módulo da secção efetiva,  $W_{eff}$ , pode ser calculado (de acordo com a ETA-06/0138):

$$W_{eff} = \frac{J_{eff}}{\frac{h}{2}} \quad (4.45)$$

$h$  espessura média do painel

O momento efetivo de inércia é:

$$J_{eff} = \sum (J_i) + \sum (\gamma_i \times A_i \times a_i^2) \quad (4.46)$$

As distribuições das tensões de flexão de uma secção transversal do elemento CLT carregado para fora do plano é igual à Figura 4.8.

#### 4.9.4. Corte (ações no plano)

A resistência ao corte quando submetido a ações no plano é verificada através da cláusula 6.1.7 do EC5 e tem de verificar a seguinte condição. O valor de cálculo das tensões ao corte sobre a secção transversal tem de ser inferior ou igual ao valor de cálculo das tensões resistentes de corte.

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (4.47)$$

A resistência ao corte para cargas no plano de elementos CLT é consideravelmente maior do que o valor correspondente para a madeira maciça ou madeira *Glulam*. Com base em ensaios no *Institute for Timber Engineering and Wood Technology, em Graz*, foi determinado um valor resistente ao corte no plano em painéis CLT entre 8-10 N/mm<sup>2</sup> e 2,5 N/mm<sup>2</sup> para a resistência à torção na interface de colagem.

Existem vários métodos para o cálculo das tensões ao corte e da rigidez ao corte, uns mais simplificados do que outros, mas todos baseados na análise de volume representativo de um elemento (RVE) e de um subelemento (RVSE) (Bogensperger, Moosbrugger, & Silly, 2010), para a verificação dos mecanismos de corte no plano, ver Figura 4.25.

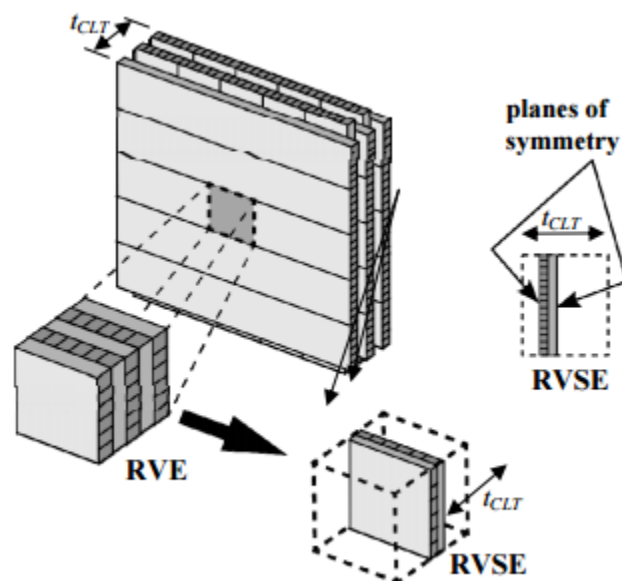


Figura 4.25 – Elemento CLT RVE e RVSE, (Bogensperger et al., 2010).

Nesta secção para o cálculo das paredes CLT, apresenta-se o modelo mecânico de painéis de madeira lamelada, modelo proposto pela instituição “*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*” na Alemanha (Bogensperger et al., 2010).

Nos painéis em que as secções coincidem com juntas não coladas entre as lamelas paralelas, as forças de corte são transferidas apenas por lamelas perpendicularmente às juntas. As tensões de corte nestas secções transversais (net) serão conseqüentemente maiores do que nas secções transversais (gross) entre as juntas não coladas.

As duas componentes das tensões de corte nas secções transversais,  $\tau_{net}$ , e  $\tau_{gross}$ , dão origem ao mecanismo I (corte), ver Figura 4.26; já para o mecanismo II (torsão), ver Figura 4.26, verificar as três componentes,  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  e  $\tau_{tor}$ , que são causadas pelas transferências de forças de corte entre camadas longitudinais e transversais e provocadas pelas tensões de corte torsionais nas áreas de cruzamento de lamelas ligadas ortogonalmente, respetivamente.

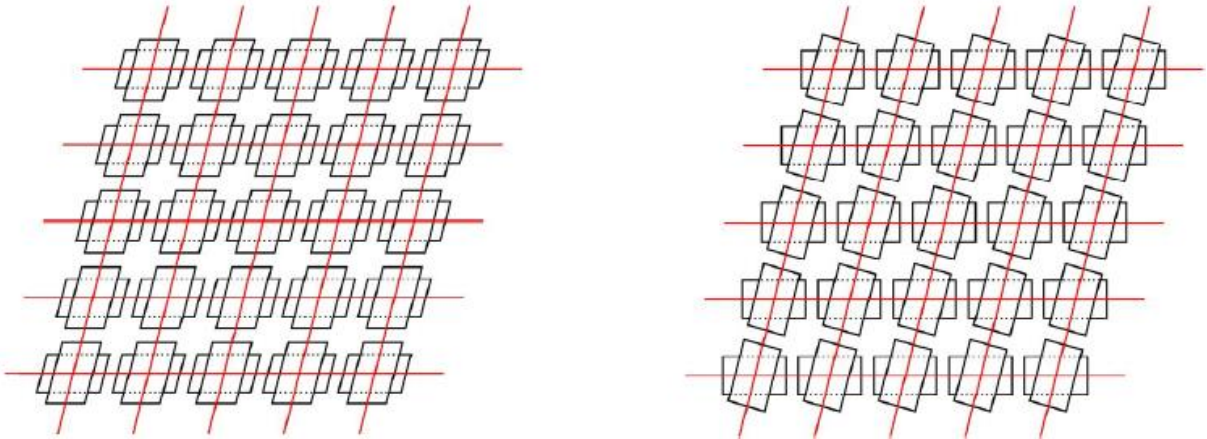


Figura 4.26 – Mecanismo I – corte (esquerda) e mecanismo II – torção (direita),  
(Bogensperger et al., 2010).

É de referir que os dois mecanismos (corte e torção) têm de ser verificados separadamente. Os esforços de corte nas lamelas e os esforços nas áreas de cruzamento levam à necessidade de verificar os três tipos de modos de rotura em paredes CLT, ver Figura 4.27.

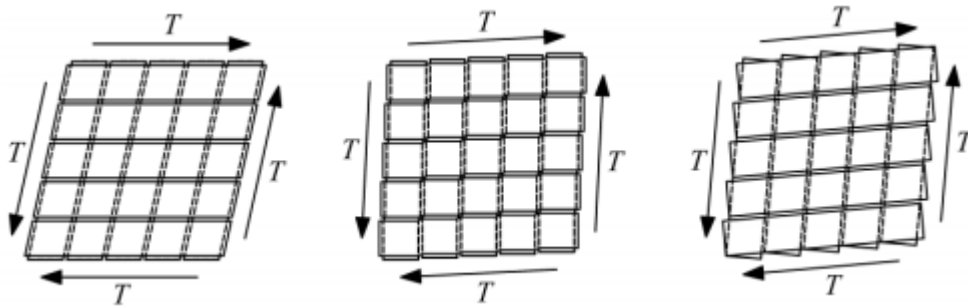


Figura 4.27 – Modos de rotura I na secção completa (esquerda), modos de rotura II na secção efectiva (meio) e modos de rotura III (direita) em painéis CLT sujeitas a forças transversais na direção do plano (da esquerda para a direita)

- **Mecanismo de corte**

### Modo de rotura I

Através da distorção das camadas formadas nas superfícies, as tensões de corte, as quais são assumidas como sendo constantes, podem levar a uma rotura no sentido das fibras das camadas (rotura por corte na secção completa).

$$\tau_{gross} = \frac{T}{h \times t_{gross}} \leq f_{v,gross} \quad (4.48)$$

O valor característico de resistência ao corte dos painéis CLT foi apresentado por Flaig & Blaß, (2012), com o valor de 3,8 N/mm<sup>2</sup>. É um valor superior aos valores característicos para madeira maciça e para a madeira lamelada colada.

Para painéis de multicamadas, os valores são mais elevados, pois as camadas do painel são mais finas, que levam a um menor número de fissuras de retração. Além disso, através do “efeito bloqueio” das camadas transversais, a ocorrência de grandes fendas é condicionada.

O valor característico da resistência ao corte,  $f_{v,k}$ , é proposto na EN 308 mas é de referir que *Blaß e Flaig* (M Flaig & Blaß, 2012) propõem um valor igual a 3,5 N/mm<sup>2</sup>.

## Modo de rotura II

Nas juntas entre as camadas não coladas umas às outras, a única possibilidade de transferência de forças de corte é apenas através das camadas perpendiculares às juntas.

As tensões de corte podem causar rotura interna (rotura de corte na secção efectiva).

$$\tau_{net} = \frac{T}{h \times t_{net}} \leq f_{v,net} \quad (4.49)$$

A verificação ao corte dos painéis CLT, para o modo de rotura II, é caracterizado pela rotura de corte na secção transversal net. Jöbstl et al. (2008) e Flaig & Blaß (2012) apresentam um valor médio e característico da resistência ao corte,  $f_{v,net}$ , 12.8 N/mm<sup>2</sup> e 10.3 N/mm<sup>2</sup>, respetivamente. Embora as tensões de corte na secção transversal,  $t_{net}$ , são significativamente maiores do que as tensões de corte na secção,  $t_{gross}$ , estas são relevantes nas estruturas em que a proporção das camadas da superfície de corte sob pressão no plano do painel em ambos os sentidos for muito baixa, uma vez que as resistências ao corte nas tensões de corte perpendiculares são maiores do que a resistência ao corte ao longo do fio.

- **Mecanismo à torsão**

## Modo de rotura III

As distorções em planos rígidos causam uma rotação mútua perpendicular nas camadas da superfície cruzada. Isto resulta nas superfícies de passagem de tensões de corte torsionais que podem levar á rotura nestas áreas de passagem.

É determinado as tensões de corte torsionais através da seguinte equação:



$$\tau_{tor} = \frac{T \times h}{\sum I_{p,KF}} \times \frac{\alpha_{KF}}{2} \quad (4.50)$$

Flaig & Blaß (2012) defendem que a resistência ao corte média de torção ronda os 3,6 N/mm<sup>2</sup>, com um valor mínimo de 2,6 N/mm<sup>2</sup>, é ainda apresentado um valor característico da resistência à torção,  $f_{v,tor,k}$ , de 2,5 N/mm<sup>2</sup>. Além das tensões de corte torsionais, deve-se adicionar as tensões de corte paralelo e perpendicular ao eixo da parede, que ocorrem nas superfícies de cruzamento, área da transferência das cargas.

$$\tau_x = \frac{T}{n \times A_{KF}} \quad (4.51)$$

$$\tau_x = \frac{h}{l} \times \frac{T}{m \times A_{KF}} \quad (4.52)$$

Ao contrário das tensões de corte de torção,  $\tau_{tor}$ , que agem localmente perpendicular ao fio, nas tensões de corte,  $\tau_x$  e  $\tau_y$ , uma das duas superfícies de contacto é sempre dirigida perpendicular ao fio. Assim, propõe-se um valor característico do rolling shear,  $f_R$ , de 1,0 N/mm<sup>2</sup>, (M Flaig & Blaß, 2012).

A verificação ao corte torsional dos painéis CLT, para o modo de rotura III, é caracterizado pela rotura de três componentes - tensões de corte torsionais, tensões de corte paralelo e tensões de corte perpendicular ao eixo dos painéis nas superfícies de cruzamento de forças. As duas componentes de tensão individuais devem ser sobrepostas. Como critério, são propostas as duas condições.

$$\frac{\tau_{tor}}{f_{v,tor}} + \frac{\tau_x}{f_R} \leq 1 \text{ e } \frac{\tau_{tor}}{f_{v,tor}} + \frac{\tau_y}{f_R} \leq 1 \quad (4.53)$$

Significados:

- $T$  forças transversais na direção do plano;
- $T_{gross}$  tensão de corte na secção gross;
- $T_{gross}$  soma das espessuras de todas as camadas do painel;
- $\tau_{net}$  tensão de corte na secção net;
- $t_{net}$  soma das espessuras das camadas transversais ou longitudinais, o valor mais pequeno;
- $\tau_{tor}$  tensão de corte torsional nas áreas de cruzamento:

- $\tau_x$  tensão de corte na direção x nas áreas de cruzamento;
- $\tau_y$  tensão de corte na direção y nas áreas de cruzamento;
- $h$  altura do painel;
- $l$  comprimento do painel;
- $a_{KF}$  maior comprimento lateral da superfície de cruzamento;
- $m$  número de lamelas dentro das camadas horizontais;
- $n$  número de lamelas dentro das camadas verticais;
- $I_{p,KF}$  momento polar de inércia de uma superfície de cruzamento;
- $\Sigma I_{p,KF}$  somatório dos momentos polares de inércia das superfícies de cruzamento;
- $A_{KF}$  área de cruzamento.

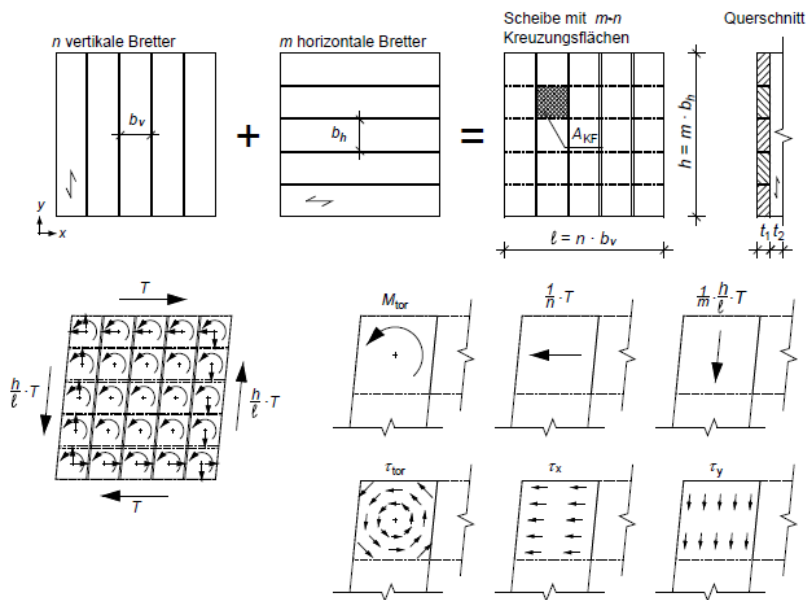
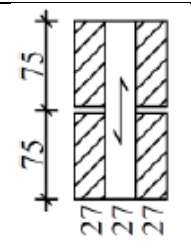
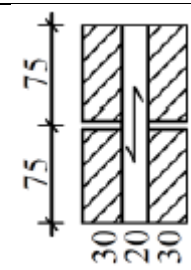


Figura 4.28 – Distribuição do esforço de corte, tensões normais de corte e tensões de torção na interface de colagem.

Tabela 4.11 – Resistência ao corte por torsão e a resistência ao rolling shear nas de cruzamento avaliadas a partir de ensaios de flexão de acordo com a CUAP 03.04 / 06

Series 27 – 27 – 27							
	$F_{v,tor}$ (MPa)	3.68	4.43	3.72	3.72	3.51	3.61
	$F_R$ (MPa)	1.58	1.90	1.59	1.59	1.50	1.55
Series 30 – 20 – 30							
	$F_{v,tor}$ (MPa)	4.64	6.49	6.05	3.66	6.26	6.33
	$F_R$ (MPa)	1.99	2.78	2.59	1.57	2.68	2.71

É de referir que, em anexo I, é descrito um método que o programa TimberTech utiliza para os cálculos ao corte no plano de um painel. É um método mais simplificado e está sempre do lado da segurança. Importa ainda mencionar que estes dois métodos (método exposto acima e o método usado pelo TimberTech) não têm em conta as diferenças de altura que um painel pode sofrer ou se as larguras das lamelas adjacentes forem diferentes, mas tanto um, como outro método estão sempre do lado da segurança.

Na secção 4.10.2 (vigas CLT), aborda-se um método que pretende eliminar, o mais possível, o erro para o cálculo das tensões ao corte no plano, tendo em conta várias vertentes que o painel pode ter, por exemplo, um painel com diferentes larguras de lamelas.

#### 4.9.5. Corte (ações ortogonais ao plano)

A resistência ao corte fora do plano das paredes deve ser tratada da mesma forma que a resistência ao corte para fora do plano para pavimentos CLT, ver secção 4.7.2.

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (4.54)$$

Para tensões de corte longitudinais, ver Figura 4.9.

$$\tau_d = \frac{V \times S_{eff}}{J_{eff} \times b} \quad (4.55)$$

Para tensões de corte transversais, ver Figura 4.10.

$$\tau_d = \frac{V \times S_i}{J_{eff} \times b} \quad (4.56)$$

Verificação ao corte normal:

$$\frac{\tau_{máx.d}}{f_{v,d}} \leq 1 \quad (4.57)$$

Verificação ao rolling shear:

$$\frac{\tau_{máx.d}}{f_{r,d}} \leq 1 \quad (4.58)$$

#### 4.9.6. Rigidez horizontal da parede

A rigidez geral das paredes CLT é calculada tendo em conta a contribuição de vários fatores:

- Painel CLT
- Ligações de corte – angle brackets
- Hold-down ou tie-down

As cargas horizontais tornam-se mais relevantes, devido ao aumento da altura da construção e ao aumento de peso.

Os painéis CLT têm uma elevada importância na manutenção da integridade da estrutura, pelo facto de ser um elemento leve e muito rígido em comparação com as ligações, de modo que a maior flexibilidade está concentrada nas ligações. São as ligações, colocadas entre os painéis, que permitem à estrutura ter ductilidade e dissipar energia, ver Figura 4.29. Esta dissipação de energia é libertada pela plastificação dos elementos de ligação de metal, que podem trabalhar em diferentes direções, isto é, tanto podem estar a trabalhar em compressão ou em tração. Assim, proporciona uma ótima resistência, rigidez, estabilidade e ductilidade da estrutura. Desta forma, apresenta um comportamento “caixa”, onde os painéis de parede são assumidos como diafragmas rígidos.

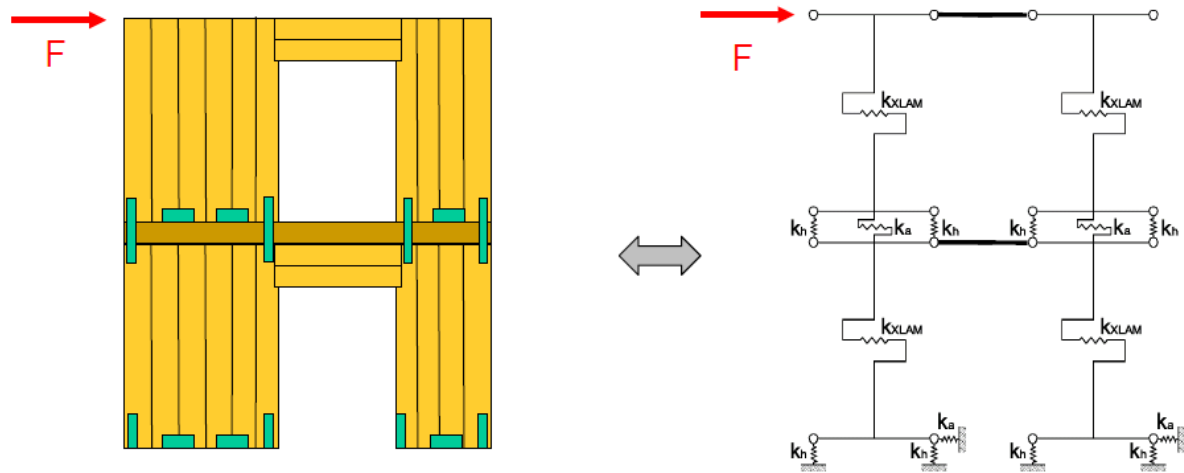


Figura 4.29 – Distribuição da força horizontal através dos painéis CLT e das ligações (angle brackets e hold-down ou tie-down), até aos apoios.

### ▪ Deformação do painel CLT

O módulo de corte efetivo dos elementos CLT pode ser calculado usando a seguinte equação:

$$G_{eff} = G_{0,mean} \times \frac{1}{1 + 6 \times \alpha_T \left(\frac{t}{a}\right)^2} \quad (4.59)$$

Com um fator de correção:

$$\alpha_T = 0.32 \times \left(\frac{t}{a}\right)^{-0.77} \quad (4.60)$$

Símbolos:

- t      Espessura média das lamelas
- a      Largura média das lamelas

### ▪ Deformação hold-down

Com referência ao balanço do corpo rígido e considerando o equilíbrio de rotação em torno do ponto O, ver a Figura 4.30, existem:

- uma contribuição devido à força horizontal,  $F$ ;
- uma contribuição estabilizadora devido à carga vertical  $N$ :

A força de tensão no hold-down pode ser calculada como:

$$\begin{cases} T = \left( \frac{F \times h}{0.9 \times L} - \frac{N}{2} \right) & \text{hold-down ativado} & F \times h > N \times \frac{0.9 \times L}{2} \\ T = 0 & \text{hold-down não ativado} & F \times h \leq N \times \frac{0.9 \times L}{2} \end{cases} \quad (4.61)$$

A primeira equação refere-se aos casos em que a parede sofre uma rotação, porque o momento provocado pela força horizontal,  $F$ , é maior do que o momento de estabilização.

A segunda equação refere-se aos casos em que a parede não sofre rotação, porque o momento de estabilização é maior do que o momento provocado pela força horizontal,  $F$ .

Através do cálculo da rigidez da ligação hold-down, pode ser calculado o deslocamento vertical,  $\Delta_v$ , e o deslocamento horizontal,  $\Delta_h$ , na parte superior da parede:

$$\Delta_v = \frac{T}{k_h} \quad (4.62)$$

$$\Delta_{u_{hold-down}} = \frac{h}{0.9 \times L} \times \Delta_v \quad (4.63)$$

Símbolos:

$k_a$  rigidez de cada ligação.

#### ▪ Deformação angle-brackets

O deslocamento rígido do corpo da parede, devido à deformação dos angle-brackets, pode ser avaliado utilizando a seguinte expressão:

$$\Delta_{u_a} = \frac{F}{k_a \times n_a} \quad (4.64)$$

Símbolos:

$k_a$  rigidez de cada ligação;

$n_a$  número de ligações.

O deslocamento total no topo da parede é dado pela soma das três contribuições, Figura 4.30:

$$u_{wall} = \Delta_{u_{CLT}} + \Delta_{u_{hd}} + \Delta_{u_a} \quad (4.65)$$

A contribuição da rigidez da parede para forças horizontais pode ser calculada por:

$$k_{wall} = \frac{F}{u_{wall}} \quad (4.66)$$

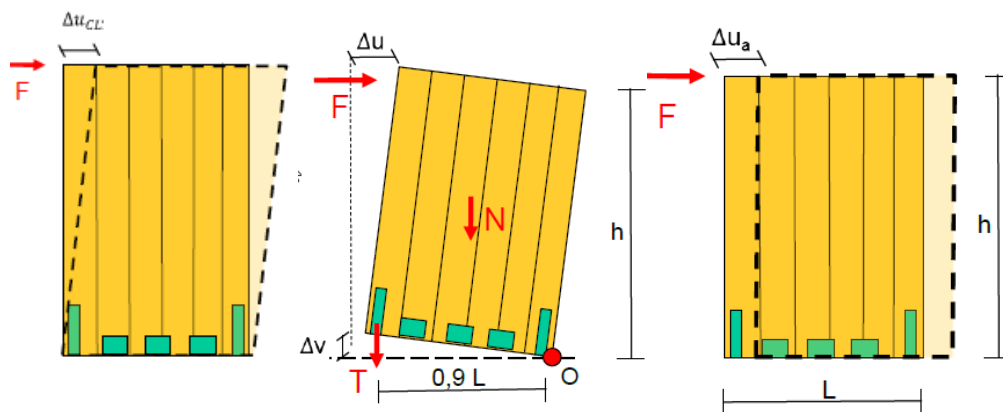


Figura 4.30 – Representação dos fatores que influenciam a resistência horizontal de uma parede perante uma força horizontal, (Tomasi, 2015).

#### 4.9.7. Ligações

As paredes devem ter alturas, pelo menos, iguais à altura entre os pisos e podem ser feitas de elementos únicos até ao comprimento máximo transportável ou pode ser composto por mais do que um painel. Cada segmento tem largura não inferior a  $0,25h$ , em que  $h$  é a altura entre os pisos, e os painéis devem ser ligados por meio de ligações verticais. As ligações horizontais entre as paredes devem ser evitadas, a menos que sejam tomadas disposições especiais para garantir a adequada contenção fora do plano.

Estas ligações verticais ou horizontais podem consistir num painel muito fino de multicamadas, e por ligações de parafusos, ver Figura 4.31. Deve-se considerar o uso de parafusos auto-roscantes (diâmetros que variam entre 6-10 mm) ou pregos (diâmetro de cerca de 3 mm), com espaçamento dependendo do nível de carga.

A ligação entre os painéis ortogonais é feita por meio de parafusos auto-perfurantes, Figura 4.31. Neste caso, é necessário ter em conta que o parafuso não deve ser inserido em camadas com a direção das fibras paralela ao próprio parafuso, mas deve ser inserido em camadas com a direção do fio perpendicular ao parafuso, de modo a maximizar a capacidade resistente do parafuso. É por esta razão que no local opta-se por inserir o parafuso com uma inclinação, assegurando que o parafuso passa por camadas com direção adequada à fibra.

A utilização de painéis de menor comprimento permite um maior número de ligações verticais, que, por sua vez, conduzem a um maior nível de ductilidade e de dissipação de energia. Em qualquer caso, a hierarquia de força deve ser respeitada (rotura das ligações antes da rotura dos painéis).

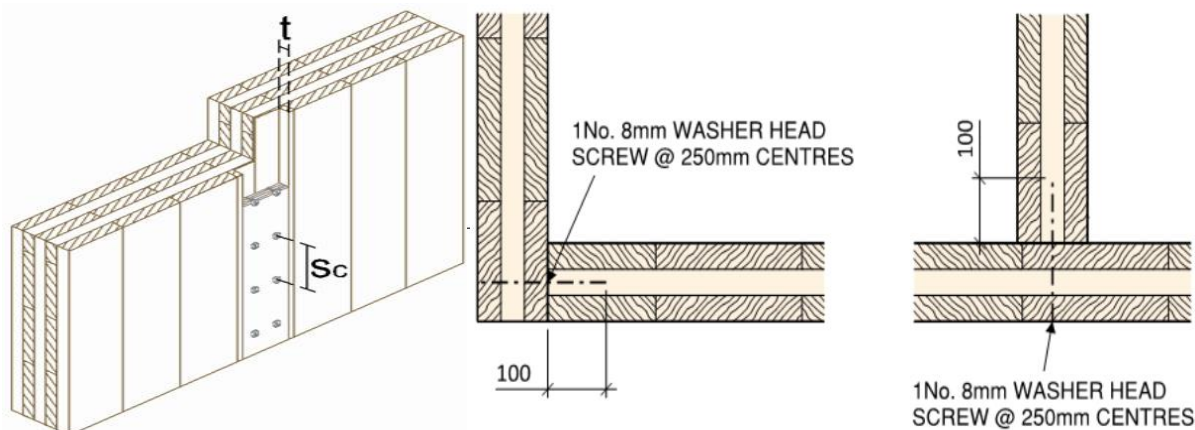


Figura 4.31 – Ligações entre paredes butt-strap (esquerda) e parafusos washer head (meio e direita).

#### 4.10. Vigas CLT

As vigas feitas de madeira laminada cruzada oferecem várias vantagens quando comparadas com as vigas de madeira maciça e com as vigas de madeira lamelada colada, devido à sua disposição típica de camadas ligadas ortogonalmente. Um grande benefício das vigas CLT é a alta resistência à tração perpendicular ao eixo da viga, que tornam os elementos CLT menos suscetíveis a fissuras.

Como já se mencionou, as paredes CLT têm uma resistência elevada às ações verticais. A Figura 4.32 mostra os locais preocupantes para alguns tipos de parede, com uma carga pontual, no local mais desfavorável para o tipo de parede, que podemos analisar em certos locais como uma viga.



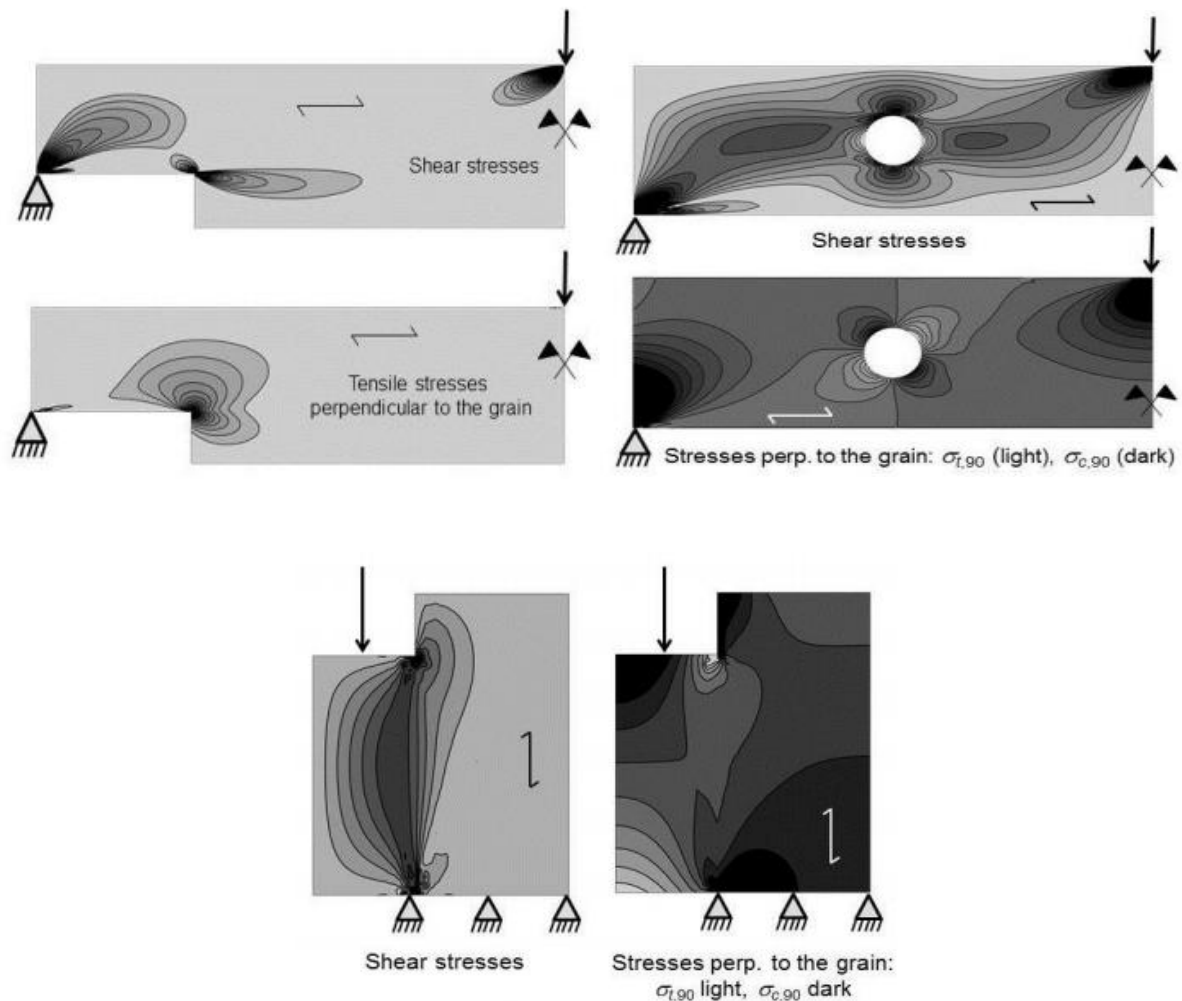


Figura 4.32 – Interação das tensões corte e tensões perpendiculares ao fio, (Steiger & E Gehri, 2010).

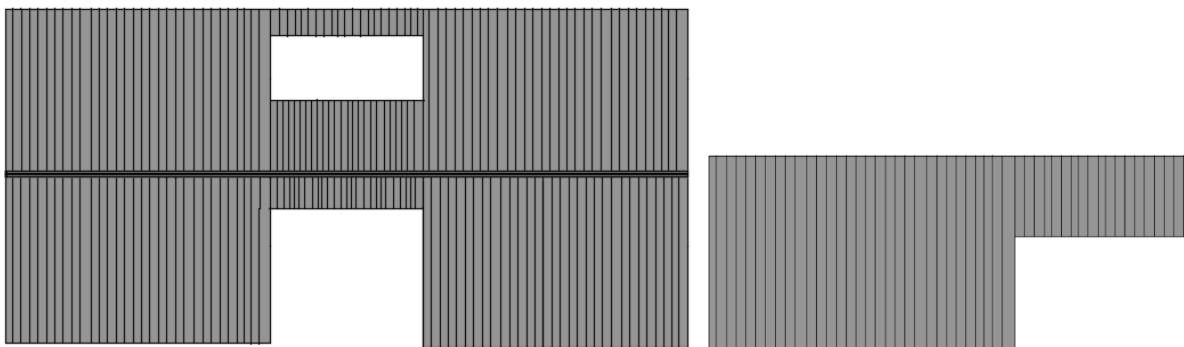
As vigas CLT são casos particulares das paredes CLT. Muitas vezes as paredes têm aberturas (janelas, portas ou vãos) e são tratadas como vigas. A *Stora Enso* distingue dois tipos de paredes, paredes monolíticas com lintéis contínuos e paredes com lintéis encaixados (Stora Enso, 2012).

#### ▪ Paredes monolíticas com lintéis contínuos

Os lintéis contínuos podem ser analisados como sendo uma parte da parede em consola ou como viga encastrada, ver Figura 4.33.

Se uma parede acima do lintel é usada como uma viga de apoio, é essencial ter em conta a altura da soleira de quaisquer aberturas de janelas.

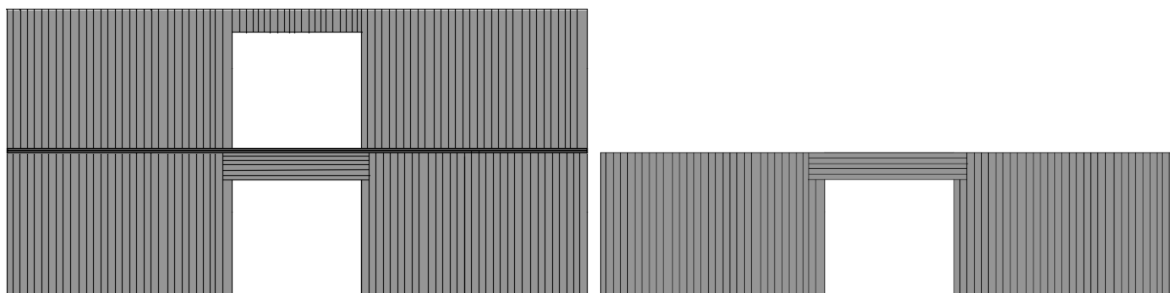
O lintel pode ser ligado à parede superior, como por exemplo, através de placas de metal perfuradas ou parafusos.



*Figura 4.33 – Paredes monolíticas, com lintéis encaixados.*

#### ▪ Paredes com lintéis encaixados

Os lintéis de madeira (glulam ou CLT, Figura 4.34) ou de aço são os mais usados. Devido às camadas ortogonais, os lintéis de CLT observam e transmitem melhor do que os lintéis de madeira lamelada colada. A análise estrutural para paredes com lintéis encaixados deve ser de uma viga simples e devemos ter atenção ao esmagamento na área de apoio.



*Figura 4.34 – Paredes com lintéis encaixados.*

Como podemos ver na anterior figura, as disposições das primeiras camadas da parede são verticais e para as vigas, já são horizontais, isto é, num painel de 5 camadas, 3 camadas estão sempre a contribuir independentemente do elemento estrutural.

Optar por um bom sistema estrutural para estes casos é fundamental, com vista a garantir uma boa aproximação ao comportamento real e ter um bom dimensionamento para as cargas e forças que estão a ser aplicadas.

Devido à limitação que o programa TimberTech tem, para as aberturas dos painéis (portas e janelas) o dimensionamento deste não são abordados. Segundo a cláusula 9.2.4.2(6) do EC5, é correto o tipo de paredes com lintéis encaixados, mas torna um simplificação para o tipo de paredes monolíticas com lintéis encaixados. No entanto, a modulação que o programa realiza é

sempre do lado da segurança. É um dos objetivos para o próximo ano a realização do dimensionamento de lintéis por parte do software TimberTech

#### 4.10.1. Flexão

Para a flexão das vigas CLT, temos de verificar a seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{max,d}}{f_{m,CLT,d}} \leq 1 \quad (4.67)$$

Se os módulos de elasticidade,  $E$ , das camadas forem todos iguais, podemos utilizar a seguinte equação para o cálculo das tensões de flexão,  $\sigma_{m,d}$ .

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{Ed}}{W_{eff}} \leq f_m \quad (4.68)$$

Para o cálculo do módulo da secção efetiva de uma viga, temos de ter em conta só as camadas transversais à carga, pois são estas que contribuem para a resistência à flexão, ver Figura 4.35

O módulo de inércia eficaz é dado pela seguinte equação:

$$I_{net} = \frac{B \times H^3}{12} \quad (4.69)$$

O módulo da secção efetiva pode ser calculado através da seguinte equação (de acordo com a ETA-06/0138 (ETA-06/0138, 2011)), ver Figura 4.35.

$$W_{eff} = \frac{I_{net}}{\frac{H}{2}} \quad (4.70)$$

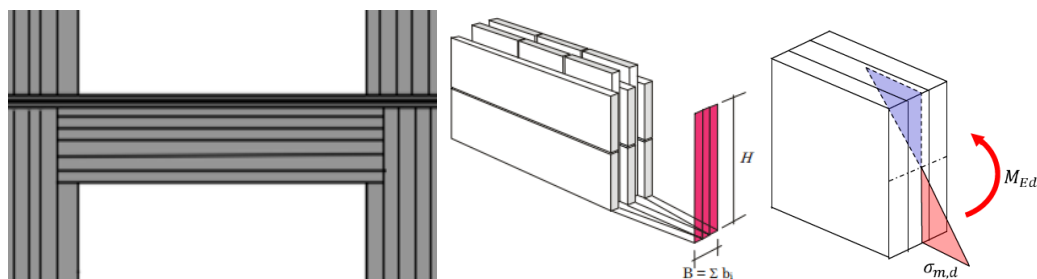


Figura 4.35 – Ilustração de lintel, parede e piso (esquerda), secção transversal de um lintel (meio), tensões de flexão de uma viga (direita).

#### 4.10.2. Corte (ações no plano)

Nesta secção para o cálculo das vigas CLT, apresenta-se o modelo mecânico para elementos em esbeltos”; é um modelo proposto pela instituição “*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*” na Alemanha (M Flaig & Blaß, 2012).

É um modelo que é um seguimento do modelo mecânico para os painéis de madeira lamelada colada, ver secção 4.9.4, mas que abrange mais detalhes que um painel pode ter. Este modelo pode muito bem substituir qualquer modelo para qualquer elemento estrutural CLT.

Em vigas CLT, como em materiais sólidos, as forças transversais, que atuam na direção do plano, causam tensões de corte. A distribuição da tensão de corte pode ser considerada constante na espessura do elemento, ver secção 4.9.4.

Os efeitos das tensões de corte nas secções transversais das vigas,  $\tau_{gross}$  e  $\tau_{net}$ , e das tensões de corte torsionais,  $\tau_{tor}$ , têm o mesmo efeito que as paredes. Logo, devemos verificar os cinco componentes de tensão, dos três modos de rotura que são efeitos dos dois mecanismos (corte e torsão), ver secção 4.9.4.

##### ▪ Mecanismo I – Resistência ao corte nas lamelas

A ligação entre lamelas longitudinais adjacentes é realizado por camadas transversais, que são suficientemente fortes para assegurar que as camadas atuam como unidades sólidas. As tensões de corte,  $t_{xz}$ , nas lamelas, que causam rotura paralela e perpendicular ao fio nos modos de rotura I e II, respetivamente, podem ser calculadas de acordo com a *Teoria de Bernoulli-Euler Beam*, que tem em conta a espessura adequada na secção transversal e usa a fórmula *Jouravsky, 1855*.

Modo de rotura I – É uma rotura de corte paralela ao fio na secção transversal,  $t_{gross}$ , da viga. A rotura consiste em secções entre as juntas não coladas com as tensões de corte iguais em camadas longitudinais e transversais.

As tensões de corte nas secções transversais,  $t_{gross}$ , são calculadas a partir da seguinte expressão:

$$\tau_{xz,gross} = \frac{V_z \times S_{y,gross}}{I_{y,gross} \times t_{gross}} \quad (4.71)$$

A verificação ao corte de uma viga CLT, para o modo de rotura I, é caracterizado pela rotura de corte paralela ao fio dentro das lamelas. A resistência ao corte é especificada na secção 4.9.4 e deve satisfazer a seguinte condição:

$$\tau_{xz,gross} \leq f_{gross} \quad (4.72)$$

Modo de rotura II – É uma rotura de corte perpendicular ao fio na secção transversal,  $t_{net}$ , da viga. A rotura consiste em secções entre as juntas não coladas e as tensões de corte, apenas em camadas perpendiculares às juntas.

As tensões de corte nas secções transversais,  $t_{net}$ , são calculadas a partir da seguinte expressão:

$$\tau_{xz,net} = \frac{V_z \times S_{y,net}}{I_{y,net} \times t_{net}} \quad (4.73)$$

A verificação ao corte de uma viga CLT, para o modo de rotura II, é caracterizado pela rotura de corte na secção transversal. O valor médio característico da resistência ao corte,  $f_{v,net}$ , é dado na secção 4.9.4, e deve satisfazer a seguinte condição:

$$\tau_{xz,net} \leq f_{v,net} \quad (4.74)$$

Uma das formas de calcular as tensões de corte nas secções transversais,  $t_{net}$  e  $t_{gross}$ , é através de funções parabólicas. As equações seguintes descrevem curvas dos esforços de corte nas secções transversais  $t_{gross}$  e  $t_{net}$ .

$$\tau_{xz,gross,max} = \frac{3 \times V_z}{2 \times h \times t_{gross}} \quad (4.75)$$

$$\tau_{xz,net,max} = \frac{3 \times V_z}{2 \times h \times t_{net}} \quad (4.76)$$

- $V_z$     esforço transversal aplicado na estrutura;
- $S$       momentos estáticos;
- $I$       momentos de inércia;
- $t_{gross}$     espessura total do elemento;
- $t_{net}$       soma da espessura menor das camadas transversais ou longitudinais.

A obtenção das tensões máximas de corte (picos), em camadas longitudinais e transversais, é uma estimativa conservadora, e o erro diminui rapidamente com o número de lamelas em camadas longitudinais. Na Figura 4.36 é apresentada uma possível distribuição das tensões de corte na secção transversal,  $t_{gross}$  e  $t_{net}$ , de uma viga CLT de três camadas.

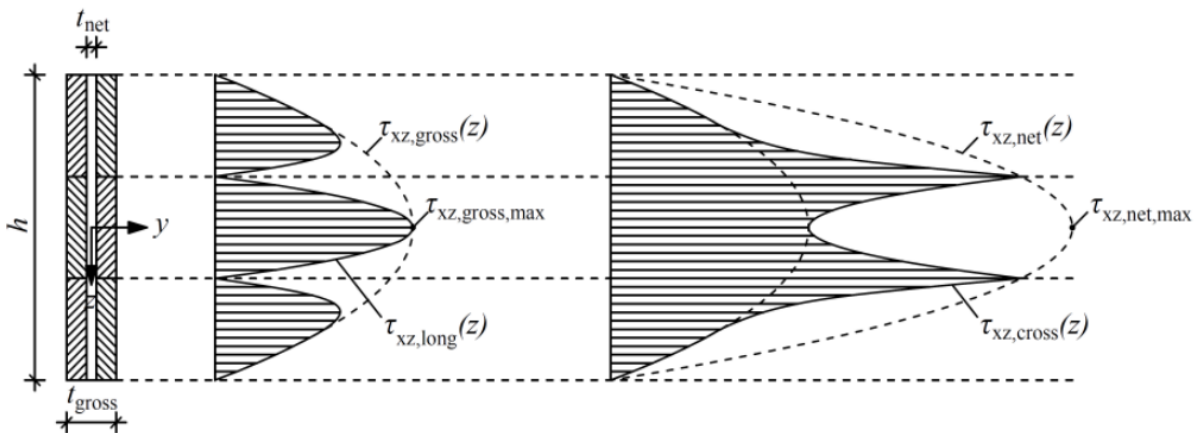


Figura 4.36 – Distribuição das tensões de corte nas lamelas de uma secção transversal de uma viga CLT de três camadas dentro das lamelas transversais: tensões de corte nas lamelas longitudinais,  $t_{xz, long}$ , (à esquerda) e tensões de corte nas lamelas transversais,  $t_{xz, cross}$ , (direita) ((Marcus Flaig & Blass, 2013)).

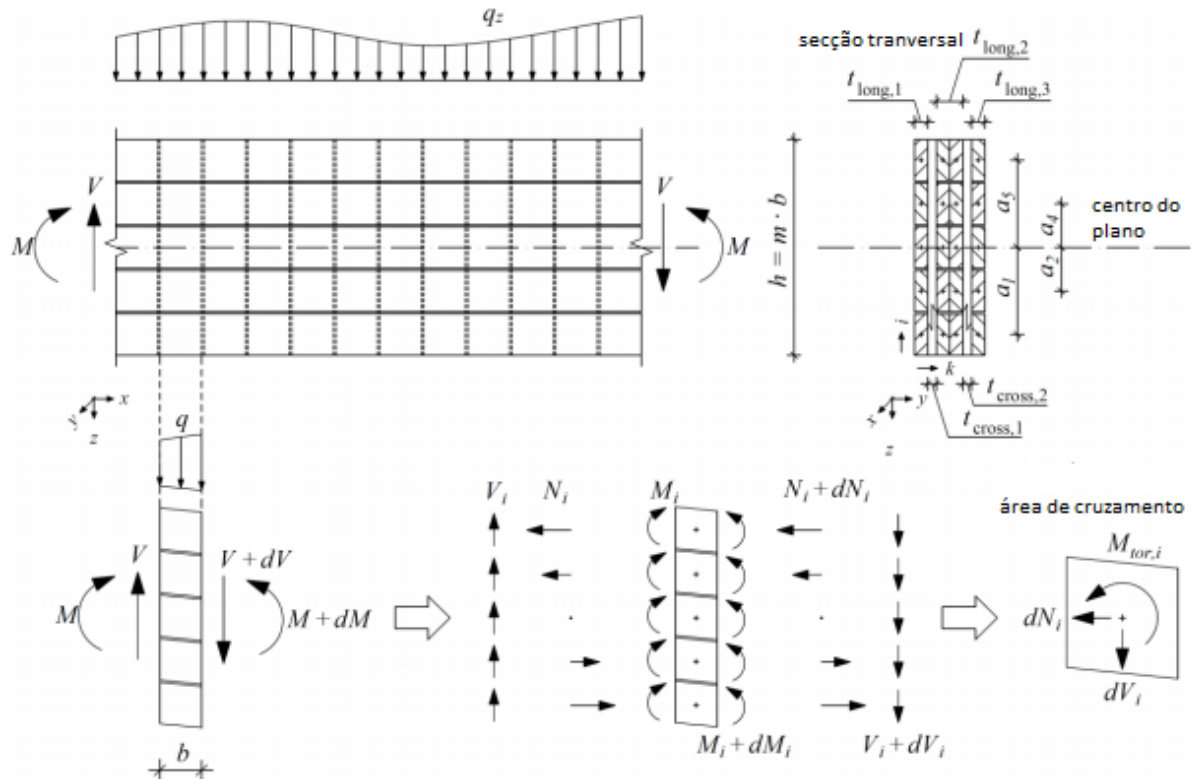


Figura 4.37 – Vista lateral e a secção transversal da viga CLT com 4 camadas carregadas no plano (topo) e forças internas na viga em lamelas individuais e nas áreas de cruzamento (M Flaig & Blaß, 2012).

#### ▪ Mecanismo II – Resistência ao corte nas áreas de cruzamento.

Modo de rotura III – É uma rotura de corte nas áreas de cruzamento entre lamelas ligadas ortogonalmente. A rotura é causada por esforços de corte torsionais e unidirecionais, que são resultado da transferência de forças entre as camadas adjacentes.

Nesta rotura temos três componentes que devemos verificar, que correspondem às tensões de corte nas áreas de cruzamento:

- a) Tensões de corte paralelas ao eixo das vigas.

As tensões de corte paralelas ao eixo das vigas são causadas pela mudança do momento final e pelo equilíbrio das tensões normais diferenciais resultantes nas lamelas longitudinais.

Uma vez que as lamelas adjacentes dentro das camadas longitudinais não estão ligadas nas suas extremidades, as forças normais diferenciais,  $dN_i$ , causadas pela mudança do momento de flexão ao longo do eixo da viga CLT, são transmitidas através das áreas de cruzamento entre

camadas longitudinais e transversais. Estas forças,  $N_i$ , nas lamelas longitudinais são calculadas através do modelo de uma viga composta, ver Figura 4.37.

As tensões de corte,  $\tau_{yx}$ , nas áreas de cruzamento, são obtidas dividindo a força normal diferencial de uma secção de uma lamela longitudinal pelas áreas de cruzamento da lamela.

$$\tau_{yx} = \frac{dN_{i,max}}{n_{CA} \times b^2} \quad (4.77)$$

onde:

$$dN_{i,max} = \frac{dM}{I_{y,net,long}} \times a_{i,max} \times t_{net,long} \times b \text{ com } dM = V \times dx = V \times b \quad (4.78)$$

$$I_{y,net,long} = \frac{m^3 \times b^3 \times t_{net,long}}{12} \text{ e } a_{i,max} = \frac{m-1}{2} \times b \quad (4.79)$$

Substituindo a expressão (4.77) por  $dN_i$ ,  $I_{net,long}$  e  $a_{i,max}$ , obtemos a seguinte expressão:

$$\tau_{yx} = \frac{6 \times V}{n_{CA} \times b^2} \times \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{m^3} \right) \quad (4.80)$$

- $\tau_{yx}$  tensão de corte nas áreas de cruzamento;
- $V$  esforço transversal aplicado na estrutura;
- $dN_i$  forças normais diferenciais;
- $b$  largura das lamelas longitudinais e transversais;
- $n_{ca}$  número de áreas de cruzamento dentro da espessura do elemento;
- $m$  número de lamelas dentro das camadas longitudinais;

#### b) Tensões de corte torsional.

As tensões de corte de torção surgem devido à excentricidade entre as linhas centrais das lamelas adjacentes.

Uma vez que a excentricidade das forças normais,  $N_i$ , atua nas linhas centrais das lamelas longitudinais adjacentes, estas forças são transferidas através das áreas de cruzamento, que criam esforços de corte paralelos ao eixo da viga e tensões de corte de torção dentro destas áreas de passagem. Como as tensões de corte atuam na direção do eixo da viga, estas tensões são calculadas através do modelo de uma viga composta, ver Figura 4.37.



As tensões de corte de torção,  $\tau_{yx}$ , nas áreas de cruzamento podem ser calculadas de acordo com as seguintes equações:

$$\tau_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^m M_{tor,i}}{n_{CA} \times \sum_{i=1}^m I_{p,CA}} \times \frac{b}{2} \quad (4.81)$$

onde:

$$\sum_{i=1}^m M_{tor,i} = \sum_{i=1}^m dN_i(x) \times a_i = \frac{dM(x)}{I_{y,net,long}} \times t_{net,long} \times b \times \sum_{i=1}^m a_i^2, \quad (4.82)$$

$$\sum_{i=1}^m a_i^2 = b^2 \times \sum_{i=1}^m \left( \frac{m+1}{2} - i \right) = b^2 \times \frac{(m^3 - m)}{12} e \sum_{i=1}^m I_{p,CA} = m \times \frac{b^4}{6} \quad (4.83)$$

Substituindo a expressão 4.4.81 por  $M_{tor}$ ,  $I_{p,CA}$  e  $a_{i,max}$ , obtemos a seguinte expressão:

$$\tau_{tor} = \frac{3 \times V}{n_{CA} \times b^2} \times \left( \frac{1}{m} - \frac{1}{m^3} \right) \quad (4.84)$$

Para vigas, o número grande de lamelas,  $m$ , dentro das camadas longitudinais, assume-se como uma grande influência para o cálculo das tensões de corte torsionais. É apresentada a seguinte expressão, para esta observação:

$$\tau_{tor} = \frac{3 \times V}{n_{CA} \times b^2 \times m} = \frac{V \times b}{\sum I_{p,CA}} \times \frac{b}{2} \quad (4.85)$$

É de referir a existência desta equação para o cálculo de tensões de corte torsionais em paredes de corte e diafragmas.

- $\tau_{yx}$  tensão de corte nas áreas de cruzamento;
- $V$  esforço transversal aplicado na estrutura;
- $dN_i$  forças normais diferenciais;
- $b$  largura das lamelas longitudinais e transversais;
- $n_{ca}$  número de áreas de cruzamento dentro da espessura do elemento;
- $m$  número de lamelas dentro das camadas longitudinais;
- $I_{p,CA}$  momentos de inércia polar da área de cruzamento.

## c) Tensões de corte perpendiculares ao eixo das vigas

As tensões de corte perpendiculares ao eixo da viga são causadas nas áreas de cruzamento em pontos de apoio e de aplicação de carga concentrada e em vigas com secção transversal variável, como em vigas entalhadas, vigas com furos e vigas cônicas.

Estas tensões de corte criam forças externas, por exemplo, reações de suporte e cargas, e geram forças internas, devido às mudanças de secção transversal ou devido à direção do eixo da viga. O cálculo de tensão de corte,  $\tau_{yz}$ , nas áreas de cruzamento de vigas CLT com furos e entalhes, bem como para vigas CLT cônicas e vigas CLT, é dado de acordo com a seguinte equação, desde que as cargas sejam transferidas, apenas por contacto, através das superfícies dos fios das extremidades de camadas transversais e supondo que os esforços de corte são uniformemente distribuídos dentro da viga.

$$\tau_{yz} = \frac{q_z}{b \times m} \quad (4.86)$$

Para casos com larguras diferentes nas lamelas nas camadas transversais e longitudinais,  $b_Q \neq b$ , devemos ajustar as componentes das tensões de corte torsionais, através do fator  $k_b$ :

$$\tau_{tor} = k_b \times \tau_{tor}^* \quad (4.87)$$

$$k_b = \frac{b_{max}}{b} \times \frac{2 \times b^2}{b^2 + b_Q^2} \quad (4.88)$$

Para casos com variação de lamelas no interior das camadas longitudinais, devemos calcular as tensões de corte torsionais pela seguinte equação:

$$\tau_{tor} = 6 \times \frac{V \times b_Q}{h^3} = \frac{\sum_{i=1}^m a_i^2 \times b_{L,i}}{\sum I_{p,i}} \times b_{max} \quad (4.89)$$

$V$  esforço transversal aplicado na estrutura;

$q_z$  cargas externas;

$b$  largura das lamelas longitudinais;

$b_Q$  largura das lamelas transversais;

$b_{max} = \max\{b; b_Q\}$ ;

$b_{L,i}$  largura das lamelas longitudinais;

$m$  número de lamelas dentro das camadas longitudinais;

$a_i$  distância entre faces da gravidade das lamelas longitudinais e a secção transversal;

$I_{p,i}$  momentos de inércia polar da área  $b_Q$ ;

A verificação das tensões de corte no modo de rotura III é caracterizado pela interação dos diferentes componentes de tensão de corte, que foi falado acima, que têm de ser consideradas pelas seguintes equações:

$$\frac{\tau_{tor,d}}{f_{v,tor,d}} + \frac{\tau_{yx,d}}{f_{R,d}} \leq 1 \text{ e } \frac{\tau_{tor,d}}{f_{v,tor,d}} + \frac{\tau_{yz,d}}{f_{R,d}} \leq 1 \quad (4.90)$$

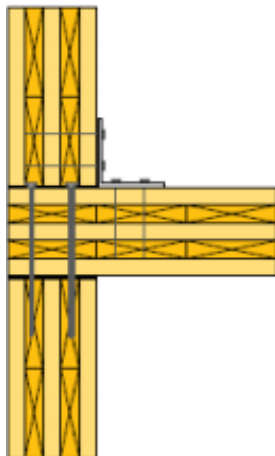
Nos últimos anos, a resistência ao corte das áreas de cruzamento das forças de corte e de torsão foi determinada em várias séries de ensaios, ver Tabela 4.12.

*Tabela 4.12 – Valores ensaiados da resistência ao corte por torsão e da resistência ao rolling shear nas áreas de cruzamento entre as lamelas e os respetivos autores.*

Autor	n	$f_{v,tor,mean}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,tor,k}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{R,mean}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{R,k}$ N/mm <sup>2</sup>
Blaß/Görlacher (2002)	57	3,59	2,82	-	-
Jöbstl (2004)	81	3,46	2,71	-	-
Wallner (2004)	12	-	-	1,51	1,18
Blaß/Flaig	6	-	-	1,43	1,18
Blaß/Flaig (2012)	13	3,98	2,76	1,71	1,19
Blaß/Flaig (2012)	13	3,69	2,79	1,58	1,20
Blaß/Flaig	12	4,67	2,68	1,99	1,15

## 4.11. Elementos de diafragmas

Os painéis CLT têm uma boa capacidade de resistência a forças horizontais produzidas, por exemplo, por ações sísmicas e ações do vento. A resistência às ações horizontais é fornecida pela resistência no plano de corte de painéis de paredes revestidas que estão ligados em conjunto para atuar como diafragmas de parede contínuas, ver a Figura 4.38.



*Figura 4.38 – Exemplo de ligação entre as paredes e um piso.*

As paredes de madeira são os elementos primários de contraventamento e resistência às ações horizontais, que estão ligadas por diafragmas rígidos ao nível dos pisos. Os pisos são responsáveis por absorver as forças horizontais atuantes,  $F_{v,Ed}$ , aplicadas no edifício.

Segundo o EC5, os diafragmas das paredes devem ser encastrados, de modo a evitar o derrubamento e o deslizamento e deve haver um reforço no próprio plano, por placas ou por elementos diagonais ou por ligações que são resistentes aos momentos.

Muitas vezes, as paredes não contribuem para a resistência das forças horizontais, isto é, uma parede pode ser constituída por uma parede simples de diafragmas ou por várias paredes diafragmas, se esta tiver descontinuidades, tais como aberturas de portas, Figura 4.39. Os limites são estabelecidos no *PD 6693-1: 2012*(BSI, 2012).

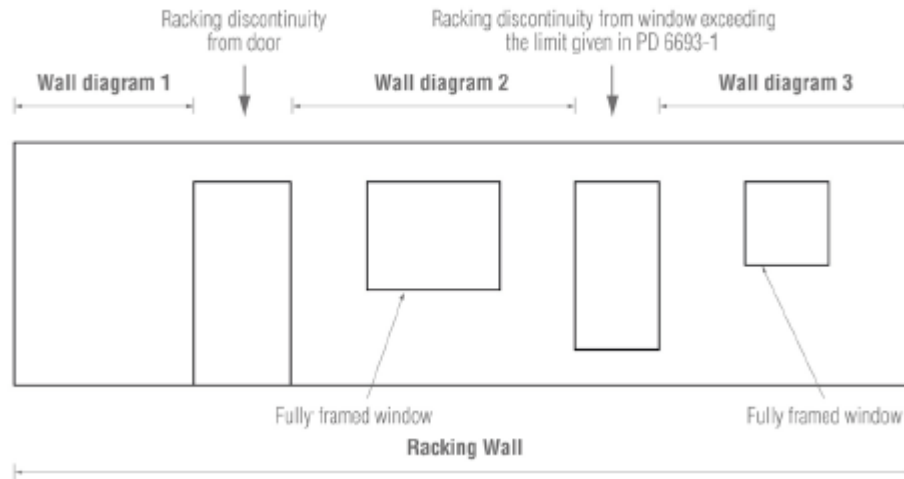


Figura 4.39 – Divisão de uma parede racking em diafragmas de parede.

A resistência das forças horizontais,  $F_{v,Rd}$ , de uma parede deve ser determinada ou por ensaios ou por cálculos, utilizando métodos analíticos ou modelos de cálculo adequados.

Um dos modelos apresentados pela *structural timber association*, é a seguinte:

A resistência do diafragma de cada parede diafragma é calculada de acordo com a *PD 6693-1: 2012*(BSI, 2012):

$$F_{i,v,Rd} = K_{opening} \times K_{i,w} \times f_{p,d,t} \times L \quad (4.91)$$

$L$  Comprimento da parede diafragma

$K_{i,w}$  É um fator de modificação tendo em conta os parâmetros de comprimento da parede, a carga vertical e a disposição dos hold-downs.

$K_{opening}$  É um fator de modificação tendo em conta o efeito de aberturas de janelas, que considera os limites prescritos pela PD 6693-1.

$f_{p,d,t}$  É a capacidade de corte de cálculo para cada elemento de fixação (kN / m).

Os esforços de corte em cada painel CLT também podem ser obtidos através das análises simplificadas de diafragmas de parede, que a norma EC5 apresenta. São dois métodos simplificados de análise do efeito diafragma em estruturas de madeira, referentes às cláusulas 9.2.4.2 e a 9.2.4.3, para o método A e para o método B, respetivamente.

## ▪ Método A

A análise simplificada do método A é aplicado para diafragmas de parede encastradas junto a uma extremidade. Este método é muito utilizado para a determinação dos esforços de corte de cada parafuso, pois admite uma distribuição plástica dos esforços dos parafusos, tal como ilustrado na Figura 4.40.

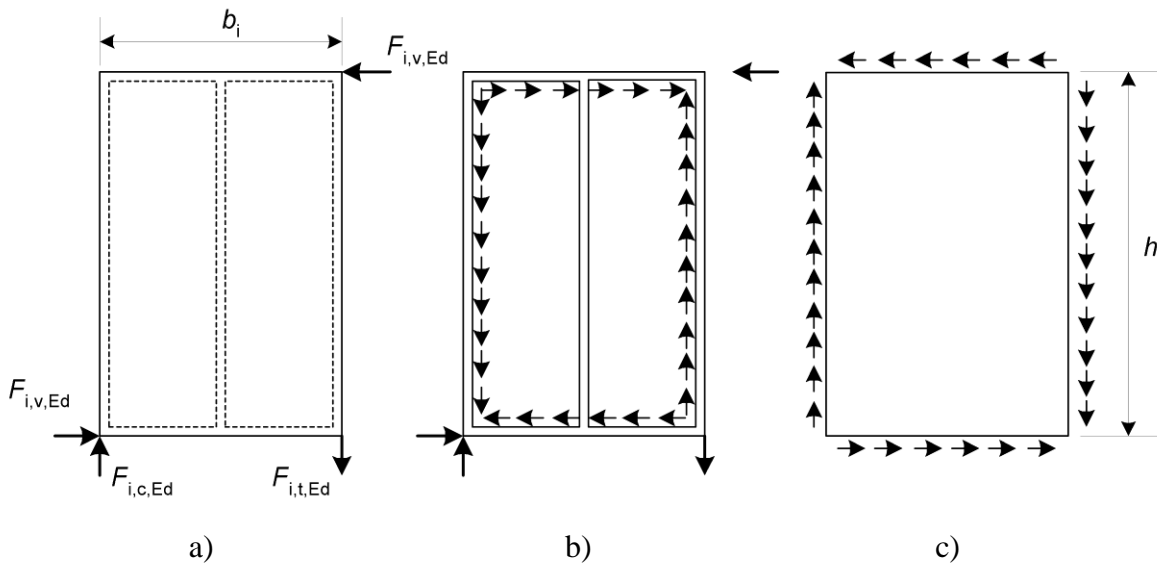


Figura 4.40 – Esforços atuantes: a) num painel de parede; b) na estrutura reticulada c) na placa do EC5.

A capacidade resistente das forças horizontais de uma parede,  $F_{v,Rd}$ , constituída por vários painéis de parede, é calculada da seguinte forma:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} \quad (4.92)$$

A capacidade resistente de forças horizontais de cada painel de parede é calculada da seguinte forma:

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} b_i c_i}{s} \quad (4.93)$$

em que:

$F_{f,Rd}$  valor de cálculo da capacidade resistente lateral de um ligador isolado;

$b_i$  largura do painel de parede;

$s$  espaçamento entre ligadores;

$$c_i = \begin{cases} 1 & \text{para } b_i \geq b_0 \\ \frac{b_i}{b_0} & \text{para } b_i < b_0 \end{cases}$$

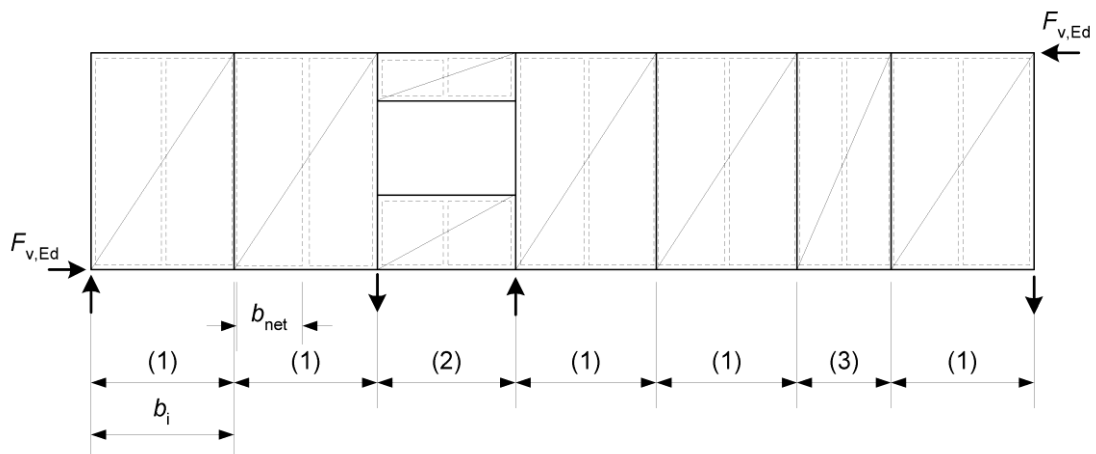
$$b_0 = h/2;$$

$h$  altura da parede.

As forças exteriores representadas na Figura 4.40,  $F_{i,c,Ed}$  e  $F_{i,t,Ed}$ , são calculadas da seguinte forma:

$$F_{i,c,Ed} = F_{i,t,Ed} = \frac{F_{i,v,Ed} h}{b_i} \quad (4.94)$$

Estas forças exteriores, que são solicitadas em painéis de parede, são transmitidas para outros painéis adjacentes ou para elementos construtivos situados abaixo ou acima do painel. Se as forças de tração transmitirem à estrutura localizada inferiormente, o painel deve ser ancorado por ligadores com suficiente rigidez e torna-se necessário verificar a encurvadura dos montantes de parede. Já para as extremidades dos elementos verticais, que se apoiam em elementos horizontais da estrutura, devemos verificar a compressão perpendicular ao fio nos elementos horizontais, cláusula 4.2.4.2(9) do EC5. As forças exteriores são transmitidas entre os painéis de parede com aberturas e com painéis de menor largura, semelhante à Figura 4.41.



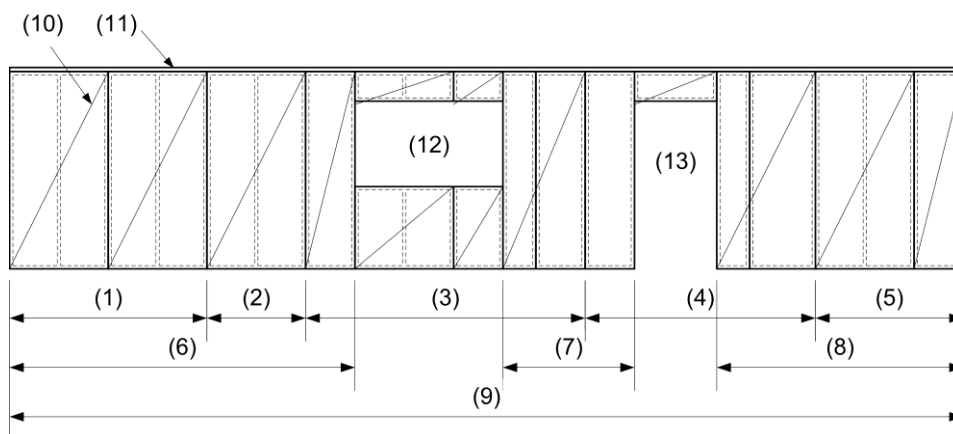
Legenda:

- (1) Painel de parede (largura corrente) (2) Painel de parede com janela  
(3) Painel de parede (largura menor)

Figura 4.41 – Exemplo de um conjunto de painéis de parede contendo uma abertura e um painel de largura menor (3), EC5.

## ▪ Método B

A análise simplificada do método B é aplicado para os diafragmas de parede com um sistema, ver Figura 4.42, com uma ou mais paredes, em que cada parede pode ser formada por um ou mais painéis, derivados de madeira que devem satisfazer o disposto no EN 13986.



Legenda:

- |                        |                        |                        |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| (1) Painel de parede 1 | (2) Painel de parede 2 | (3) Painel de parede 3 |
| (4) Painel de parede 4 | (5) Painel de parede 5 | (6) Parede 1           |
| (7) Parede 2           | (8) Parede 3           | (9) Sistema de parede  |
| (10) Placa             | (11) Frechal           | (12) Janela            |
| (13) Porta             |                        |                        |

Figura 4.42 – Exemplo de um conjunto de painéis de parede constituído por vários painéis de parede, do EC5.

As cláusulas 9.2.4.3.1 (1) a (4) do EC5 informam sobre como devemos proceder na verificação dos requisitos de uma análise simplificada de diafragmas das paredes e dos painéis.

A capacidade resistente das forças horizontais de um sistema constituído por várias paredes,  $F_{v,Rd}$ , é calculada da seguinte forma:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} \quad (4.95)$$

A capacidade resistente de forças horizontais da parede é calculada da seguinte forma:

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} b_1}{s_0} k_d k_{i,q} k_s k_n \quad (4.96)$$

em que:

$F_{f,Rd}$  valor de cálculo da capacidade resistente lateral de um ligador isolado;



- $b_i$  comprimento da parede, em m;  
 $s_0$  espaçamento de base dos ligadores;  
 $k_d$  coeficiente relativo à dimensão do painel;  
 $k_{i,q}$  coeficiente relativo ao carregamento uniformemente distribuído para a parede  $i$ ;  
 $k_s$  coeficiente relativo ao espaçamento dos ligadores;  
 $k_n$  coeficiente relativo ao material constituinte das placas.

As forças exteriores representadas na Figura 4.43,  $F_{i,c,Ed}$  e  $F_{i,t,Ed}$ , são calculadas da mesma maneira para os dois métodos (ver o método A).

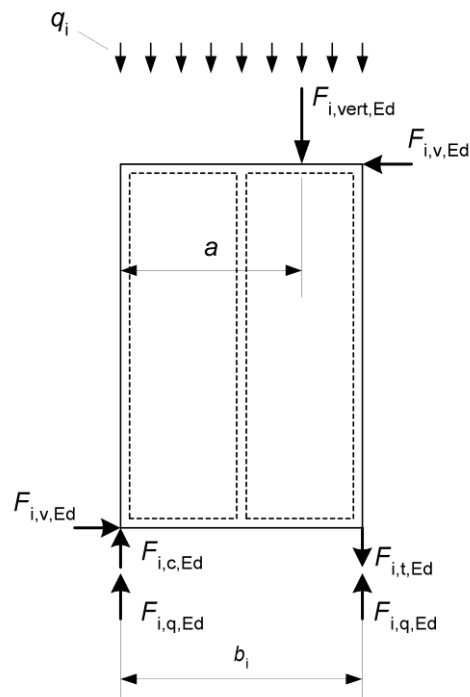


Figura 4.43 – Determinação da ação vertical equivalente  $q_i$  e das reações resultantes de ações verticais e horizontais, EC5.

### 4.11.1. Métodos de análise

Existem vários métodos que analisam diafragmas de madeira, ver tabela 4.13, segundo (Moroder, 2016).

Tabela 4.13 – Métodos de análise para diafragmas de madeira

Método de análise	Diafragma de madeira
Deep beam analogy	Geralmente usados em diafragmas regulares
Vierendeel truss analogy	Usados em diafragmas desbloqueados e diafragmas com placas retas
Shear field analogy	Geralmente usado para diafragmas regulares e irregulares para uma extensão limitada.
Truss analogy	Aplicável, mas não usado
Finite element analysis	Aplicável, usado para estudos especiais.

Muitos dos métodos que abordam os diafragmas de madeira, acabam por ser métodos simples, que não correspondem às exigências de diafragmas de pavimento.

Um dos métodos muito usado é o método Deep Beam Analogy, que é usado para diafragmas regulares. Os cantos re-entrant, as aberturas, set-backs, forças concentradas introduzidas são limites do uso do método deep beam analogy, ver a Figura 4.44.

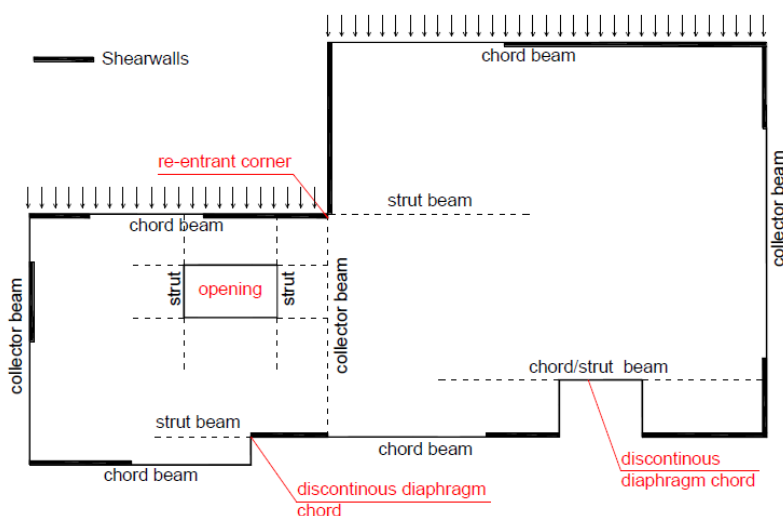


Figura 4.44 – Geometria do piso irregular com os típicos componentes diafragmas (Moroder, 2016).

Mesmo assim este método é usado, ignorando a presença de forças de concentradas. Para as aberturas e outras irregularidades podem ser explicadas por cálculos adicionais baseados em publicações (Elliott 1979, Jephcott e Dewdney 1979, Diekmann 1982, Dean et al., 1984, Kessel e Schönhoff 2001, Prion 2003, Tissell e Elliott 2004) fornecem a teoria e os métodos para aberturas em diafragmas de madeira. Nem todos os métodos foram verificados experimentalmente e um número de abordagens pode tornar-se complexo.

Então deve-se usar um método mais adequado, para o cálculo de diafragmas de madeira um método intuitivo e mais eficiente em termos de custo para a sua análise. O *Equivalent truss method* para diafragmas de madeira.

#### **4.11.2. Método de Truss Equivalente para diafragmas de madeira**

Os pisos modernos tendem a ter um número crescente de irregularidades, exigindo reforço na forma de angles brackets ou strut beam, esses elementos também precisam ser considerados na analogia. A posição das aberturas e cantos, bem como a disponibilidade de dimensões de painel de engenharia com altas relações de aspeto requerem o refinamento de uma diagonal equivalente por painel para múltiplas diagonais por painel. A combinação de múltiplas diagonais por painel e a derivação das fórmulas de deformação de painéis de madeira maciça fornecem a extensão da analogia de treliça aos diafragmas de madeira maciça. A analogia treliça reforçada, referida como Método de Truss Equivalente ou modelo de escoras e treliças como é conhecido em português, não só fornece forças de corte unitárias e deformações de diafragma, mas também tensões axiais em vigas de suporte e outros elementos de reforço. Além disso, fornece uma estimativa das forças longitudinais em diafragmas de madeira maciça, que são normalmente ausentes em diafragmas de LTF

#### **4.11.3. Regras gerais do método das treliças**

Conforme se sabe da mecânica dos sólidos, a força de corte,  $F$ , provoca a deformação de um elemento retangular num paralelogramo com um ângulo de corte,  $\gamma$ , como mostra a Figura 4.45. A flexibilidade dos elementos de fixação de painel aumenta ainda mais a deformação do painel. Este comportamento de deformação pode ser reproduzido por um sistema quadrilateral com uma diagonal equivalente como mostrado na Figura 4.45b.

---

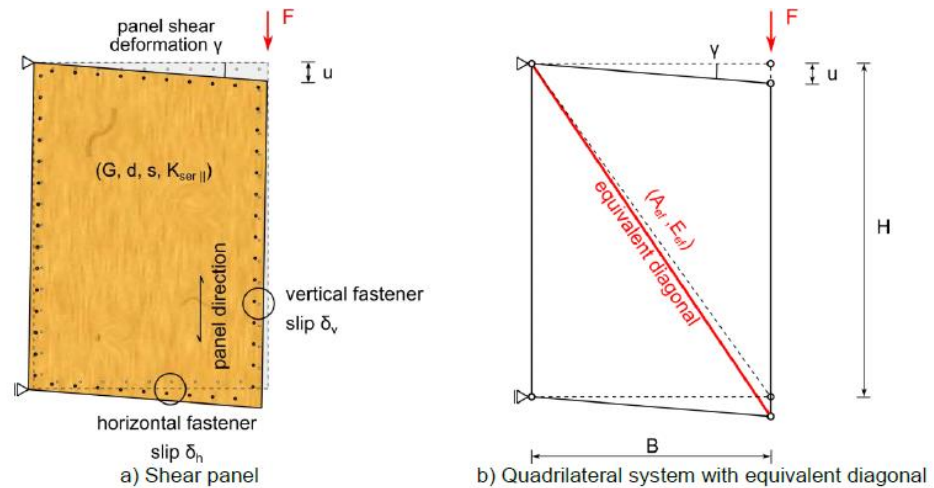


Figura 4.45- Painel de corte com rigidez de ligação e diagonal da treliça equivalente (Moroder, 2016).

A força de corte unitária no painel pode ser obtida diretamente pela força que atua na diagonal equivalente. Ver a Figura 4.46.

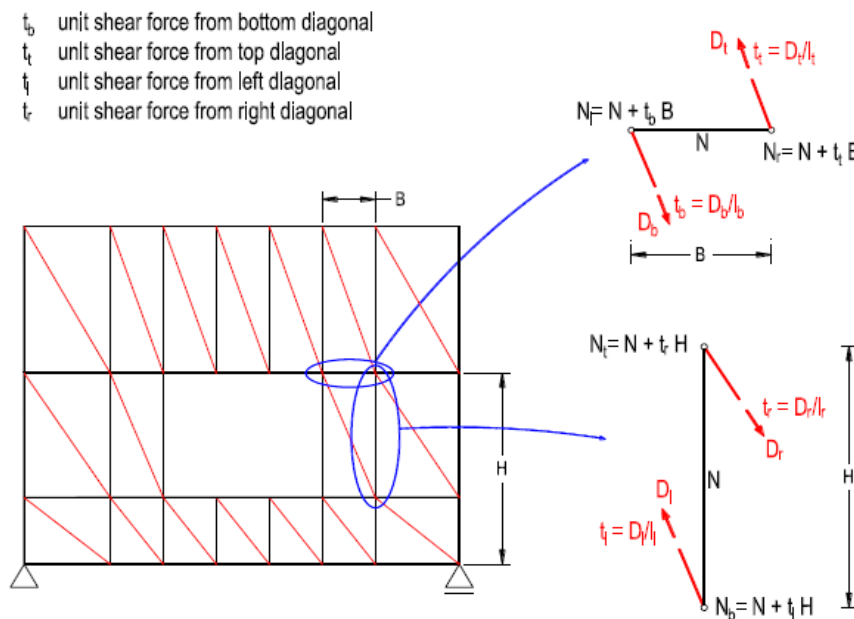


Figura 4.46 – Pós-cálculo para a determinação das forças de cada tramo (modificado de ((Kessel & Schönhoff, 2001)).

Com o método de Truss Equivalent, o diafragma horizontal é modelado por uma grelha de elementos representando membros “framing” e vigas bem como a rigidez axial de cada painel que inclui a rigidez do elemento de ligação perpendicular nos bordos do painel. Para cada painel, a rigidez ao corte e a flexibilidade dos ligadores são modeladas por diagonais equivalentes, caracterizadas pelas seguintes propriedades:

A sua rigidez ao corte da espessura equivalente do painel  $(Gd)_{ef}$ , inclui o módulo de deslizamento dos ligadores paralelo à borda,  $K_{ser||}$ , é determinado para painéis de madeira maciça, através da seguinte formula:

$$(Gd)_{ef} = \frac{1}{\frac{1}{Gd} + \frac{1}{k_{ser||}} \times \left( \frac{c_1}{b} + \frac{c_2}{h} \right)}$$

onde, o número das conexões ao longo da borda do painel de revestimento,  $c_i$ . Em que,  $c_1$ , corresponde ao número de ligadores entre painéis adjacentes ao longo da altura,  $h$ , do painel de revestimento e  $c_2$ , corresponde ao número de ligadores entre painéis adjacentes ao longo do comprimento,  $b$ , do painel de revestimento.

Diafragmas LTF com pregos $c = 2$	
Diafragmas de madeira maciça com juntas half-lap e parafusos $c = 1$	
Diafragmas de madeira maciça com juntas single spline e parafusos/pregos $c = 2$	

O módulo de elasticidade equivalente na diagonal é determinada através da seguinte fórmula:

$$E_{ef} = \frac{(Gd)_{ef} \times l^2}{h \times b}$$

A área da secção transversal equivalente na diagonal é determinada através da seguinte fórmula:

$$A_{ef} = l = \sqrt{h^2 + b^2}$$

Onde, o módulo de corte,  $G$ , a espessura do painel,  $d$ , espaçamento dos ligadores,  $s$ , largura do painel,  $b$ , altura do painel,  $h$ , comprimento da diagonal do painel.

#### 4.11.4. – Propriedades diagonais em casos para painéis regulares ou painéis irregulares.

Para um painel de diafragma de dimensões  $b \times h$  dividido em painéis  $m \times n$  ( $m$  é o número de diagonais ao longo da altura do painel e  $n$  é o número de diagonais ao longo do comprimento do painel) como na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, a área efetiva,  $A_{ef}$ , e o módulo efetivo de elasticidade,  $E_{ef}$ , é determinado, segundo (Moroder, 2016) pelas seguintes equações:

$$E_{ef,mxn} = mn \times \frac{(Gd)_{ef} \times l_{mxn}^2}{h \times b}$$

$$A_{ef,mxn} = l_{mxn} = \sqrt{\left(\frac{h}{m}\right)^2 + \left(\frac{b}{n}\right)^2}$$

Quando o espaçamento da subdivisão do painel não é regular como na Figura 4.47b, (ou seja, os painéis não têm comprimentos iguais), então a área efetiva,  $A_{ef}$ , e o módulo efetivo de elasticidade,  $E_{ef}$ , é determinado, segundo (Moroder, 2016) pelas seguintes equações:

$$E_{ef,ij} = \frac{(Gd)_{ef} \times l_{ij}^2}{h_j \times b_i}$$

$$A_{ef,ij} = l_{ij} = \sqrt{h_j^2 + b_i^2}$$

onde o índice,  $i$ , é o número de subdivisão ao longo da altura do painel e o índice,  $j$ , é o número da subdivisão ao longo da largura do painel.

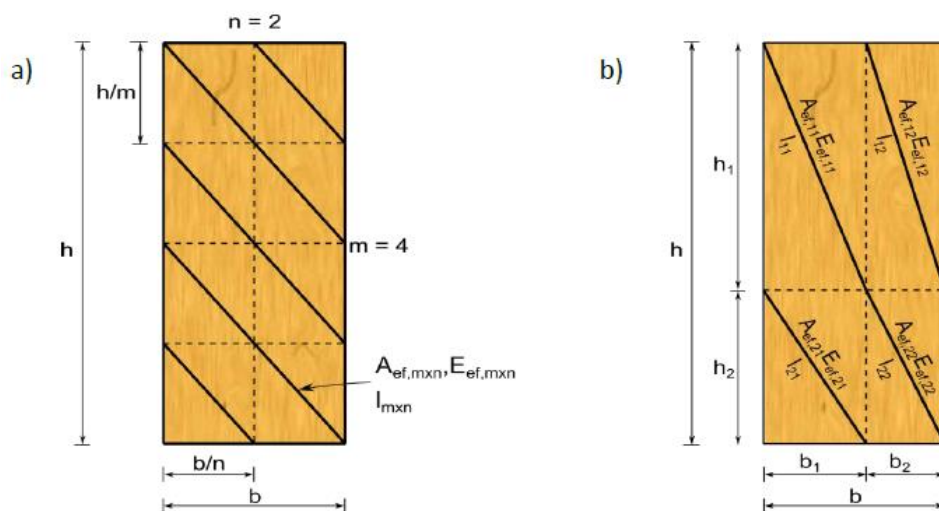


Figura 4.47 – Múltiplas diagonais. a) subdivisões  $m \times n$  regulares ou para b) subdivisões irregulares (Moroder, 2016).

Usando múltiplas diagonais, são necessários elementos adicionais nas treliças transversais e longitudinais. As propriedades das rigidezes das treliças são apuradas de forma a representar as contribuições para o comportamento global do diafragma.

No caso de um diafragma de madeira maciça, a rigidez axial do elemento da treliça transversal é muito maior do que a rigidez dos elementos ligadores e pode normalmente ser ignorada. Considerando uma subdivisão comum de 2 diagonais ao longo da largura do painel, o número de ligadores é multiplicado por (3-c) para ter em conta o número de linhas de ligadores necessárias para transferir as forças. No caso de uma única linha de ligadores ( $c = 1$ ), a rigidez do ligador é dobrada, uma vez que é partilhada entre dois painéis adjacentes. Para uma ligação deslizamento com duas linhas de ligadores ( $c = 2$ ), cada treliça transversal considera a rigidez de uma linha de ligadores.

$$K_{ef,transversal} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{E_{90} \times A'}{b}} + \frac{1}{(3-c) \times n' \times k_{ser\perp}}} \cong (3-c) \times n' \times k_{ser\perp}$$

onde, módulo de elasticidade perpendicular ao painel,  $E_{90}$ , secção transversal da treliça,  $A'$  ( $A' = h' \times d$ ), espessura do painel,  $d$ , largura longitudinal da treliça,  $b' = (b_i + b_{i+1})/2$ , largura transversal da treliça,  $h' = (h_i + h_{i+1})/2$ , número de ligadores ao longo  $h'$ , módulo de deslizamento dos ligadores perpendiculares ao bordo do painel

Isto é, para o cálculo da rigidez da treliça transversais, uma divisão de painéis de 4x2 (diagonal 4), Figura 4.48 e a Figura 4.49, segundo (Moroder, 2016), é calculado da seguinte forma:

$$K_{ef,transversal} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{4 \times (150 \times 975)}{525}} + \frac{1}{(3-1) \times 6.5 \times 3.0}} \cong 39N/mm$$

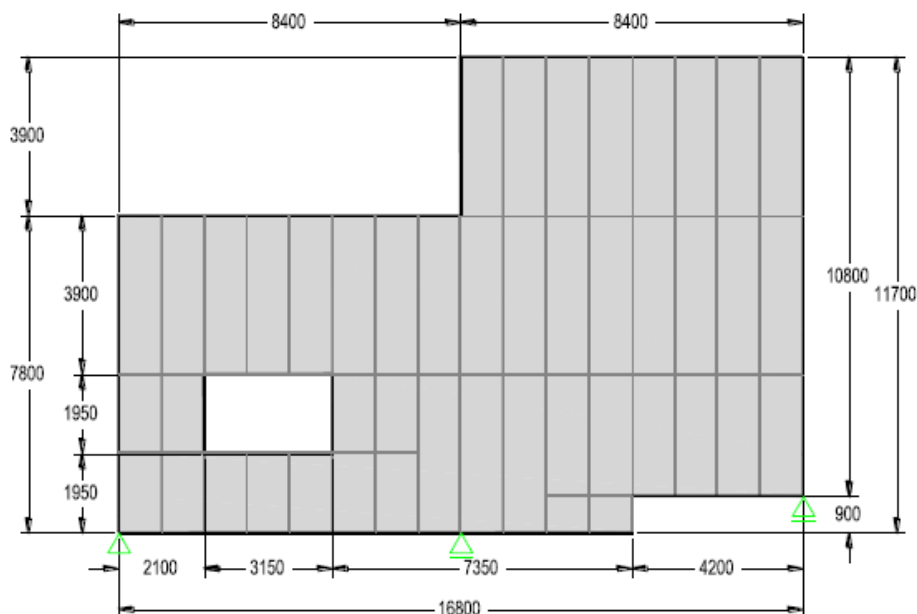


Figura 4.48 – Exemplo de um diafragma irregular com abertura e re-entrant de cantos (Moroder, 2016).

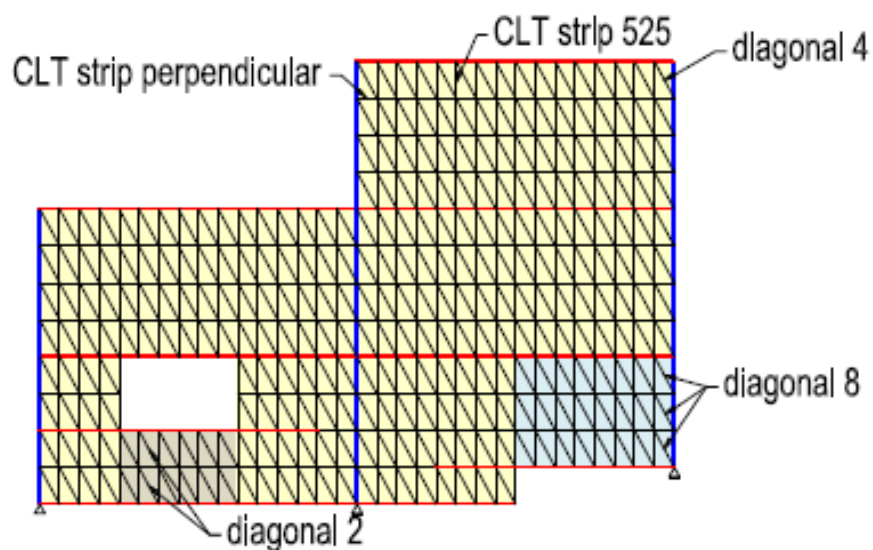


Figura 4.49 – Exemplo de diagonais para um modelo de treliças equivalentes possível (Moroder, 2016).

Tabela 4.14 Propriedades do painel:

CLT strip 525	$A = 525 \times 150 \text{ mm}^2$
	$E = 8,000 \text{ MPa}$
Ligadores	$s = 150 \text{ mm}$
	$K_{\text{ser}} = 3,000 \text{ N/mm}$



Se for usada uma análise de treliça com múltiplas diagonais, a de força de corte unitária no painel deve ser considerada como média em todas as diagonais.

Uma vez que os painéis de madeira maciça possuem uma rigidez axial relativamente elevada em comparação com os painéis de LTF, as tensões normais  $n_{xx}$  e  $n_{yy}$  ao longo das duas direções principais têm de ser consideradas. Além disso, os elementos de ligação não apenas transferem forças paralelas às extremidades do painel, mas também perpendiculares a eles. Ao dividir os painéis em múltiplas diagonais, como mostra na Figura 4.50, os elementos das treliças horizontais podem explicar estes efeitos, incluindo a rigidez do elemento de ligação perpendicular aos bordos do painel.

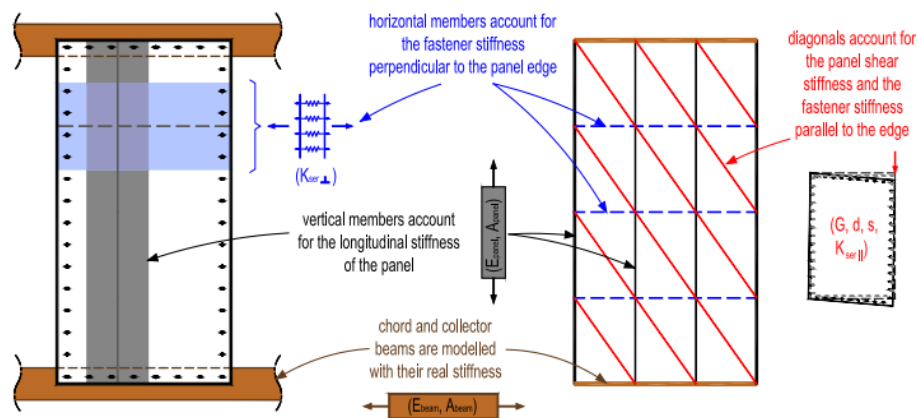


Figura 4.50 – Painel de diafragma maciço e sua idealização no modelo de treliça equivalente em caso de múltiplas diagonais (Moroder, 2016).

A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** mostra a análise FEM e o Equivalent Truss Method para um piso irregular feito de painéis CLT de 1,05 x 3,9 m, com cargas aplicadas na direção da página (Moroder, 2016).

Cada painel de diafragma foi modelado com 8 diagonais equivalentes (4x2). Os chord, strut e collector foram modelados com suas seções reais. As cargas foram aplicadas como cargas de linha aos elementos de treliça paralelos à direção de carga. Uma comparação das Figuras 8a e c mostra que as forças de corte unitárias podem ser previstas com precisão com a treliça equivalente. Também a flexibilidade do diafragma pode ser obtida de uma forma muito precisa, bem como as forças de reação (não ilustradas). As Figuras 8b e d mostram as forças de compressão e de tensão nas vigas chord e collector do FEM e da análise de treliça equivalente, respetivamente. Uma vez que as forças de tensão e de compressão são obtidas, assumindo uma secção de chords and collectores podem ser verificadas e suas ligações ou emendas podem ser

calculadas. Conhecer o corte unitário, a capacidade de fixação, a capacidade de corte do painel e a força de encurvadura (estes últimos raramente governam o projeto de diafragmas de madeira maciça) podem ser verificados.

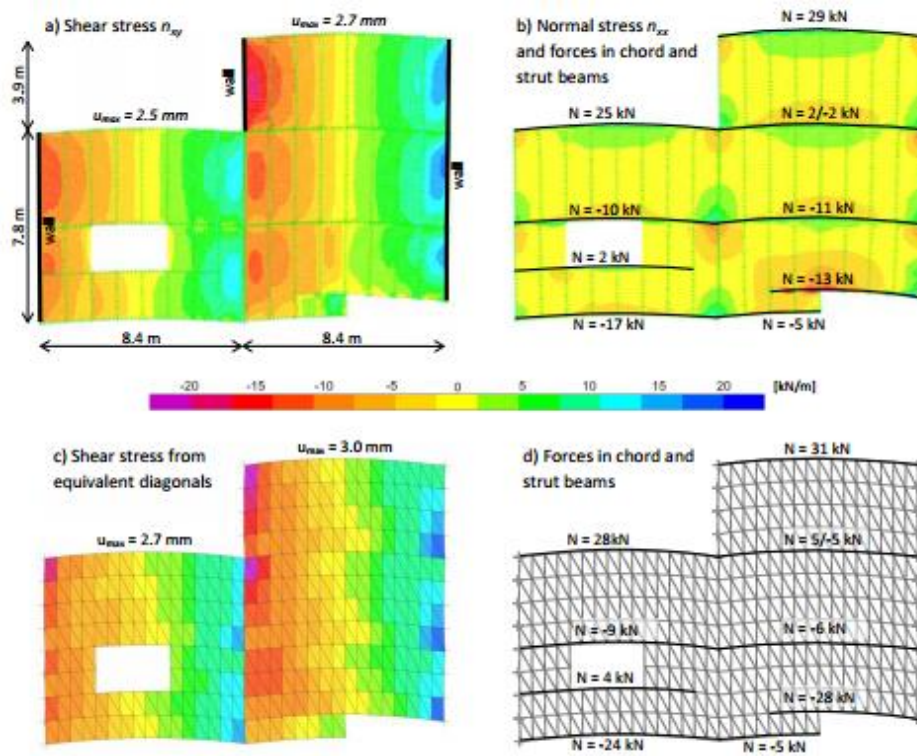


Figura 4. 51 – Distribuições de tensão de um diafragma irregular. a) tensões de corte  $n_{xy}$  (FEM); b) tensões normais  $n_{xx}$  e forças em “chord beams” e “strut beams” (FEM), c) tensões de corte (treliça equivalente) e d) forças em “chord beams” e “strut beams” (treliça equivalente) (Moroder, 2016).

Por fim, a deformação dos diafragmas de madeira, podemos determinar diretamente com método *Equivalent Truss Method*, no caso, de o diafragma for regular e espaçados entre dois suportes, a deformação pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\Delta = \Delta_{\text{bending}} + \Delta_{\text{shear}} + \Delta_{\text{fastener slip}} + \Delta_{\text{splice}}$$

$$\Delta_{\text{bending}} = \frac{5 \times W \times L^3}{192 \times E \times A \times H^2}$$

$$\Delta_{\text{shear}} = \frac{W \times L}{8 \times G \times H \times d}$$

$$\Delta_{\text{fastener slip}} = \frac{1}{4} \times \delta(c_1 + c_2 \alpha) m$$

$$\Delta_{\text{splice}} = \frac{\Sigma(\delta_s \times x)}{2 \times H}$$

- $W$  é a carga lateral uniformemente distribuída aplicada ao diafragma;
- $L$  é comprimento do diafragma;
- $E$  é o módulo elástico de elasticidade dos membros corda;
- $A$  é a área de secção transversal da corda;
- $H$  é a distância entre membros da corda (altura do diafragma);
- $d$  é a espessura do painel de revestimento;
- $G$  é o módulo de corte;
- $m$  é o número de painéis de revestimento ao longo do comprimento do membro de corda;
- $\alpha$  é a relação do aspeto do painel  $\alpha = b / h$  ( $b$  é o comprimento na direção da corda);
- $\delta$  é o deslizamento dos ligadores na ligação de painel-a-painel no diafragma nos apoios do diafragma a partir das disposições de código ou dados experimentais;
- $x$  é a distância da ligação a partir da origem;
- $\delta_s$  é o deslizamento da ligação na corda;
- $C_i$  é o número de linhas de ligações ao longo do bordo do painel de revestimento.

#### 4.12. TimberTech vs Calculatis

Nesta secção, é feita algumas verificações dos programas TimberTech e a Stora Enso, com o intuito de comparar as várias verificações entre os dois programas.

Os elementos estruturais comparativos, para o dimensionamento é um pavimento em CLT e uma parede em CLT, ver as seguintes tabelas.

Tabela 4.15 – Características do piso.

Piso	
Painel	CLT 120 L3s
Espessura	120 (40x40x40) mm
Classe	C24 abeto
Cl.de serviço	1
Comprimento	10 m
Largura	5 m
Tipologia	Piso interno

Tabela 4.16 – Verificações do piso.

	TimberTech		Stora Enso	
Transverso (kN)	21.14		19.85	
Momento (kN/m)	21.21		19.48	
$\sigma_{m,d}$ (Mpa)	9.43		8.43	
Verificação à Flexão	71%		58%	
$\sigma_{v,d}$ (Mpa)	0.24		0.23	
corte	11%		10%	
$\sigma_{R,d}$ (Mpa)	0.24		0.23	
Verificação ao Rolling shear	35%		33%	
Verificação à deformação inst.	14.56 mm <sup>1</sup>	87%	13.8 mm <sup>2</sup>	83%
Deformação final net	-		15.3 mm <sup>3</sup>	77%
Verificação à deformação final	19.84 <sup>4</sup> mm	99%	20.7 <sup>5</sup> mm	82%

<sup>1</sup> ( $W_{inst}$ )

<sup>2</sup> ( $W_{char}$ )

<sup>3</sup> ( $W_{char} + W_{q,p} * k_{def}$ )

<sup>4</sup> ( $W_{inst} + (1 + k_{def})$ )

<sup>5</sup> ( $W_{q,p} * (1 + k_{def})$ )

Tabela 4.17 – Características da parede.

Parede	
Painel	CLT 100 C3s
Espessura	100 (30x40x30) mm
Classe	C24 abeto
Cl.de serviço	1
Altura	2.8 m
Largura	5 m
Tipologia	Parede interna

Tabela 4.18 – Verificações do parede.

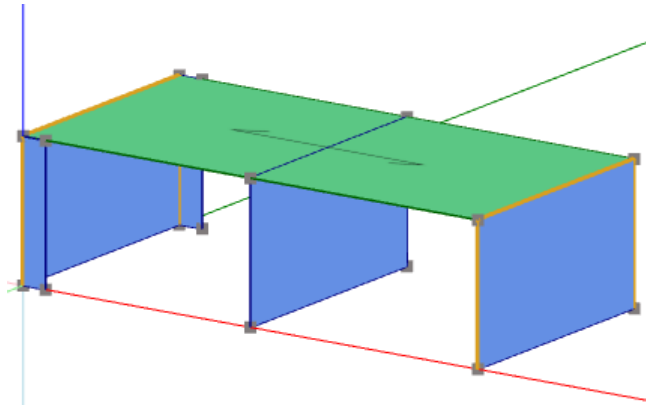
	TimberTech	Stora Enso
$K_c$	0.45	0.626
$\sigma_{c,0,d}$ (MPa)	0.88	0.88
$\sigma_{m,0,d}$ (MPa)	0	0
$f_{c,0,d}$ (MPa)	-	11.58
$f_{c,0,k}$ (MPa)	21	-
Verificação à encurvadura	14%	12% <sup>1</sup>
$K_{C,90}$	1.5	-
$\sigma_{c,90,k}$ (MPa)	0.53	-
Verificação à compressão per. ao fio	20%	-
$\sigma_d$ (Mpa)	0.02	0
Verificação ao corte no plano	1%	0%
$\sigma_{T,d}$ (Mpa)	0.01	0
Verificação à torsão no plano	0%	0%

<sup>1</sup>Esta diferença existe porque o  $k_c$  não é igual.

Como o programa TimberTech não permite calcular elementos simples, então dimensionou-se uma estrutura simples no programa Timbertech, ver Figura 4. 52.

Uso de três paredes, uso de paredes nos eixos x e y em que cada parede deve ter um comprimento maior ou igual que 300mm e o uso de cobertura em todas as paredes, são exigências do programa TimberTech.

Os cargas inseridos no programa Claculaties em cada elemento simples, são cargas retiradas do programa Timbertech é por isso que existe algum erro entre os dois programas no momento e nos esforços. Além disto a influência dos elementos de ligação ajuda a não conformidade dos valores. Tendo em conta, estes fatores pode-se validar os dois programas.



*Figura 4. 52 – Estrutura simples, TimberTech.*

No anexo II, mostro as tabelas das verificações de ambos os programas.

## 5. EXEMPLO DE UMA MORADIA CLT

Neste capítulo pretende-se, utilizando já estruturas completas, avaliar as potencialidades do programa TimberTech nos dimensionamentos de construções em CLT. Para o efeito foram selecionados dois casos de estudo, nomeadamente, uma habitação térrea e um edifício com quatro pisos.

### 5.1. Habitação térrea

O primeiro caso de estudo, é uma moradia familiar com várias áreas amplas, de um piso, com 330 m<sup>2</sup>, composta por três quartos, três quartos de banho, duas salas (uma sala de estar e uma sala de jantar) e uma cozinha.

Nesta moradia, focou-se nas verificações aos pisos de CLT, para a resistência à flexão, para o corte, para o corte torsional nas camadas transversais e para as deformações (SLS) e também abordou-se, as verificações às paredes de CLT, para a encurvadura das paredes, para a compressão perpendicular às fibras e para o corte (carga no plano).

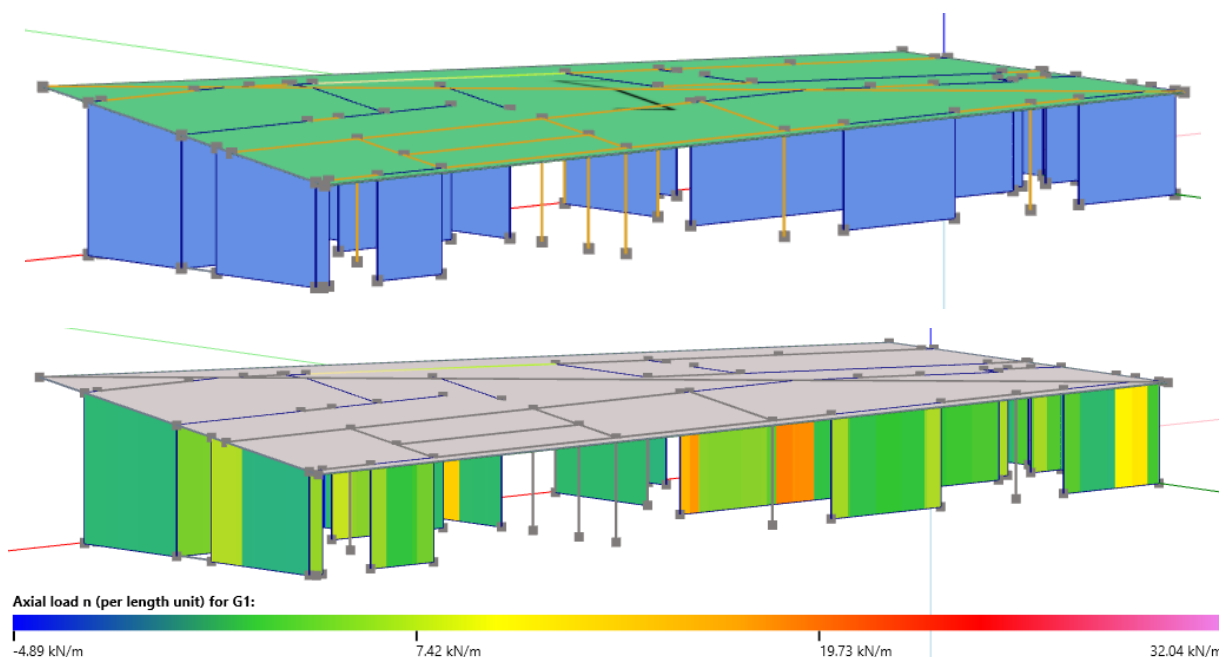


Figura 5.1 – Modelação do edifício (superior) e distribuição das tensões axiais nas paredes (carga permanente G1) (inferior).

A modulação não trouxe complicações e muito menos nas verificações dos elementos estruturais, devido à vasta biblioteca, ver Figura 5.2, que o programa dispõe, oferecendo ao usuário muitas soluções para a modulação.

Foi escolhido para as paredes e a cobertura painéis CLT da fabricante Stora Enso, de 3 camadas e 5 camadas, com espessura de 60 mm (3 camadas) na maioria das paredes e uma maior espessura na cobertura com 140 mm (5 camadas). Os pilares e as vigas são compostos por madeira lamelada colada combinada; utilizando duas vigas HEB300 para os vãos grandes, ver Figura 5.3.

Como é possível verificar no modelo, as paredes não têm qualquer tipo de lintéis nas aberturas (portas ou janelas), isto porque o programa TimberTech não possui nenhuma ferramenta para as aberturas destas. Mas, quando olhamos para a cláusula 9.2.4.2(6), “*deverá considerar-se que os painéis de parede com uma abertura para a colocação de uma porta ou de uma janela não contribuem para a capacidade resistente às forças horizontais*” (está sempre do lado da segurança).

As ligações utilizadas para forças de tensão (hold-down), ver Figura 5.4 e para forças de corte (angle brackets), ver Figura 5.5.

No anexo III, é transcrito do modelo de cálculo, algumas verificações e processos de cálculo do programa TimberTech.

Name	Manufacturer	Layers number	Nominal thickness [mm]	Layer thicknesses [mm]
CLT 90 L3s	Stora Enso CLT	3	90	30 - 30 - 30
CLT 100 L3s	Stora Enso CLT	3	100	30 - 40 - 30
CLT 120 L3s	Stora Enso CLT	3	120	40 - 40 - 40
CLT 100 L5s	Stora Enso CLT	5	100	20 - 20 - 20 - 20 - 20
CLT 120 L5s	Stora Enso CLT	5	120	30 - 20 - 20 - 20 - 30
CLT 140 L5s	Stora Enso CLT	5	140	40 - 20 - 20 - 20 - 40
CLT 160 L5s	Stora Enso CLT	5	160	40 - 20 - 40 - 20 - 40
CLT 180 L5s	Stora Enso CLT	5	180	40 - 30 - 40 - 30 - 40
CLT 200 L5s	Stora Enso CLT	5	200	40 - 40 - 40 - 40 - 40
CLT 160 L5s-2	Stora Enso CLT	5	160	60 - 40 - 60
CLT 180 L7s	Stora Enso CLT	7	180	30 - 20 - 30 - 20 - 30 - 20 - 30
CLT 200 L7s	Stora Enso CLT	7	200	20 - 40 - 20 - 40 - 20 - 40 - 20
CLT 240 L7s	Stora Enso CLT	7	240	30 - 40 - 30 - 40 - 30 - 40 - 30
CLT 220 L7s-2	Stora Enso CLT	7	220	60 - 30 - 40 - 30 - 60

Figura 5.2 – Biblioteca para pavimentos de painéis CLT.



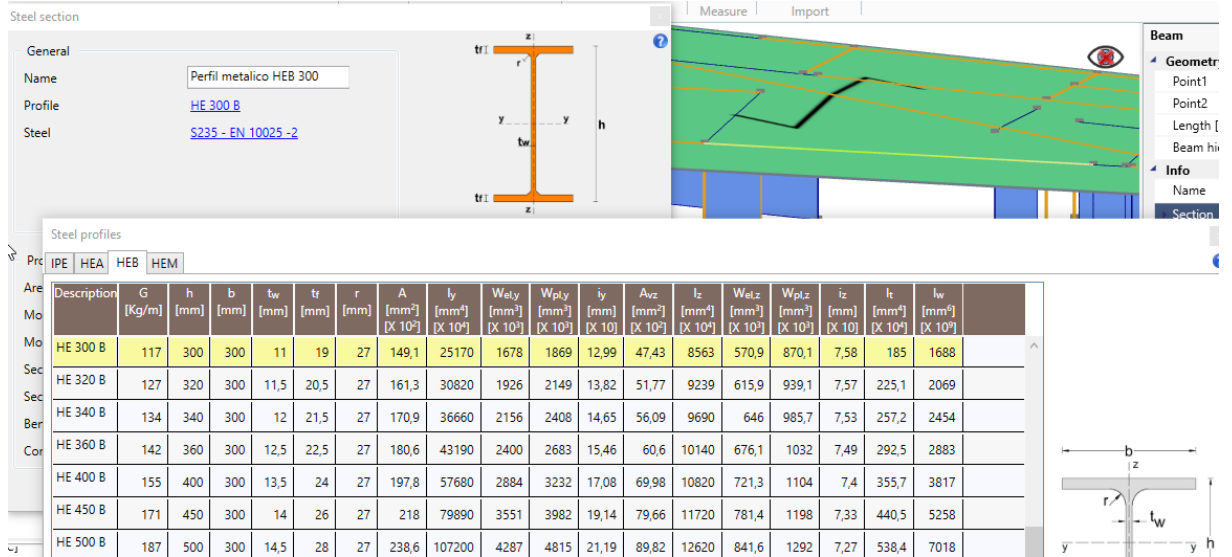


Figura 5.3 – Biblioteca para perfis metálicos.

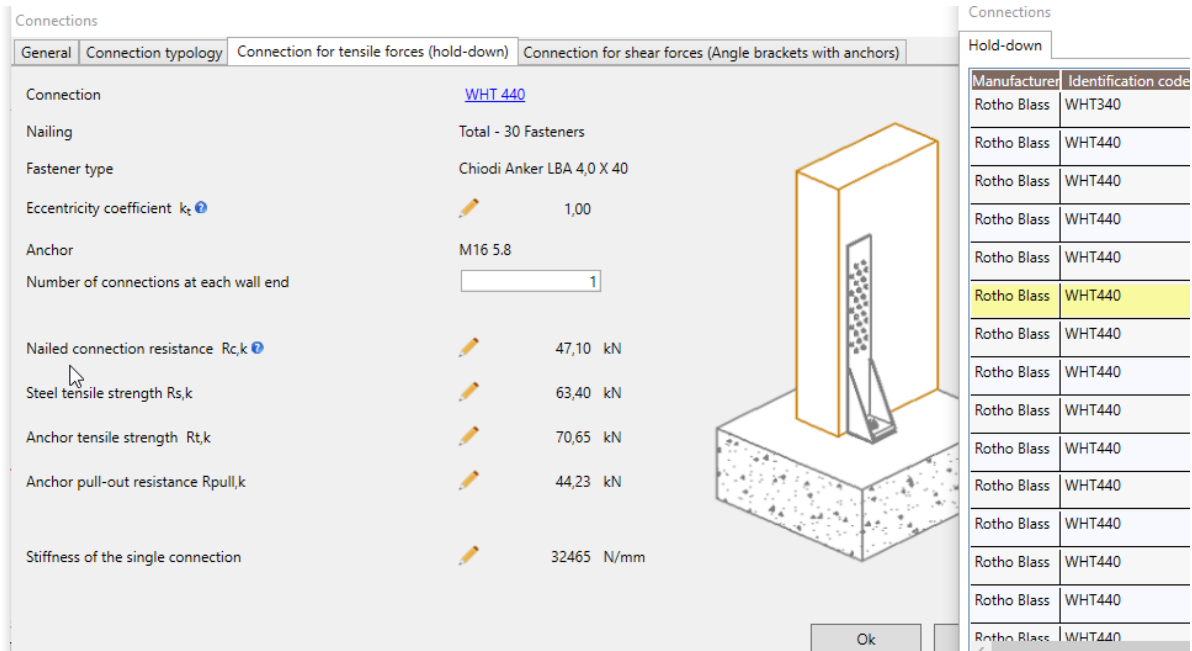


Figura 5.4 – Bibliotecas e características das ligações hold-down.

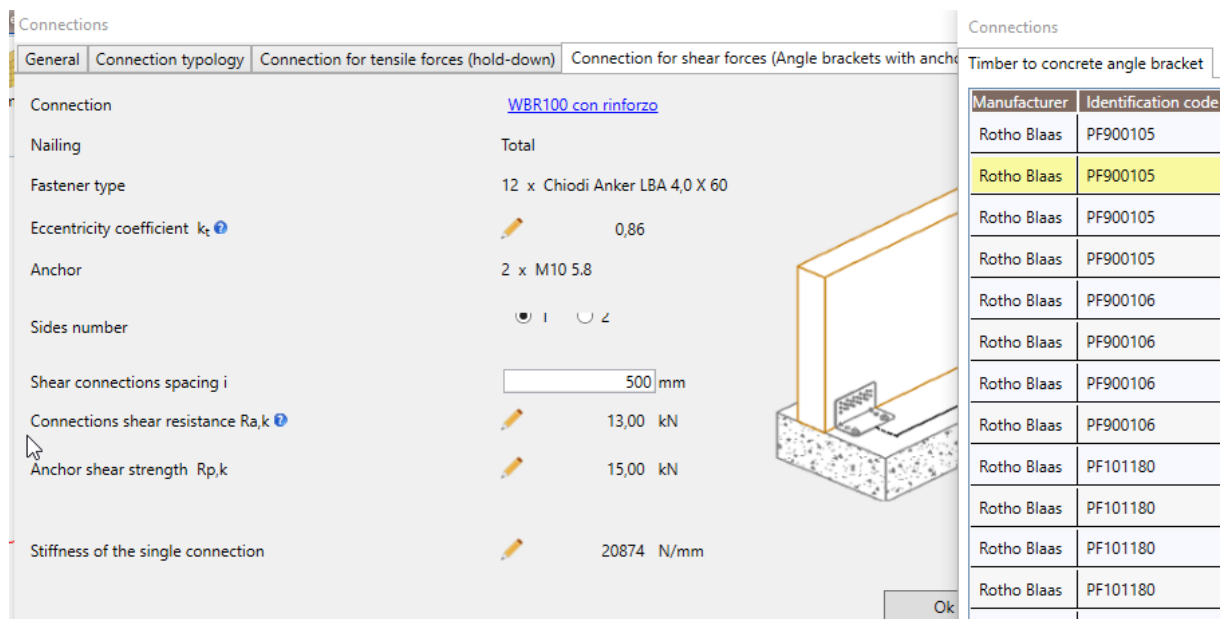
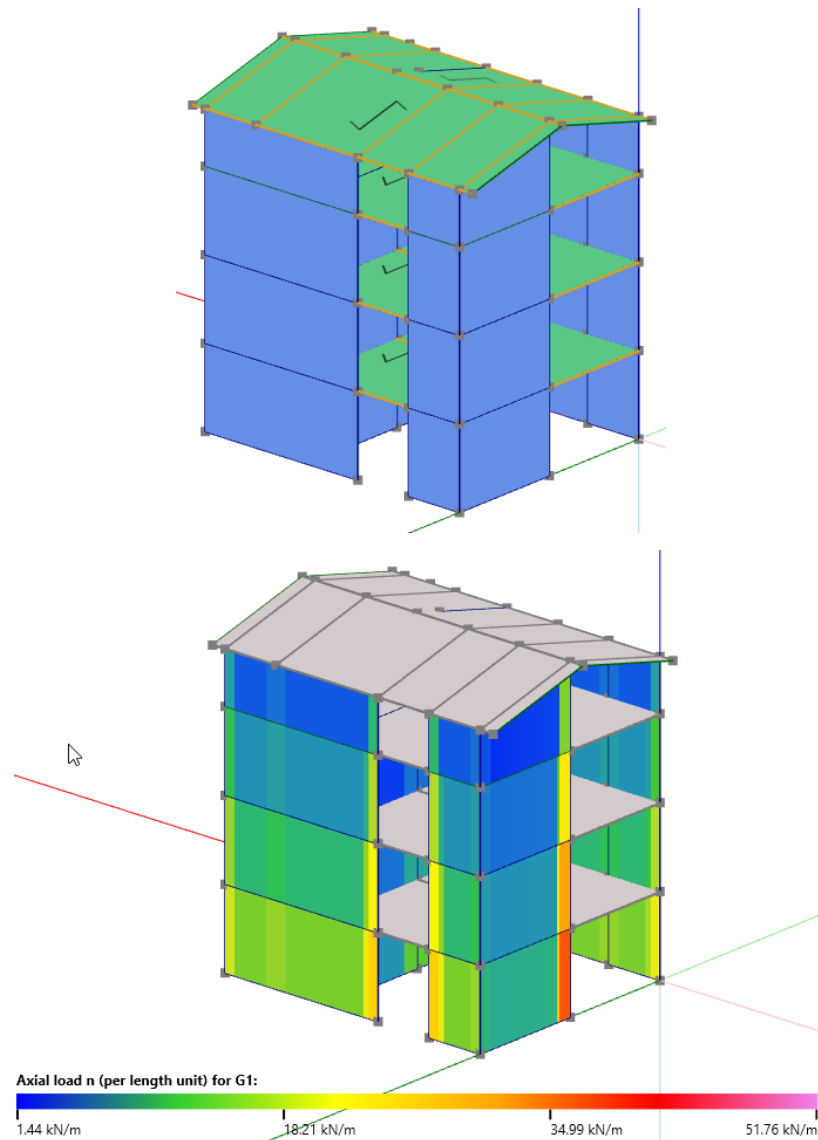


Figura 5.5 – Bibliotecas e características das ligações angle brackets.

## 5.2. Edifício de quatro pisos

O segundo caso de estudo, é um edifício de quatro pisos. É um exemplo, de uma construção em altura e que muitas vezes as verificações mais exigentes são as ações horizontais (pisos) e as verificações das ações verticais (paredes).

Com este exemplo demonstra-se que é possível a construção de um edifício de madeira com 4 pisos, usufruindo das verificações imposta pelas normas europeias, tanto a nível estático como nível dinâmico, em especial, para as combinações de ações sísmicas e combinações de ações verticais.



*Figura 5.6 – Modelação do edifício (superior) e distribuição das tensões axiais nas paredes (carga permanente G1) (inferior).*

A simplicidade que o programa “interage” com o usuário, elimina qualquer obstáculo que possa trazer complicações ao dimensionamento.

Foi escolhido para as paredes e a cobertura painéis CLT da fabricante Stora Enso com 5 camadas, de espessura para as paredes de 160 mm e de espessura para a cobertura e pisos de 140 mm. As vigas são compostas por madeira lamelada colada combinada e não existem pilares;

As ligações utilizadas para forças de tensão (hold-down) e para forças de corte (angle brackets), são iguais ao 1º exemplo.

Nas seguintes tabelas, são transcritos modelos de cálculo, verificações e processos de cálculo do programa TimberTech. As verificações estudadas neste caso de estudo, foram focadas nas verificações para as paredes em CLT e para os pisos em CLT, com especial atenção para a análise modal.

Tabela 5.1 – Encurvadura nas paredes CLT, mais solicitados.

Nome da parede	Secção	h [m]	$A_{net}$ [mm <sup>2</sup> /m]	$J_{eff}$ [mm <sup>4</sup> /m]	$k_c$	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{c,0,k}$ [MPa]	$f_{m,k}$ [MPa]	$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	$\sigma_{m,d}$ [MPa]	Verificação
Parede 145	XLAM 160 mm - 5 strati	1.8	120000	209628041	0.92	ULS 64	1	0.6	1.25	23	30	0.10	0.00	1%
Parede 79	XLAM 160 mm - 5 strati	2.8	120000	255716236	0.74	ULS 65	1	0.8	1.25	23	30	1.49	0.00	14%
Parede 4	XLAM 160 mm - 5 strati	2.8	120000	255716236	0.74	ULS 65	1	0.8	1.25	23	30	2.27	0.00	21%
Parede 13	XLAM 160 mm - 5 strati	1.8	120000	209628041	0.92	ULS 64	1	0.6	1.25	23	30	0.17	0.00	2%

Tabela 5.2 – Compressão perpendicular ao fio em paredes CLT, mais solicitados

Nome da parede	Secção	$A_{full}$ [mm <sup>2</sup> /m]	$k_{c,90}$	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{c,90,k}$ [MPa]	$\sigma_{c,90,d}$ [MPa]	Verificação
Parede 79	XLAM 160 mm - 5 strati	160000	1.5	ULS 65	1	0.8	1.25	2.5	1.12	43%
Parede 30	XLAM 160 mm - 5 strati	160000	1.5	ULS 65	1	0.8	1.25	2.5	0.83	32%
Parede 34	XLAM 160 mm - 5 strati	160000	1.5	ULS 65	1	0.8	1.25	2.5	0.60	23%
Parede 8	XLAM 160 mm - 5 strati	160000	1.5	ULS 65	1	0.8	1.25	2.5	1.20	46%

Tabela 5.3 – Corte no plano em paredes CLT, mais solicitados

Nome da parede	Secção	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{v,k}$ [MPa]	$T_d$ [MPa]	Verificação - Corte	$M_T$ [Nmm]	$W$ [mm <sup>3</sup> ]	$f_{T,k}$ [MPa]	$T_{T,d}$ [MPa]	Verificação - Torsão
Parede 75	XLAM 160 mm - 5 strati	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	4	0.07	2%	16377	1125000	2.5	0.01	1%
Parede 76	XLAM 160 mm - 5 strati	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	4	0.07	2%	16377	1125000	2.5	0.01	1%
Parede 77	XLAM 160 mm - 5 strati	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	4	0.07	2%	16377	1125000	2.5	0.01	1%
Parede 78	XLAM 160 mm - 5 strati	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	4	0.18	5%	41134	1125000	2.5	0.04	2%

Tabela 5.4 – Flexão nos pisos, mais solicitados

Nome do psio	Secção	$M_{3-3}$ [kNm]	$J_{eff}$ [mm <sup>4</sup> ]	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{m,d}$ [MPa]	$\sigma_{m,d}$ [MPa]	Verificação
Piso 11	CLT floor 1	7.52	197516587.67	ULS 64	1	0.6	1.25	7.68	2.54	33%
Piso 12	CLT floor 1	7.52	197516587.67	ULS 64	1	0.6	1.25	7.68	2.54	33%
Piso 8	CLT floor 1	13.31	189386916.58	ULS 65	1	0.8	1.25	10.24	4.53	44%
Piso 4	CLT floor 1	13.31	189386916.58	ULS 65	1	0.8	1.25	10.24	4.53	44%
Piso 5	CLT floor 1	13.31	189386916.58	ULS 65	1	0.8	1.25	10.24	4.53	44%

Tabela 5.5 – Corte nos pisos, mais solicitados

Nome do piso	Secção transversal	$V_2$ [kN]	$J_{eff}$ [mm <sup>4</sup> ]	Comb.	Serviço de classe	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{v,d}$ [MPa]	$\tau_{v,d}$ [MPa]	Verificação	$f_{R,d}$ [MPa]	$\tau_{R,d}$ [MPa]	Verificação
Piso 11	CLT floor 1	7.26	197516587.67	ULS 64	1	0.6	1.25	1.54	0.07	5%	0.38	0.07	18%
Piso 12	CLT floor 1	7.26	197516587.67	ULS 64	1	0.6	1.25	1.54	0.07	5%	0.38	0.07	18%
Piso 8	CLT floor 1	16.56	189386916.58	ULS 65	1	0.8	1.25	2.05	0.16	8%	0.51	0.16	30%
Piso 4	CLT floor 1	16.56	189386916.58	ULS 65	1	0.8	1.25	2.05	0.16	8%	0.51	0.16	30%
Piso 5	CLT floor 1	16.56	189386916.58	ULS 65	1	0.8	1.25	2.05	0.16	8%	0.51	0.16	30%

Tabela 5.6 – Diafragmas do edifício.

Diafragma	Altura máxima [m]	xG [m]	yG [m]	Massa i [kg]
1	2.80	5.15	4.08	38782
2	5.60	5.15	4.08	38782
3	8.40	5.05	4.03	35798
4	10.70	4.96	3.99	28898

Tabela 5.7 – Análise modal

Modo	Período [s]	Frequência [Hz]	$M_x$ [%]	Sum $M_x$ [%]	$M_y$ [%]	Sum $M_y$ [%]	$M_z$ [%]	Sum $M_z$ [%]
Modo 1	0.59	1.71	1.51	1.51	75.47	75.47	1.06	1.06
Modo 2	0.55	1.82	62.75	64.26	2.18	77.65	13.39	14.44
Modo 3	0.40	2.50	15.18	79.44	0.07	77.71	64.49	78.94
Modo 4	0.24	4.11	0.03	79.47	9.66	87.38	0.77	79.70
Modo 5	0.19	5.26	7.26	86.74	0.55	87.93	2.64	82.35
Modo 6	0.16	6.35	1.56	88.29	4.88	92.80	1.12	83.47
Modo 7	0.14	7.30	1.72	90.01	1.52	94.32	6.13	89.60
Modo 8	0.12	8.08	1.49	91.50	3.84	98.17	1.72	91.32



## 6. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

### 6.1. CONCLUSÕES GERAIS

As investigações que são realizadas nas estruturas em CLT, têm conseguido abranger a maior parte das dúvidas ou questões que são levantadas pelos projetistas. Mas ainda existem várias lacunas em várias investigações, que tornam algumas investigações incompletas, que fazem com que a não exploração do todo o potencial de painéis CLT. Porém, as investigações são, sem dúvida, uma grande ajuda para o dimensionamento destes painéis, pois todo o dimensionamento para estruturas de CLT, referidas nesta dissertação, estão sempre do lado da segurança e sempre a serem atualizadas.

O fator de segurança parcial,  $\gamma_M$ , e os fatores de modificação,  $k_{mod}$ , segundo a EN 16351 para a madeira lamelada colada cruzada têm valores iguais aos valores da madeira lamelada colada. Já para o factor de deformação,  $k_{def}$ , a EN 16351, indica valores superiores comparativamente à madeira lamelada colada e para painéis com mais ou igual a sete camadas, a deformação ainda é mais acentuada.

A rigidez de flexão pode ser calculada pelo anexo B do EC5, em que o fator  $\gamma_i$ , tem em conta as componentes  $G_R$  (módulo de rigidez do rolling shear) e  $b$  (espessura total do painel CLT).

Mestek (2011) assume uma distribuição da carga de compressão perpendicular ao longo de um ângulo  $\alpha=35^\circ$ , para a madeira lamelada colada cruzada, diferente á madeira lamelada colada, onde o EC5 indica que a distribuição das cargas é efetuado com um incremento de 30 mm para cada aresta.

Esta dissertação elimina algumas barreiras para o dimensionamento de painéis CLT, bem como harmonizar e registar várias informações realizadas que possibilitam obter alguns resultados das várias investigações, ou seja, simplificar, esclarecer e orientar um engenheiro de estruturas. O programa TimberTech modela estruturas de paredes de madeira de corte de CLT ou sistemas de paredes entramadas com modelos numéricos desenvolvidos através de pesquisas e investigações. Estes modelos numéricos implementados no programa TimberTech, permite analisar corretamente os vários modelos e aliviar um fardo ao usuário.

## **6.2. PROPOSTAS PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS**

Ao longo da pesquisa para esta dissertação, existe alguma curiosidade por parte de várias empresas e de vários engenheiros e arquitetos acerca do uso de painéis CLT em estruturas de madeira, bem como sobre a utilização de elementos compósitos em painéis CLT e do uso de pré-esforço. Estas são algumas das possíveis hipóteses que poderiam encorajar outros voos relacionados com a utilização da madeira, principalmente os painéis CLT. Este último aspeto (pré-esforço) é ainda é uma área totalmente desconhecida nas madeiras.

As ligações para elementos CLT é ainda uma área com grande investigação e devemos olhar para as ligações como um ponto de ligação entre o “desconhecimento” e o futuro das estruturas de madeira, especialmente para os painéis CLT.

Para um futuro próximo, o programa TimberTech conseguirá realizar verificações à vibração nos pisos e realizar verificações ao incêndio. Uma área que encarece de algum consenso e, especialmente, uma maior investigação no que toca à vibração nos pisos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bogensperger, T. ., Moosbrugger, T. ., & Silly, G. . (2010). Verification of CLT-plates under loads in plane. In *11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010*.
- Bogensperger, T., & Augustin, M. (2011). Properties of clt-panels exposed to compression perpendicular to their plane. In *CIB W18, 44th Meeting*. Alghero, Italy.
- BSI. (2009). *BS NA EN 1995-1-1 (2008): UK National Annex to Eurocode 5. Design of timber structures. General. Common rules and rules for buildings NI*.
- BSI. (2012). *PD 6693-1: 2012 - Recommendations for the design of timber structures to Eurocode 5: Design of timber structures. General. Common rules and rules for buildings*.
- CEN. (2009). *EN 338 - Structural timber - Strength classes*. Brussels.
- CEN. (2013). *EN 14080 Timber structures — Glued laminated timber and glued solid timber — Requirements*. Bruxelles.
- CEN. (2015). *prEN 16351 - Timber structures - Cross laminated timber - Requirements Structures*. Bruxelles.
- COST. (2016). *Cross Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings*. (Andreas Falk, Philipp Dietsch, & Joachim Schmid, Eds.).
- Council of Forest Industries of British Columbia. (1970). *Fir Plywood Web Beam Design* (COFI). London.
- ETA-06/0138. (2011). *KLH - Massivholzplatten: Solid wood slab elements to be used as structural element in buildings*, Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), 2011, valid until 30.06.2016.
- Flaig, M., & Blaß, H. J. (2012). *Stabförmige Bauteile aus Brettsperrholz*.
- Flaig, M., & Blass, H. J. (2013). Shear strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction - Working Commission W18 - Timber Structures*, 243–258.
- FPInnovations. (2011). Structural Performance and Design of CLT Building. In *CLT Symposium and Workshop*. Moncton,NB.
- Harris, R., Ringhofer, A., & Schickhofer, G. (2014). *Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*.
- IPQ. (2002). *NP EN 1194:2002 - Estruturas de Madeira – Madeira lamelada colada – Classes de resistência e determinação dos valores característicos*.
- Kessel, M. H., & Schönhoff, T. (2001). *Entwicklung eines Nachweisverfahrens für Scheiben auf der Grundlage von Eurocode 5 und DIN 1052 neu* (“Development of a design

- methodology for diaphragms based on Eurocode 5 and DIN1052:2008*) (Fraunhofer). Braunschweig, Germany.
- Ministero delle Infrastrutture, Ministro dell'interno, & Capo del dipartimento della protezione civile. (2008). NTC 2008-Decreto Ministeriale 14/1/2008 - norme tecniche per le costruzioni, 428. <http://doi.org/10.1515/9783110247190.153>
- Moroder, D. (2016). *Floor diaphragms in multi-storey timber buildings*.
- Portilame. (2016). Madeira Lamelada Colada. Retrieved August 2, 2016, from <http://www.portilame.com/pt/5-materiais/3-madeira-lamelada-colada-mlc/>
- Steiger, R., & E Gehri. (2010). Interaction of shear stresses and stresses perpendicular to the grain. In *International Network on Timber Engineering Research, 44th Meeting*. Alghro, Italy.
- Stora Enso. (2012). A Shell construction. Retrieved from <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Shell-construction-EN.pdf>
- Tomasi, R. (2015). Design of CLT wall and floor to resist lateral and gravity loads. In *CLT Wood Design Seminar*.
- Young, WC., Budynas, R. J. (2002). *Roark's Formulas for Stress and Strain* (7<sup>th</sup> edition). McGraw-Hill.

---

## ANEXOS

### Anexo I – Cálculo do programa TimberTech relativo ao corte no plano

As tensões internas de um elemento CLT, submetido a forças de corte no plano, levam à influência do material, através de dois diferentes mecanismos - tensão de corte nas placas (mecanismo I) e tensões de torção nas interfaces da colagem (mecanismo II).

#### Mecanismo I - corte

A tensão de corte interno pode ser avaliada de seguinte maneira:

$$\tau_z = \frac{v_2}{\sum t_{i,ext}}$$

$$\tau_y = \frac{v_2}{\sum t_{i,int}}$$

sendo que:

- $v_2$  corte por metro linear que atua sobre o elemento de CLT
- $t_{i,ext}$  espessura da camada  $i$  na orientação paralela às camadas externas
- $t_{i,int}$  espessura da camada  $i$  na orientação paralela às camadas internas
- $\tau_z$  tensão de corte atuando sobre as camadas que têm uma orientação paralela às camadas externas
- $\tau_y$  tensão de corte atuando sobre as camadas que têm uma orientação paralela às camadas internas

A tensão usada para a verificação é a máxima entre os dois:

$$\tau_d = \max(\tau_z; \tau_y)$$

A seguinte expressão deve ser satisfeita:

$$\tau_d \leq f_{v,lastra,d}$$

O valor de cálculo da resistência ao corte,  $f_{v,d}$ , é calculado por:

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M}$$


---

### Mecanismo II – torção

As tensões de torção interna podem ser avaliadas sobre o momento de torção interna,  $M_T$ , e o valor do módulo da secção torsional,  $W$ , da seguinte maneira:

$$\tau_{T,d} = \frac{M_T}{W} \leq f_{T,d}$$

O valor máximo do momento de torção interna,  $M_T$ , entre as camadas ortogonais coladas pode ser calculado pela expressão proposta pela entidade de Aprovação Técnica Europeia (ETA):

$$M_T = \frac{v_2 \cdot a^2}{n_{camadas-1}}$$

O valor máximo do momento de torção interna,  $M_T$ , com as interfaces coladas é avaliada de acordo com o modelo proposto por “*Mauro Andreolli, Roberto Tomasi, Andrea Polastri, investigação experimental sobre o comportamento no plano de elementos de madeira em secção laminados CIB-W18 Meeting 2012*”. A expressão é a seguinte:

$$M_T = \tau_z \cdot a^2 \cdot t_{hor}$$

O valor do módulo da secção torsional,  $W$ , das interfaces coladas pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$W = \frac{a^3}{3}$$

em que:

$a$  largura média

A seguinte expressão deve ser satisfeita, sendo  $f_{T,d}$  o valor de cálculo da resistência à torção de interfaces coladas:

$$f_{T,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{T,k}}{\gamma_M}$$

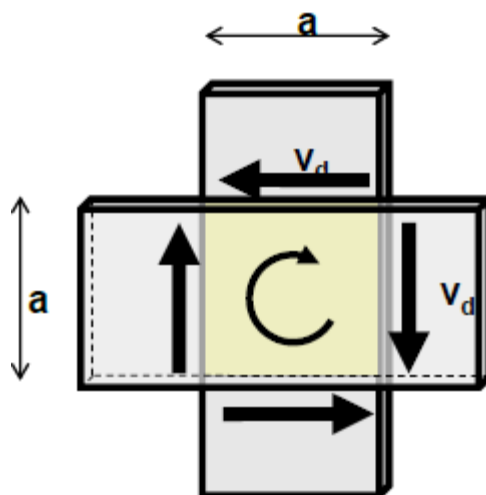


Figura A.1 – Ilustração do mecanismo de rotura de torção nas superfícies de cruzamento, (Tomasi, 2015).

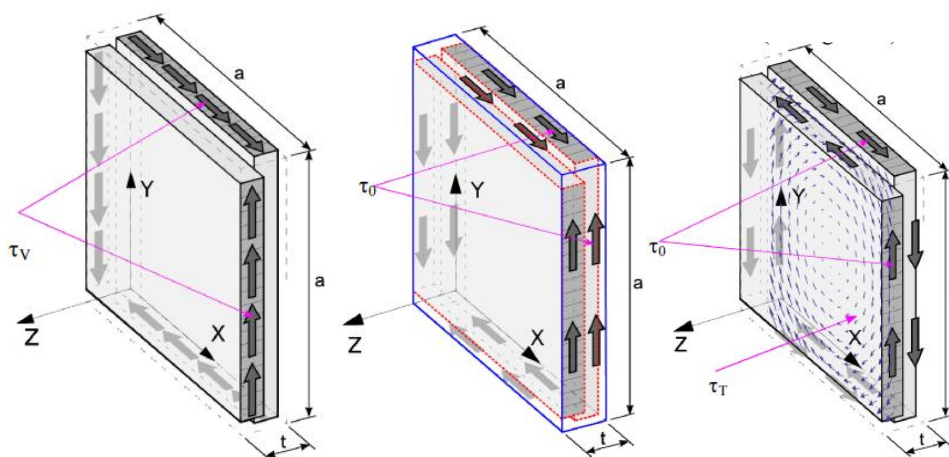


Figura A.2 – Distribuição real do esforço de corte na RVSE (esquerda), tensões normais de corte,  $\tau_0$ , em RVSE (centro), tensões de torção na interface de colagem,  $\tau_T$ , RVSE (direita), (Bogensperger et al., 2010).

## Anexo II – TimberTech vs Stora Enso

flexural stress analysis						58 %
$M_d =$	-	kNm	$f_{m,k} =$	24.00	N/mm <sup>2</sup>	
	19.48					
$\sigma_{m,d} =$	8.43	N/mm <sup>2</sup>	$<$	$f_{m,d} =$	14.57	N/mm <sup>2</sup> ✓
shear stress analysis						10 %
$V_d =$	19.85	kN	$f_{v,k} =$	4.00	N/mm <sup>2</sup>	
$\tau_{v,d} =$	0.23	N/mm <sup>2</sup>	$<$	$f_{v,d} =$	2.21	N/mm <sup>2</sup> ✓
rolling shear analysis						33 %
$V_d =$	19.85	kN	$f_{r,k} =$	1.25	N/mm <sup>2</sup>	
$\tau_{r,d} =$	0.23	N/mm <sup>2</sup>	$<$	$f_{r,d} =$	0.69	N/mm <sup>2</sup> ✓
initial deflection [ $w_{char}$ ]						
field	dist.	limit	$w_{limit}$	$w_{calc.}$	ratio	
	[m]	[-]	[mm]	[mm]		
1	2.25	1/300	16.7	13.8	83 %	
2	2.75	1/300	16.7	13.8	83 %	
final deflection [ $w_{char} + w_{q.p.} \cdot k_{def}$ ]						
field	dist.	limit	$w_{limit}$	$w_{calc.}$	ratio	
	[m]	[-]	[mm]	[mm]		
1	2.25	1/200	25.0	20.6	82 %	
2	2.75	1/200	25.0	20.7	83 %	
net final deflection [ $w_{q.p.} \cdot (1 + k_{def})$ ]						
field	dist.	limit	$w_{limit}$	$w_{calc.}$	ratio	
	[m]	[-]	[mm]	[mm]		
1	2.25	1/250	20.0	15.3	77 %	
2	2.75	1/250	20.0	15.4	77 %	

Figura A.3 – Verificações do piso CLT, Stora Enso.

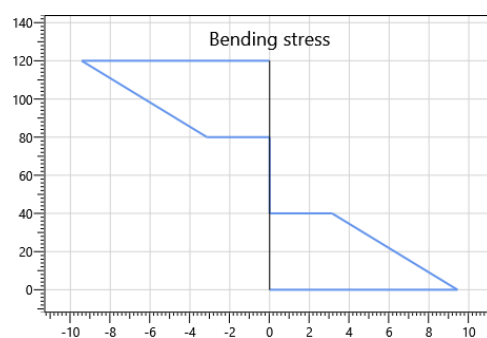


Figura A.4 – Tensões de flexão do piso, TimberTech.

Nome do piso	Secção	$M_{3-3}$ [kNm]	$J_{eff}$ [mm <sup>4</sup> ]	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{m,d}$ [MPa]	$\sigma_{m,d}$ [MPa]	Verificação
Piso 1	CLT 90 L3s C16	21.21	126139450.58	ULS 17	1	0.8	1.45	13.24	9.43	71%

Figura A.5 – Verificação da resistência à flexão do piso, TimberTech.

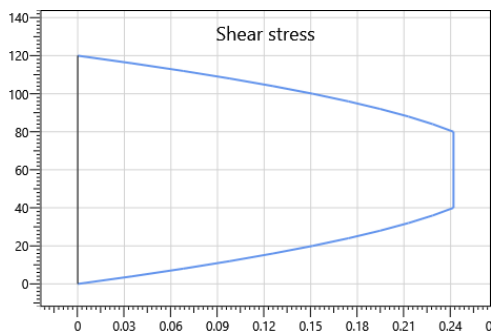


Figura A.6 – Tensões de corte do piso, TimberTech.

Nome do piso	Secção transversal	V <sub>2</sub> [kN]	J <sub>eff</sub> [mm <sup>4</sup> ]	Comb.	Classe de serviço	k <sub>mod</sub>	γ <sub>M</sub>	f <sub>v,d</sub> [MPa]	τ <sub>v,d</sub> [MPa]	Verificação	f <sub>R,d</sub> [MPa]	τ <sub>R,d</sub> [MPa]	Verificação
Piso 1	CLT 90 L3s C16	21.14	126139450.58	ULS 17	1	0.8	1.45	2.21	0.24	11%	0.69	0.24	35%

Figura A.7 – Verificação das resistências ao corte e ao rollin shear do piso, TimberTech.

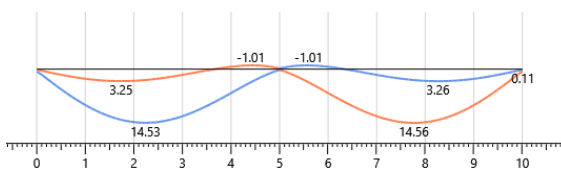


Figura A.8 – Deformações ao longo do piso, TimberTech.

Nome do piso	Seção	Combinação	Verificação mais restritas	W <sub>inst</sub> [mm]	W <sub>inst limit</sub> [mm]	Limite de deformação	Verificação
Piso 1	CLT 90 L3s C16	SLS characteristic 3	Internal span	14.56	16.67	l/300	87%

Figura A.9 – Verificação das deformações instantâneas do piso, TimberTech.

Nome do piso	seção	Combinação	Classe de serviço	k <sub>def</sub>	Verificação mais restritas	W <sub>fin</sub> [mm]	W <sub>fin limit</sub> [mm]	Limite de deformação	Verificação
Piso 1	CLT 90 L3s C16	SLS characteristic 3	1	0.6	Internal span	19.84	20.01	l/250	99%

Figura A.10 – Verificação das deformações finais do piso, TimberTech.

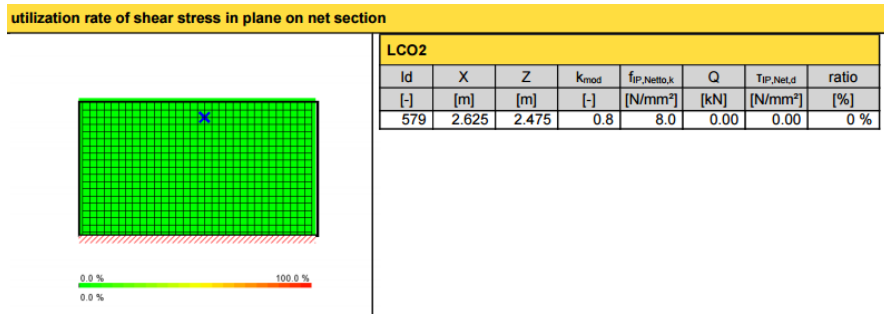


Figura A.11 – Verificação ao corte na secção net da parede CLT, Stora Enso.

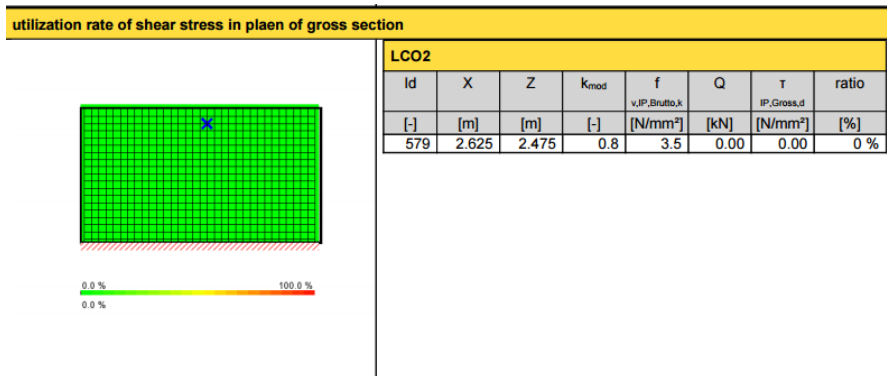


Figura A.12 – Verificação ao corte na secção gross da parede CLT, Stora Enso.

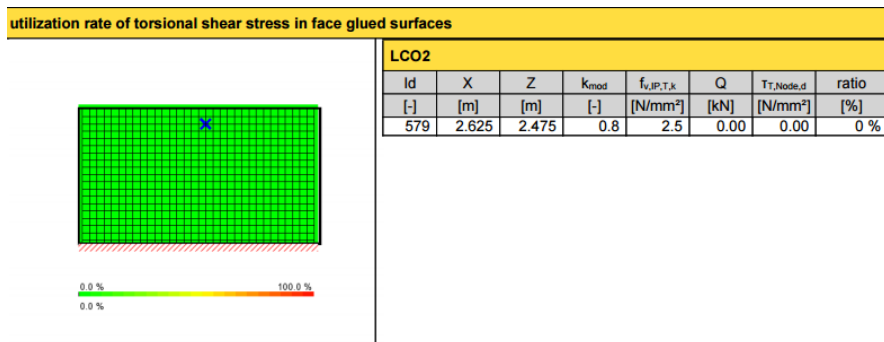


Figura A.13 – Verificação ao corte torsional nas superfícies coladas da parede CLT, Stora Enso.



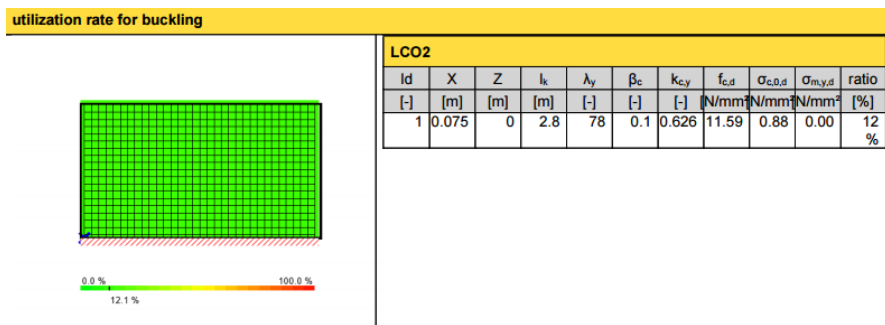


Figura A.14 – Verificação à encurvadura da parede CLT, Stora Enso.

Nome da parede	Secção	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{v,k}$ [MPa]	$T_d$ [MPa]	Verificação - corte	$M_r$ [Nmm]	$W$ [mm <sup>3</sup> ]	$f_{T,k}$ [MPa]	$T_{T,d}$ [MPa]	Verificação - torsão
Parede 2	CLT 100 mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	4	0.02	1%	9450	1125000	2.5	0.01	0%

Figura A.15 – Verificação do corte no plano da parede, TimberTech.

Nome da parede	Secção	$A_{r,full}$ [mm <sup>2</sup> /m]	$k_{c,90}$	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{c,90,k}$ [MPa]	$\sigma_{c,90,d}$ [MPa]	Verificação
Parede 2	CLT 100 mm - 3 layers	100000	1.5	ULS 17	1	0.8	1.25	2.5	0.53	20%

Figura A.16 – Verificação ao corte perpendicular ao fio na parede CLT, TimberTech.

Nome da pared	Secção	$h$ [m]	$A_{net}$ [mm <sup>2</sup> /m]	$J_{off}$ [mm <sup>4</sup> /m]	$k_c$	Comb.	Classe de serviço	$k_{m,d}$	$\gamma_M$	$f_{c,0,k}$ [MPa]	$f_{m,k}$ [MPa]	$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	$\sigma_{m,d}$ [MPa]	Verificação
Parede 2	CLT 100 mm - 3 layers	2.8	60000	67526728	0.45	ULS 17	1	0.8	1.25	21	24	0.88	0.00	14%

Figura A.17 – Verificação À encurvadura da parede CLT, TimberTech.

## Anexo III – Modelo de cálculo do edifício térreo

### Pisos em CLT

#### Modelo de cálculo

O modelo de cálculo adotado para o projecto de CLT em flexão para fora plano é de vigas mecanicamente articulado com ligação deformáveis de acordo com o Apêndice B do EC5. A flexibilidade de corte das camadas transversais é considerada usando o método  $\gamma$  (gamma): ou seja, com a teoria de Möhler para painéis de CLT tendo até três camadas orientados na direção de cálculo e com a teoria de Shelling para painéis com mais de três camadas orientadas na direção do cálculo.

A rigidez efetiva de flexão é dada através:

$$EJ_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i J_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

em que:

- $J_i$  é o momento de inércia da camada  $i$ , referênte ao eixo neutro
- $A_i$  área da secção transversal da cada  $i$
- $a_i$  distância entre o centro de gravidade da camada  $i$  e o centro de gravidade do elemento em CLT
- $l_{ref}$  comprimento referência do vão
- $G_R$  Módulo de corte torsional (valor médio)

O comprimento de referência é tomado, consoante o regime estático, como relatado na tabela seguinte.

Esquema estrutural	Comprimento de referência do vão
Viga simplesmente apoiada	$l_{ref} = l$
Vão de uma viga contínua	$l_{ref} = 0.8 l$
Apoio intermedio com viga contínua	$l_{ref} = 0.8 l_{min}$
Consola	$l_{ref} = 2 l$

A tabela seguinte apresenta detalhes, para cada piso e relativamente para os diferentes vãos, os comprimentos de referência para cada vão, o momento de inércia efetivo das seções transversais do piso CLT e o esquema estrutural adotado.

Nome do piso	Largura para o cálculo da faixa [m]	Comprimento de referência $l_{ref}$ [m]	$J_{eff}$ [mm <sup>4</sup> ]	Esquema estrutural
Piso 1	1	2.04 1.78 1.65 4.15	1.453E8 1.328E8 1.253E8 1.9E8	
Piso 2	1	3.99 0.96	1.885E8 7.306E7	

### Resistência à flexão

As verificações são realizadas de acordo com a secção 6.1.6 do EC5. A expressão seguinte deve ser satisfeita:

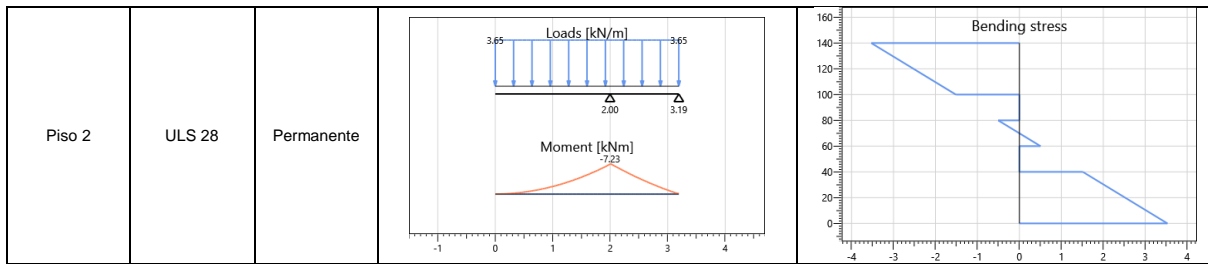
$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$\sigma_{m,d}$  valor de cálculo de tensão de flexão

$f_{m,d}$  valor de cálculo da resistência à flexão

A tabela seguinte apresenta detalhes relativos aos esquemas estruturais e os diagramas do momento de flexão para cada piso, sempre com os controlos mais severos.

Nome do piso	Combinação	Duração	Diagrama $M_{3-3}$	Tensões de flexão
Piso 1	ULS 28	Permanente		



Os controlos são resumidos abaixo. Os valores resultantes dos cálculos, relativos a cada verificação, são apresentados sob a forma de uma percentagem.

Nome do piso	Secção	$M_{3-3}$ [kNm]	$J_{eff}$ [mm <sup>4</sup> ]	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{m,d}$ [MPa]	$\sigma_{m,d}$ [MPa]	Verificação
Piso 1	CLT 140 mm - 5sL	7.80	125331958.03	ULS 28	1	0.6	1.25	16.80	3.02	18%
Piso 2	CLT 140 mm - 5sL	7.28	73060508.78	ULS 28	1	0.6	1.25	16.80	3.53	21%

## Resistência ao corte

### A resistência ao corte nas camadas paralelas à direção do fio

As verificações são realizadas de acordo com a secção 6.1.7 do EC5. A expressão a seguir deve ser satisfeita:

$$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

sendo:

$\tau_{v,d}$  valor de cálculo de tensão de corte

$f_{v,d}$  valor de cálculo da resistência ao corte

O valor de cálculo de tensão de corte máxima nas camadas longitudinais pode ser avaliada usando a seguinte expressão:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d \cdot S_{max}}{J_{eff} \cdot b}$$

em que:

$V_d$  força total de corte no local em questão

$S_{max}$  momento estático máx. da área

$J_{eff}$  momento de inércia efetivo na secção transversal do elemento em CLT

$b$  largura da secção transversal do elemento CLT ( $k_{cr} = 1$ )

### Resistência de corte torsional nas camadas transversais

As verificações são realizadas de acordo com a secção 6.1.7 do EC5. A expressão a seguir deve ser satisfeita::

$$\frac{\tau_{R,d}}{f_{v,R,d}} \leq 1$$

sendo:

$\tau_{R,d}$  Valor de cálculo de tensão de corte torsional

$f_{v,R,d}$  Valor de cálculo da resistência ao corte torsional

A tensão máxima de cálculo de corte torsional nas camadas transversais pode ser avaliada utilizando a expressão seguinte:

$$\tau_{R,d} = \frac{V_d \cdot S_{R,max}}{J_{eff} \cdot b}$$

em que:

$V_d$  força total de corte no local em questão

$S_{R,max}$  momento estático da área

$J_{eff}$  momento de inércia efetivo na secção transversal do elemento em CLT

$b$  largura da secção transversal do elemento CLT ( $k_{cr} = 1$ )

A tabela seguinte apresenta detalhes relativos aos esquemas estruturais e os diagramas de corte para cada piso, sempre com as combinações mais severos.

Nome do piso	Combinação	Duração	Diagrama $V_2$	Tensões de corte
Piso 1	ULS 28	Permanent		
Piso 2	ULS 28	Permanent		

Os controlos são resumidos a seguir. Os resultados dos cálculos, relativa a cada verificação, são apresentadas sob a forma de percentagem.

Nome do piso	Secção transversal	V <sub>2</sub> [kN]	J <sub>eff</sub> [mm <sup>4</sup> ]	Comb.	Classe de serviço	k <sub>mod</sub>	γ <sub>M</sub>	f <sub>v,d</sub> [MPa]	τ <sub>v,d</sub> [MPa]	Verificação	f <sub>R,d</sub> [MPa]	τ <sub>R,d</sub> [MPa]	Verificação
Floor 1	CLT 140 mm - 5sL	-8.97	182884394.86	ULS 28	1	0.6	1.25	1.92	0.09	5%	0.38	0.08	22%
Floor 2	CLT 140 mm - 5sL	10.33	46088983.37	ULS 28	1	0.6	1.25	1.92	0.09	5%	0.38	0.08	20%

### Deformação dos pisos (SLS)

As verificações de deformação são realizadas de acordo com a clausula 2.2.3 do EC5.

A flecha aparente final, considerada em relação à linha reta entre os apoios,  $w_{net,fin}$ , deverá ser considerada igual a:

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c$$

em que:

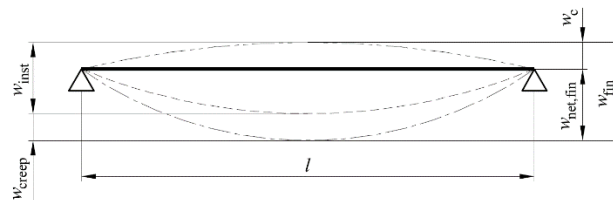
$w_{net,fin}$  flecha aparente final

$w_{inst}$  flecha instantânea

$w_{creep}$  flecha devida à fluência

$w_c$  contra flecha (caso aplicada)

$w_{fin}$  flecha final



Os valores limites retomados para as flechas das vigas estão representados na tabela seguinte.

	$w_{inst}$	$w_{net,fin}$
Vigas sobre dois apoios	$l/300$	$l/250$
Vigas em consola	$l/150$	$l/125$

### Deformação instantânea

A deformação instantânea,  $w_{inst}$ , é calculada para a combinação característica (rara) de ações.

A tabela seguinte apresenta detalhes relativos à deformação de cada piso (em relação ao elemento no qual os controlos de deformação são mais severos).

Nome do piso	Combinação	Deformação instantânea
Piso 1	SLS characteristic 3	
Piso 2	SLS characteristic 3	

A tabela seguinte mostra as verificações das deformações instantâneas dos elementos dos pisos.

Nome dos pisos	Secção	Combinação	Classe de serviço	$k_{def}$	Verificação mais restritiva	$w_{fin}$ [mm]	$w_{fin}$ limit [mm]
Floor 1	CLT 140 mm - 5sL	SLS characteristic 3	Overhang	9.34	13.84	l/150	68%
Floor 2	CLT 140 mm - 5sL	SLS characteristic 3	Overhang	8.04	13.31	l/150	60%

### Deformação final

Para estruturas constituídas por elementos, componentes e ligações com as mesmas características de fluência, e na hipótese de uma relação linear entre as ações e as deformações correspondentes, a deformação final  $w_{fin}$ , pode ser considerado como:

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q1} + \sum w_{fin,Qi}$$

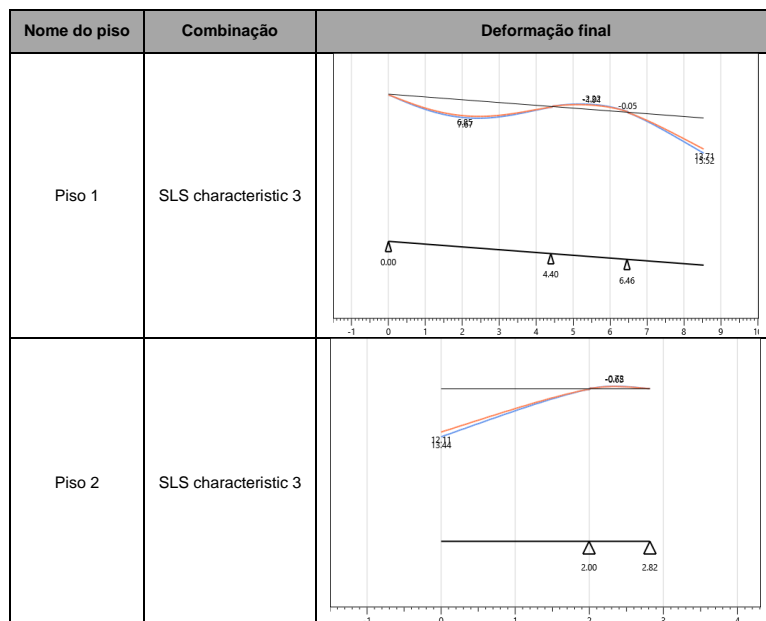
onde:

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) \quad \text{para uma ação permanente, G}$$

$$w_{fin,Q,1} = w_{inst,Q,1} \cdot (1 + \Psi_{2,1} \cdot k_{def}) \quad \text{para a ação variável de base da combinação, } Q_1$$

$$w_{fin,Q,i} = w_{inst,Q,i} \cdot (\Psi_{0,i} + \Psi_{2,1} \cdot k_{def}) \quad \text{para ações variáveis acompanhantes, } Q_i \text{ (i>1)}$$

A tabela seguinte apresenta detalhes relativos à deformação de cada piso (em relação ao elemento no qual os controlos de deformação são os mais severos).



A tabela seguinte mostra os controlos de deformação finais dos elementos dos pisos.

Nome dos pisos	Secção	Combinação	Classe de serviço	$k_{def}$	Verificação mais restritiva	$W_{fin}$ [mm]	$W_{fin}$ limit [mm]	Deformação limite	Verificação
Piso 1	CLT 140 mm - 5sL	SLS characteristic 3	1	0.8	Overhang	15.52	16.60	$l/125$	93%
Piso 2	CLT 140 mm - 5sL	SLS characteristic 3	1	0.8	Overhang	13.44	15.97	$l/125$	84%

## Paredes CLT

### Encurvadura de paredes em CLT

A verificação da instabilidade da parede CLT são realizadas com referencia ao que é relatado no item 6.3.2 do EC5.

Os valores das acções na tabela seguinte estão relacionadas, para cada parede a estabilidade e para a combinação de carga mais grave para o Estado Limite Último.

Nome da parede	Comprimento [m]	Comb.	Dur.	N [kN]	M2-2 [kNm]
Wall 1	4.21	ULS 36	Instantaneous	20.69	3.55
Wall 2	9.60	ULS 28	Permanent	174.04	0.00
Wall 3	2.08	ULS 28	Permanent	9.03	0.00
Wall 6	1.18	ULS 28	Permanent	22.24	0.00
Wall 7	2.46	ULS 36	Instantaneous	8.97	2.07
Wall 8	3.70	ULS 28	Permanent	68.42	0.00
Wall 11	4.10	ULS 36	Instantaneous	20.65	6.58
Wall 12	2.12	ULS 28	Permanent	121.76	0.00
Wall 13	4.83	ULS 28	Permanent	88.47	0.00
Wall 14	0.80	ULS 36	Instantaneous	3.47	0.95
Wall 15	0.50	ULS 28	Permanent	10.93	0.00
Wall 17	4.33	ULS 28	Permanent	83.31	0.00
Wall 18	4.10	ULS 36	Instantaneous	-2.22	6.54
Wall 19	0.50	ULS 28	Permanent	22.66	0.00
Wall 20	0.95	ULS 28	Permanent	113.20	0.00
Wall 21	4.10	ULS 36	Instantaneous	20.80	5.43



Wall 22	0.93	ULS 28	Permanent	22.04	0.00
Wall 23	0.67	ULS 28	Permanent	2.85	0.00
Wall 24	3.05	ULS 28	Permanent	45.48	0.00
Wall 25	6.90	ULS 28	Permanent	221.05	0.00
Wall 26	4.25	ULS 28	Permanent	65.05	0.00
Wall 27	0.50	ULS 28	Permanent	45.41	0.00
Wall 28	2.45	ULS 28	Permanent	36.58	0.00
Wall 29	4.35	ULS 28	Permanent	47.40	0.00
Wall 30	3.07	ULS 28	Permanent	75.14	0.00
Wall 35	1.05	ULS 28	Permanent	4.25	0.00

A verificação da estabilidade dos painéis CLT são considerados tendo um comprimento unitário.

No caso em que simultaneamente  $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$  e  $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$ , as tensões tem satisfazer as expressões (6.19) e (6.20) em 6.2.4 do EC5.

Em todos os outros casos, as tensões, que aumentadas devido à deformação, deverão satisfazer as seguintes expressão:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

### Modelo mecânico para o padrão de tensões internas em elementos de CLT

O modelo de cálculo adotado para a conceção CLT em flexão para fora do plano é feita com vigas mecanicamente articulado com ligações deformáveis. O cálculo dos elementos de CLT é feita como uma estrutura mecanicamente estrutural em conformidade com anexo B do EC5. A flexibilidade das camadas de corte transversal é considerada usando o  $\gamma$ -método (gamma): ou seja, com a teoria de Möhler para painel de CLT tendo até 3 camadas orientadas na direção de cálculo e com a teoria Shelling para painéis com mais de 3 camadas orientadas na direção do cálculo.

A rigidez de flexão efetiva é tomada através:

$$EJ_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i J_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

$$\gamma_i = \left[ 1 + \frac{\pi^2 E_i A_i}{G_R \cdot \frac{b}{d} \cdot h^2} \right]^{-1}$$

em que:

$J_i$  é o momento de inércia da camada i, referência ao eixo neutro

$A_i$  área da secção transversal da cada i

$a_i$  distância entre o centro de gravidade da camada I e o centro de gravidade do elemento em CLT

$h$  altura da parede

$G_R$  Módulo de rolling shear (valor médio)

Os resultados dos controlos da estabilidade são apresentados a seguir, expressas em percentagens.

$A_{net}$ : Área da secção transversal da parte da parede que é considerada para a verificação (metro linear)

$J_{eff}$ : Momento de inércia efetivo na secção transversal da parte da parede

Comb.: Combinação de carga mais severa

$k_{mod}$ : Factor de modificação tendo em conta a duração das ações e para o teor de água

$\gamma_M$ : Coeficiente parcial para uma propriedade de um material

$f_{c,0,k}$ : Valor característico da resistência à compressão paralela ao fio

$f_{m,k}$ : Valor característico da resistência à flexão

$\sigma_{c,0,d}$ : Valor de cálculo de tensão de compressão paralela ao fio

Nome da parede	Secção	h [m]	$A_{net}$ [mm <sup>2</sup> /m]	$J_{eff}$ [mm <sup>4</sup> /m]	$k_c$	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{c,0,k}$ [MPa]	$f_{m,k}$ [MPa]	$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	$\sigma_{m,d}$ [MPa]	Verificação
Wall 1	CLT 60mm - 3 layers	3.0	40000	16790898	0.14	ULS 36	1	1.1	1.25	17	16	0.22	1.51	21%
Wall 2	CLT 80mm - 3 layers	3.55	60000	39912912	0.18	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	0.62	0.00	35%
Wall 3	CLT 60mm - 3 layers	3.57	40000	16946814	0.10	ULS 28	1	0.6	1.25	17	16	0.11	0.00	13%
Wall 6	CLT 60mm - 3 layers	3.03	40000	16802847	0.14	ULS 28	1	0.6	1.25	17	16	0.49	0.00	44%
Wall 7	CLT 60mm - 3 layers	3.0	40000	16790898	0.14	ULS 36	1	1.1	1.25	17	16	0.09	1.51	15%
Wall 8	CLT 60mm - 3 layers	3.05	40000	16806664	0.14	ULS 28	1	0.6	1.25	17	16	0.89	0.00	81%
Wall 11	CLT 60mm - 3 layers	4.36	40000	17043646	0.07	ULS 36	1	1.1	1.25	17	16	0.13	2.83	33%
Wall 12	CLT 90mm - 3 layers	4.43	60000	55925936	0.16	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	0.99	0.00	62%
Wall 13	CLT 80mm - 3 layers	3.86	60000	40432637	0.15	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	0.41	0.00	27%
Wall 14	CLT 60mm - 3 layers	3.57	40000	16946814	0.10	ULS 36	1	1.1	1.25	17	16	0.11	2.12	26%
Wall 15	CLT 60mm - 3 layers	3.06	40000	16809793	0.14	ULS 28	1	0.6	1.25	17	16	0.54	0.00	48%
Wall 17	CLT 80mm - 3 layers	3.86	60000	40432637	0.15	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	0.48	0.00	32%

Wall 18	CLT 60mm - 3 layers	4.07	40000	17041696	0.08	ULS 36	1	1.1	1.25	17	16	0.12	2.81	30%
Wall 19	CLT 80mm - 3 layers	4.43	60000	40793430	0.12	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	0.74	0.00	63%
Wall 20	CLT 120 mm - 5 layers	4.28	80000	118618968	0.27	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	1.46	0.00	55%
Wall 21	CLT 80mm - 3 layers	3.76	60000	40345987	0.16	ULS 36	1	1.1	1.25	21	24	0.08	1.31	9%
Wall 22	CLT 60mm - 3 layers	3.13	40000	16832868	0.13	ULS 28	1	0.6	1.25	17	16	0.59	0.00	56%
Wall 23	CLT 80mm - 3 layers	3.15	60000	39696095	0.22	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	0.07	0.00	3%
Wall 24	CLT 60mm - 3 layers	3.29	40000	16863722	0.12	ULS 28	1	0.6	1.25	17	16	0.48	0.00	49%
Wall 25	CLT 80mm - 3 layers	3.56	60000	40145510	0.18	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	1.00	0.00	57%
Wall 26	CLT 60mm - 3 layers	3.06	40000	16809839	0.14	ULS 28	1	0.6	1.25	17	16	0.50	0.00	45%
Wall 27	CLT 80mm - 3 layers	3.01	60000	39485178	0.24	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	1.48	0.00	62%
Wall 28	CLT 60mm - 3 layers	3.06	40000	16809793	0.14	ULS 28	1	0.6	1.25	17	16	0.46	0.00	41%
Wall 29	CLT 60mm - 3 layers	3.58	40000	16893705	0.10	ULS 28	1	0.6	1.25	17	16	0.65	0.00	80%
Wall 30	CLT 80mm - 3 layers	4.08	60000	40488464	0.14	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	0.94	0.00	69%
Wall 35	CLT 80mm - 3 layers	3.0	60000	39469042	0.24	ULS 28	1	0.6	1.25	21	24	0.07	0.00	3%

### Compressão perpendicular ao fio

Na área do suporte de parede há elevadas tensões locais perpendiculares ao fio. Seguindo a expressão deve ser satisfeita:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90,d} \cdot f_{c,90,d}$$

com

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{full}}$$

em que:

$\sigma_{c,90,d}$  valor de cálculo de tensão de compressão na zona de contato perpendicular ao fio

$F_{c,90,d}$  valor de cálculo da carga de compressão perpendicular ao fio

$A_{full}$  área de contato onde carga de compressão atua (perpendicular ao fio)

$f_{c,90,d}$  valor cálculo da resistência à compressão perpendicular ao fio

$k_{c,90,d}$  fator que tem em conta a configuração do carregamento, a possibilidade de fendimento e o grau de deformação por compressão

Os valores das ações estão na tabela seguinte, relaonadas, para cada parede e para a combinação de carga mais severa para o Estado Limite Últimos.

Nome da parede	Comprimento [m]	Comb.	Dur.	N [kN]
Wall 1	4.21	ULS 28	Permanent	21.28
Wall 2	9.60	ULS 28	Permanent	174.04
Wall 3	2.08	ULS 28	Permanent	9.03
Wall 6	1.18	ULS 28	Permanent	22.24
Wall 7	2.46	ULS 28	Permanent	8.97
Wall 8	3.70	ULS 28	Permanent	68.42
Wall 11	4.10	ULS 28	Permanent	20.65
Wall 12	2.12	ULS 28	Permanent	121.76
Wall 13	4.83	ULS 28	Permanent	88.47
Wall 14	0.80	ULS 28	Permanent	3.47
Wall 15	0.50	ULS 28	Permanent	10.93
Wall 17	4.33	ULS 28	Permanent	83.31
Wall 18	4.10	ULS 28	Permanent	-3.59
Wall 19	0.50	ULS 28	Permanent	22.66
Wall 20	0.95	ULS 28	Permanent	113.20
Wall 21	4.10	ULS 28	Permanent	20.80
Wall 22	0.93	ULS 28	Permanent	22.04
Wall 23	0.67	ULS 28	Permanent	2.85
Wall 24	3.05	ULS 28	Permanent	45.48
Wall 25	6.90	ULS 28	Permanent	221.05
Wall 26	4.25	ULS 28	Permanent	65.05
Wall 27	0.50	ULS 28	Permanent	45.41
Wall 28	2.45	ULS 28	Permanent	36.58
Wall 29	4.35	ULS 28	Permanent	47.40
Wall 30	3.07	ULS 28	Permanent	75.14
Wall 35	1.05	ULS 28	Permanent	4.25

A verificação de compressão dos painéis CLT são considerados uma parte da parede de um comprimento unitário.

Secção: Secção do elemento em CLT

$A_{full}$ : Área de contacto onde a carga de compressão atua (perpendicular ao fio)

Comb.: Combinação de carga mais severa

$k_{mod}$ : Fator de modificação tendo em conta o efeito da duração da carga e o teor de água

$\gamma_M$ : Coeficiente parcial para uma propriedade de um material

$f_{c,90,d}$ : Valor cálculo da resistência à compressão perpendicular ao fio

$\sigma_{c,90,d}$ : Valor de cálculo de tensão de compressão na zona de contato perpendicular ao fio

Nome da parede	Secção	$A_{full}$ [mm <sup>2</sup> /m]	$k_{c,90}$	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{c,90,d}$ [MPa]	$\sigma_{c,90,d}$ [MPa]	Verificação
Wall 1	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.16	8%
Wall 2	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.46	24%
Wall 3	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.07	4%
Wall 6	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.33	17%
Wall 7	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.06	3%
Wall 8	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.60	31%
Wall 11	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.09	5%
Wall 12	CLT 90mm - 3layers	90000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.66	34%
Wall 13	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.30	16%
Wall 14	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.07	4%
Wall 15	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.36	18%
Wall 17	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.36	18%
Wall 18	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.08	4%
Wall 19	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.56	29%

Wall 20	CLT 120 mm - 5 layers	120000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.97	50%
Wall 21	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.06	3%
Wall 22	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.40	20%
Wall 23	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.05	3%
Wall 24	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.32	16%
Wall 25	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.75	39%
Wall 26	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.33	17%
Wall 27	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	1.11	57%
Wall 28	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.31	16%
Wall 29	CLT 60mm - 3 layers	60000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.43	22%
Wall 30	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.70	36%
Wall 35	CLT 80mm - 3 layers	80000	1.5	ULS 28	1	0.6	1.25	2.5	0.05	3%

### Corte (carga no plano)

As tensões internas de um elemento CLT, submetido a forças de corte leva à influência do material, através de dois diferentes mecanismos, tensão de corte nas placas (mecanismo I) e tensões de torção na interfaces da colagem (mecanismo II).

Os valores das acções na tabela a seguir estão relacionadas, para cada parede na combinação de carga mais severa no Estado Limite Último.

Nome da parede	Comprimento [m]	Comb.	Dur.	V2 [kN]
Wall 1	4.21	Horizontal ULS 4	Instantaneous	12.71
Wall 2	9.60	Horizontal ULS 5	Instantaneous	8.30
Wall 3	2.08	Horizontal ULS 4	Instantaneous	3.01
Wall 6	1.18	Horizontal ULS 5	Instantaneous	0.29
Wall 7	2.46	Horizontal ULS 4	Instantaneous	5.92
Wall 8	3.70	Horizontal ULS 5	Instantaneous	1.65
Wall 11	4.10	Horizontal ULS 4	Instantaneous	6.86
Wall 12	2.12	Horizontal ULS 5	Instantaneous	0.55
Wall 13	4.83	Horizontal ULS 5	Instantaneous	2.47
Wall 14	0.80	Horizontal ULS 4	Instantaneous	0.57
Wall 17	4.33	Horizontal ULS 5	Instantaneous	2.08
Wall 18	4.10	Horizontal ULS 4	Instantaneous	7.89
Wall 20	0.95	Horizontal ULS 5	Instantaneous	0.13
Wall 21	4.10	Horizontal ULS 4	Instantaneous	10.07
Wall 22	0.93	Horizontal ULS 5	Instantaneous	0.18
Wall 23	0.67	Horizontal ULS 4	Instantaneous	0.56
Wall 24	3.05	Horizontal ULS 5	Instantaneous	1.22
Wall 25	6.90	Horizontal ULS 5	Instantaneous	4.63
Wall 26	4.25	Horizontal ULS 5	Instantaneous	2.01
Wall 28	2.45	Horizontal ULS 5	Instantaneous	0.89
Wall 29	4.35	Horizontal ULS 4	Instantaneous	10.10
Wall 30	3.07	Horizontal ULS 4	Instantaneous	5.81
Wall 35	1.05	Horizontal ULS 4	Instantaneous	1.42

### Mecanismo I - corte

As tensões do corte interno pode ser avaliadas de seguinte maneira:

$$\tau_z = \frac{v_2}{\sum t_{i,ext}}$$

$$\tau_y = \frac{v_2}{\sum t_{i,int}}$$

sendo que

$v_2$  corte por metro linear que atua sobre o elemento de CLT

$t_{i,ext}$  espessura da camada  $i$  na orientação paralela às camadas externas

$t_{i,int}$  espessura da camada  $i$  na orientação paralela às camadas internas

$\tau_z$  a tensão de corte atuando sobre as camadas que têm uma orientação paralelas às camadas externas

$\tau_y$  tensão de corte atuando sobre as camadas que têm uma orientação paralelas às camadas internas

A tensão usada para a verificação é a máxima entre os dois:

$$\tau_d = \max(\tau_z; \tau_y)$$

Seguindo a expressão devem ser satisfeitas

$$\tau_d \leq f_{v,lastra,d}$$

sendo

$f_{v,d}$  o valor de cálculo da resistência ao corte é calculado:

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M}$$

### Mecanismo II – torção

As tensões de torção interna pode ser avaliados da seguinte maneira:

$$\tau_{T,d} = \frac{M_T}{W}$$

sendo que:

$M_T$  momento de torção interna

$W$  momento de resistência polar

O momento de resistência polar é definida pela seguinte expressão:

$$W = \frac{a_{ref}^3}{3}$$

onde  $a_{ref}$  é a largura média assumindo as lamelas iguais 150 mm.

O momento de torção interna,  $M_T$ , pode ser avaliada de acordo com o modelo proposto pela Aprovação Técnica Europeia (ETA) onde podemos usar a seguinte expressão:

$$M_T = \frac{v_2 \cdot a_{ref}^2}{n_{strati-1}}$$

A seguinte expressão deve ser satisfeita:

$$\tau_{T,d} \leq f_{T,d}$$

sendo

$f_{T,d}$  o valor de cálculo da resistência à torção de interfaces coladas

$$f_{T,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{T,k}}{\gamma_M}$$

A tabela seguinte representa os controlos de corte para cada parede CLT. A verificação dos dois mecanismos diferentes (corte e torção).

Comb.: Combinação de carga mais severa

$k_{mod}$ : Factor de correção para a duração das ações e para o teor de água

$\gamma_M$ : Coeficiente parcial para uma propriedade de um material

$f_{v,k}$ : Valor característico da resistência ao corte (Mecanismo I)

$\tau_d$ : Valor de cálculo de tensão de corte nas camadas

$M_T$ : Momento de torção em todas as interfaces coladas

$W$ : Momento de resistência polar

$f_{T,k}$ : Valor característico da resistência à torção de corte das interfaces coladas

$\tau_{T,d}$ : Valor de cálculo de tensão de corte (devido à torção) nas camadas externas

Nome da parede	Secção	Comb.	Classe de serviço	$k_{mod}$	$\gamma_M$	$f_{v,k}$ [MPa]	$\tau_d$ [MPa]	Verificação ao corte	$M_T$ [Nmm]	$W$ [mm <sup>3</sup> ]	$f_{T,k}$ [MPa]	$\tau_{T,d}$ [MPa]	Verificação à torção
Wall 1	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	3.2	0.15	5%	33992	1125000	2.5	0.03	1%
Wall 2	CLT 80mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	4	0.04	1%	9730	1125000	2.5	0.01	0%
Wall 3	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	3.2	0.07	3%	16298	1125000	2.5	0.01	1%
Wall 6	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	3.2	0.01	0%	2798	1125000	2.5	0	0%
Wall 7	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	3.2	0.12	4%	27126	1125000	2.5	0.02	1%
Wall 8	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	3.2	0.02	1%	5031	1125000	2.5	0	0%
Wall 11	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	3.2	0.08	3%	18833	1125000	2.5	0.02	1%

Dimensionamento de estruturas de madeiras usando o programa TimberTech

Wall 12	CLT 90mm - 3layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	4	0.01	0%	2889	1125000	2.5	0	0%
Wall 13	CLT 80mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	4	0.03	1%	5751	1125000	2.5	0.01	0%
Wall 14	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	3.2	0.04	1%	8068	1125000	2.5	0.01	0%
Wall 17	CLT 80mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	4	0.02	1%	5402	1125000	2.5	0	0%
Wall 18	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	3.2	0.1	3%	21657	1125000	2.5	0.02	1%
Wall 20	CLT 120 mm - 5 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	4	0	0%	791	1125000	2.5	0	0%
Wall 21	CLT 80mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	4	0.12	3%	27641	1125000	2.5	0.02	1%
Wall 22	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	3.2	0.01	0%	2200	1125000	2.5	0	0%
Wall 23	CLT 80mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	4	0.04	1%	9451	1125000	2.5	0.01	0%
Wall 24	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	3.2	0.02	1%	4506	1125000	2.5	0	0%
Wall 25	CLT 80mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	4	0.03	1%	7547	1125000	2.5	0.01	0%
Wall 26	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	3.2	0.02	1%	5309	1125000	2.5	0	0%
Wall 28	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 5	1	1.1	1.25	3.2	0.02	1%	4065	1125000	2.5	0	0%
Wall 29	CLT 60mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	3.2	0.12	4%	26129	1125000	2.5	0.02	1%
Wall 30	CLT 80mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	4	0.09	3%	21273	1125000	2.5	0.02	1%
Wall 35	CLT 80mm - 3 layers	Horizontal ULS 4	1	1.1	1.25	4	0.07	2%	15311	1125000	2.5	0.01	1%