



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Francisco Gomes Dias

Construir em altura com CLT. O UT System
aplicado a um exemplo

Francisco Gomes Dias
Construir em altura com CLT. O UT System
aplicado a um exemplo



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Francisco Gomes Dias

Construir em altura com CLT. O UT System
aplicado a um exemplo

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Jorge Manuel Gonçalves Branco

DECLARAÇÃO

Nome: Francisco Gomes Dias

Endereço eletrónico: franciscogd1991@hotmail.com Telefone: 935417958

Número do Bilhete de Identidade: 13950258

Título da dissertação: “Construir em altura com CLT. *O UT System* aplicado a um exemplo.”

Orientador: Professor Jorge Manuel Gonçalves Branco

Ano de conclusão: 2017

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO
APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO
ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, / /

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação só foi possível com o o apoio prestado por algumas pessoas a quem gostaria de agradecer. Assim, agradeço:

Ao Professor Doutor Jorge Manuel Gonçalves Branco, pelas ideias, sugestões, recomendações, paciência, disponibilidade e pelo acompanhamento excepcional ao longo deste projeto;

À equipa técnica da empresa Dlubal pelo apoio incondicional prestado, desde o fornecimento do software até ao esclarecimento de dúvidas e recomendações a adotar na modelação do edifício proposto;

Ao Doutor Hélder Manuel da Silva e Sousa, pelo apoio, disponibilidade e troca de conhecimentos;

À Arquiteta Catarina Silva pelo fornecimento do projeto de arquitetura do *UT system*;

À minha família pelo apoio, paciência, atenção ao longo deste percurso académico, neste último ano.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo estudar a viabilidade de um sistema estrutural inovador, *Urban Timber (UT) system*, desenvolvido por investigadores da Universidade do Minho (Silva *et al.*, 2014), que propõe revolucionar a construção de edifícios em altura. O *UT system* consiste num sistema híbrido que utiliza o *Cross Laminated Timber (CLT)* e a madeira lamelada colada, como materiais estruturais, que visa solucionar a limitada flexibilidade característica dos sistemas monolíticos CLT, contribuindo simultaneamente para uma maior sustentabilidade do sector da construção considerando a problemática associada ao contínuo aumento das densidades urbanas. O CLT possui elevada capacidade de carga com um reduzido peso próprio, permitindo elementos de elevada esbelteza, mesmo para vãos de grande dimensão. Ao contrário dos sistemas porticados em que as cargas são transmitidas predominantemente em fluxos unidireccionais, nas estruturas com painéis CLT os elementos comportam-se como placas, sendo a transmissão da carga bidireccional (Costa, 2013). Com recurso ao módulo adicional RF-Laminte disponível no software RFEM 5.07, foi realizada uma análise estrutural de um modelo tridimensional para o edifício proposto pelo projeto de arquitetura *UT system*. Através deste estudo foi possível constatar o cumprimento dos requisitos impostos nas verificações aos Estados Limite Últimos e aos Estados Limite de Serviço pela regulamentação em vigor, para o caso do edifício proposto com 10 pisos localizado em Lisboa.

PALAVRAS-CHAVE: *CLT, UT system*, construção em altura, estruturas em madeira.

ABSTRACT

This thesis mainly aims to study how viable is the groundbreaking structural Urban Timber (UT) system, which was developed by researchers from Universidade do Minho (Silva et al) and intends to revolutionize the construction of high rise buildings. The UT system consists of a hybrid utilization of Cross Laminated Timber (CLT) and Glulam timber as structural materials, thus warranting a higher flexibility than that typical of CLT monolithic systems, contributing this way for a significantly improved construction sustainability, in light of the issues arising from the continuously growing density of urban areas. CLT possesses a vast load-bearing capacity while being very light, hence allowing the construction of aesthetical pleasant elements, even for long spans. Contrary to porticated systems, on which loads are transmitted mainly through unidirectional fluxes, on CLT structures, the elements behave as plates/boards and the transmission of loads is bidirectional (costa 2013). By using the RF-Laminte additional module, available on RFEM 5.07, a structural analysis of a tridimensional model for the building proposed by the architecture project UT System, was conducted. That analysis showed that the minimum requirements imposed by the current legislation on the verification of both the Ultimate Limit State and Serviceability Limit State were met, for the proposed 10 storey building located in Lisbon.

KEYWORDS: CLT, UT system, High-rise construction, Timber structures

ÍNDICE

DECLARAÇÃO.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS	xxv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. PERGUNTA DE INVESTIGAÇÃO	3
1.3. OBJETIVOS	3
1.4. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	4
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2. CONSTRUIR EM CLT.....	7
2.1. ORIGEM DO CLT.....	7
2.2. DEFINIÇÃO DO MATERIAL CLT.....	7
2.3. PROCESSO DE FABRICO	9
2.4. TRANSPORTE DOS PAINÉIS CLT	12
2.5. CONTROLO DE QUALIDADE – MARCAÇÃO CE.....	13
2.6. VANTAGENS ASSOCIADAS AO SISTEMA CONSTRUTIVO CLT.....	14
2.6.1. Rapidez e eficiência da instalação.....	14
2.6.2. Flexibilidade de projeto	15
2.6.3. Competitividade de custo	16
2.6.4. Proteção contra incêndios	17
2.6.5. Desempenho sísmico	19
2.6.6. Desempenho acústico dos elementos em CLT	20
2.6.7. Desempenho térmico e eficiência energética.	21
2.6.8. Desempenho ambiental.....	22
2.6.9. Eficiência dos recursos	23
2.7. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA CONSTRUTIVO CLT	24
2.7.1. Princípios arquitetónicos	24

2.7.2. Comportamento estrutural.....	26
2.7.2.1. Paineis.....	27
2.7.2.2. Parede	27
2.7.2.3. Viga.....	28
2.7.2.4. Outros.....	28
2.7.3. Princípios sobre a acústica dos edifícios.....	29
2.7.4. Princípios sobre a segurança ao fogo dos edifícios.....	31
2.7.5. Princípios sobre sistema HVAC dos edifícios	31
2.8. AS LIGAÇÕES NAS ESTRUTURAS DE CLT	32
2.8.1. Ligadores do tipo mecânico	34
2.8.2. Dispositivos de ligação	34
2.8.3. Detalhes dos sistemas de ligação de CLT.....	35
2.8.3.1. Ligação parede - fundação	36
2.8.3.2. Ligação parede - parede	37
2.8.3.2.1. Ligação entre painéis de parede paralelos	37
2.8.3.2.2. Ligação de painéis de parede perpendiculares.....	38
2.8.3.3. Ligação parede - pavimento.....	39
2.8.3.3.1. Sistema de construção <i>platform system</i>	39
2.8.3.3.2. Sistema de construção <i>Balloon frame</i>	40
2.8.3.4. Ligação pavimento - pavimento	41
2.8.3.5. Ligação parede - cobertura	41
2.9. INVESTIGAÇÕES CIENTÍFICAS DISPONÍVEIS.....	42
2.9.1. Resistência às cargas laterais	42
2.9.2. Segurança ao Fogo	47
2.9.3. Dimensionamento do CLT.....	48
2.9.4. Ligações.....	50
2.9.5. Custo	51
3. CLT NA CONSTRUÇÃO EM ALTURA	53
3.1. CONSTRUÇÕES EM CLT RELEVANTES NO MUNDO	53
3.1.1. Stadthaus	53
3.1.1.1. Descrição do edifício	53
3.1.1.2. Projeto estrutural.....	54
3.1.1.3. Aspectos relevantes a destacar	56
3.1.2. Forté.....	56

3.1.2.1. Descrição do edifício	56
3.1.2.2. Aspetos construtivos	58
3.1.2.3. Durabilidade	58
3.1.2.4. Resistência ao fogo.....	59
3.1.3. Via Cenni	60
3.1.3.1. Descrição do edifício	60
3.1.3.2. Comportamento ao sismo.....	63
3.1.3.3. Comportamento ao fogo.....	65
3.2. PROJETOS EM FASE DE ESTUDO.....	66
3.2.1. FFFT system.....	67
3.2.1.1. Sistema estrutural	67
3.2.2. Urban Timber System.....	69
3.2.2.1. Sistema estrutural	69
3.2.3. PRES-LAM system.....	71
3.2.3.1. Desempenho sísmico	72
3.2.3.2. Componentes híbridos	73
3.2.3.3. Caraterísticas do método construtivo.....	75
4. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE CLT	79
4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CLT.....	79
4.2. MÉTODOS DE CÁLCULO DISPONÍVEIS PARA CLT	81
4.2.1. Geral.....	81
4.2.2. Painéis de piso ou de cobertura (carregamento fora do plano).....	82
4.2.2.1. Métodos de cálculo utilizados.....	84
4.2.2.1.1. Mechanically Jointed Beams Theory (Gamma Method).....	85
4.2.2.1.2. Composite Theory – k Method	88
4.2.2.1.3. Shear Analogy Method (by Kreuzinger)	91
4.2.3. Painéis de parede (carregamentos no plano)	93
4.2.3.1. Métodos de cálculo utilizados.....	94
4.2.4. Painéis de pavimento/cobertura (carregados no plano)	96
4.3. DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DOS PAINÉIS CLT	97
4.3.1. Rigidez à flexão	97
4.3.2. Rigidez axial.....	98
4.3.3. Rigidez de corte para painéis carregados no plano	98
4.3.4. Rigidez de corte para painéis carregados fora do plano.....	99

4.3.5. Rigidez de torção.....	100
4.4. DIMENSIONAMENTO AOS ESTADOS LIMITE ÚLTIMOS (ELU).....	102
4.4.1. Flexão (cargas fora do plano).....	102
4.4.2. Tração (cargas no plano).....	103
4.4.3. Compressão (cargas no plano).....	104
4.4.3.1. Método da viga equivalente	104
4.4.3.2. Teoria dos efeitos de 2ª ordem.....	105
4.4.4. Compressão (cargas fora do plano)	105
4.4.5. Corte (cargas no plano).....	108
4.4.5.1. Mecanismo I – corte.....	110
4.4.5.2. Mecanismo II – torção.....	111
4.4.6. Corte (cargas fora do plano)	112
4.5. DIMENSIONAMENTO AOS ESTADOS LIMITE DE SERVIÇO (ELS)	113
4.5.1. Deformação (cargas fora do plano)	113
4.5.2. Vibração (cargas fora do plano).....	114
4.5.2.1. Frequência natural	114
4.5.2.2. Critério de rigidez	116
4.5.2.2.1. Aceleração da vibração	117
4.6. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL AO FOGO	119
5. CÁLCULO DE UM EDIFÍCIO ALTO EM CLT	123
5.1. INTRODUÇÃO	123
5.2. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO	123
5.2.1. Sistema estrutural.....	125
5.2.2. Sistema construtivo.....	126
5.2.3. Solução construtiva do <i>UT system</i>	127
5.3. MODELAÇÃO DO <i>UT SYSTEM</i>	130
5.3.1. Dimensões dos componentes estruturais.....	131
5.3.2. Simplificações e alterações efetuadas na modelação	132
5.3.3. Determinação das ações	134
5.3.3.1. Ações permanentes.....	134
5.3.3.2. Ações variáveis	138
5.3.3.2.1. Cargas residenciais impostas nos pavimentos.....	138
5.3.3.2.2. Cargas impostas na cobertura	138
5.3.3.2.3. Ação da neve	138

5.3.3.2.4. Ação do vento nas fachadas.....	139
5.3.3.2.5. Ação do vento na cobertura.....	141
5.3.4. Pré-dimensionamento estrutural	142
5.3.4.1. Pré-dimensionamento dos pavimentos CLT	142
5.3.4.2. Pré-dimensionamento das paredes CLT.....	144
5.3.4.2.1. Determinação das forças internas de dimensionamento.....	147
5.3.5. Verificação do modelo tridimensional.....	149
5.3.6. Resultados do modelo base	152
5.4. MODELO RÍGIDO DO <i>UT SYSTEM</i>	156
5.4.1. Pré-dimensionamento das ligações	158
5.4.1.1. Capacidade resistente de uma ligação madeira-madeira.....	160
5.4.1.2. Cálculo da capacidade resistente da ligação paredes-vigas.....	160
5.4.1.3. Espaçamentos mínimos.....	162
5.4.1.4. Determinação da rigidez das ligações.....	164
5.5. MODELO FLEXÍVEL DO <i>UT SYSTEM</i>	166
5.5.1. Verificação aos Estados Limite Últimos	166
5.5.1.1. Situação de dimensionamento.....	166
5.5.1.2. Estabilidade	171
5.5.1.2.1. Encurvadura da parede CLT devida à compressão	171
5.5.1.3. Verificação da resistência de corte das ligações	173
5.5.2. Verificação aos Estados Limite de serviço	174
5.5.2.1. Situação de dimensionamento.....	174
5.5.2.2. Limitação das deformações	175
5.5.2.2.1. Manutenção do aspecto dos pavimentos na situação de projecto quase-permanente.....	176
5.5.2.2.2. Prevenção de danos e da limitação de utilização dos pavimentos na situação de projeto característica.....	177
5.5.2.3. Deslocamentos horizontais entre pisos	178
5.5.2.3.1. Modelo rígido.....	178
5.5.2.3.2. Modelo Flexível	179
5.6. ASPETOS RELEVANTES PARA O DIMENSIONAMENTO ÀS SOLICITAÇÕES HORIZONTAIS	180
6. CONCLUSÕES.....	185
6.1. CONCLUSÕES GERAIS	185
6.2. FUTURAS INVESTIGAÇÕES.....	188
6.3. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS PARA O DIMENSIONAMENTO DO <i>UT SYSTEM</i>	191

6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES DA ANÁLISE AO UT SYSTEM	192
6.5. SÍNTESE.....	195
7. BIBLIOGRAFIA.....	197
8. ANEXOS	203
8.1. CLT DIFERENTES TIPOS DE ESTRUTURAS CONSTRUÍDAS EM CLT.....	203
8.1.1. Edifícios residenciais	203
8.1.2. Edifícios comerciais e escritórios	204
8.1.3. Estruturas híbridas	205
8.1.4. Pontes	205
8.2. EXEMPLOS RESOLVIDOS DE DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS SIMPLES DE CLT	206
8.2.1. Dimensionamento de um painel de pavimento através da <i>Composite Theory (K-method)</i>	206
8.2.2. Dimensionamento de um painel de pavimento através da <i>Mechanically Jointed Beams Theory (Gamma Method)</i>	213
8.2.3. Dimensionamento de um painel de pavimento através da <i>Shear Analogy Theory</i>	218
8.2.4. Dimensionamento de um painel de parede utilizando a <i>Mechanically Jointed Beams Theory + RVSEs</i>	224
8.2.5. Dimensionamento de uma laje à vibração	231
8.2.6. Dimensionamento ao fogo de uma laje CLT	235
8.2.7. Dimensionamento ao fogo de uma laje CLT com revestimento ao fogo.....	237
8.3. TABELAS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO.....	240
8.3.1. Pré-dimensionamento de um painel de pavimento	240
8.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	242

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Configuração de um painel de CLT (Karacabeyli e Douglas, 2013).....	8
Fig. 2 – Exemplo de secções possíveis dos painéis de CLT (Karacabeyli e Douglas, 2013).	8
Fig. 3 – Tábuas retiradas dos toros de madeira (Mandegarian e Milev, 2010).	9
Fig. 4 – Encaixe e colagem das tábuas através de finger-joints (Mandegarian e Milev, 2010).	10
Fig. 5 – Colagem lateral das lamelas, formando as camadas constituintes do painel CLT (Mandegarian e Milev, 2010).....	10
Fig. 6 – Prensagem vertical e horizontal das camadas CLT (Mandegarian e Milev, 2010).	11
Fig. 7 – Esquema do processo de fabrico dos painéis de CLT (adaptado de Mandegarian e Milev, 2010).	12
Fig. 8 – Dimensões de um camião com reboque articulado padrão utilizado para o transporte dos painéis CLT (Stora Enso – Technical Folder, 2015).	13
Fig. 9 – Dimensões de um camião com mega reboque (Stora Enso – Technical Folder, 2015).....	13
Fig. 10 – Bridport House, construído em Londres no ano 2011 (http://www.bdonline.co.uk/bridport-house-east-london-by-karakusevic-carson-architects/5036283.article , 23/03/16).....	15
Fig. 11 – Custos unitários associados aos componentes estruturais de um edifício, segundo diferentes materiais estruturais para diferentes números de pisos (Crespell e Gaston, 2011).....	17
Fig. 12 – Edifício de sete andares em CLT testado na maior mesa sísmica do mundo, Japão (Karacabeyli e Douglas, 2013).	19
Fig. 13 – Pavimento em CLT com isolamento acústico aplicado no topo (Karacabeyli e Douglas, 2013).	21
Fig. 14 – Pavimento em CLT com isolamento acústico aplicado na base (Karacabeyli e Douglas, 2013).	21
Fig. 15 – Algumas possibilidades arquitetónicas relativas à planta do edifício, à posição do núcleo central e à divisão dos compartimentos residenciais (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).	25
Fig. 16 – Comparação da rigidez de paredes estruturais CLT com e sem aberturas. (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).	25
Fig. 17 – Exemplo de uma planta com uma localização ideal das coretes, casas de banho e cozinhas. (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).	26
Fig. 18 – Painel em CLT funcionando como pavimento (Wiegand <i>et al.</i> , 2011).	27
Fig. 19 – Painel em CLT funcionando como parede (Wiegand <i>et al.</i> , 2011).	28
Fig. 20 – Painel em CLT funcionando à flexão (Wiegand <i>et al.</i> , 2011).	28
Fig. 21 – Caminhos de transmissão possíveis entre dois compartimentos adjacentes (Mateus, 2008).	29
Fig. 22 – Exemplo de um pavimento de teto falso com revestimento acústico na face superior e inferior (Stora Enso – Soundproofing for CLT, 2016).	30
Fig. 23 – Exemplo de uma parede interior dupla com revestimento acústico (Stora Enso – Soundproofing for CLT, 2016).	30
Fig. 24 – Exemplos dos pormenores estruturais referentes ao três princípios de dimensionamento ao fogo (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).....	31
Fig. 25 – Exemplo de um projeto HVAC num edifício multifamiliar (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).....	32

Fig. 26 – a) pregos de aro anelar; b) parafusos auto-perfurantes totalmente roscados (Piazza <i>et al.</i> , 2013)	34
Fig. 27 – a) e b) cantoneiras para corte; c) cantoneiras para tração; d) placas metálicas de pregos (Piazza <i>et al.</i> , 2013).	35
Fig. 28 – Diferentes tipos ligação existentes entre painéis CLT num edifício CLT de três andares típico (Mandegarian e Milev, 2010).	36
Fig. 29 – Ligação do tipo parede – fundação: (a) Ligação com uma cantoneira; (b) Ligação com um ligador metálico escondido; (c) Ligação com um perfil de madeira (Mandegarian e Milev, 2010).	36
Fig. 30 – Ligação do tipo parede – parede (): (a) Ligação com uma lingueta; (b) Ligação com cobrejunta em madeira; (c) Ligação em corte de meia-madeira; (d) sistema de ligação com um tubo (Mandegarian e Milev, 2010).	37
Fig. 31 – Ligações do tipo parede – parede (⊥): (a) Ligação com parafusos auto-perfurantes; (b) ligação com um perfil de madeira; (c) ligação com uma cantoneira metálica; (d) ligação com uma placa metálica escondida (Mandegarian e Milev, 2010).	38
Fig. 32 – Ligação do tipo parede – pavimento usadas no sistema construtivo <i>platform system</i> : (a) Ligação com parafusos auto-perfurantes; (b) Ligação com cantoneira metálica; (c) Ligação com placas metálicas escondidas (Mandegarian e Milev, 2010).	40
Fig. 33 – Ligações do tipo parede – pavimento usadas no sistema construtivo <i>balloon frame</i> (Mandegarian e Milev, 2010).	41
Fig. 34 – Ligação do tipo parede – cobertura (Mandegarian e Milev, 2010)	42
Fig. 35 – Modelo <i>Frame</i> ; modelo <i>Circular Core</i> e modelo <i>Shear Walls</i> (da esquerda para a direita, respetivamente) (Chapman J., 2010).	43
Fig. 36 – Fundação <i>socket</i> em planta e secção transversal (Chapman J., 2010).	44
Fig. 37 – Ligação entre painéis CLT através de placas planas de aço (Chapman, 2010).	44
Fig. 38 – Esquema da colocação das <i>shear keys</i> e das hastes de aço para o modelo <i>Shear Wall</i> (Chapman, 2010).	45
Fig. 39 – Sistemas estruturais resistentes a cargas laterais – Dimensões dos painéis, Tensões e deformações entre pisos (Chapman, 2010).	46
Fig. 40 – Edifício Stadthaus, construído em CLT, situado em Hackney, leste de Londres. (adaptado de http://www.waughthistleton.com/project.php?name=murray , 14/03/16).	54
Fig. 41 – Edifício Forté construído em CLT, situado em Victoria Harbour, Docklands – Austrália (reproduzido de http://www.aboutpeople.com.au/stories.html , 05/04/16).	57
Fig. 42 – Complexo residencial Via Cenni em Milão (adaptado de http://urbanfilemilano.blogspot.pt/2015/03/zona-quarto-cagnino-via-cenni-leco.html , 14/06/16).	61
Fig. 43 – Planta estrutural do complexo residencial, composto por 4 torres de 9 andares (delimitados pelas linhas vermelhas) e por edifícios de ligação com 2 pisos (delimitados pelas linhas verdes) (Bernasconi, 2012).	62
Fig. 44 – Corte longitudinal de umas das torres do Via Cenni. O piso subterrâneo é constituído por betão armado e serve de garagem e de armazenamento de equipamento técnico (Bernasconi, 2012).	62
Fig. 45 – Exemplo das deformações e forças criadas na ocorrência de um evento sísmico. (Bernasconi, 2012).	64
Fig. 46 – Análises a serem efetuadas através da criação de um modelo de dimensionamento de uma estrutura a eventos sísmicos (Bernasconi, 2012).	65

Fig. 47 – Localização das placas EI60 nos elementos estruturais do complexo residencial Via Cenni (Bernasconi, 2012).	66
Fig. 48 – Princípio da colocação dos painéis EI60 e exemplificação da correta disposição das instalações do edifício (Bernasconi, 2012).	66
Fig. 49 – Configuração 4 - configuração estrutural para edifícios até 30 pisos (Green e Karsh,2012). 68	
Fig. 50 – Esquematização 3D do sistema estrutural relativo à configuração 4 (Green e Karsh,2012). 68	
Fig. 51 – Esquema estrutural proposto pelo <i>UT system</i> (Silva <i>et al.</i> , 2013).....	70
Fig. 52 – Fachadas propostas pelo <i>UT system</i> (Silva <i>et al.</i> , 2013).	70
Fig. 53 – Corte transversal (BB') e longitudinal (AA') do edifício proposto pelo <i>UT system</i> (Silva <i>et al.</i> , 2013).	71
Fig. 54 – Conceito híbrido utilizado em sistema de paredes (Sarti <i>et al.</i> , 2012).	72
Fig. 55 – Diferentes opções de dissipadores na parede: (a) barras internas, (b) barras internas substituíveis, (c) barras externas fundidas (modificado de Sarti <i>et al.</i> , 2012).	74
Fig. 56 – Placas fletoras em forma de “U”(UFPs) ligadas às paredes estruturais (Foreman, 2015).	74
Fig. 57 – Processo construtivo de uma parede pré-esforçada: a) fundações da parede; b) extremidades dos cabos de pré-esforço e dissipadores rebocados às fundações; c) ligação dos cabos de pré-esforço Macalloy e d) colocação em obra do painel LVL (Palermo <i>et al.</i> , 2012).	76
Fig. 58 – Aplicação dos perfis metálicos curvados (esquerda) e das placas de aço (direita) nas extremidades do painel de parede (Palermo <i>et al.</i> , 2012 e Foreman, 2015).	77
Fig. 59 – Ligação emendada de uma parede/pilar de um edifício de madeira pré-esforçado (Foreman, 2015).	77
Fig. 60 – Localização da abertura de acesso aos cabos de pré-esforço no 3º andar do edifício NMIT Arts and Media (Foreman, 2015).	78
Fig. 61 – Diferença na espessura das camadas de um painel CLT com a mesma espessura total (120 mm), mas produzido por empresas diferentes (KLH e Stora Enso) (Pérez <i>et al.</i> , 2016).	79
Fig. 62 – Direção principal (0º) e secundária (90º) da capacidade de carga de um painel CLT com 5 camadas (Novak <i>et al.</i> , 2014)	81
Fig. 63 – Comportamento de corte das camadas transversais (esquerda); deformação de corte rasante num painel CLT com 5 camadas (direita) (adaptado de Novak <i>et al.</i> , 2014; Gagnon e Pirvu, 2011).	83
Fig. 64 – Comportamento unidirecional (caso A) e bidirecional (caso B) de um painel de pavimento CLT apoiado segundo as 4 arestas e carregado perpendicularmente ao plano (Gagnon e Pirvu, 2011).	84
Fig. 65 – Secção transversal de um painel CLT com 3 camadas (esquerda) e 5 camadas (direita).....	86
Fig. 66 – Tensões de corte no painel CLT. (adaptado de Thiel e Schickhofer, 2010).....	88
Fig. 67 – Conceito do <i>Shear Analogy Method</i> (Guggenberger, 2012).....	92
Fig. 68 – Ilustração de um RVE e RVSE pertencente a um elemento CLT (esquerda) e forças atuantes sobre um RVE (direita) (Harris <i>et al.</i> , 2013).	95
Fig. 69 – Secção transversal de um elemento CLT com 5 camadas (Harris, 2013).	97
Fig. 70 – Coeficiente de correção de corte, κ , dependente do rácio da espessura das camadas longitudinais, t_0/t_{CLT} , (assumindo que $G_0 / G_r = 10$). Comparação entre as soluções analíticas e aquelas avaliadas por meio do software <i>Calculatis</i> . Onde t_0 é a soma das espessuras de todas as camadas longitudinais ($\alpha = 0^\circ$) (Harris, 2013).	100
Fig. 71 – Distribuição das tensões normais ao longo da secção transversal de um painel CLT devido a um momento fora do plano ($E_{90} = 0$) (Thiel <i>et al.</i> , 2016).	103

Fig. 72 – Tensões num RVSE com as lamelas coladas lateralmente e sem fissuras (à esquerda) e tensões num RVSE sem as lamelas coladas lateralmente e/ou com fissuras: mecanismo I - corte (centro) e mecanismo II – torção (à direita) (Schickhofer <i>et al.</i> , 2010)	108
Fig. 73 – Mecanismo I - corte (esquerda) e mecanismo II - torção (direita) (Schickhofer <i>et al.</i> , 2010)	109
Fig. 74 – Distribuição das tensões de corte ao longo da secção transversal de um painel CLT com 5 camadas (assumindo $E_{90} = 0$): orientado segundo a direção da carga (esquerda); orientado perpendicularmente à direção da carga (direita), (Thiel <i>et al.</i> , 2016)	113
Fig. 75 – Representação de vários cenários possíveis para a profundidade de carbonização ao longo do tempo de um elemento CLT com 5 camadas (adaptado de Harris <i>et al.</i> , 2013).	120
Fig. 76 – Definições relativas a secção transversal reduzida provocadas pelo incêndio. (Harris <i>et al.</i> , 2013).	121
Fig. 77 – Diferentes taxas de carbonização, β_0 , para elementos CLT horizontais (esquerda) e verticais (direita) (Stora Enso - Documentation on fire protection, 2016).	122
Fig. 78 – Planta do edifício proposto pelo <i>UT system</i>	124
Fig. 79 – Perfil AA' do edifício proposto pelo <i>UT system</i>	124
Fig. 80 – Sistema estrutural tipo do <i>UT system</i> (Silva <i>et al.</i> , 2014).	125
Fig. 81 – Sequência de montagem do <i>UT system</i> , usando o sistema construtivo <i>balloon frame</i> (Silva <i>et al.</i> , 2014).	126
Fig. 82 – Possíveis soluções construtivas das fachadas a adotar no <i>UT system</i> (Silva <i>et al.</i> , 2014).	128
Fig. 83 – Soluções construtivas adotadas pelo <i>UT system</i> para o desempenho acústico dos pisos e paredes CLT (Silva <i>et al.</i> , 2014).	129
Fig. 84 – Tipos de ligações adotados pelo <i>UT system</i> entre os diversos elementos estruturais (Silva <i>et al.</i> , 2014).	130
Fig. 85 – Modelo tridimensional do edifício proposto - localização das descontinuidades/ligações entre os painéis de parede pertencentes aos pisos 1-3 (bege), 4-6 (cinza) e 7-10 (amarelo).	132
Fig. 86 – Numeração dos diferentes tipos de vigas de madeira lamelada colada existentes no sistema estrutural: (1) Vigas de suporte das escadas; (2) Vigas núcleo central; (3) Vigas caixa de elevadores e (4) Vigas duplas.	133
Fig. 87 – Gerador automático da ação da neve para coberturas planas (<i>RFEM-5</i>).	139
Fig. 88 – Gerador automático da ação do vento para as fachadas (<i>RFEM-5</i>)	140
Fig. 89 – Gerador automático da ação do vento para a cobertura plana com parapeito (<i>RFEM-5</i>)... ..	141
Fig. 90 – Vão contínuo sujeito ao pré-dimensionamento (distâncias em metros).	143
Fig. 91 – Resultados obtidos no software <i>Calculatis</i> para os pavimentos CLT	144
Fig. 92 – Modelo tridimensional de um único piso do edifício proposto pelo <i>UT system</i> , usando o programa <i>RFEM-5</i>	145
Fig. 93 – Paredes com maior coeficiente de influência de acordo com as 3 categorias (Núcleo central, caixa de elevador, pilares e coretes) existentes na estrutura.	146
Fig. 94 – Representação gráfica de todas as rotações φ_x (<i>line hinges</i>) libertadas entre os elementos estruturais do modelo tridimensional base rígido.	151
Fig. 95 – Representação gráfica da libertação das rotações φ_x (<i>line release</i>) entre os pavimentos (superfície 252 e 253) que estão conectados às vigas duplas.	152
Fig. 96 – <i>RF- Laminate</i> : resultados máximos obtidos para a combinação fundamental $1,35 G_k + 1,5 Q_k$	153

Fig. 97 – Localização dos painéis de pavimento cujas tensões de compressão + flexão não foram verificadas aos ELU.....	153
Fig. 98 – Deformações nos elementos estruturais devido à combinação 1,35 Gk + 1,5 Qk.....	154
Fig. 99 – Verificação das tensões máximas de compressão + flexão (rácio) nos restantes tipos de elementos estruturais: a) vigas altas; b) pilares CLT; c) núcleo central e d) caixa de elevadores.	155
Fig. 100 – Alguns dos modos de rotura possíveis para uma ligação madeira-madeira de corte duplo, com recurso a ligadores do tipo cavilha (Leijten, 2008).	160
Fig. 101 – Efeito de grupo dos ligadores (adaptado de Leijten,2008).....	162
Fig. 102 – Espaçamentos mínimos entre ligadores do tipo cavilha (EN1995-1-1, 2004).....	163
Fig. 103 – Conceito de segurança usado no dimensionamento de estruturas em madeira	167
Fig. 104 – Tensões de corte $x'y'$ localizadas nos pavimentos CLT.....	169
Fig. 105 – Tensões de compressão/tração localizadas nos pavimentos CLT.	169
Fig. 106 – Tensões de compressão/tração localizadas nos pilares e coretes CLT.....	170
Fig. 107 –Tensões de compressão/tração localizadas nas paredes das caixas de elevadores.	170
Fig. 108 – Encurvadura da parede CLT segundo o eixo Y (perpendicular ao plano, menor inércia) (Novak <i>et al.</i> , 2014).	171
Fig. 109 –Encurvadura segundo as duas direções (Y e Z) de uma parede CLT com largura reduzida (Novak <i>et al.</i> , 2014).	172
Fig. 110 – Deformações segundo a situação de projeto quase-permanente (Novak <i>et al.</i> , 2014).....	176
Fig. 111 – Deformações segundo a situação de projeto característica (Novak <i>et al.</i> , 2014).....	177
Fig. 112 – Deslocamento entre pisos segundo a direção longitudinal (X) do modelo rígido do <i>UT system</i>	178
Fig. 113 – Deslocamento entre pisos segundo a direção transversal (Y) do modelo rígido do <i>UT system</i>	178
Fig. 114 – Deslocamento entre pisos segundo a direção longitudinal (X) do modelo flexível do <i>UT system</i>	179
Fig. 115 – Deslocamento entre pisos segundo a direção transversal (Y) do modelo flexível do <i>UT system</i>	179
Fig. 116 – “Capacity design” através da analogia da corrente (modificado de Paulay and Park (1975).	183
Fig. 117 – Moradias familiares construídas em CLT situadas em Rykkinn, Noruega (esquerda) e Klagenfurt, Áustria (Direita) (Karacabeyli e Douglas, 2013).....	203
Fig. 118 – Edifício multifamiliar construído em CLT situada em Judenburg, Áustria.(Karacabeyli e Douglas, 2013).....	203
Fig. 119 – Edifício comercial Viken Skog BA, Hønefoss, Noruega (Karacabeyli e Douglas, 2013).....	204
Fig. 120 – Edifício de escritórios Juwi head, Wörrstadt, Alemanha (Karacabeyli e Douglas, 2013). ..	204
Fig. 121 – Pavilhão de armazenamento de materiais, Katsch, Áustria (Karacabeyli e Douglas, 2013).....	204
Fig. 122 – Parque de estacionamento em Innsbruck, Áustria (Karacabeyli e Douglas, 2013).	205
Fig. 123 – Edifício residencial em South Carolina, USA (Karacabeyli e Douglas, 2013).	205
Fig. 124 – Ponte CLT Spielberg (esquerda) e ponte Raabsteg Feldbach (direita) (Mandegarian e Milev, 2010).	205
Fig. 125 – Representação esquemática do painel de pavimento CLT (cargas em kN/m e comprimento do vão em m) (<i>Calculatis</i> , http://www.clt.info/)	206
Fig. 126 – Constituição do painel de pavimento CLT.	207
Fig. 127 – Localização das duas tensões a serem verificadas.	208

Fig. 128 – Constituição do painel de pavimento CLT.	213
Fig. 129 – Constituição do painel de pavimento CLT.	219
Fig. 130 – Diagrama de esforços das vigas A e B, obtidos através do software Ftool.	219
Fig. 131 – Constituição do painel de parede CLT com espessura de 90mm (30x30x30).	225
Fig. 132 – Metodologia de verificação da análise à vibração.....	231
Fig. 133 – Secção transversal reduzida.	236
Fig. 134 – Secção transversal reduzida.	239
Fig. 135 – Representação esquemática do painel de pavimento CLT sujeito a análise dos diversos métodos (<i>Calculatis</i> , http://www.clt.info/)	242
Fig. 136 – Representação esquemática do painel de parede CLT sujeito à comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos de dimensionamento (<i>Calculatis</i> , http://www.clt.info/).....	243

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do desempenho ao fogo de elementos CLT de parede e pavimento (Osborne <i>et al.</i> , 2012).....	18
Tabela 2 – Gama de espessuras de painéis produzidos pelos fornecedores KLH, Binderholz, MMK e Stora Enso (Pérez <i>et al.</i> , 2016).	79
Tabela 3 – Comparação das propriedades mecânicas obtidas pelos principais fabricantes CLT (lamelas da classe C24), com aquelas sugeridas por Novak <i>et al.</i> (2014), segundo o EN 16351:2015 (adaptado de Pérez <i>et al.</i> , 2016).....	80
Tabela 4 – Fatores de composição, “k”. (Blass e Fellmoser, 2004).....	90
Tabela 5 – Valores da resistência e rigidez efetiva dos painéis CLT. (Blass e Fellmoser, 2004).....	90
Tabela 6 – Fator de redução κ_{CLT} , P e parâmetros p e q , de acordo com Silly (2010).	101
Tabela 7 – Determinação do módulo de corte reduzido, G_{xy} *, para os seguintes parâmetros: $t/a = 1/4$ e $G_{xy} = 650 /mm^2$, de acordo com Silly (2010).	102
Tabela 8 – Valores propostos de k_c , 90, CLT para painéis sujeitos a uma carga pontual, admitindo f_c , 90, CLT, $k = 2,85 N/mm^2$ e uma área real de contato, A_c , 90 (Salzmann, 2010; Bogensperger <i>et al.</i> , 2011).....	107
Tabela 9 – Valores propostos de k_c , 90, CLT para painéis sujeitos a uma carga linear, admitindo f_c , 90, CLT, $k = 2,85 N/mm^2$ e uma área real de contato, A_c , 90 (Serrano e Enquist, 2010)	107
Tabela 10 – Esquema para a determinação da espessura ideal, t_i *, de um elemento CLT com “n” camadas.	110
Tabela 11 – Valores do fator, k_m , considerando diferentes condições de apoio para o 1º Eigenmode (Smith <i>et al.</i> , 2009).....	115
Tabela 12 – Frequência crítica, f_{crit} , para requisitos elevados e normais.	116
Tabela 13 – Valores limite do critério de rigidez, w_{crit} , 1kN, para requisitos elevados e normais. ..	117
Tabela 14 – Coeficientes de Fourier e frequências de excitação, de acordo com Schweiz (2003).....	118
Tabela 15 – Valores recomendado para a taxa de amortecimento, ζ , dependente do tipo de construção do piso (Fitz, 2008).	118
Tabela 16 – Valores críticos da aceleração de vibração, a_{crit} , para requisitos elevados e normais (adaptado de Harris <i>et al.</i> , 2013).	119
Tabela 17 – Variação das dimensões de cada componente estrutural adotadas no modelo de elementos finitos.....	131
Tabela 18 – Secção transversal e espaçamento das vigas do sistema estrutural.	133
Tabela 19 – Ações permanentes dos pavimentos interiores	134
Tabela 20 – Ações permanentes dos pilares CLT.	135
Tabela 21 – Ações permanentes das paredes do núcleo central.....	135
Tabela 22 – Ações permanentes das paredes da caixa de elevadores.	136
Tabela 23 – Ações permanentes das fachadas.	136
Tabela 24 – Ações permanentes da cobertura.	137
Tabela 25 – Ações permanentes das caixas de escadas.....	137
Tabela 26 – Cargas impostas em pavimentos, varandas e escadas em edifícios (EN 1991-1-1:2002).	138
Tabela 27 – Ação do vento nas fachadas.	141
Tabela 28 – Ação do vento na cobertura.	142

Tabela 29 – Valor médio dos coeficientes de influência para as três paredes mais solicitadas de acordo com as diferentes categorias.	146
Tabela 30 – Ações atuantes nos elementos de parede	147
Tabela 31 – Esforços axiais máximo obtidos para cada segmento da parede mais esforçada de cada categoria.....	148
Tabela 32 – Percentagem de utilização das seções adotadas aos ELU.....	149
Tabela 33 – Resumo dos resultados obtidos dos diversos elementos estruturais aos ELU para a combinação fundamental.	156
Tabela 34 – Combinações de ações utilizadas na pré-análise, segundo os ELU.	157
Tabela 35 – Espaçamentos mínimos entre os ligadores da ligação parede-vigas.	163
Tabela 36 – Número de cavilhas, espaçamento e rigidez considerado/a para a ligação parede-vigas.	165
Tabela 37 – Combinações de ações utilizadas na pré-análise, segundo os ELU.	167
Tabela 38 – Resultados obtidos para a envolvente das combinações de ações (RC1), através do RF-Laminate.....	168
Tabela 39 – Tensões máxima de compressão, tração e de corte no plano $x'y'$ para cada tipo de elemento estrutural.	168
Tabela 40 – Verificação ao corte das ligações consideradas no modelo flexível do <i>UT system</i>	174
Tabela 41 – Resultados dos limites de deformação aos ELS para as vigas altas CLT (<i>Suface No. 421 e 424</i>) e painéis de pavimento (<i>Suface No. 801 e 843</i>) mais deformados.	176
Tabela 42 – Cargas de dimensionamento e respetivos esforços.	206
Tabela 43 – Propriedades do painel CLT.....	206
Tabela 44 – Tensões de flexão	207
Tabela 45 – Tensões de Corte	208
Tabela 46 – Tensões de corte rasante.....	209
Tabela 47 – Tensões de Corte utilizando o método simplificado	210
Tabela 48 – Deformação do painel	211
Tabela 49 – Propriedades do CLT.....	213
Tabela 50 – Tensões de flexão	214
Tabela 51 – Tensão de Corte.....	215
Tabela 52 – Tensão de corte rasante	215
Tabela 53 – Deformação do painel	216
Tabela 54 – Propriedades do CLT.....	218
Tabela 55 – Esforços atuantes nas vigas A e B.....	219
Tabela 56 – Tensões de flexão	220
Tabela 57 – Tensões de Corte	221
Tabela 58 – Tensões de corte rasante.....	222
Tabela 59 – Deformação do painel	223
Tabela 60 – Propriedades do CLT.....	224
Tabela 61 – Tensões de compressão e flexão no plano.....	226
Tabela 62 – Determinação das espessuras dos RVSEs para cada nó.	229
Tabela 63 – Tabela de dimensionamento à deformação de um painel de pavimento (<i>Stora Enso - Floor-Single-Span-Beam-Deformation</i>).....	241
Tabela 64 – Tensões e deformações obtidas para uma laje sujeita à flexão fora do plano, recorrendo a três métodos analíticos e através dos softwares <i>Calculatis</i> e <i>RFEM 5 – RF-Laminate</i>	243

Tabela 65 – Tensões obtidas para uma parede sujeita à compressão e flexão no plano, recorrendo ao γ -method + RVSEs e através dos softwares <i>Calculatis</i> e <i>RFEM 5 – RF-Laminate</i>	244
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

Letras maiúsculas latinas

A – Área;
B – Rigidez;
D – Rigidez axial;
E – Módulo de elasticidade;
EI – Rigidez à flexão;
F – Força;
G – Módulo de corte;
G_k – Valor característico das cargas permanentes;
I – Momento de Inércia;
K – Rigidez à flexão;
M – Momento flector;
*M** - Massa modal;
N – Força axial;
Q – Carga pontual referente à sobrecarga de utilização de carácter residencial;
Q_k – Valor característico da sobrecarga de utilização de carácter residencial;
R – Valor da resistência para a verificação da capacidade de carga;
S – Rigidez de corte;
ELS – Estados Limite de Serviço;
ELU – Estados Limite Últimos;
V – Força de corte;
W – Módulo da secção transversal;
Z – Centro de gravidade.

Letras minúsculas latinas

a – Aceleração (Sismo) ;
b – Largura do painel CLT;
c – Rigidez da mola por unidade de comprimento;
d – Espessura do elemento;
d_i – Espessura da camada individual *i*;
e – Distância;
f – Valor da resistência;
f₁ – Frequência natural;
h – Altura do elemento;
h_{CLT} – Espessura do painel CLT;
i – Raio de giração;
k – Fator;
l – Na direção da capacidade de carga após a indicação da constituição do painel;
ℓ – Comprimento/vão do painel CLT;
m̄ – Massa por unidade de área;

n - Número;
 p - Fator;
 q - Coeficiente de ductilidade;
 s - Espaçamento entre ligadores aparafusados;
 t - Espessura;
 w - Deformação perpendicular à direção da capacidade de carga após a indicação da constituição do painel (direção da largura);
 z - Ordenada da camada na secção transversal (Timoshenko-beam).

Letras gregas

α - Ângulo;
 α_{FE} - Coeficiente para a rigidez de corte de um painel;
 β - Taxa de carbonização;
 β_c - Coeficiente de imperfeição;
 γ - Para sismos, coeficiente de importância de um objeto;
 γ_i - Para o cálculo dos valores da secção transversal eficaz: fator de redução de uma camada i de acordo com o Gamma method;
 $\gamma_M, \gamma_G, \gamma_Q$ - Fatores parciais de segurança;
 η - Fator;
 φ - Deslocamento rotacional;
 ψ - Coeficiente de combinação;
 κ - Fator de aumento de corte ($\geq 1,20$);
 κ_z - Fator de correção de corte ($\leq 0,80$);
 λ - Esbeltez;
 μ - Coeficiente de fricção;
 ρ - Densidade aparente;
 σ - Tensões normais;
 τ - Tensões de corte.

Índices

0 - Na direção da camada superior (direção principal do vão);
05 - Quartil 5%;
90 - Na direção perpendicular à camada superior (direção auxiliar do vão);
ax - Axial (ligadores);
c - Compressão;
char - Carbonização;
CLT - Propriedades do CLT;
crit - Crítica;
d - Valor de dimensionamento (afetado com fatores parciais de segurança);
def - Coeficiente para a determinação das deformações por fluência;
eff - Valor transversal eficaz, considerando a constituição da secção transversal e a flexibilidade de corte (Gamma method);
fi - Relativo ao dimensionamento ao fogo;
fin - Valor final (da deformação);
g, G - Relativo às ações permanentes;

gross – Relativo à secção transversal total;
 i – Número do índice;
 inst – Valor inicial (da deformação);
 k – Valor característico (geralmente quartil 5%, sem coeficientes parciais de segurança);
 l – Longitudinal;
 m – Flexão;
 max – Máximo;
 mean – Médio;
 min – Mínimo;
 mod – Modificação para consideração da duração da carga e da humidade da madeira;
 n – camada n;
 net – Relativo à secção transversal parcial, sem ter em consideração a flexibilidade de corte das camadas ortogonais (apenas camadas longitudinais 0°) ;
 P – Polar;
 Q – Relativo às ações variáveis;
 qs – Na situação de dimensionamento quási-permanente;
 R – Corte rasante;
 ref – Valor de referência;
 s – Em relação ao centro de gravidade;
 sys – Coeficiente de sistema;
 t – Tração;
 tot – Total;
 T – Torção;
 v – Corte;
 x – Eixo global paralelo à direção das fibras das camadas superiores (direção principal do CLT);
 y – Eixo global ortogonal ao sentido das fibras das camadas superiores (eixo secundário do CLT);
 z – Eixo global perpendicular ao plano do CLT;
 0 – Eixo local paralelo às fibras;
 05 – Quartil 5%;
 20 – Quartil 20%;
 90 – Eixo local perpendicular às fibras (ambos tangencial e radial).

Caracteres especiais:

α_i – Distância desde o centro de gravidade da camada i até ao centro de gravidade geral;
 α_{i,f_1} – Coeficiente de Fourier da oscilação parcial harmônica predominante;
 β_n – Taxa de incineração fictícia;
 β_0 – Taxa de incineração unidimensional da madeira homogénea;
 β_c – fator de linearidade;
 ζ – Taxa de amortecimento modal;
 $\kappa_{CLT,P}$ – Fator de redução para a rigidez de torção;
 τ^*_v – Tensão de corte efetiva de um RVSE;
 b_f – largura efetiva da laje;
 D^*_{xy} – Rigidez de torção reduzida;

E_d – Valor característico de uma ação;
 $f_{1,beam}$ – Frequência natural de uma viga de vão único;
 $f_{1,plate}$ – Frequência natural de uma laje duplamente apoiada nos quatro lados;
 f_f – Frequência de excitação;
 f_1 – Frequência natural;
 F_0 – Peso próprio da pessoa excitatória;
 G_{xy}^* – Módulo de corte reduzido para elementos CLT, sem as lamelas coladas lateralmente e/ou com rachaduras;
 $k_{c,90,CLT}$ – Fator que tem em conta a configuração de carga, possibilidade de deslizamento e o grau de deformação à compressão;
 k_c – Fator de instabilidade;
 k_{f2} – Fator usado para o efeito de continuidade entre vigas;
 K_i – Módulo de deslizamento dos ligadores aparafusados;
 k_i – Fator de composição “i” (*Composite Theory*);
 k_m – Fator dependente das condições de apoio;
 l_c – Comprimento de vão em consola;
 l_k – Coeficiente de encurvadura;
 $L_{n,r,w}$ – Nível sonoro de percussão normalizado;
 M_{gen} – massa (generalizada) efetiva da laje;
 n_{cr} – Carga de encurvadura elástica ideal;
 n_x – tensão axial na direção “x” (estado plano de tensão);
 n_{xy} – tensão de corte na direção “x” (estado plano de tensão);
 n_y – tensão axial na direção “y” (estado plano de tensão);
 Q_s - Carga da neve;
 Q_w – Carga do vento;
 R_w – Índice de redução sonora ponderado;
 $S_{(E(i),Z(i))}$ – Primeiro momento de área, dependente do módulo de elasticidade, E , e do centro de gravidade, Z , das camadas;
 t^* – Espessura total de todos os RVSEs;
 t_i^* – espessura ideal de um RVSE;
 $w_{crit,1kN}$ - Valores limite da deformação vertical máxima instantânea segundo o critério de rigidez;
 $w(F, b_f)$ – Deformação vertical máxima instantânea provocada por uma força vertical concentrada estática, $F = 1$ kN;
 w_{ges} – Deformação causada pelo corte;
 z_i – distância de Steiner.

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil (MIEC), da Universidade do Minho inclui, neste capítulo, um breve enquadramento ao tema, bem como uma descrição dos objetivos pretendidos, da metodologia de investigação utilizada e da organização da dissertação.

1.1. ENQUADRAMENTO

A madeira é utilizada pelo Homem, como material de construção, desde o Período Neolítico. Contudo, desde o início do século XX tem vindo a perder relevância, nomeadamente, com o aparecimento do betão armado, um material de baixo custo, de fácil preparação e praticamente acessível a todos. Esta realidade conduziu a um decréscimo acentuado da utilização da madeira como material de construção. A sociedade foi ganhando um estigma em relação às construções em madeira, denominando-as precárias, com caráter temporário e de baixa durabilidade.

As recentes políticas ambientais visam a diminuição urgente das emissões de dióxido de carbono. Desta forma, o recurso à madeira como material de construção ganha novos contornos de viabilidade, uma vez que, a madeira é um material natural, renovável, facilmente reciclável e com capacidade de armazenamento de dióxido de carbono, sendo apenas emitido para a atmosfera aquando da combustão ou decomposição da madeira.

Surgiram recentemente novos sistemas construtivos utilizando a madeira como material estrutural, com a introdução de um produto inovador que propõe revolucionar a temática - Construção de Edifícios em Altura. Este novo derivado de madeira é denominado por CLT (Cross Laminated Timber, ou em Português, madeira lamelada colada cruzada) e possui elevada capacidade de carga com um reduzido peso próprio, permitindo elementos de elevada esbelteza, mesmo para vãos de grande dimensão. Em comparação com outros tipos de sistemas estruturais correntemente usados na construção, este sistema oferece novas possibilidades em termos de transferência de carga. Ao contrário dos sistemas porticados em que as cargas são transmitidas predominantemente em fluxos unidirecionais, nas estruturas em painéis de CLT os elementos

comportam-se como placas, sendo a transmissão da carga feita bidireccionalmente (Costa, 2013).

A utilização da madeira lamelada colada cruzada (CLT) na construção em altura é uma temática recente e ainda se encontra em fase de estudo, uma vez que o material ainda é relativamente novo e ainda não existe um profundo conhecimento das suas características físicas e mecânicas, dos melhores tipos de ligações e da viabilidade económica. Contudo, vários estudos (Silva *et al.*, 2014; Karacabeyli e Lum, 2013) têm sido conduzidos com o objetivo de contribuir para um melhor conhecimento deste inovador sistema construtivo, nomeadamente, através de estudos sobre o recurso a sistemas híbridos, utilizando outros tipos de materiais associados com o CLT, como o betão, aço, madeira lamelada colada, entre outros.

Investigadores da Universidade do Minho desenvolveram um sistema estrutural combinando elementos estruturais de CLT e madeira lamelada colada, denominado *UT system*, Silva *et al.* (2014). Esta proposta visa solucionar a limitada flexibilidade característica dos sistemas monolíticos CLT que têm por base painéis maciços resistentes. O *UT system* foi inspirado no *bundled tube concept*, que funciona como um conjunto de tubos individuais ligados entre si, de modo a fazê-los comportarem-se como uma unidade única, resultando numa melhoria da resistência e rigidez global da estrutura (Ali & Moon, 2007).

O CLT está presente em pisos, paredes e vigas altas enquanto o uso da madeira lamelada colada é restrito a vigas. As paredes CLT são os principais elementos responsáveis pela transferência das cargas gravíticas até às fundações. Adicionalmente, funcionam como paredes resistentes frente a ações horizontais, sendo colocadas perpendicularmente às fachadas de maneira a aumentar a resistência estrutural às solicitações horizontais (Ali & Moon, 2007). Os pisos CLT trabalham em conjunto com vigas duplas de madeira lamelada colada na distribuição das cargas para as paredes CLT, melhorando a rigidez do edifício e evitando o efeito do colapso progressivo. As vigas altas de CLT garantem o comportamento tridimensional do sistema garantindo uma adequada amarração dos tubos verticais (formados pelas paredes CLT) ao longo do perímetro do edifício.

O *UT system* baseia-se no sistema construtivo *balloon frame*, estando este associado a um melhor aproveitamento da cêrcea quando comparado com o *platform system*. Isto deve-se ao facto do sistema ser constituído por painéis de parede CLT contínuos entre pisos, evitando o

apoio direto dos painéis de pavimento nas paredes CLT, minimizando os problemas associados às compressões perpendiculares às fibras da madeira localizadas nos pavimentos CLT. Desta forma, os pavimentos não apresentam qualquer ligação com as paredes estruturais, criando-se espaçamentos ao redor das paredes CLT, de modo a acomodar possíveis deslocamentos entre os dois elementos estruturais e variações provocadas por efeitos de instabilidade dimensional (retração e inchamento). O elevado grau de pré-fabricação associado ao CLT, assim como o sistema de construção *ballon frame*, permitem obter ganhos na velocidade de construção.

Devido às características das ligações associadas ao método construtivo e à inexistência de uma clara definição das ligações a utilizar no caso de edifícios altos em CLT com as fundações em betão armado, foi necessário encontrar uma solução específica para o *UT system*. Após uma extensa revisão bibliográfica foi encontrada uma solução inovadora que proporcionará ao *UT system* mecanismos de resposta sísmica de baixo dano, através da implementação de um sistema híbrido de cabos pré-esforçados nas paredes CLT. Este sistema híbrido é denominado por Pres-Lam e foi desenvolvido na Universidade de Canterbury, Nova Zelândia (ver tópico 3.2.3).

1.2. PERGUNTA DE INVESTIGAÇÃO

Será o sistema estrutural proposto pelo *UT system* capaz de cumprir os requisitos impostos pelas verificações aos ELU e ELS, solucionando a necessidade de construção em altura e eliminando a compartimentação excessiva associada aos sistemas monolíticos CLT?

1.3. OBJETIVOS

O objetivo principal consiste em estudar a viabilidade do *UT system* através da realização de uma análise estrutural, utilizando um modelo tridimensional de elemento finitos, para um edifício com 10 pisos localizado em Lisboa. Com a realização desta dissertação procura-se também:

- Divulgar o CLT, como um material estrutural inovador capaz de substituir o betão armado em inúmeras situações de projeto;
- Divulgar as vantagens associadas à construção em CLT, com o intuito de consciencializar o setor da construção para a necessidade de perfil mais sustentável, sendo este um dos principais responsáveis pelas alterações climáticas;

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

- Desmistificar alguns preconceitos inerentes à utilização da madeira como material estrutural de construção;
- Apresentar uma síntese das diversas metodologias de cálculo existentes para dimensionar elementos CLT simples, uma vez que a inclusão do CLT no EC 5 ainda se encontra em fase de desenvolvimento;
- Estudar o tipo de ligações a considerar e a influência que as mesmas têm para o cálculo do edifício alto CLT;
- Contribuir para o desenvolvimento de novas soluções construtivas em altura, através conjugação da tecnologia Pres-Lam e do *UT system*.

1.4. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

Na presente dissertação foi adotada a metodologia de investigação-ação – *Action Research* (Coughlan P. & Coughlan D., 2002). A metodologia investigação-ação consiste numa forma de pesquisa sistemática, autorreflexiva e colaborativa, com foco no melhoramento de processos ou técnicas nos diversos campos de ação realizado num ambiente de trabalho (Coutinho, 2005).

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se a introdução, indicando o enquadramento, pergunta de investigação, objetivos assim como a metodologia de investigação utilizada.

No capítulo 2 é efetuada uma análise da revisão bibliográfica sobre o material CLT, incluindo o processo de fabrico e o processo construtivo CLT.

O capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica sobre algumas das construções em altura de CLT mais relevantes no mundo, bem como, propostas estruturais inovadoras, algumas delas, ainda em fase de estudo.

No capítulo 4 são abordados os diferentes métodos de cálculo disponíveis para o dimensionamento de elementos CLT, tendo em conta os Estados Limite Últimos, Estados Limite de Serviço e o fogo.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

O capítulo 5 visa estudar a viabilidade do *UT system* através do dimensionamento estrutural de um edifício multifamiliar de 10 pisos, com recurso ao módulo adicional RF-Laminate presente no software de elementos finitos RFEM-5.

No capítulo 6 são analisados e discutidos os resultados obtidos em relação à modelação do *UT system*. São apresentadas as conclusões gerais da dissertação e sugeridas futuras investigações a realizar em relação ao *UT system* e ao sistema construtivo com CLT.

O capítulo 7 corresponde às referências bibliográficas utilizadas para a elaboração da presente dissertação.

O último capítulo é constituído pelos anexos, onde é possível consultar diferentes tipos de construções que usaram o CLT como material construtivo. São ainda fornecidos alguns exemplos de dimensionamento de elementos simples CLT, segundo as diferentes metodologias de cálculo existentes. Por último, é apresentada uma tabela de comparação de resultados para os diversos métodos de dimensionamento: cálculos analíticos, softwares de dimensionamento e tabelas de dimensionamento.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

2. CONSTRUIR EM CLT

2.1. ORIGEM DO CLT

O CLT, conhecido em Portugal como madeira lamelada colada cruzada (MLCC), é um material que nasceu em Zurique, Suíça, em 1990, mas foi desenvolvido posteriormente na Áustria, através da cooperação entre a indústria e a universidade. Uma das empresas pioneiras no fabrico de CLT foi a empresa austríaca, KLH, depois de vários anos de pesquisa e estudos desenvolvidos em parceria com a Graz University of Technology (Costa, 2013).

Durante vários anos, o progresso foi lento, contudo em 2000 a construção CLT aumentou drasticamente. O crescimento deveu-se a inúmeros fatores, sendo este particularmente impulsionado pela criação de um movimento de construção sustentável (ecológico). A criação de melhores sistemas de comercialização e distribuição, o desenvolvimento de homologações técnicas nacionais (caso existam) ou aprovações técnicas europeias (ETA) referentes ao CLT, as inúmeras investigações conduzidas pelas universidades em parceria com a indústria, bem como, a divulgação das potencialidades do sistema construtivo, foram fatores determinantes para o desenvolvimento da construção em madeira com CLT. Os países líderes no uso do CLT, como sistema construtivo são: a Áustria, a Alemanha, a Suíça, a Suécia, a Noruega, o Reino Unido, a Austrália e o Canadá.

2.2. DEFINIÇÃO DO MATERIAL CLT

O CLT consiste em várias lamelas de madeira coladas entre si, formando uma camada que, posteriormente, será colada a outra, sobreposta ortogonalmente à anterior, sendo este processo repetido várias vezes até obter o número de camadas desejado (normalmente 3, 5 ou 7 camadas, podendo ter mais, em casos especiais), sendo obrigatório um número ímpar de camadas, com o intuito de criar um eixo de simetria na camada central (Fig. 1 e Fig. 2). As dimensões dos painéis de CLT podem ser ajustadas de acordo com as necessidades de cada projeto, contudo, estas estão dependentes do fornecedor escolhido, uma vez que, as dimensões são estabelecidas consoante a norma de produto (ETA) atribuída ao fabricante. As dimensões abaixo apresentadas são referentes à empresa Stora Enso em conformidade com a ETA-14/0349 (2014), e servem

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

apenas como exemplo sendo susceptível que hajam algumas variações de fabricante para fabricante.

Tábuas individuais:

- Espessura: entre 14 e 45 mm
- Largura: entre 40 e 300 mm
- Quociente entre a largura e a espessura: $\geq 4 : 1$

CLT:

- Espessura do painel: entre 42 e 350 mm
- Espaçamento máximo entre tábuas da mesma camada: 3 mm
- Largura do painel: ≤ 3 m (devido a limitações de transporte)
- Comprimento do painel: $\leq 16,5$ m (devido a limitações de transporte)

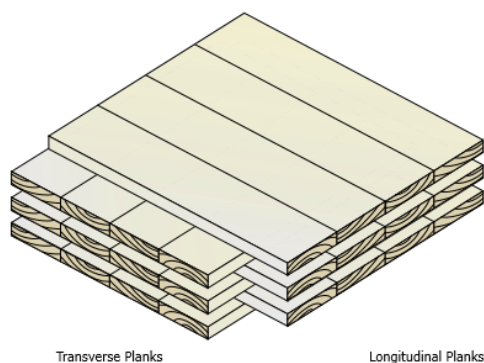


Fig. 1 – Configuração de um painel de CLT (Karacabeyli e Douglas, 2013).

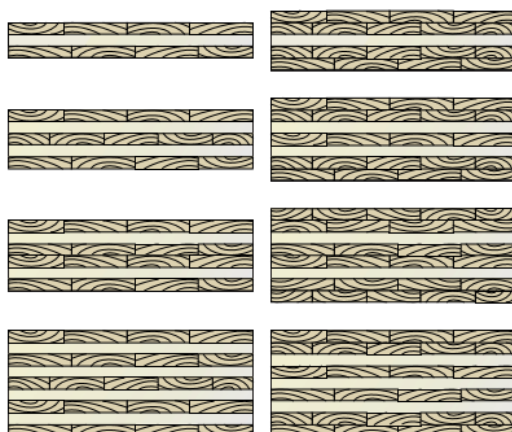


Fig. 2 – Exemplo de secções possíveis dos painéis de CLT (Karacabeyli e Douglas, 2013).

A construção utilizando CLT proporciona estabilidade dimensional, resistência e rigidez, tornando-se uma alternativa viável ao betão, alvenaria e aço em diversas aplicações. Este material pode ser utilizado em todo o edifício, já que o sistema é resistente tanto a cargas verticais, como a laterais, sendo usado em coberturas, pavimentos ou paredes. Geralmente, painéis com 3 ou 5 camadas, com uma espessura entre 80 e 120 mm, são usados em paredes e painéis com 5 ou 7 camadas, com espessura entre 140 e 200 mm, são utilizados para os pavimentos, podendo a espessura e o número de camadas variar de acordo com as especificidades de cada projeto.

Os painéis em CLT usados em paredes devem ter as camadas exteriores orientadas de cima para baixo, paralela às cargas gravíticas de maneira a maximizar a capacidade de carga vertical da parede. Relativamente aos pavimentos e coberturas, as camadas exteriores deve ser orientadas paralelamente segundo a direção com maior vão.

2.3. PROCESSO DE FABRICO

Cada empresa produtora de painéis CLT possui praticamente o mesmo processo de fabrico, residindo as principais diferenças no tipo de cola usada e nas dimensões dos elementos. O processo de fabrico dos painéis de CLT passa primeiro pela rigorosa seleção da madeira, as mais utilizadas são: abeto, pinho e larício.

Após a seleção da madeira, procede-se ao corte das tábuas provenientes dos toros de madeira, como é apresentado na Fig. 3. Pode-se constatar que a qualidade da madeira é mais elevada quanto mais afastada do centro forem retiradas as tábuas, devido ao maior número de fibras presentes, à medida que nos afastamos do centro do toro.

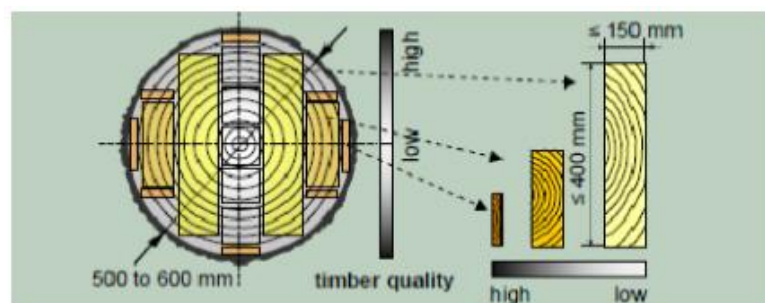


Fig. 3 – Tábuas retiradas dos toros de madeira (Mandegarian e Milev, 2010).

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

De acordo com a EN 14081-1 (2016), as tábuas são classificadas, visual ou mecanicamente, consoante a sua resistência. Geralmente, as camadas de um painel CLT são constituídas pela classe de resistência C24, contudo é possível utilizar classes de resistência inferiores (C16 ou C18) nas camadas transversais. A mistura de tábuas, pertencentes à mesma camada, com classes de resistência diferentes não é permitida. O processo de seleção das tábuas é feito para excluir as partes de madeira que têm defeitos, nomeadamente, nós. Posteriormente as tábuas sofrem um processo de lixagem, com o intuito de aumentar a aderência de colagem. O próximo passo passa por efetuar os *finger-joints* (Fig. 4) no topo das tábuas de forma a conseguir ligar as tábuas de topo e assim conseguir os comprimentos pretendidos no sentido longitudinal das tábuas. Normalmente, nesta fase são formados longos membros até 16,5 m de comprimento.

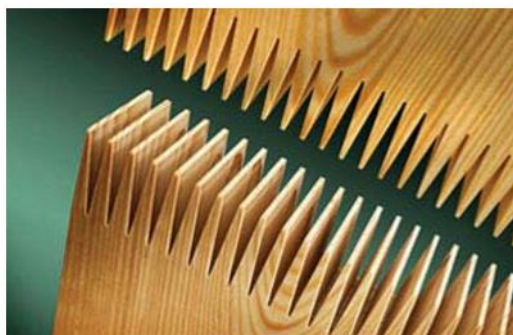


Fig. 4 – Encaixe e colagem das tábuas através de finger-joints (Mandegarian e Milev, 2010).

De seguida, ocorre a formação das respetivas camadas do painel CLT, através da colagem das lamelas lateralmente umas às outras (Fig. 5). A colagem lateral das lamelas é opcional, variando de acordo com processo de fabrico da respetiva empresa em questão (Fig. 5). Assim, existe a possibilidade de criação de painéis CLT com pequenos espaçamentos entre as lamelas de cada camada.

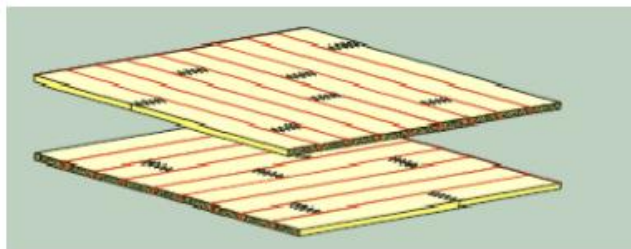


Fig. 5 – Colagem lateral das lamelas, formando as camadas constituintes do painel CLT (Mandegarian e Milev, 2010).

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

De referir que os trabalhos de colagem são maioritariamente efetuados com recurso a colas do tipo PUR (one-component Polyurethane), livres de formaldeído e solventes. Existe, porém, outros tipos de colas utilizados, nomeadamente, a cola EPI (Emulsion-Polymer-Isocyanate), usada na colagem lateral das lamelas e a cola MUF (Melamine-Urea-Formaldehyde), amplamente utilizada pelas empresas fabricantes do CLT, contudo, a substância formaldeído foi classificada recentemente como cancerígena (categoria 1B) e mutagénica (categoria 2) (Adaptation to Technical Progress – CLP – Regulation 605, 2014).

De seguida, é efetuada a colagem das camadas com recurso a uma cola do tipo PUR, sendo, posteriormente, elaborada a prensagem vertical (geralmente com prensas hidráulicas) das mesmas com uma pressão de 6 MN/m^2 , proporcionando uma colagem rigorosa de todas as camadas e formando um painel maciço monolítico. É normalmente efetuada também uma prensagem horizontal com uma pressão até $0,6 \text{ MPa}$, aumentando ainda mais a resistência dos painéis.

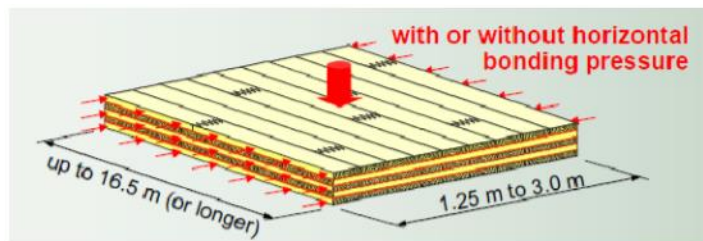


Fig. 6 – Prensagem vertical e horizontal das camadas CLT (Mandegarian e Milev, 2010).

Posteriormente, os painéis CLT são lixados através de uma máquina de maneira a obter-se uma superfície lisa. O painel é cortado no local de produção, de acordo com o tamanho pretendido, utilizando uma moderna tecnologia, que permite rasgar/cortar os elementos com elevada precisão. Esta nova tecnologia de corte é controlada por controlo numérico (CNC) e torna a pré-fabricação destes painéis bastante eficiente, visto que, diminui os resíduos na obra, tornando possível reaproveitar o material excedente. Isto permite a execução de aberturas para janelas, portas, ligações, sistemas de serviço e condutas. É também possível a execução de acabamentos e isolamentos térmicos dos painéis, no local de produção.

Por último, os painéis devem passar por uma fase de controlo de qualidade, ou seja, os requisitos do produto prescritos na norma do produto (no caso da empresa Stora Enso: ETA-14/0349) devem ser verificados em fábrica (por exemplo, resistência à flexão, resistência ao corte,

delaminação, entre outros). A Fig. 7 apresenta uma síntese das principais fases do processo de fabrico do CLT.

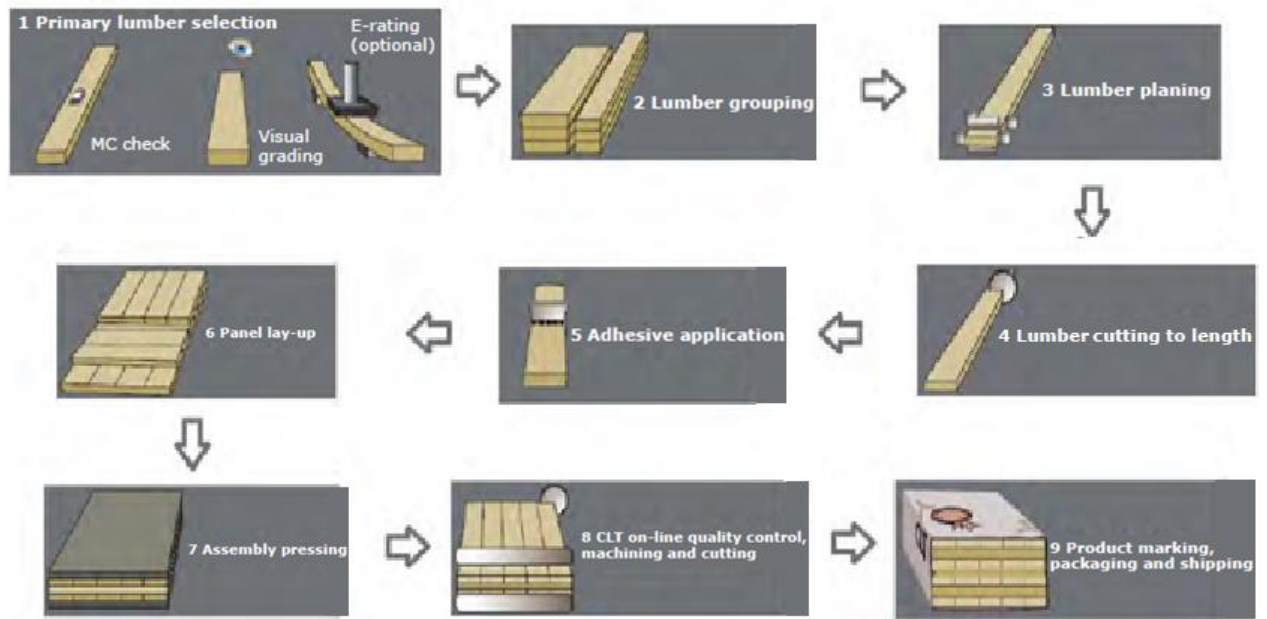


Fig. 7 – Esquema do processo de fabrico dos painéis de CLT (adaptado de Mandegarian e Milev, 2010).

2.4. TRANSPORTE DOS PAINÉIS CLT

O transporte dos painéis CLT da fábrica para o local de obra é feito geralmente mediante camiões, contudo, existe a possibilidade de o mesmo ser feito por comboio ou através de contentores transportados por barco. Os camiões mais utilizados no transporte de painéis CLT são os camiões com reboque articulado padrão (Fig. 8). As dimensões máximas dos painéis CLT estão limitadas segundo normas europeias/nacionais que definem as dimensões máximas de circulação permitidas para cada tipo de veículo. O camião com reboque articulado padrão é o meio de transporte mais comum e mais económico no transporte do CLT. Este apresenta uma capacidade máxima de 25 toneladas (cerca de 50 m³ de CLT) e permite o transporte horizontal de painéis CLT com largura e comprimento máximos de 2,45 m x 13,6 m. Existe a possibilidade do comprimento dos painéis ser estendido até aos 16m, através de outros tipos de reboque, estando estes associados a custos superiores de transporte.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

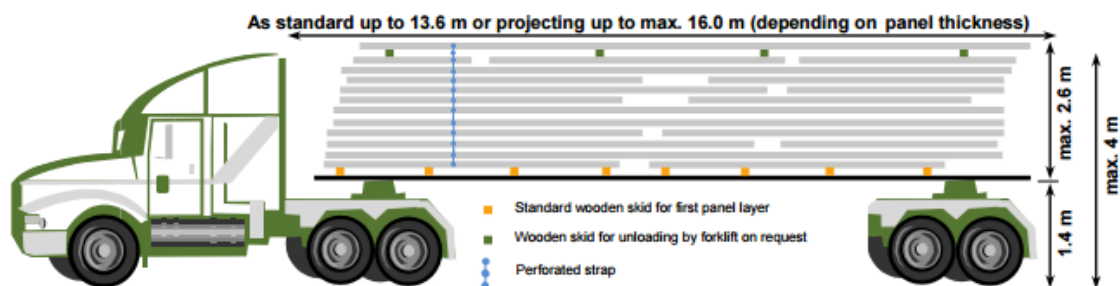


Fig. 8 – Dimensões de um caminhão com reboque articulado padrão utilizado para o transporte dos painéis CLT (Stora Enso – Technical Folder, 2015).

Caso os painéis CLT possuam larguras superiores a 2,45 m, estes devem ser transportados na vertical. O transporte é feito através de camiões com mega reboque até 3 m de altura (Fig. 9). O acondicionamento dos painéis é feito com recurso a uma plataforma em forma de “A” na zona central do reboque, calços nas extremidades e um material aderente na base, garantindo todas as condições de segurança e estabilidade de transporte. Devido ao espaço de utilização da plataforma em forma de “A”, este tipo de camiões apresenta uma capacidade de carga inferior (45 m^3). Outro aspeto relevante é a dificuldade acrescentada de aluguer deste tipo de veículos, estando esta associada a custos mais elevados.

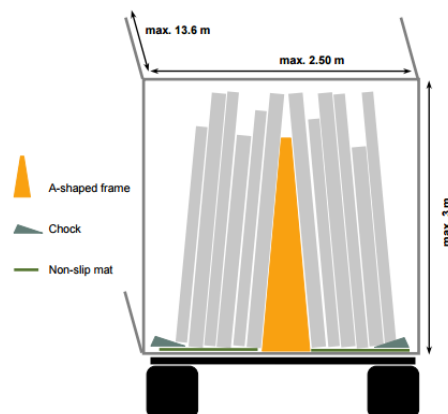


Fig. 9 – Dimensões de um caminhão com mega reboque (Stora Enso – Technical Folder, 2015).

2.5. CONTROLO DE QUALIDADE – MARCAÇÃO CE

As regras técnicas para o uso do CLT são fornecidas nas homologações técnicas nacionais (caso existam) ou aprovações técnicas europeias (ETA). As aprovações contêm os requisitos mínimos de produção, os requisitos do produto, o controlo de qualidade e as regras para a marcação e

rotulagem. Além disso, contêm regulamentos relativos à conceção do projeto e à física das construções.

Assim, a empresa fabricante deve ter um certificado geral de competência para o trabalho de colagem, denominado aprovação de colagem (prova de aptidão para a colagem de elementos construtivos em madeira, com capacidade estrutural). O CLT é sujeito a um adicional controlo de produção de fábrica e também a um bianual controlo externo de qualidade por autoridades independentes.

A aprovação técnica europeia (ETA) tem como objetivo garantir o controlo de qualidade do produto através da atribuição da marca CE. A marca CE indica que o CLT foi fabricado de acordo com a ETA e, portanto, a sua comercialização é permitida na Europa.

2.6. VANTAGENS ASSOCIADAS AO SISTEMA CONSTRUTIVO CLT

O CLT apresenta, para além das vantagens já referidas, outras provenientes das características específicas do material. Este tópico fornece uma visão geral de alta relevância desses benefícios, e é dado destaque a questões de particular importância para os engenheiros de estruturas.

2.6.1. RAPIDEZ E EFICIÊNCIA DA INSTALAÇÃO

Os painéis CLT são fabricados para aplicações específicas. São pré-fabricados, e devidamente cortados já com os detalhes do projeto, ou seja, podem já apresentar as aberturas para portas, janela, escadas, canais para as instalações necessárias. São, deste modo, enviados diretamente do fabricante para a obra já com um grande número de operações realizadas em fábrica, onde podem ser instalados de forma rápida e eficientemente, o que garante uma grande rapidez de construção.

Como exemplo, é de referir o Bridport House (Fig. 10), construído em 2011 em Londres, e que representa o maior bloco de apartamentos contemporâneo construído no mundo em madeira. A construção em CLT foi concluída em 12 semanas por quatro trabalhadores qualificados e um supervisor.



Fig. 10 – Bridport House, construído em Londres no ano 2011 (<http://www.bdonline.co.uk/bridport-house-east-london-by-karakusevic-carson-architects/5036283.article>, 23/03/16).

2.6.2. FLEXIBILIDADE DE PROJETO

O CLT pode ser usado na construção integral de um edifício ou parcialmente em paredes, pavimentos e/ou coberturas. A sua reduzida massa, entre outras características, tornam o CLT altamente adaptável a diferentes tipos de projetos, desenhos e as condições do local, como solos moles ou proximidade acentuada para prédios vizinhos. Elementos em CLT também podem ser combinados com outros materiais de construção, permitindo flexibilidade no projeto, estilo e acabamento arquitetônico. Quando são necessárias modificações em obra, uma das vantagens da CLT em relação a outros materiais (por exemplo: betão) é que as mudanças podem ser feitas no local com ferramentas simples.

Dois exemplos de flexibilidade de projeto permitidas pelo CLT são o Earth Sciences Building e o Forté: i) o Earth Sciences Building (ESB) da Universidade de British Columbia é composto por duas alas de cinco andares – uma ala Sul constituída por laboratórios feitos de betão armado convencional e a ala Norte, com um novo edifício denominado LEED Gold, com escritórios e salas de aula, que utiliza madeira como o elemento estrutural principal. A Ala Norte apresenta uma combinação inovadora de sistemas de madeira maciça, incluindo coberturas em CLT e coberturas exteriores. As duas alas estão ligadas por um átrio e a estrutura é suportada por pilares e vigas de madeira lamelada colada, e os pavimentos são feitos por uma solução mista

de um derivado da madeira denominado *laminated strand lumber* (LSL) com betão; ii) o Forté é o primeiro edifício em CLT na Austrália e atualmente o prédio de apartamentos em madeira mais alto do mundo, constituído por 10 pisos. As paredes e os pavimentos formam uma estrutura de suporte de carga semelhante a favos de mel, com os vãos dos pavimentos atingindo até 6 m, proporcionando um caminho de carga repetitiva para a resistência vertical e lateral. Lend Lease, que era ao mesmo tempo o criador e o arquiteto do projeto, cita uma série de razões para a escolha de CLT, incluindo a capacidade para a fabricação de materiais com tolerâncias precisas, fora do local de obra e a sua instalação rápida. A instalação de 10 pisos em CLT necessitou apenas de cinco trabalhadores qualificados e somente 10 semanas, sendo estimada por Lend Lease uma poupança de 30 por cento em relação à mesma estrutura em betão.

2.6.3. COMPETITIVIDADE DE CUSTO

Segundo um estudo realizado pela FPInnovations (Crespell e Gaston, 2011), a construção de estruturas leves de madeira ainda é o sistema mais económico para projetos de baixa envergadura (Fig. 11). Foi ainda realizada pela mesma entidade uma análise de competitividade de custo para diferentes tipos de construção em CLT, sendo os resultados comparados com os respetivos custos associados à construção-tipo em betão, alvenaria e aço. Mesmo sem levar em conta as vantagens de menor tempo de construção e a redução dos custos de fundação (devido ao reduzido da solução em CLT), o CLT apresentou um custo competitivo para edifícios residenciais e não residenciais de média altura, edifícios educacionais e comerciais de baixa altura e edifícios industriais com apenas 1 piso. O estudo chegou à conclusão que o CLT é particularmente rentável em estruturas grandes, com forma regular e em situações onde a fabricação é repetitiva.

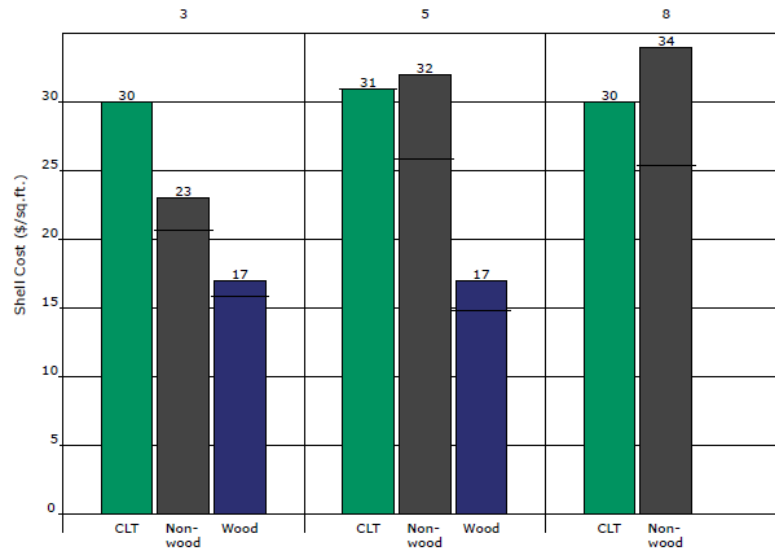


Fig. 11 – Custos unitários associados aos componentes estruturais de um edifício, segundo diferentes materiais estruturais para diferentes números de pisos (Crespell e Gaston, 2011).

2.6.4. PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIOS

O desempenho ao fogo de painéis de parede e de pavimento de CLT foi avaliado através de um programa de ensaios experimentais conduzidos pelo National Research Council of Canada (NRCC) e pela FPIinnovations (Osborne *et al.*, 2012). Foram realizados 8 ensaios à escala real com o intuito de determinar a taxa de carbonização, o desempenho ao fogo da cola PUR e o procedimento de cálculo. O desempenho ao fogo é afetado por diversos fatores, nomeadamente: espécie de madeira, tipo de cola, espessura e número de camadas, exposição ao fogo, pormenores da ligação e revestimentos protetores. Os resultados dos diversos ensaios realizados são apresentados na Tabela 1. Por exemplo, para um painel CLT desprotegido com 7 camadas, sujeito a um carregamento de 14,5 kPa, foi obtida uma capacidade de resistência ao fogo de aproximadamente 3 horas. Assim, concluiu-se que o CLT apresenta uma resistência ao fogo considerável, podendo ser comparada a sistemas tradicionais não combustíveis.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 1 – Resultados do desempenho ao fogo de elementos CLT de parede e pavimento (Osborne *et al.*, 2012).

Elemento	Nº camadas	Espessura (mm)	Placas de gesso (mm)	Carga	Taxa de carbonização (mm/min)	Modo de rotura	Resistência ao fogo (min)
Parede	3	114	2 x 12,7	333 kN/m	0,41	Estrutural	106
Parede	5	175	-	333 kN/m	0,65	Estrutural	113
Parede	5	105	-	72 kN/m	0,80	Estrutural	57
Pavimento	3	114	2 x 12,7	2,7 kN/m ²	-	Sem rotura	77
Pavimento	5	175	-	11,8 kN/m ²	0,64	Integridade	96
Pavimento	3	105	1 x 15,9	2,4 kN/m ²	0,6	Integridade	86
Pavimento	5	175	1 x 15,9	8,1 kN/m ²	0,75	Integridade	124
Pavimento	7	245	-	14,6 kN/m ²	0,65	Estrutural	178

Frangi *et al.* (2008) submeteram um edifício CLT de 3 pisos (escala real) a condições normais de incêndio, para avaliar o desempenho global e encontrar possíveis pontos fracos na estrutura. Os painéis CLT foram protegidos com uma ou duas placas de gesso cartonado não combustível. A investigação confirmou que, mesmo para estruturas de madeira, é possível limitar a propagação do fogo para um compartimento, através de medidas estruturais. No compartimento acima do compartimento de fogo não foi registado um aumento da temperatura nem a presença de fumo. Devido à proteção da estrutura de madeira, através de placas de gesso cartonado, os danos nos painéis CLT foram relativamente pequenos.

Em suma, a espessura da secção transversal e o número de camadas do CLT proporciona uma valiosa resistência ao fogo. Devido à reduzida taxa de carbonização associada aos produtos de madeira maciça, os painéis de CLT mantêm a capacidade estrutural significativa por um período prolongado de tempo, quando exposto ao fogo. Uma vez formada, a carbonização protege a madeira de uma maior degradação. Além disso, os painéis CLT não contribuem para a propagação/crescimento do incêndio oferecendo uma maior compartimentação quando utilizado para paredes interiores. Outro grande atributo dos painéis CLT é a sua massa térmica

sólida, que permite que um lado do painel esteja a uma temperatura perto de 1000 °C, enquanto a outra face se encontra à temperatura ambiente.

2.6.5. DESEMPENHO SÍSMICO

Após uma revisão bibliográfica sobre o desempenho sísmico de edifícios em CLT, com a contribuição de diversas investigações científicas desenvolvidas mundialmente e através dos resultados dos ensaios quase-estáticos em série, efetuados em painéis de parede CLT pela FPInnovations (Popovski e Karacabeyli, 2012), conclui-se que o sistema construtivo em CLT é resistente a cargas laterais.

No Japão, por exemplo, um edifício de sete andares em CLT foi testado na maior mesa sísmica do mundo no decorrer do projeto SOFIE (Ceccotti *et al.*, 2013). Mesmo quando submetido à simulação de um sismo grave (magnitude de 7,2, e a aceleração de 0,8 a 1,2 g), a estrutura não apresentou nenhuma deformação residual após o teste. O desvio máximo entre pisos era de 3,81 cm e a deformação lateral máxima no topo do edifício era de apenas 28,7 cm. O edifício resistiu a 14 eventos sísmicos consecutivos sem praticamente nenhum dano, o que, além de demonstrar a segurança dos edifícios em CLT, ilustra bem serem estruturas resilientes.



Fig. 12 – Edifício de sete andares em CLT testado na maior mesa sísmica do mundo, Japão (Karacabeyli e Douglas, 2013).

2.6.6. DESEMPENHO ACÚSTICO DOS ELEMENTOS EM CLT

O controlo dos níveis de ruído em edifícios multifamiliares são requisitos obrigatórios nos regulamentos de construção de quase todo o mundo. Em muitos casos, estes requisitos são tão rigorosos como os requisitos inerentes ao dimensionamento estrutural e à segurança ao fogo. O desempenho acústico de edifícios de CLT facilmente excede os requisitos impostos pelos regulamentos de construção, através da aplicação de revestimentos isolantes nas paredes exteriores e em tetos falsos. Contudo, é necessário adotar medidas para limitar a transmissão indireta do ruído através de diferentes compartimentos. Uma das medidas passa por utilizar tetos falsos suspensos. Outra medida passa por efetuar descontinuidades entre as paredes ao longo dos pisos e descontinuidades entre pavimentos de diferentes compartimentos. A transmissão indireta do ruído em ligações entre paredes e pavimentos de CLT pode ser controlada através de barras metálicas, parafusos isolados e tiras de amortecimento de vedador de poliuretano ou de borracha natural laminada.

No Canadá, foram efetuados estudos (Schoenwald *et al.*, 2013) sobre a avaliação da classe de transmissão do som (STC) e da classe de isolamento do som de impacto (IIC) nas ligações estruturais entre pisos e paredes de CLT. Assim, estudos paramétricos foram realizados para: o isolamento do ruído de impacto em pavimentos de CLT (com e sem diversos tipos de revestimentos acústicos e placas de gesso cartonado), o isolamento de ruído aéreo em paredes de CLT (com e sem placas de gesso cartonado) e a transmissão indireta de ruído entre elementos estruturais de CLT. Os resultados foram usados como dados de entrada para as previsões do isolamento do ruído de impacto aparente e do ruído aéreo em edifícios reais CLT, usando a norma ISO 15712-2:2005(E). Assim, o estudo permitiu o desenvolvimento de uma base de dados que permite aos projetistas prever o desempenho acústico de sistemas construtivos de CLT.

Na Europa, os elementos de CLT têm sido classificados na classe de som A e B. Segundo Crespell e Gagnon (2010) para uma parede exterior de CLT (85 mm de espessura + 150 mm de isolamento acústico) o índice de redução sonora ponderado, R_w , situa-se entre 47 e 52 dB, sendo o limite mínimo para a classe A igual a 43 dB (Izewska, 2002). Já para paredes divisórias de CLT o R_w situa-se entre 65 e 75 dB, sendo o limite mínimo para a classe A igual a 50 dB (Izewska, 2002). Um pavimento de CLT (5 camadas + teto falso + isolamento de fibra de vidro de 200 mm + 2 placas de gesso cartonado de 15 mm) apresenta um nível sonoro de percussão

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

normalizado, $L_{n,r,w}$, igual a 48 dB, sendo o limite máximo para a classe A igual a 53 dB (Izewska, 2002).

Nota: a conversão das unidades canadianas para europeias é feita da seguinte forma: $STC = R_w$ e $IIC = 110 - L_{n,r,w}$.

Assim cabe aos projetistas a definição do tipo de isolamento necessário (tipo de material e a sua respetiva espessura) para garantir os requisitos mínimos impostos no Código Internacional de Construção (IBC). A Fig. 13 e a Fig. 14 mostram exemplos de pavimento com sistemas de isolamento de som.



Fig. 13 – Pavimento em CLT com isolamento acústico aplicado no topo (Karacabeyli e Douglas, 2013).



Fig. 14 – Pavimento em CLT com isolamento acústico aplicado na base (Karacabeyli e Douglas, 2013).

2.6.7. DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

A condutividade térmica é a medida da taxa de fluxo de calor através de uma unidade de espessura de um material sujeito a um gradiente de temperatura (Evans L., s.d.). A condutividade térmica da madeira estrutural é significativamente inferior à condutividade dos metais com que a madeira é frequentemente ligada em obra. Por exemplo, a condutividade da madeira de resinosas com 12 % de conteúdo de humidade encontra-se no intervalo de 0,7 a 1,0 Btu/(ft².hr.°F) comparado com o valor de 1500 para o alumínio , 310,6 para o aço, 6 para o betão , 7 para o vidro , 5 para o gesso, e 0,25 para a lã mineral.

Uma vez que o CLT é um painel de madeira maciça, irá também fornecer massa térmica, contudo, os fatores mais relevantes no desempenho térmico do CLT são: o coeficiente de transferência de calor, U, e a capacidade de isolamento, R. Ambas grandezas estão relacionadas com a espessura do painel. Painéis mais espessos têm valores U mais baixos, sendo melhores isolantes e, portanto, requerem menos revestimentos térmicos. O valor R normalmente utilizado para a madeira é de 0,49 por centímetro de espessura. Assim, um painel CLT com 20 cm de espessura teria um valor de R de 9,8. A madeira de resinosas, em geral, possui cerca de um terço da capacidade de isolamento térmico para a mesma espessura de isolamento de manta de fibra de vidro, contudo é cerca de 10 vezes superior ao betão e alvenaria, e 400 vezes superior ao aço.

Além disso, desde que os painéis CLT começaram a ser fabricados usando equipamentos de Controlo Numérico Computadorizado (CNC), as tolerâncias dimensionais diminuíram e as ligações entre painéis são mais precisas, resultando numa melhor eficiência energética

2.6.8. DESEMPENHO AMBIENTAL.

A pegada ambiental do CLT é frequentemente discutida como sendo potencialmente vantajosa quando comparada com sistemas equivalentes em betão. Inerente à discussão, é um pressuposto que o perfil ambiental comparativo do CLT será menor, com base na análise de ciclo de vida genérica (LCA) dos perfis da madeira e do betão. O CLT apresenta uma pegada de carbono baixa comparativamente com o betão, devido às baixas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e devido à capacidade de armazenamento de carbono dos produtos em madeira.

Vários estudos (Werner e Richter, 2007; Sathre e O'Connor, 2010; Athena Sustainable Materials Institute, 2012a e 2012b) sobre a avaliação do ciclo de vida (LCA) demonstram que a madeira supera ambientalmente o aço e betão em termos de energia incorporada, poluição do ar e poluição da água. A madeira também apresenta uma pegada de carbono mais leve, pois os produtos de madeira armazenam carbono no seu interior, proveniente da absorção efetuada pelas árvores. A fabricação de madeira requer um consumo de energia inferior ao aço e betão. Todos estes fatores citados anteriormente resultam em menores emissões de gases de efeito estufa. Segundo Guest *et al.* (2012) o uso da madeira como material de construção pode contribuir para a redução das emissões dos gases de efeito de estufa (CO₂), minorando os

potenciais efeitos do aquecimento global a curto prazo. Desta forma, o uso do CLT na construção promove a criação de reservas de dióxido de carbono até ao fim de vida do edifício, podendo os painéis serem reaproveitados para outros edifícios ou, em último caso, incinerados (restabelecimento do ciclo de carbono).

O armazenamento de carbono é um atributo importante dos componentes estruturais da madeira, que normalmente permanece por longos períodos. Com a utilização do CLT no setor da construção, a massa de carbono armazenada na madeira é significativa. Cálculos estimados pela *Wood Carbon Calculator*, baseados na investigação de Sathre e O'Connor (2010), para o edifício CLT “*The Crossroads*” previram um benefício potencial de armazenamento de carbono total na ordem das 692 toneladas de CO₂ (equivalente), que é comparável à manutenção de 132 carros na estrada, por um ano, ou ao fornecimento de energia total para operar uma casa durante 59 anos.

2.6.9. EFICIÊNCIA DOS RECURSOS

O CLT contribui para o uso eficiente do recurso de várias maneiras. Uma das vantagens do CLT é que se pode fazer uso de materiais de menor dimensão que não poderiam ser usados em aplicações estruturais. Além disso, como os painéis de CLT são fabricados especificamente para cada projeto, quase não há resíduos no local de trabalho, e os fabricantes podem reutilizar os restos de fabricação de escadas e outros elementos arquitetónicos, ou utilizar como biocombustível.

Em termos de utilização global de recursos, a distinção entre construção de estruturas leves e pesadas é importante. O CLT foi desenvolvido não como um substituto para a construção de estruturas leves, mas como uma alternativa, de baixas emissões de carbono, aos materiais de construção “pesados”, como o betão e aço nas aplicações construtivas onde construção de estruturas leves de madeira não é aconselhável: em edifícios mais altos, em armazéns industriais com paredes de grande comprimento que precisam suportar os impactos de máquinas pesadas, ou edifícios de escritórios da classe A, onde algumas paredes divisórias e vibrações mínimas do pavimento são desejadas. Um edifício em CLT pode exigir mais quantidade de madeira do que um edifício de estrutura leve, mas quando comparado ao aço ou betão em aplicações onde os três são potencialmente aplicáveis, vantagens como renovabilidade, pegada de carbono,

baixa energia incorporada e eficiência energética operacional, fazem do CLT uma escolha ambientalmente preferível.

2.7. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA CONSTRUTIVO CLT

O CLT permite o desenvolvimento de um sistema construtivo que permite a possibilidade de uma construção simples em termos de elementos estruturais, apresentando apenas paredes, pavimentos e coberturas. No que concerne às propriedades físicas da construção em CLT, destacam-se os seguintes aspectos: estruturas com simples constituição, havendo clara separação entre a estrutura de suporte de carga e a camada de isolamento; simples tecnologia de ligação de elementos; possibilidade de construções maciças, sem recurso a caixa-de-ar no sistema construtivo das paredes; boa estanqueidade ao ar sem recurso a placas de isolamento; normalmente não é necessário barreira contra o vapor de água; com o intuito de melhorar o clima interno da construção é possível utilizar revestimento em madeira decorativa ou apenas a aplicação direta dos painéis de CLT com os respectivos acabamentos estéticos das lamelas exteriores que se encontram à vista dos utilizadores; maior capacidade de armazenamento de massa térmica da construção.

A principal vantagem do sistema construtivo CLT, em relação a outros tipos de sistemas construtivos convencionais, passa pelo reduzido tempo de construção inerente ao elevado grau de pré-fabricação. Contudo, isto requer por parte dos projetistas uma maior atenção na fase de planeamento do projeto, visto que, a ocorrência de erros de projeto após o envio dos painéis para o local de obra pode em certas situações comprometer financeiramente o empreendimento. É de extrema importância que arquitetos e engenheiros saibam tirar partido das potencialidades do CLT como material construtivo. Nos tópicos seguintes serão apresentados alguns aspectos relevantes a ter em consideração quando se projeta com o sistema construtivo CLT.

2.7.1. PRINCÍPIOS ARQUITETÓNICOS

O sistema construtivo em madeira maciça CLT permite aos arquitetos uma grande liberdade construtiva, permitindo a criação edifícios multifamiliares, escolas, edifícios comerciais e de escritórios, edifícios residenciais, edifícios de armazenamento, etc. Dependendo do local e da sua implantação, o arquiteto pode considerar e propor tipologias variadas para todo o projeto ou para edifícios específicos.

A planta tipo do edifício, a posição e forma do núcleo de acesso vertical, bem como a distribuição dos compartimentos residenciais fazem parte dos parâmetros básicos de uma estrutura de um edifício multifamiliar em CLT (Fig. 15). A localização central do núcleo de acesso vertical em combinação com uma distribuição simétrica das paredes estruturais produz uma otimização da capacidade de suporte do edifício. Sempre que possível, a arquitetura deve optar por uma disposição simétrica dos elementos em planta, de maneira a evitar efeitos de torção na estrutura.

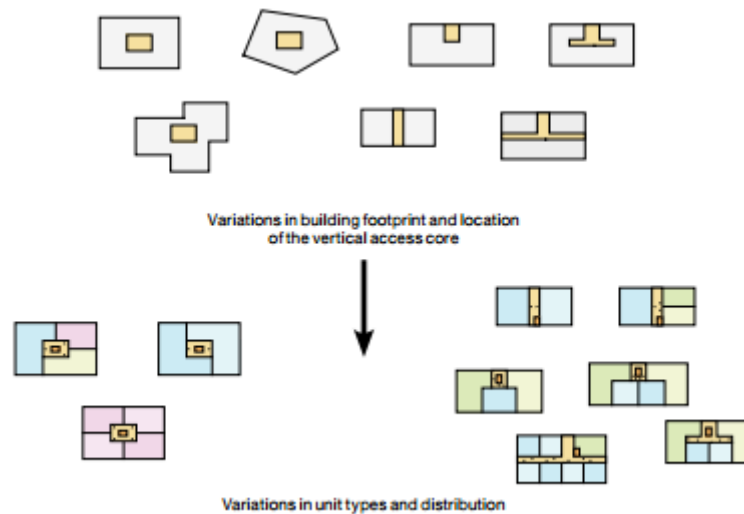


Fig. 15 – Algumas possibilidades arquitetônicas relativas à planta do edifício, à posição do núcleo central e à divisão dos compartimentos residenciais (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).

Em termos estruturais, os arquitetos devem ter em consideração a necessidade de um número adequado de paredes estruturais para que a estrutura seja resistente a forças laterais e verticais. As aberturas em painéis de parede estruturais devem ser bem planeadas (tamanho, localização e número) devida à redução acentuada da rigidez do painel (Fig. 16).

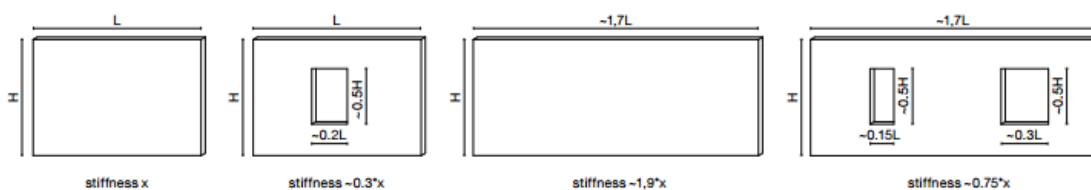


Fig. 16 – Comparação da rigidez de paredes estruturais CLT com e sem aberturas. (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).

A utilização de pavimentos em combinação com sistemas de vigas é aconselhável para a criação de espaços interiores mais amplos, permitindo vãos mais longos e eliminando a necessidade de um elevado número de elementos de suporte de carga.

A localização das coretes devem estar preferencialmente em torno do núcleo vertical (Fig. 17) para facilitar a manutenção e gestão das instalações das construções (condutas, cabos, etc). As casas de banho e cozinhas devem estar próximas das coretes, permitindo as ligações dos diversos serviços inerentes a estas instalações de uma forma prática e eficiente.

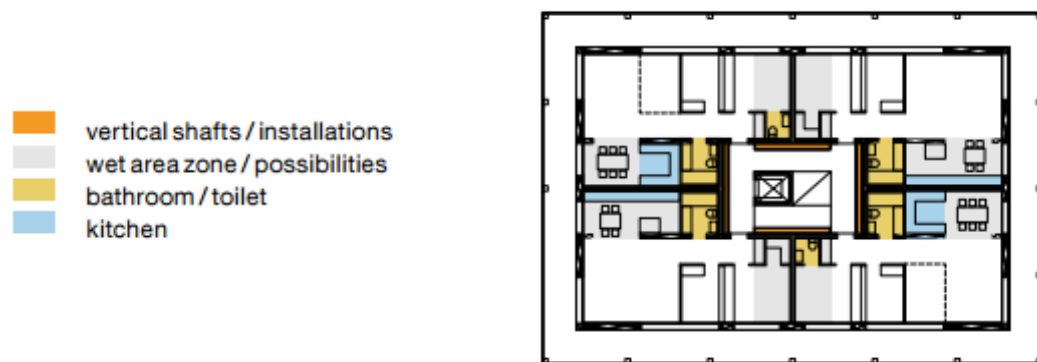


Fig. 17 – Exemplo de uma planta com uma localização ideal das coretes, casas de banho e cozinhas. (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).

As paredes divisórias não estruturais podem ser posicionadas sem qualquer restrição. Para além disso, este sistema construtivo permite liberdade arquitetónica relativamente aos seguintes elementos: varandas (de recesso, em balanço, em suspensão, etc.), janelas (emolduradas, sistemas envidraçados, etc.), portas (articuladas ou deslizante), paredes e elementos de mobiliário fixo. As superfícies e acabamentos interiores e exteriores das estruturas podem ser definidas individualmente para cada projeto, de acordo com projeto arquitetónico, necessidades técnicas e os requisitos locais.

2.7.2. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

O CLT tem inúmeras possíveis aplicações nomeadamente enquanto parede, pavimento e/ou cobertura. Contudo, o funcionamento dos painéis CLT é dependente das condições de apoio dos mesmos, sendo classificados da seguinte forma:

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

- Painel - elementos que funcionam bidireccionalmente, sendo geralmente apoiados pontualmente ou continuamente em todos os lados;
- Viga - elementos que funcionam unidireccionalmente, sendo apoiados continuamente nas extremidades longitudinais.

2.7.2.1. PAINEL

As cargas perpendiculares ao plano do elemento produzem esforços de flexão que são principalmente distribuídos através das camadas do painel paralelas à direção do vão, no caso dos pavimentos. As vigas de madeira lamelada colada cruzada apenas funcionam numa direção, não sendo rentável a utilização deste material em vigas, pois, as lamelas perpendiculares às cargas não trarão resistência ao sistema, havendo desperdício de material. Uma vantagem considerável do sistema de madeira lamelada colada cruzada consiste na distribuição de carga bidireccional que permite que os sistemas de pavimentos (Fig. 18) sejam apoiados continuamente em todos os lados do painel, em apoios pontuais ou em consola.

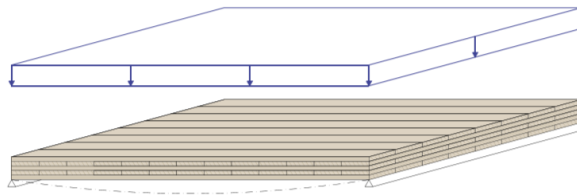


Fig. 18 – Painel em CLT funcionando como pavimento (Wiegand *et al.*, 2011).

2.7.2.2. PAREDE

As cargas verticais sobre elementos de parede criam tensões normais nas camadas paralelas à carga aplicada. Tensões de flexão, que resultam de possíveis ligações excêntricas dos pavimentos ou de deformações que ocorrem, são aplicadas as placas de parede. Devido à disposição transversal das camadas individuais do painel, as placas de parede (Fig. 19) apresentam uma capacidade de carga horizontal superior e podem, portanto, ser usadas simultaneamente para o contraventamento da estrutura. A elevada rigidez e capacidade de suporte de carga dos elementos de madeira lamelada colada cruzada permitem a sua utilização em estruturas residenciais e industriais com vários andares.

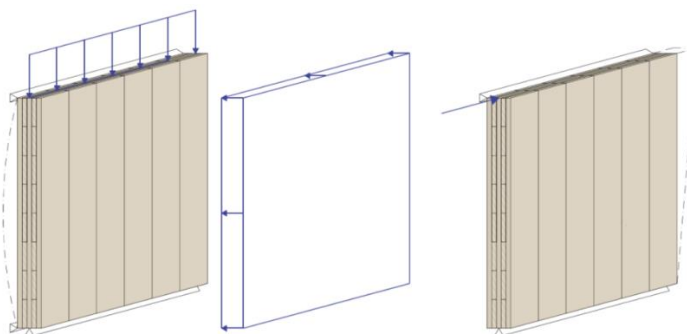


Fig. 19 – Painel em CLT funcionando como parede (Wiegand *et al.*, 2011).

2.7.2.3. VIGA

Orientadas as camadas longitudinais (exteriores) de um painel CLT horizontalmente permite ao elemento estrutural a capacidade de transferir as cargas efetivas paralelas ao plano do elemento, através de flexão (Fig. 20). Este é tipicamente o caso de lintéis de janela/portas, coberturas rígidas e painéis de pavimento. Existe ainda a possibilidade de formar placas dobradas CLT facilmente.

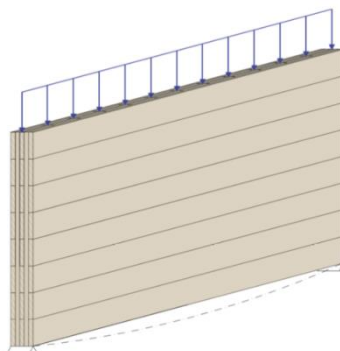


Fig. 20 – Painel em CLT funcionando à flexão (Wiegand *et al.*, 2011).

2.7.2.4. OUTROS

Dependendo do processo de fabrico, é possível a execução de elementos dobrados/curvados. Esses elementos de casca, que são predominantemente sujeitos a forças normais ou flexão, são geralmente usados para estruturas especiais, por exemplo, para sistemas de apoio de coberturas especiais. Contudo é de salientar que a sua produção é um processo relativamente dispendioso, uma vez que a madeira lamelada colada cruzada não apresenta características apropriadas para o efeito.

2.7.3. PRINCÍPIOS SOBRE A ACÚSTICA DOS EDIFÍCIOS

A transmissão sonora entre dois compartimentos é um processo complexo que envolve transmissões diretas e secundárias/marginais (Fig. 21). As transmissões diretas são caracterizadas pela transmissão do som através de uma parede comum a ambos os compartimentos. Já as transmissões secundárias são realizadas através de elementos adjacentes ao elemento de separação ou através de espaços laterais (portas ou condutas de ventilação).

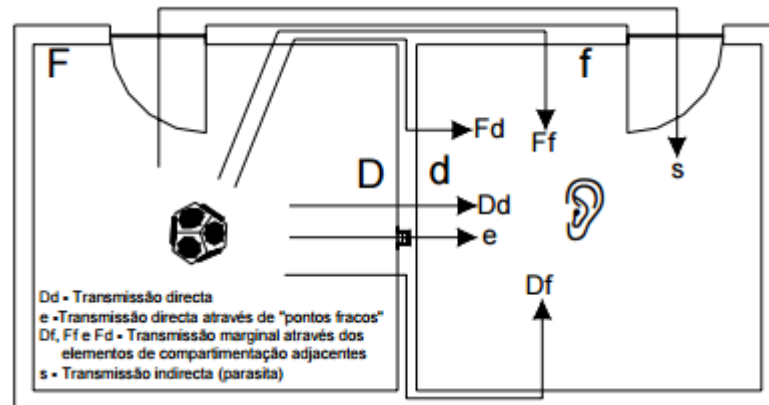


Fig. 21 – Caminhos de transmissão possíveis entre dois compartimentos adjacentes (Mateus, 2008).

A fim de controlar o ruído e a vibração indesejada, o projeto acústico tem em consideração uma vasta gama de fatores que afetam as transmissões diretas e secundárias entre quartos e apartamentos. A maneira mais simples de reduzir o ruído aéreo e melhorar o isolamento acústico dos apartamentos na construção CLT passa por aplicar revestimentos em camadas (por exemplo: isolamento acústico e placas de gesso). A transmissão marginal do som através dos elementos de compartimentação adjacentes pode ser reduzida através da utilização de bandas elásticas entre as ligações das paredes com os pavimentos (separação dos elementos estruturais) ou através da montagem de painéis de revestimento flexível.

O isolamento acústico dos pavimentos pode ser melhorado através do aumento de massa ou melhorando o isolamento mecânico dos seus componentes. A utilização de teto suspenso isolado mecanicamente (montados sobre molas ou aros) reduz de uma maneira mais eficaz as vibrações e as emissões de ruído. O desempenho acústico dos pavimentos é melhorado através da instalação de uma betonilha relativamente pesada (5-7 cm) por cima de uma placa de isolamento ao som de impacto suave ($s' \leq 10 \text{ MN/m}^3$) com gravilha para fornecer massa

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

adicional por baixo (Fig. 22). Em termos de isolamento acústico, os revestimentos de teto são mais eficazes quando isolados mecanicamente (montados sobre molas ou aros). As cavidades devem ser isoladas com lã mineral para evitar a ressonância das mesmas.

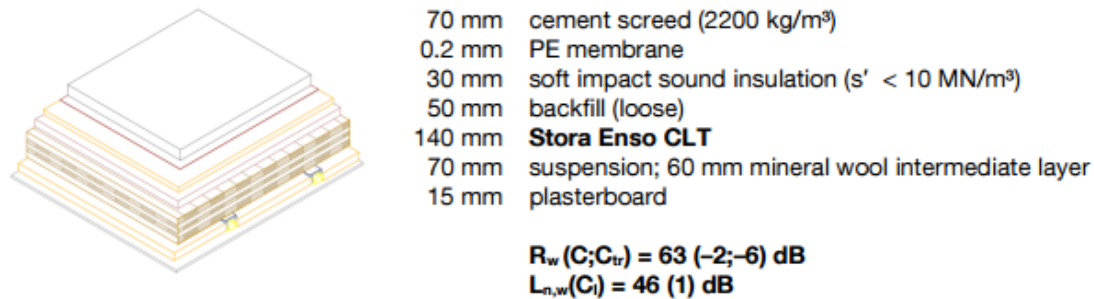


Fig. 22 – Exemplo de um pavimento de teto falso com revestimento acústico na face superior e inferior (Stora Enso – Soundprofing for CLT, 2016).

O isolamento acústico de componentes de camada única é determinado pela sua massa de superfície base e pela rigidez de flexão. Quando se trata de painéis de parede com múltiplas camadas (Fig.), maior isolamento acústico pode ser obtido através de uma menor massa. Para conseguir um bom isolamento ao som, a ressonância dos revestimentos dos painéis deve ser tão baixa quanto possível em frequência (≤ 100 Hz). A frequência de ressonância pode ser reduzida aumentando o espaçamento entre as camadas, aumentando a massa das camadas individuais e assegurando que os revestimentos dos painéis estão ligados o mais flexível possível à parede de suporte de carga. Para evitar a ressonância das cavidades, os revestimentos dos painéis devem ser preenchidos com material fibroso de isolamento de absorção de som.

Double-layer facing panel



Fig. 23 – Exemplo de uma parede interior dupla com revestimento acústico (Stora Enso – Soundprofing for CLT, 2016).

2.7.4. PRINCÍPIOS SOBRE A SEGURANÇA AO FOGO DOS EDIFÍCIOS

No sistema construtivo CLT existem três princípios relativos à obtenção de resistência ao fogo para materiais composto por madeira maciça (Fig. 24):

Princípio 1: "madeira maciça exposta": inexistência de camadas de proteção adicionais sobre o painel CLT, sendo a resistência ao fogo completamente oferecida pelo mesmo;

Princípio 2: "encapsulamento limitado": painel CLT com camadas de proteção contra incêndio sobre ele. É permitida a carbonização do painel CLT;

Princípio 3: "encapsulamento completo": painel CLT com camadas de proteção contra incêndio sobre ele. Não é permitida a carbonização do painel CLT.

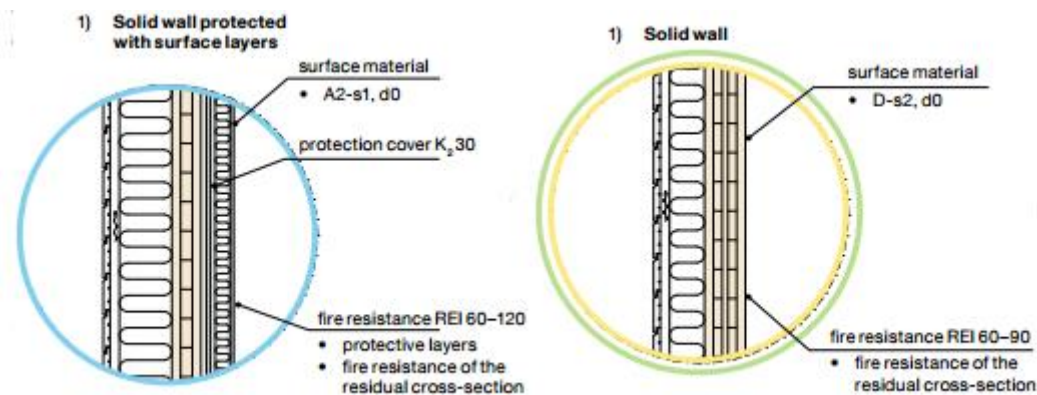


Fig. 24 – Exemplos dos pormenores estruturais referentes ao três princípios de dimensionamento ao fogo (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).

2.7.5. PRINCÍPIOS SOBRE SISTEMA HVAC DOS EDIFÍCIOS

O objetivo de um sistema HVAC é proporcionar conforto térmico aos ocupantes e garantir a qualidade do ar interior. A Fig. 25 fornece um exemplo das principais rotas das condutas presentes num sistema de ventilação centralizado de um edifício. As condutas principais de ventilação passam por tetos falsos na direção horizontal e através das coretes na direção vertical. O objetivo passa por alcançar rotas simples, curtas, sem necessidade de furos difíceis através das estruturas dos edifícios. A localização das coretes deve estar junto aos corredores de acesso. Desta forma, a propagação dos ruídos das condutas para o interior dos apartamentos é reduzida substancialmente.

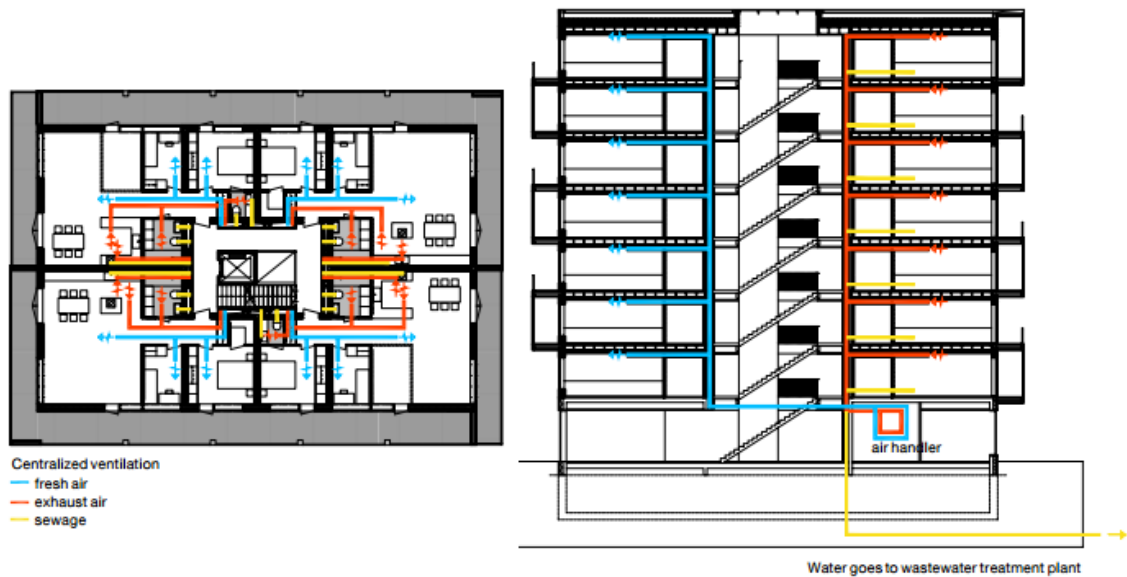


Fig. 25 – Exemplo de um projeto HVAC num edifício multifamiliar (Stora Enso – Residential Multistorey Buildings - Design Manual, 2016).

2.8. AS LIGAÇÕES NAS ESTRUTURAS DE CLT

Nas estruturas de CLT existem dois componentes principais, nomeadamente, os painéis CLT que as constituem e as ligações entre os mesmos. É sabido que o comportamento das ligações tem um papel fulcral no desempenho estrutural da construção de CLT. As ligações têm por objetivo preservar a resistência estrutural do edifício e são importantes para a resistência global e capacidade de serviço do edifício. Devido às limitações impostas pelas dimensões máximas de transporte dos painéis pré-fabricados (3.00 m x 13.60 m), as estruturas CLT apresentam um elevado número de ligações entre os diferentes elementos estruturais e entre painéis pertencentes ao mesmo elemento estrutural (ligações do tipo parede-parede e pavimento-pavimento). Assim, as ligações entre elementos de CLT adquirem um papel ainda mais crucial para a resistência e estabilidade da estrutura. Neste tipo de construção os painéis CLT apresentam uma elevada rigidez, sendo a ductilidade e a dissipação de forças no sistema estrutural fornecidas pelas ligações (Dujic *et al.*, 2008).

A eficiência estrutural das construções CLT reside principalmente na capacidade dos painéis de pavimentos funcionarem como um diafragma e das paredes estruturais resistirem às cargas laterais, sendo a obtenção destas condições extremamente dependente da eficiência dos sistemas de ligação adotados para a estrutura em análise. Um diafragma consiste num elemento estrutural horizontal ou inclinado (no caso de coberturas) que transmite as cargas laterais aos

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

elementos resistentes verticais de uma estrutura, principalmente por meio de tensão de corte no plano. Os diafragmas geralmente possuem dupla função uma vez que suportam simultaneamente cargas gravíticas. Existem dois tipos diferentes de diafragma: os flexíveis e os rígidos. Os diafragmas flexíveis resistem às forças laterais segundo a área de influência, independentemente da flexibilidade dos membros para qual a transferência de forças ocorre. Por outro lado, os diafragmas rígidos efetuam a transferência de carga para vigas ou paredes em função da sua flexibilidade e da sua localização na estrutura. Desta forma, a flexibilidade de um diafragma afeta a distribuição das forças laterais para os componentes verticais que fazem parte da resistência lateral de uma estrutura.

O correto dimensionamento e execução das ligações nas estruturas de CLT promove diversas vantagens, nomeadamente: manutenção da integridade estrutural; ductilidade estrutural em situações de carregamento lateral; melhoria no controlo da vibração e na acústica na fase de dimensionamento da capacidade de serviço da estrutura; promove uma melhoria na execução dos acabamentos do edifício e aumenta a eficiência da montagem e desmontagem dos painéis.

No decorrer de um evento sísmico, os danos e falhas nos edifícios CLT são principalmente localizados nas ligações, uma vez que, as ligações são dimensionadas de forma a garantir a rotura dúctil das mesmas. Em suma, os sistemas de ligação em estruturas de CLT exigem uma atenção minuciosa por parte dos engenheiros em todas as fases do projeto e construção.

Na construção em CLT os elementos estruturais são geralmente ligados através de ligadores ou outro tipo de dispositivo de ligação metálico. Assim, as ligações em CLT são denominadas por ligações do tipo mecânico, sendo as mais comuns as aparafusadas. Neste tipo de ligações é recorrente o uso de espaçamentos de fixação grandes e de distâncias de extremidade e de bordo, de maneira a evitar roturas por separação dos elementos quer por roturas de corte, que são frágeis por natureza. O correto dimensionamento aliado à fabricação eficaz das ligações, muitas vezes determina o nível de sucesso das construções de madeira,

Os tópicos seguintes apresentam uma visão geral dos ligadores e dos dispositivos metálicos ou de madeira utilizados atualmente nas ligações das estruturas de CLT.

2.8.1. LIGADORES DO TIPO MECÂNICO

Na construção com CLT são normalmente utilizados parafusos auto-perfurantes de rosca completa, devido à sua facilidade de instalação, juntamente com a alta capacidade lateral (corte) e de arranque (axial), o que torna estes ligadores resistentes a ações axiais e laterais (Fig. 26). A utilização de pregos de aro anelar está limitada a situações onde os níveis de cargas não excedam a resistência dos mesmos.



Fig. 26 – a) pregos de aro anelar; b) parafusos auto-perfurantes totalmente roscados (Piazza *et al.*, 2013)

2.8.2. DISPOSITIVOS DE LIGAÇÃO

Apesar da existência de diversos tipos de dispositivos de ligação utilizados no setor da construção em madeira, a utilização de cantoneiras para corte, cantoneiras para tração e placas metálicas (angle brackets, hold-downs e nail plates) é prática corrente no sistema construtivo CLT, sendo a sua utilização recomendada pelos fabricantes (Fig. 27). Quando os projetistas optam por ligações metálicas escondidas são geralmente utilizados perfis metálicos em forma “T” invertido com espessuras a variar entre 6 e 12 mm. No âmbito dos dispositivos de ligação em madeira destacam-se os perfis de madeira usados geralmente para efetuar a ligação entre painéis de parede perpendiculares e painéis de parede com a fundação. Existe ainda as tiras de madeira estrutural compósita que são utilizadas fundamentalmente nas ligações entre painéis paralelos ao longo das suas faces longitudinais (pavimento-pavimento e parede-parede).



Fig. 27 – a) e b) cantoneiras para corte; c) cantoneiras para tração; d) placas metálicas de pregos (Piazza *et al.*, 2013).

Cantoneiras para tração, cantoneiras para corte, placas e placas metálicas são usadas para transferir forças das paredes para os pavimentos, de um nível para outro nível, até às fundações. As cantoneiras para tração (hold-downs) são usados principalmente nas extremidades dos painéis de parede e em zonas de abertura de portas, tendo como função resistir às forças derrubamento resultantes da ação do vento ou sismo. Por outro lado, o principal papel das cantoneiras para corte (angle brackets) em forma de “L” passa por resistir às forças de corte em painéis de parede causados pelo vento ou por um evento sísmico. Pregos com ranhuras ou roscados helicoidais são usados em conjunto com placas de metal perfuradas e com as cantoneiras, sendo instalados na superfície do painel.

2.8.3. DETALHES DOS SISTEMAS DE LIGAÇÃO DE CLT

A Fig. 28 apresenta as principais juntas de ligação (1, 2a, 2b, 3, 4 e 5) existentes num edifício típico em CLT, posteriormente serão apresentadas os detalhes de algumas das soluções mais utilizadas para cada caso. De maneira a não tornar a lista dos sistemas de ligação exaustiva apenas serão apresentados os mais utilizados na montagem dos elementos CLT, bem como alguns sistemas de fixação inovadores. A consulta do CLT handbook (Karacabeyli e Douglas, 2013) permite a obtenção de uma vasta gama de ligações possíveis adequadas a diversas situações.

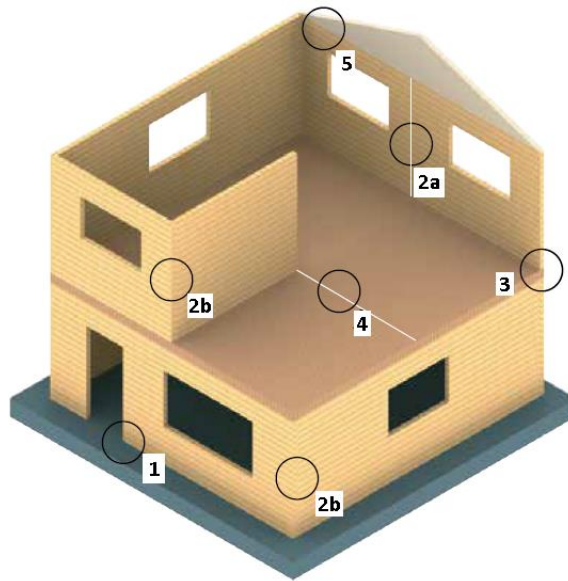


Fig. 28 – Diferentes tipos ligação existentes entre painéis CLT num edifício CLT de três andares típico (Mandegarian e Milev, 2010).

2.8.3.1. LIGAÇÃO PAREDE - FUNDAÇÃO

Na construção em altura em madeira é prática corrente a realização das fundações e do primeiro piso (rés-do-chão) do edifício em betão armado, devido à suscetibilidade da madeira à presença de humidade. A Fig. 29 apresenta alguns dos possíveis sistemas tipo de ligação parede-fundação.

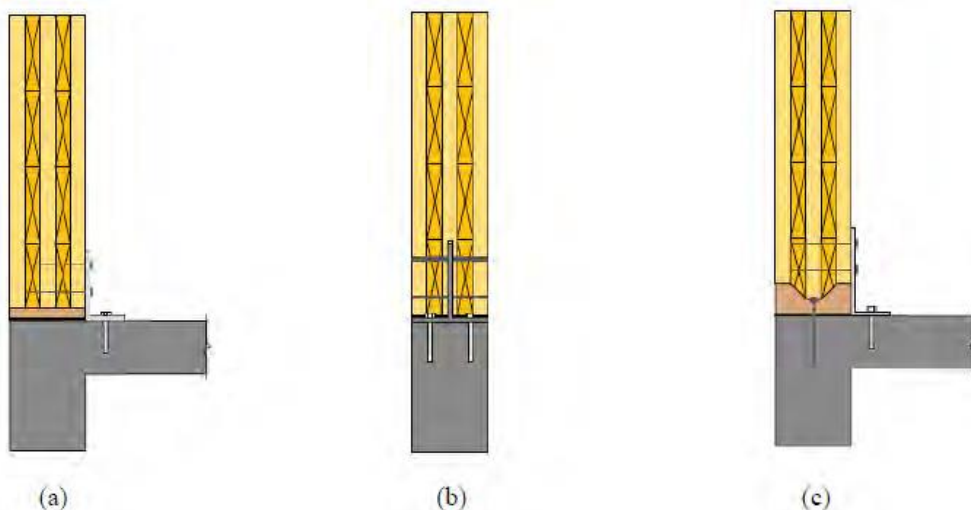


Fig. 29 – Ligação do tipo parede – fundação: (a) Ligação com uma cantoneira; (b) Ligação com um ligador metálico escondido; (c) Ligação com um perfil de madeira (Mandegarian e Milev, 2010).

2.8.3.2. LIGAÇÃO PAREDE - PAREDE

2.8.3.2.1. LIGAÇÃO ENTRE PAINÉIS DE PAREDE PARALELOS

Este tipo de ligação é utilizado para ligar os painéis ao longo dos seus bordos longitudinais. Devido às limitações de produção e transporte relacionadas com o tamanho dos painéis que podem ser entregues nos locais de construção, as ligações do tipo parede-parede são estabelecidas principalmente em obra. A ligação dos painéis de paredes paralelos deve ser concebida de modo a transferir as forças de corte dentro do plano e os momentos fletores fora do plano ao longo dos elementos de parede ligados. Existe uma vasta gama de soluções possíveis para este tipo de ligações (Fig. 30).

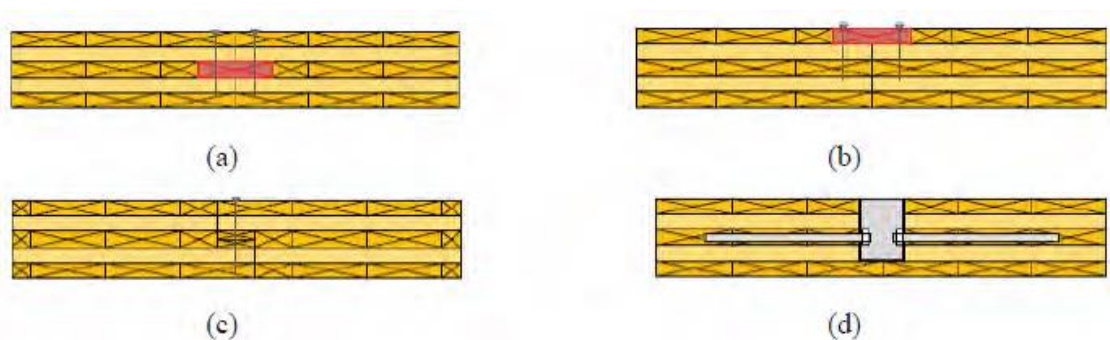


Fig. 30 – Ligação do tipo parede – parede (||): (a) Ligação com uma lingueta; (b) Ligação com cobrejunta em madeira; (c) Ligação em corte de meia-madeira; (d) sistema de ligação com um tubo (Mandegarian e Milev, 2010).

No caso do recurso a linguetas ou cobrejuntas, estas podem ser em madeira maciça, contraplacado, *laminated veneer lumber* (LVL) ou mesmo CLT. A fixação entre a lingueta ou a(s) cobrejunta(s) e o painel é normalmente materializada por parafusos sendo também possível, quando o nível das cargas assim o permite, utilizarem-se pregos. A vantagem deste pormenor é que fornece uma ligação dupla de corte e resistência a cargas fora do plano.

No caso das ligações em corte de meia-madeira, são usados geralmente parafusos para ligar as extremidades dos painéis. A ligação pode transportar cargas normais e transversais, contudo não é uma ligação dimensionada para ser resistente a momentos (Augustin, 2008). Este tipo de ligação é bastante simples, facilitando a montagem rápida dos elementos de CLT. No entanto, há um risco de divisão da secção transversal, devido à concentração de tensões perpendiculares

às fibras na região da ligação. Esse risco é particularmente acentuado em casos onde ocorra distribuição irregular de carga sobre os vãos de um pavimento (Augustin, 2008).

O sistema de ligação de tubo incorpora tubos de aço perfilado com buracos dentro do painel CLT. Os painéis CLT são entregues em obra já com os varões colados ou aparafusados segundo a direção do plano dos dois painéis que se pretenda ligar. Os dispositivos de ligação de tubo são inseridos ao longo das arestas dos painéis, segundo o espaçamento (determinado pelo engenheiro estrutural) entre os varões colados ou aparafusados. Os varões são encaixados pelos buracos do tubo de aço e posteriormente o sistema é apertado em obra através de porcas metálicas. A eficiência do sistema depende principalmente da resistência de arranque dos varões aparafusados ou colados (Stepinac *et al.*, 2013).

2.8.3.2.2. LIGAÇÃO DE PAINÉIS DE PAREDE PERPENDICULARES

Este tópico apresenta algumas das ligações típicas utilizadas para materializar a ligação de painéis de parede posicionados em ângulo reto (90°). Nas construções em CLT essas ligações são efetuadas entre paredes divisórias interiores, paredes exteriores ou combinação das mesmas (Fig. 31).

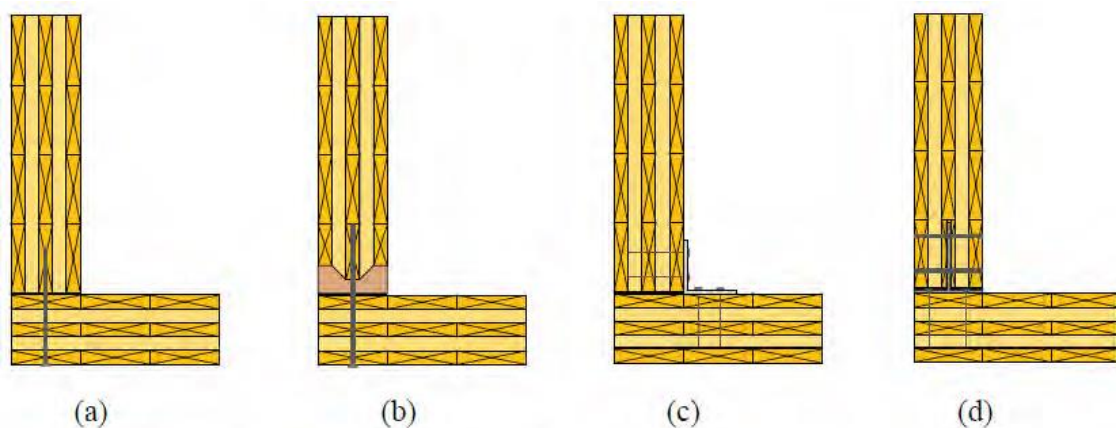


Fig. 31 – Ligações do tipo parede – parede (\perp): (a) Ligação com parafusos auto-perfurantes; (b) ligação com um perfil de madeira; (c) ligação com uma cantoneira metálica; (d) ligação com uma placa metálica escondida (Mandegarian e Milev, 2010).

A utilização de parafusos auto-perfurantes (Fig. 31a) é a forma mais simples de se ligar painéis de parede CLT perpendiculares. Existem algumas preocupações relacionadas com esta forma de ligação, devido ao facto de os parafusos serem aplicados na zona da secção transversal de

um dos painéis. Esta situação é particularmente preocupante quando os parafusos são instalados na face final das camadas cruzadas, pois contribui para a redução da resistência de arranque devido à aplicação dos ligadores segundo a direção das fibras da madeira. Assim, os parafusos auto-perfurantes devem ser aplicados na face lateral das camadas longitudinais do painel de parede CLT ou inseridos segundo um determinado ângulo para evitar a instalação direta dos parafusos nas camadas cruzadas.

Perfis de madeira (Fig. 31b) podem ser escondidos ou expostos e são utilizados em combinação com parafusos auto-perfurantes ou parafusos de madeira tradicionais. A vantagem dos perfis de madeira escondidos em relação à aplicação direta de parafusos auto-perfurantes passa pela possibilidade de aumentar a resistência da ligação através da aplicação de mais parafusos de madeira para ligar o painel CLT ao perfil de madeira central, que, por sua vez, é aparafusado à parede transversal.

Outra forma simples de ligar paredes no sentido transversal é a utilização de cantoneiras metálicas em combinação com parafusos ou pregos (Fig. 31c). Este tipo de sistema de ligação é um dos mais simples e mais eficientes em termos de resistência resultante da fixação na direção perpendicular ao plano dos painéis. Contudo, este tipo de sistemas requer uma maior resistência ao fogo, sendo essa garantida através da aplicação de revestimento protetor (placas de gesso).

2.8.3.3. LIGAÇÃO PAREDE - PAVIMENTO

Existe um vasto leque de possibilidades quando o objetivo é ligar as paredes ao pavimento superior e/ou ligar as paredes ao pavimento inferior. Estas possibilidades variam conforme o sistema estrutural de ligação adotado (ou seja, sistema construtivo *platform system* ou *balloon frame*), a disponibilidade de ligadores no mercado e do grau de pré-fabricação

2.8.3.3.1. SISTEMA DE CONSTRUÇÃO *PLATFORM SYSTEM*

Neste sistema os painéis de pavimento apoiam-se diretamente no topo dos painéis de parede, formando uma plataforma para os pisos subsequentes (Fig. 32). Este é provavelmente o tipo de sistema estrutural mais usado na Europa para a montagem dos painéis CLT, especialmente para edifícios de vários andares. Este sistema é utilizado em edifícios construídos exclusivamente

em CLT, ou em edifícios híbridos, com produtos à base de madeira (por exemplo: LVL e GLT), ou sem serem à base de madeira (por exemplo: betão e aço). Este sistema construtivo apresenta as seguintes vantagens: simplifica a montagem de andares superiores; sistemas de ligação simples podem ser usados e o caminho de carga da estrutura é geralmente bem definido.

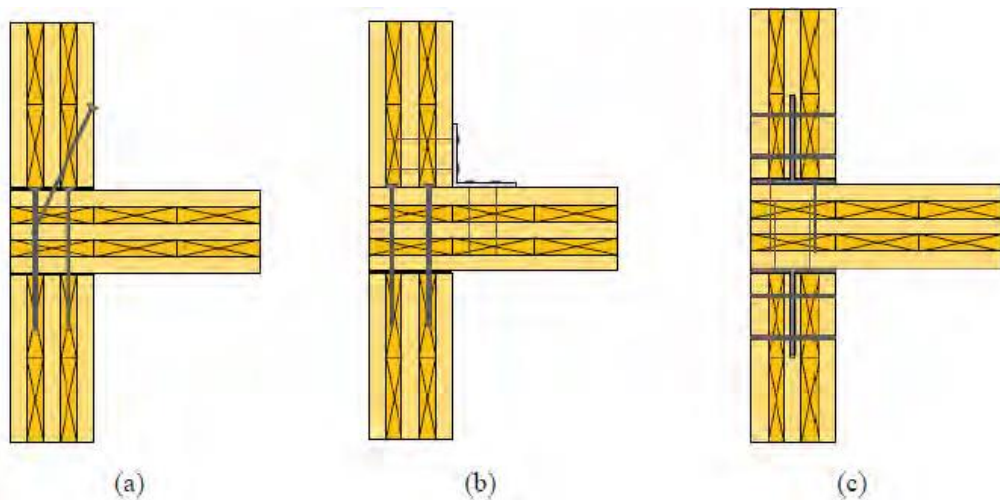


Fig. 32 – Ligação do tipo parede – pavimento usadas no sistema construtivo *platform system*: (a) Ligação com parafusos auto-perfurantes; (b) Ligação com cantoneira metálica; (c) Ligação com placas metálicas escondidas (Mandegarian e Milev, 2010).

2.8.3.3.2. SISTEMA DE CONSTRUÇÃO *BALLOON FRAME*

Este sistema tem a particularidade de as paredes apresentarem uma continuidade por alguns andares, sendo os pavimentos intermédios ligados a essas paredes. Devido às limitações do comprimento dos painéis e outras questões de dimensionamento e construção, este sistema é frequentemente usado em construções de pouca envergadura, nomeadamente, em edifícios comerciais ou industriais. As ligações são geralmente mais complexas neste tipo de construção. A construção em *balloon frame* é menos utilizada que a construção no sistema *platform system*.

A Fig. 33 apresenta algumas das várias opções de ligação entre pavimentos CLT e uma parede CLT contínua em altura. O sistema de ligação mais simples inclui o uso de uma viga frechal para proporcionar um suporte contínuo aos painéis de pavimento CLT (Fig. 33, esquerda). Existe ainda sistemas de ligação que utilizam cantoneiras metálicas para efetuar o suporte do pavimento CLT (Fig. 33, centro e direita). Ambos os sistemas supramencionados recorrem ao uso de ligadores, tais como: pregos, parafusos ou parafusos lag. O dimensionamento das ligações, segundo o sistema construtivo *balloon frame*, requer uma maior atenção por parte dos

projetistas, devido a problemas associados à flexão fora do plano protagonizado pelo efeito de sucção do vento. Assim, este sistema construtivo não é recomendado para edifícios CLT em altura devido à sua inferior capacidade resistente das ligações às cargas laterais (vento e sismo).

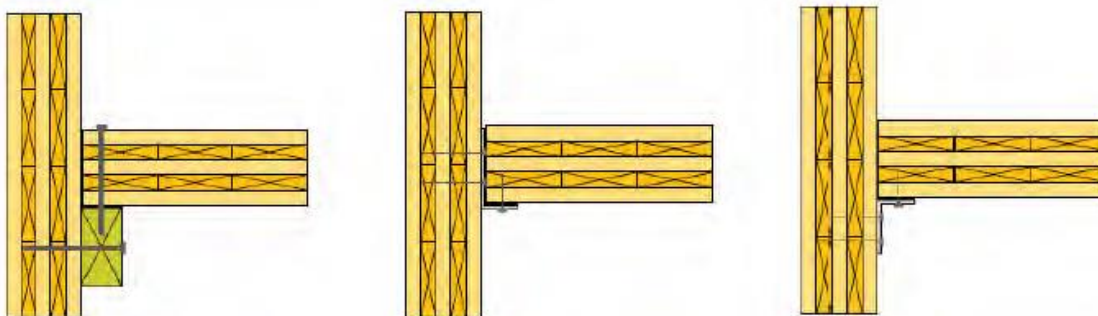


Fig. 33 – Ligações do tipo parede – pavimento usadas no sistema construtivo *balloon frame* (Mandegarlan e Milev, 2010).

2.8.3.4. LIGAÇÃO PAVIMENTO - PAVIMENTO

Quando a ligação é usada entre painéis de pavimento CLT que atuam como diafragmas, a ligação tem de ser capaz de transferir forças no plano dos mesmos, bem como manter a integridade dos painéis e do sistema global de resistência a carga lateral. Os detalhes utilizados nas ligações entre painéis de pavimentos são iguais, aqueles usados entre painéis de parede paralelos, descritos anteriormente neste capítulo.

2.8.3.5. LIGAÇÃO PAREDE - COBERTURA

Independentemente da inclinação da cobertura, as ligações a efetuar são semelhantes aquelas utilizadas na ligação entre painéis de parede e painéis de pavimento. Parafusos auto-perfurantes e cantoneiras metálicas são os sistemas de ligação geralmente utilizados nesta aplicação (Fig. 34).

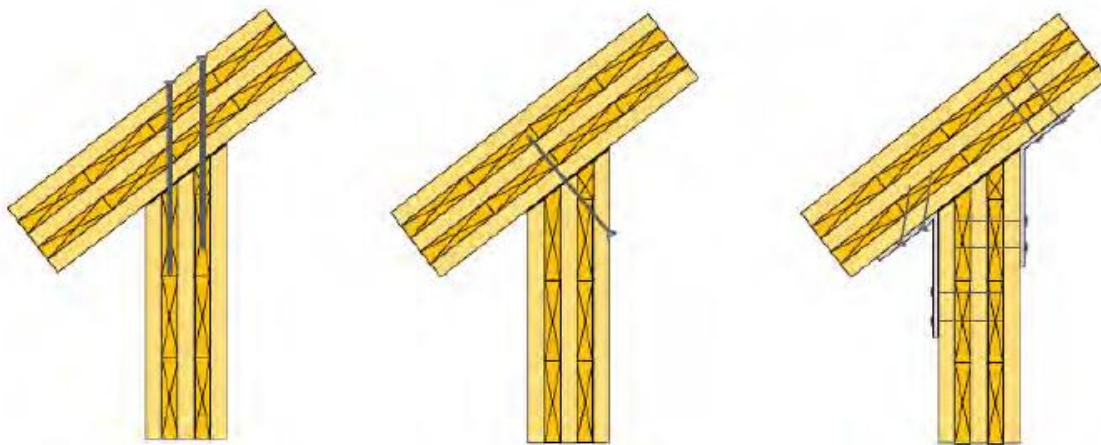


Fig. 34 – Ligação do tipo parede – cobertura (Mandegarian e Milev, 2010)

2.9. INVESTIGAÇÕES CIENTÍFICAS DISPONÍVEIS

Neste tópico serão abordadas algumas das inúmeras investigações científicas realizadas sobre o material CLT. Com principal destaque para os aspetos estruturais, contudo, será também dado ênfase aos aspetos não estruturais, nomeadamente, à segurança contra incêndios e aos custos da construção.

2.9.1. RESISTÊNCIA ÀS CARGAS LATERAIS

Um dos principais desafios da construção em altura prende-se com os problemas de dimensionamento inerentes à capacidade de resistência do edifício às cargas laterais. Inúmeros estudos têm sido realizados ao longo dos últimos anos abordando este tópico. Por exemplo, Frangi e Smith (2008) apresentaram um panorama geral dos problemas de dimensionamento relativos à construção de edifícios altos (10 a 20 andares). Em suma, podemos afirmar que em edifícios altos e delgados, as forças de corte horizontal e as forças axiais devidas à gravidade e à flexão assumem particular destaque, no que diz respeito às ações internas do edifício. Outro aspeto problemático é o controlo da deformação horizontal do edifício. Com intuito de controlar a amplitude da deformação horizontal é possível prever-se antecipadamente a provável impossibilidade da construção de um edifício alto com geometria delgada, caso o mesmo apresente uma cêrcea na ordem dos 8 a 10 andares. Assim, os autores da investigação científica propõem uma solução híbrida para edifícios altos e delgados, que pode passar pela implementação de subestruturas de madeira em redor de um núcleo central feito em aço ou betão armado, proporcionando uma maior rigidez às cargas laterais.

Chapman (2010), elaborou um estudo sobre edifícios comerciais feitos em madeira até 6 pisos de altura. O sistema construtivo CLT baseia-se em painéis de parede como o principal elemento estrutural de suporte das cargas verticais e horizontais, sendo apropriado para a construção em altura com fins residenciais. Contudo, este sistema não é apropriado para usos comerciais, uma vez que, o elevado número de paredes internas necessárias reduz substancialmente a flexibilidade arquitetónica dos espaços interiores. O objetivo do estudo passa pela análise de três sistemas estruturais em madeira com intuito de resistirem às cargas laterais e combater o problema associado ao uso do CLT em espaços comerciais, ou seja, evitando a excessiva compartimentação característica dos edifícios em CLT. Os três sistemas adotados pelo autor são denominados por: *Frame*, *Circular Core* e *Shear Walls* (Fig. 35).

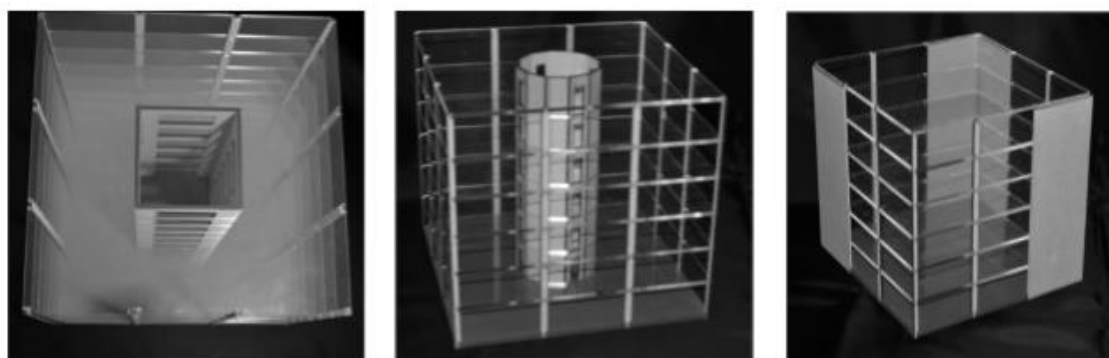


Fig. 35 – Modelo *Frame*; modelo *Circular Core* e modelo *Shear Walls* (da esquerda para a direita, respetivamente) (Chapman J., 2010).

Ambos os sistemas foram projetados para resistir em ELU a uma carga estática horizontal de vento de 2 kPa. O valor da solicitação é típico para zonas no interior de uma cidade. Contudo, em zonas com atividade sísmica reduzida, os sistemas estruturais resistentes às cargas laterais tendem a apresentar esforços de dimensionamento ao sismo, similares aos produzidos pelas cargas horizontais do vento, quando estas apresentam um valor de 2 kPa.

Chapman J. (2010) propõe ainda algumas técnicas construtivas para auxiliar a capacidade resistente às cargas laterais dos sistemas estruturais, nomeadamente, da ligação dos pilares às fundações e da ligação entre os painéis CLT. É de particular interesse que a estrutura do edifício seja projetada de forma a voltar à sua posição original após a ocorrência de um sismo, proporcionando uma maior capacidade resistente ao sismo e menores custos inerentes aos danos na estrutura. Assim, é proposta uma solução simples designada por fundação *socket*. Esta

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

consiste em aplicar uma camada de borracha, ou plástico em torno dos pilares de madeira que serão forrados por uma fundação em betão armado, tal como demonstra a Fig. 36.

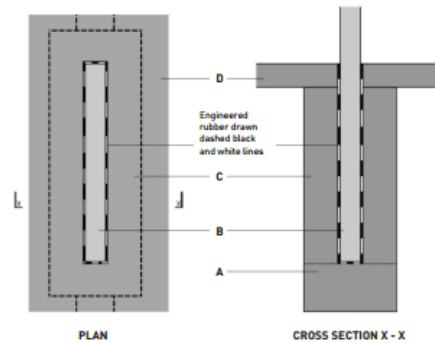


Fig. 36 – Fundação *socket* em planta e secção transversal (Chapman J., 2010).

A ligação entre painéis CLT é de extrema relevância, nomeadamente, para a transmissão dos esforços de corte entre os painéis. Uma maneira de efetuar essa transferência é através da fixação de placas planas de aço em ambos os lados do encaixe vertical do painel (Fig. 37).

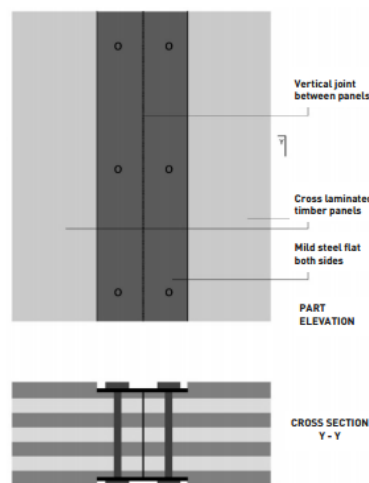


Fig. 37 – Ligação entre painéis CLT através de placas planas de aço (Chapman, 2010).

Efetuar a ligação de painéis CLT com elevada dimensão, garantindo a transferência dos esforços de corte, pode ser alcançada através de *shear keys* retangulares ou quadradas. As *shear keys* podem ser feitas numa vasta gama de materiais, tais como: aço, madeira ou betão armado. Para minimizar o escorregamento nas juntas transversais entre painéis que provocam uma deformação excessiva, deve colocar-se ligadores entre as laterais das *shear keys* e dos painéis CLT. A utilização de *shear keys* provoca forças de tensão entre os painéis de madeira, sendo a utilização varetas de aço horizontais nos soalhos de cada andar uma boa solução para o problema (Fig. 38).

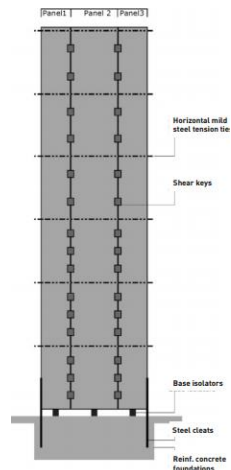


Fig. 38 – Esquema da colocação das *shear keys* e das hastes de aço para o modelo *Shear Wall* (Chapman, 2010).

Em suma, o estudo realizado por Chapman (2010) conclui: o modelo *Circular Core* é o sistema mais eficiente em termos estruturais (Fig. 39): e aponta para uma previsão de 9 pisos como cércea máxima; em ambos os modelos é possível a utilização de madeira maioritariamente com uma classe de resistência inferior e mais económica, uma vez que, apenas ocorrem tensões relativamente baixas; do ponto de vista arquitetónico, ambos os modelos apresentam as suas limitações, desta forma, um novo sistema *Frame* aplicado em todas as paredes exteriores seria a solução mais vantajosa, garantindo uma maior flexibilidade nos espaços interiores e permitindo a implementação de envidraçados ao longo das fachadas do edifício; o modelo *Frame* apresenta o custo de construção mais baixo dos 3 modelos devido à menor quantidade de madeira presente na sua estrutura (custo final dos modelos *Frame*, *Circular Core* e *Shear Walls*: 43500 USD, 47700 USD e 59200 USD).

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

LLRS Type	Frames		Tube Core	Shear Walls
	Column	Beam	Vertical	Vertical
Panel Length (m)	20	6.6	20	20
Panel Width (m)	1.8	1.04	2.2	2.8
Panel Thickness (mm)	284	284	284	284
No of panels per building	8	24	12	12
Max Compression Stress ¹ (mPa)	16.1	14.6	2.6	4.1
Max Tension Stress ¹ (mPa)	5.1	14.0	0.0	1.4
Max. Shear Stress (N/sq.mm)	0.9	1.3	0.4	0.34
Shear Stress Between Laminates ² (mPa)	1.3	1.9	0.9	0.9
Max Inter-storey Deflection, Elastic (mm)	6.3	-	0.65	1.4
Max Inter-storey Deflection, Joint Slippage (mm)	0	-	0.65	1.4
Max Inter-storey Deflection, Total (mm)	6.3	-	1.3	2.8

1. combined bending and axial stresses due to critical load case, 1.2G+Qu+Wu
2. maximum shear stress in glue line between longitudinal laminates.

Fig. 39 – Sistemas estruturais resistentes a cargas laterais – Dimensões dos painéis, Tensões e deformações entre pisos (Chapman, 2010).

O sistema *Shear Walls* pode ser melhorado, do ponto de vista arquitetónico, fazendo fenestrações nos painéis CLT exteriores, de modo que a luz entre no edifício. Porém, a resistência e rigidez das paredes são reduzidas pelas fenestrações, podendo em certas situações tornar-se um problema. O comportamento de paredes CLT com aberturas foi estudado por Dujic *et al.* (2008). O principal objetivo do estudo foi a obtenção de informações sobre a forma de estimar a carga e rigidez de rutura das paredes CLT com aberturas e reconhecer como a forma e localização das aberturas influencia a capacidade e rigidez de corte das paredes. Foi utilizado um modelo numérico com intuito de avaliar a redução da resistência e rigidez ao corte para diferentes tipos de aberturas. Este modelo foi calibrado de acordo com ensaios experimentais em paredes CLT com dimensões grandes. Para reduzir o número de ensaios a efetuar, um estudo paramétrico numérico foi realizado para 36 tipos de abertura, com três comprimentos diferentes definidos. Após a realização do estudo (Dujic *et al.*, 2008)., conclui-se que uma parede CLT com aberturas apresenta uma rigidez e uma capacidade de carga relativamente inferior. Assim, os elementos críticos que regem o dimensionamento das paredes CLT são os sistemas de ancoragem entre os painéis e as fundações da estrutura. As paredes com aberturas grandes apresentam uma rigidez de corte inferior, mas capacidade de carga do painel não é significativamente reduzida. Comprovou-se através do modelo paramétrico que as aberturas com uma área superior a 30% da superfície da parede não reduzem a capacidade de carga substancialmente, apesar de a rigidez do elemento ser afetada em cerca de 50%. A principal razão destes resultados deve-se ao facto do modo de rutura ser maioritariamente localizado na

área de ancoragem da parede e nos cantos das aberturas via esmagamento e fendilhação da madeira.

2.9.2. SEGURANÇA AO FOGO

A segurança ao fogo é um aspeto importante de dimensionamento e deve ter sido em conta, tal como a resistência a cargas laterais. Vários estudos sobre conceitos de dimensionamento ao fogo para estruturas de madeira em altura foram elaborados por Fontana *et al.* (2008). Os edifícios em altura devem ter uma abordagem mais cuidada e calculista por parte dos projetistas no que diz respeito à segurança ao fogo, uma vez que, os critérios de evacuação e de resistência ao fogo são completamente diferentes dos edifícios de pequena envergadura. Esta diferença deve-se ao facto de em determinadas situações ser impossível à brigada de incêndios efetuar evacuação, recorrendo a equipamentos exteriores, devido à elevada altitude a que o incêndio possa ocorrer. Desta forma, Fontana *et al.* (2008) concluíram que edifícios em altura devem ser dimensionados de forma a que os ocupantes sobrevivam à incineração total do compartimento em fogo enquanto permanecem noutra zona do edifício. A estabilidade estrutural e uma compartimentação ao fogo principal devem ser asseguradas pela estrutura do edifício numa situação de incineração total. A utilização de madeira como elemento estrutural requer uma maior proteção por parte dos projetistas, sendo obrigatório o revestimento da madeira com materiais não combustíveis (por ex. placas de gesso) ou com recurso a uma construção mista. Um estudo de viabilidade (Fontana *et al.*, 2008) mostrou que uma construção mista em altura de madeira e betão, em conjunto com medidas técnicas e organizativas pode ser considerada tão segura como uma construção tradicional com recurso as materiais apenas não combustíveis.

O comportamento ao fogo de painéis CLT individuais foi experimentalmente e numericamente estudado por Frangi *et al.* (2008). Nesse estudo, foi dada relevância à comparação entre painéis CLT e painéis de madeira homogénea. Através de uma análise térmica, recorrendo a um software de elementos finitos, concluiu-se que o comportamento ao fogo dos painéis CLT é dependente do comportamento das camadas individuais do elemento. Assim, quando ocorre a incineração total de uma camada é necessário ter em conta um aumento da taxa de incineração para a camada seguinte. A mesma situação ocorre quando o material protetor da madeira (por ex: placas de gesso) é incinerado totalmente. Portanto, é de extrema importância a espessura e o número de camadas do painel CLT, uma vez que, o comportamento ao fogo é fortemente influenciado por estes fatores. Ensaio ao fogo realizados em fornos horizontais demonstraram

uma menor resistência ao fogo por parte de um painel CLT de 3 camadas do que painéis de madeira homogénea com as mesmas dimensões. Esta situação deve-se ao facto de a taxa de incineração ser superior nos painéis CLT do que em painéis de madeira homogénea. Foram também realizados ensaios ao fogo em fornos verticais e os resultados apontam para uma taxa de incineração semelhante entre painéis de CLT e de madeira homogénea. Portanto, verificou-se que elementos estruturais verticais em CLT apresentam um comportamento ao fogo superior a elementos estruturais horizontais, devido a um descolamento menos acentuado dos elementos carbonizados. Além disso, o comportamento da cola adesiva, responsável pela ligação entre camadas dos painéis CLT, quando sujeita a temperaturas elevadas, pode influenciar o descolamento das camadas carbonizadas, desempenhando um papel relevante na avaliação ao comportamento ao fogo. O cálculo da profundidade de carbonização dos painéis CLT deve ter em consideração, a influência do descolamento das camadas carbonizadas bem como a influência do efeito da laminação cruzada, através da atribuição de uma taxa de incineração fictícia, β_n , que seja superior à taxa de incineração unidimensional da madeira homogénea, β_0 .

2.9.3. DIMENSIONAMENTO DO CLT

Blass e Fellmoser (2004) apresentam um método geral de dimensionamento de painéis CLT, uma vez que, as regras de dimensionamento são atualmente fornecidas em homologações técnicas, onde os valores de resistência e rigidez do CLT são fornecidos, baseados em ensaios realizados. A distribuição de tensões e o comportamento à deformação dos painéis CLT foram analisados através da teoria das secções compostas. Uma vez que esta não inclui a influência de corte em painéis de madeira maciça, esta foi abordada através do método da analogia de corte. O módulo de corte rolante influencia substancialmente o comportamento de carga e deformação dos painéis. Para um quociente entre vão e profundidade de pelo menos 30, a influência de corte pode ser ignorada para carregamentos perpendiculares ao plano. Neste caso, assume-se a teoria das secções compostas como base para o dimensionamento dos painéis de madeira maciça. O cálculo considera as camadas carregadas na direção paralela e perpendicular às fibras. A resistência e rigidez dos painéis CLT podem ser determinadas, usando os valores de resistência e rigidez de base das camadas individuais, tendo em conta a homogeneização causada pelo carregamento paralelo dentro de uma camada. Este é um método conservador, uma vez que, ignora o efeito de laminação que conduz a uma melhoria considerável dos painéis, comparando com as lamelas individuais que constituem o material. Os investigadores Blass e Fellmoser (2004) ensaiaram vários painéis, chegando à conclusão que, os valores de resistência

e rigidez dos painéis CLT compostos por madeira da classe de resistência C24 devem ser calculados com base nas propriedades da classe GL28h. Através desta investigação (Blass e Fellmoser, 2004), um sistema de classe de resistência para os painéis CLT é criado com intuito de simplificar o dimensionamento dos mesmos. Nesse sistema, os valores de resistência característica, rigidez e densidade dos painéis CLT são fornecidos em função do tipo e direção dos esforços em relação à direção das fibras das camadas exteriores.

Outro método de dimensionamento é apresentado por Mestek *et al.* (2008). A investigação baseia-se no método da analogia de corte e explica a influência da deformação de corte das camadas transversais e as consequências provenientes para o comportamento de carga dos painéis. O foco principal recai nas tensões originadas pelas cargas concentradas. A distribuição das tensões normais e de corte na zona de uma carga concentrada é calculada e avaliada para sistemas de vãos uniaxiais de acordo com o método da analogia de corte e com recurso a um software de cálculo MEF, utilizando elementos de casca. A análise mostrou que, nas áreas junto à aplicação de uma carga concentrada a tensão longitudinal não se mantém constante. Isto provoca picos de tensão nas camadas individuais, que podem ser tidos em conta através do método da analogia de cortes. Um método simplificado demonstra como considerar a influência da deformação de corte na tensão longitudinal de uma viga simplesmente apoiada carregada por uma carga concentrada. Os sistemas estáticos consistem em vigas simplesmente apoiadas carregadas a meio vão, com secções transversais simétricas e espessura constante das camadas individuais. Os parâmetros variáveis foram: o quociente entre o vão e espessura e o número de camadas do painel. A análise centrou-se na comparação das tensões longitudinais de acordo com o método da analogia de corte e com o método das secções compostas. A análise demonstrou que o aumento das tensões longitudinais, devido à influência da deformação de corte apenas depende da relação entre vão e espessura. Para as secções transversais simétricas, o estudo demonstrou que o número de camadas do painel não apresenta qualquer influência.

Um aspeto a ter em consideração na construção em altura em madeira é a baixa resistência à compressão perpendicular às fibras da madeira. Serrano e Enquist (2010) realizaram ensaios à resistência à compressão em amostras cúbicas de CLT com 3 camadas. Um dos ensaios consistiu na aplicação de uma compressão uniforme em toda a superfície da amostra, idêntico ao que está definido pelas normas dos ensaios europeus para a madeira laminada colada. Diversos ensaios complementares foram efetuados através da variação das zonas de aplicação das cargas de compressão, com recurso a cargas de linha. Os objetivos desses testes passaram

pela averiguação dos efeitos das cargas distribuídas dentro das amostras, e também pela investigação dos possíveis efeitos de fronteira, quando as cargas de linha são aplicadas junto aos cantos da amostra. As cargas de linha utilizadas nos ensaios representam o exemplo prático de uma parede a descarregar num pavimento de CLT. Os resultados demonstraram que a resistência à compressão (definida de acordo com o Eurocódigo 5 como a carga para a qual uma tensão de compressão permanente de 1% é obtida) é na verdade dependente do tamanho relativo da área de aplicação da carga, da sua orientação em relação à direção das fibras da superfície e da sua distância às bordas da amostra. Serrano e Enquist (2010) apontam para a necessidade de uma revisão dos métodos de ensaio, métodos de avaliação de ensaio, bem como os critérios de dimensionamento para a compressão perpendicular às fibras no CLT.

2.9.4. LIGAÇÕES

Blass e Uibel, (2006) desenvolveram um método de cálculo da capacidade de carga das ligações com ligadores do tipo cavilha, posicionados perpendicularmente aos painéis CLT. Uma análise aos parâmetros dos painéis CLT foi realizada, por forma a calcular a capacidade de carga dos ligadores do tipo cavilha. Assim, foi proposta uma densidade característica de 400 kg/m³ para painéis CLT fabricados com madeira de abeto. A resistência de ligação (*embedment strength*) dos ligadores do tipo cavilha aplicados entre painéis CLT foi alcançada através de análises estatísticas dos 617 ensaios de ligação realizados. As funções obtidas dependem do tipo e diâmetro dos ligadores, densidade e particularmente do ângulo entre a carga aplicada e a direção das fibras da camada exterior. Desta forma, a capacidade de carga de uma ligação entre aço e um painel CLT foi derivada e verificada através de ensaios efetuados. Ao ser atingida a capacidade de carga, nos ensaios laboratoriais, as ligações apresentaram um comportamento de deslocamento de carga plástico quase ideal. Verificou-se que a rotura da ligação por corte ou a divisão das camadas exteriores não inicia a rotura frágil do painel CLT. Estes factos demonstram o efeito de reforço associado a estruturas lameladas cruzadas.

Em continuação da investigação científica, Blass *et al.* (2007) examinaram a capacidade de carga das ligações de bordo com cavilhas e parafusos em parede de CLT. Para calcular essa capacidade, parâmetros referentes à resistência de ligação e à capacidade de remoção foram analisados. O programa de testes inclui ensaios com duas direções diferentes de carga e cinco posições possíveis dos ligadores, com diferentes diâmetros em relação à espessura das camadas e em relação à direção das fibras. Com recurso à base de dados, obtida através dos diversos

resultados dos testes, foi realizada uma análise estatística que proporcionou o desenvolvimento de funções que permitem prever os valores dos parâmetros supracitados. Contudo, é de realçar que as funções obtidas apenas são válidas para CLT fabricado com madeira de abeto e com uma densidade característica de 400 kg/m³. Os ensaios efetuados apresentaram-se em conformidade com os cálculos da capacidade de carga. O comportamento a longo prazo de ligações de bordo lateralmente carregadas foi também analisado. No decorrer dos testes de longo prazo, os deslocamentos são medidos periodicamente e o clima é registado. Após um período de três anos, as amostras são descarregadas e a capacidade de carga remanescente é determinada através de um teste de curto prazo.

Follesa *et al.* (2010) investigaram a ligação mecânica entre painéis CLT que trabalham no mesmo plano (ex.: ligações verticais entre painéis de parede e/ou ligações horizontais entre painéis de pavimento). Estudos (Follesa *et al.*, 2010) em relação à resistência das ligações, rigidez, facilidade e rapidez da execução e custos totais (custo dos ligadores e da mão de obra incluídos) foram efetuados. Foram sujeitos a análise 3 tipos de ligações diferentes, nomeadamente: ligação com cobrejunta em madeira, ligação em corte de meia-madeira e ligação com uma lingueta. Foram ainda testados dois tipos de ligadores distintos, pregos e parafusos auto-perfurantes, para as três ligações apresentadas, com intuito de descobrir as diferenças em termos de resistência, rigidez, simplicidade, velocidade da construção e custos. Efetuando uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os valores calculados segundo o Eurocódigo 5, concluiu-se que, os resultados experimentais apresentam valores 1.5 vezes superiores aos calculados pelo EC5, devendo-se ao efeito da laminação cruzada do CLT. Os resultados em obra demonstraram que as ligações através de pregos são mais baratas do que através de parafuso auto-perfurantes. Também foi possível determinar uma maior economia da ligação em corte de meia-madeira, contudo, a diferença de custo para os outros dois tipos é pouco significativa.

2.9.5. CUSTO

A viabilidade da construção em altura em madeira prende-se com a competitividade de custos e com a eficiência do custo de produção dos edifícios. Uma vez que se trata de um sistema construtivo relativamente recente, a eficiência do custo de produção dos edifícios ainda se encontra numa fase de aprendizagem. O preço da madeira em si pode não influenciar significativamente o custo de produção, mas existe uma potencial redução de custos nas

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

atividades associadas com uma mudança de betão para madeira. Não existe grande lucro direto nos custos estruturais associados a construções em altura em madeira, mas especialistas, no entanto, apontam para grandes benefícios provenientes da redução do custo total de construção através da conceção e projeto cuidadoso das paredes estruturais, prefabricação e métodos construtivos. Poucos estudos económicos foram efetuados, mas os dados existentes (Gustavsson e Mahapatra, 2009) indicam que construções em madeira de média altura custam 8 a 12% mais do que construções em betão armado. Contudo, com a crescente aposta nas construções em altura em madeira, os custos de produção deverão ser reduzidos por via da influência da aprendizagem.

3. CLT NA CONSTRUÇÃO EM ALTURA

3.1. CONSTRUÇÕES EM CLT RELEVANTES NO MUNDO

O sector da construção tem vindo a apostar na construção com painéis de madeira lamelada colada cruzada, nomeadamente, na Europa, USA, Canadá e Austrália. Inúmeras obras têm sido construídas nos últimos anos, sendo dado destaque às mais relevantes. A primeira obra a destacar é o Stadthaus que se situa em Hackney, leste de Londres e trata-se de um prédio multifamiliar com 9 pisos, dos quais, 8 são exclusivamente em CLT. O Stadthaus foi considerado o edifício mais alto do mundo construído em madeira desde 2008, contudo, em dezembro de 2012 foi construído na Austrália o edifício Forté com 10 pisos, sendo, até aos dias de hoje, o edifício mais alto do mundo construído em madeira.

3.1.1. STADTHAUS

3.1.1.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

Stadthaus localiza-se em Hackney, leste de Londres e tem cerca de 30m de altura, possuindo 9 pisos. O projeto foi dirigido pelo gabinete de arquitetura Waught Thistleton Architects, a convite do empreendedor local, Telford Homes and Metropolitan Housing Association, ficando o projeto estrutural entregue à empresa Techniker, Ltd.. A empresa austríaca KLH foi responsável pela distribuição e montagem dos painéis CLT. O edifício é constituído por 29 apartamentos (T1, T2, T3 e T4) e a sua área de implantação é de 289m². Apenas o rés-do-chão é dedicado a espaços comerciais, sendo o resto do edifício destinado a usos habitacionais. O Stadthaus foi concebido com o intuito de demonstrar que a construção em altura, recorrendo aos painéis de CLT, apresenta uma solução viável para solucionar problemas relacionados com o elevado crescimento urbano e com a sustentabilidade do desenvolvimento das urbanizações. Dos 9 pisos, 8 foram construídos exclusivamente em CLT, distinguindo-se do piso térreo e fundações devido à sua constituição em betão armado. A utilização do betão armado nas fundações e no piso térreo está associada à suscetibilidade da madeira à humidade, assim sendo, os projetistas consideraram prudente manter a madeira fora do alcance do contacto direto com o solo. Desta forma, o edifício é integralmente constituído por CLT a partir do primeiro andar, incluindo o núcleo central (caixas de escadas e elevadores).



Fig. 40 – Edifício Stadthaus, construído em CLT, situado em Hackney, leste de Londres. (adaptado de <http://www.waughthistleton.com/project.php?name=murray>, 14/03/16).

3.1.1.2. PROJETO ESTRUTURAL

Relativamente às preocupações inerentes ao projeto estrutural, os engenheiros depararam-se com duas dificuldades. Uma delas, diz respeito à obtenção de estabilidade da estrutura a longo prazo, sendo ultrapassada, através da utilização de medidas de reforço adicional, acrescentando à estrutura um elevado número de paredes resistentes (elevada compartimentação). O cumprimento dos regulamentos europeus, relativos ao risco de incêndio foi um entrave na construção do edifício, uma vez que, este especifica que os núcleos de construção devem ser constituídos por materiais não combustíveis. Assim, materiais isolantes tiveram que ser aplicados de maneira a diminuir o risco de incêndio. Contudo, a resolução destes problemas foi um processo delicado, devido à inexistência de casos semelhantes construídos anteriormente, sendo os estudos realizados baseados a partir de princípios originais.

No que respeita ao comportamento estrutural, a construção maciça, constituída por painéis de grande dimensão, possui um comportamento monolítico, semelhante às estruturas de betão armado e alvenaria. Além disso, é também um sistema baseado na distribuição de paredes resistentes responsáveis pela distribuição de cargas através de superfícies lineares contínuas, o que resulta numa menor concentração de esforços nos seus componentes estruturais e num conjunto estrutural com maior resistência e rigidez (Costa, 2013). O sistema estrutural do Stadthaus baseia-se em torno do núcleo central resistente que estabelece ligação com os

apartamentos, sendo este sistema celular comparado a um padrão de “favo de mel”. Este sistema apresenta um elevado número de paredes estruturais, visto que, para além de todas as paredes exteriores apresentarem carácter estrutural, ainda existem algumas interiores com essa função. Este facto, em contribuição com o núcleo central confere uma grande resistência estrutural/robustez ao edifício. A utilização de paredes resistentes exteriores proporciona um elevado grau de contraventamento à estrutura, garantindo uma grande capacidade de resistência a solicitações horizontais (sismo, ação do vento), mas também a uma excelente capacidade resistente a cargas verticais. As cargas horizontais, exercidas pela ação do vento, são exercidas nas fachadas do edifício, sendo transmitidas às paredes resistentes exteriores que, posteriormente, transferem as cargas aos painéis de pavimento. Os esforços resultantes são transmitidos às paredes interiores e exteriores do piso inferior através do pavimento superior, sendo este processo repetido até serem transferidas às fundações.

As estruturas constituídas por painéis CLT encontram-se geralmente sob valores de tensões baixas, contudo, em zonas onde as tensões se encontram elevadas são utilizados parafusos de maneira a reforçar a madeira localmente. O principal desafio, relativo ao projeto estrutural do Stadthaus, foi garantir a robustez do edifício, com o intuito de evitar o colapso progressivo da estrutura maciça monolítica. As diretrizes oficiais da construção em betão armado, aço ou alvenaria estabelecem três requisitos para evitar o colapso progressivo, nomeadamente: garantir a adequada ligação de todos os elementos de um edifício; teoricamente, qualquer elemento pode ser removido, mantendo-se a autossustentabilidade da estrutura; todos os elementos da estrutura devem ser dimensionados para resistir a uma carga acidental de 34 kN/m^2 . Contudo, estes requisitos não têm por base estudos efetuados em estruturas em CLT, podendo ser desadequados devido à descontextualização. Como não existiam, à data, diretrizes oficiais para a construção de edifícios usando este método construtivo, projetar o Stadthaus, tendo por base os requisitos suprarreferidos, tornaria a construção extremamente onerosa e revelar-se-iam, provavelmente, desnecessários (Costa, 2013). Perante este cenário, os projetistas aconselharam-se junto da TRADA (Timber Research and Development Association) e da TFA (Timber Frame Association), no sentido de alcançarem um método que combinasse adequadamente as ligações com a remoção parcial de elementos. Uma carga lateral de $7,5 \text{ kN/m}^2$, em qualquer elemento, e a hipotética remoção de um qualquer painel de parede, foram tidas como exigência de projeto (Costa, 2013).

3.1.1.3. ASPETOS RELEVANTES A DESTACAR

A aceitação do edifício no mercado foi de tal forma excelente que todos os apartamentos foram vendidos nas duas horas posteriores ao seu lançamento. A vida útil do edifício está estipulada em 60 anos, uma vez que a NHBC (National House-Building Council) assim o exigiu para que o projeto fosse aprovado. A escolha da madeira como material de construção principal significou uma diminuição de 310 toneladas de carbono, relativamente à mesma construção em betão. Esta poupança representa o consumo de carbono relativo a 21 anos de ocupação. A construção do Stadthaus levou 49 semanas até ficar concluída, menos 23 semanas do que o tempo estimado para a construção de um edifício idêntico em betão. Os oito pisos constituídos integralmente por painéis CLT foram erguidos e montados por uma equipa de montagem com apenas 4 homens, trabalhando apenas 3 dias por semana, durante 9 semanas, perfazendo um total de 27 dias de trabalho. A construção do Stadthaus foi realizada, apenas, com recurso a uma auto-grua. Caso a construção fosse em betão armado, seria necessário um maior número de meios (pelo menos uma grua torre seria necessária). Os níveis de conforto acústico alcançados foram excelentes, acima do regularmente exigido no Reino Unido, com uma média de 55db entre apartamentos e 53db entre andares (Costa, 2013).

3.1.2. FORTÉ

3.1.2.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

Forté é considerado, até hoje, o maior edifício residencial do mundo construído exclusivamente em CLT (exceto 1º piso e fundações), situado em Victoria Harbour, Docklands - Austrália. É constituído por 23 apartamentos, tem 10 andares (32,2 m de altura) e foi projetado com o intuito de ser um edifício amigo do ambiente, tendo-lhe sido atribuído uma classificação de 5 estrelas relativas ao seu desempenho ambiental (primeiro edifício a alcançar tal classificação). Foi o primeiro edifício australiano a ser feito a partir de CLT.



Fig. 41 – Edifício Forté construído em CLT, situado em Victoria Harbour, Docklands – Austrália (reproduzido de <http://www.aboutpeople.com.au/stories.html> , 05/04/16).

O projeto foi elaborado pela conceituada empresa Lend Lease que possui mais de 10 mil projetos construídos em todo o mundo. O diretor executivo, Mark Menhinnitt prevê que 30 a 50 por cento dos empreendimentos residenciais elaborados pela empresa poderão ter o CLT como material de construção. Desta forma, a empresa aposta, cada vez mais, no desenvolvimento sustentável da construção, oferecendo uma alternativa viável às tradicionais soluções construtivas, marcadamente responsáveis por grandes emissões de carbono. A empresa também procura alargar as aplicações construtivas do CLT, nomeadamente, a edifícios comunitários, a edifícios comerciais e de ensino (escolas e universidades).

O edifício é composto por 759 painéis de madeira lamelada colada cruzada, com um peso total de 485 toneladas. A madeira utilizada na produção dos painéis é oriunda do abeto Europeu (*Picea abies*). A empresa austríaca KLH foi responsável pelo fornecimento de todos os painéis, tendo sido enviados em 25 contentores, por via marítima. Foram também incluídos os 5.500 suportes metálicos e os 34.550 parafusos necessários para assegurar a estabilidade das ligações.

O Forté teve um impacto bastante positivo no meio ambiente, visto que, as 485 toneladas de madeira armazenam diretamente 761 toneladas de dióxido de carbono. Considerando o CO₂ emitido, caso se tivesse optado por uma solução construtiva tradicional em concreto ou aço, o benefício ambiental seria aumentado para 1.451 toneladas de CO₂ ou o equivalente a 345 carros nas ruas, durante um ano. Com o uso da madeira estima-se uma poupança de 7,7 milhões de litros de água e também uma redução da taxa de eutrofização (fornecimento de nutrientes em excesso ao sistema de água) em 75 %. Além disso, o projeto inteligente aliado aos sistemas

eficientes do edifício permite economizar aos residentes, em média, mais de \$300 por ano em energia e contas de água.

3.1.2.2. ASPETOS CONSTRUTIVOS

Após o fabrico dos painéis de CLT, cada um é cortado rigorosamente com as mesmas dimensões que constam nos desenhos CAD, usando uma máquina de corte assistida por controlo numérico computadorizado (CNC), dando o aspeto final pretendido a cada painel. Nesta fase são efetuadas as aberturas para as portas, janelas, mas também, rasgos nos painéis de forma a criar canais para os fios elétricos e outros serviços.

O piso térreo do Forté e a laje do primeiro piso foram construídos a partir de betão geopolymer. A necessidade de vãos maiores no espaço comercial (piso térreo) e a preocupação em manter a madeira longe do solo, foram fatores determinantes para escolha do betão geopolymer.

Após a finalização dos trabalhos em betão, os painéis CLT foram transportados desde o local de armazenamento até o local da obra, que se encontrava a uma curta distância. Os painéis foram então erguidos e colocados nas suas posições finais e ligados através de parafusos e suportes metálicos. Os primeiros painéis erguidos foram aqueles que constituem os núcleos resistentes da estrutura, nomeadamente, as escadas e as caixas de elevador. Uma vez que os núcleos estavam nos devidos lugares e corretamente instalados, outros painéis foram adicionados sobre os seus lados, formando as paredes internas e externas.

Após a instalação de todas as paredes interiores e exteriores do respetivo piso, outros painéis foram colocados no topo das paredes para dar origem ao pavimento. O processo foi repetido até que a altura total da construção fosse atingida. A cobertura foi construída através da mesma metodologia usada para cada pavimento. O revestimento exterior foi aplicado à medida que o andaime e a tela foram removidos, revelando o edifício como se estivesse a ser “desembrulhado”.

3.1.2.3. DURABILIDADE

CLT é feito de abeto europeu, que é considerado como não durável, ou seja, madeira da Classe 4. Proteção contra térmites e as condições climatéricas são os dois principais problemas

abordados relativos à durabilidade. A proteção contra as térmitas é garantida através da laje de betão ao nível do solo e por uma rede anti-térmita (TermiMesh). Esta solução é bastante semelhante à forma como uma casa em madeira é protegida.

Relativamente às condições climáticas, a durabilidade é alcançada com a aplicação de uma tela de chuva, constituída por painéis de alumínio. Como medida de reforço, existe entre os painéis de alumínio e o CLT uma cavidade que permite que a água escorra para fora. As varandas e cobertura são construídas por CLT e possuem um revestimento à prova de água.

3.1.2.4. RESISTÊNCIA AO FOGO

Este edifício está classificado pelo Código Nacional de Construção da Austrália (NCC) como prédio misto, pois tem zona comercial (classe 6) no piso térreo e apartamentos (classe 2) para o restante dos pisos. Como o prédio tem uma elevação no nono andar, o edifício enquadra-se na categoria A. Para construções do tipo A são impostas algumas limitações relativas ao uso de madeira em determinadas aplicações, sendo obrigatórias condições que devem ser satisfeitas. As construções do tipo A impõem limites para os materiais que podem ser utilizados na construção do edifício, assim como o nível de resistência ao fogo exigido. As paredes externas devem ser construídas a partir de materiais não combustíveis. As paredes internas resistentes devem ser construídas a partir de betão ou alvenaria, para respeitarem os limites impostos na avaliação ao fogo. Caixas de elevador e escadas devem ser construídas a partir de material incombustível.

O uso de CLT não cumpre com os requisitos impostos pelo NCC, no que concerne à utilização de materiais não combustíveis. Para atender a estes requisitos, uma solução alternativa foi proposta para satisfazer as necessidades de desempenho relevantes. Uma nova solução de projeto foi proposta, garantindo a maior parte dos níveis de resistência ao fogo, exigidos pelo NCC, com a exceção dos pavimentos que formam as varandas e das paredes externas. Além disso, esta nova solução assegura que, estruturalmente, o edifício foi concebido tendo em conta o colapso progressivo. Ou seja, os painéis de CLT foram analisados de maneira a garantir que quando uma secção de parede é danificada, a estrutura remanescente é capaz de suportar as cargas.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Resistência ao Fogo é inicialmente conseguida através da fixação direta de placas de gesso combinada com a carbonização da madeira garantindo que o componente estrutural necessário é mantido através da prestação de camadas sacrificiais. Isto é, cada painel CLT é tipicamente constituído: por 5 camadas de 128 milímetros de espessura para as paredes e por 5 camadas de 148 milímetros de espessura para os pavimentos. Estruturalmente, apenas 3 camadas são necessárias, proporcionando 2 camadas de proteção adicional denominadas de camadas de sacrifício.

As ligações entre os painéis de parede e os painéis de pavimento mantêm um apropriado comportamento ao fogo, caso sejam incorporadas dentro da camada central do painel ou sendo cobertas por betonilha / placas de gesso.

O isolamento contra o fogo das caixas de elevador e de escadas foi um desafio muito particular, na medida em que é necessário que as escadas de evacuação, em caso de incêndio, cumpram os requisitos e mantenham a sua integridade estrutural. Isto foi conseguido através da conceção de um sistema de caixa dupla, em que cada caixa atinge os níveis de desempenho ao fogo exigidos, no entanto, não existe uma ligação estrutural entre elas.

Após consulta com o Corpo de Bombeiros Metropolitanos de Melbourne, um plano e metodologia de construção foram desenvolvidos de forma a considerar requerimentos específicos quando se trabalha com madeira, tais como: assegurar que o sistema hidratante de incêndios se encontra operacional desde o início da construção e não apenas quando se atinge a altura efetiva de 12m, construir as oficinas/barracas a mais de 10 m de distância da estrutura, dispor de 2 saídas da zona de construção, e a não efetuação de qualquer soldagem dentro da última hora de trabalho do dia.

3.1.3. VIA CENNI

3.1.3.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

O *Via Cenni* é considerado o maior projeto de construção em madeira na Europa e foi concebido pela empresa Stora Enso (Stora Enso, 2014). Trata-se de um complexo residencial com quatro torres de nove andares, utilizando o CLT como material de construção estrutural principal. O empreendimento situa-se em Itália, na cidade de Milão e ficou concluído em outubro de 2013,

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

tendo recebido os primeiros inquilinos em Novembro. O complexo residencial apresenta uma área total de 17 000 m², possui 124 apartamentos e foram instalados 6 100 m³ de painéis CLT. O custo total da obra rondou os 17 milhões de euros. As principais razões para a escolha do CLT como material de construção foram a segurança aos eventos sísmicos, o curto período de construção, as boas propriedades isolantes e o aspeto da sustentabilidade ambiental.



Fig. 42 – Complexo residencial Via Cenni em Milão (adaptado de <http://urbanfilemilano.blogspot.pt/2015/03/zona-quarto-cagnino-via-cenni-leco.html>,14/06/16).

A construção do *Via Cenni* iniciou-se em Janeiro de 2012 e o topo das quatro torres de 27 m foi alcançado num curto período de tempo, aproximadamente um ano. A rapidez de construção foi um aspeto decisivo nas razões inerentes à escolha do material de construção, bem como as preocupações ambientais construtivas, recaindo a decisão num material à base da madeira, devido à sua capacidade renovável.



Fig. 43 – Planta estrutural do complexo residencial, composto por 4 torres de 9 andares (delimitados pelas linhas vermelhas) e por edifícios de ligação com 2 pisos (delimitados pelas linhas verdes) (Bernasconi, 2012).

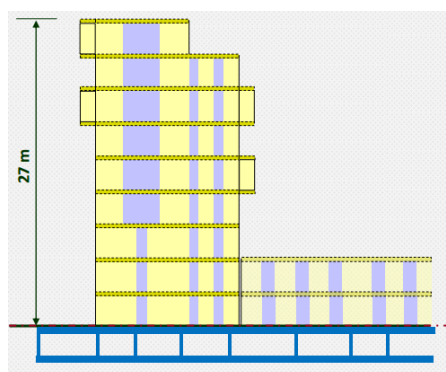


Fig. 44 – Corte longitudinal de umas das torres do Via Cenni. O piso subterrâneo é constituído por betão armado e serve de garagem e de armazenamento de equipamento técnico (Bernasconi, 2012).

A Polaris Investments SRI promoveu o concurso público a nível europeu em 2009, tendo como objetivo promover a experimentação em curso de abordagens inovadoras para a gestão de habitações sociais que cumpram os modernos aspetos ecológicos e económicos da sustentabilidade. A fim de atender a esses requisitos, o arquiteto responsável pelo empreendimento, Fabrizio Rossi Prodi e os engenheiros estruturais escolheram o CLT como material de construção estrutural.

Herbert Jöbstl, vice-presidente da empresa Stora Enso Construction and Living na Europa Central corrobora a sustentabilidade da construção utilizando o CLT, “estamos muito satisfeitos que a construção sustentável tenha encontrado o seu caminho para a habitação social. Isto é definição de uma tendência para futuros projetos. Devido ao alto grau de pré-fabricação dos elementos CLT, a construção pode ser particularmente rápida, o que resulta em vantagens de custo. Assim, este tipo de habitação é adequado para muitas pessoas, oferece excelente conforto

e bem-estar aos ocupantes e corresponde aos requisitos elevados de sustentabilidade, que podem ser atingidos rapidamente". (Stora Enso, 2014 , pag. 2).

A característica distintiva do *Via Cenni* é o uso consistente do CLT ao longo de toda a construção, desde paredes e pavimentos até às caixas de elevadores e escadas. "Para a Stora Enso Construction and Living, *Via Cenni* foi o maior projeto até à data", diz Matti Mikkola, Chefe da Building Solutions Business Development da Stora Enso (Stora Enso, 2014 , pag. 2). Do ponto de vista dos fornecedores CLT, o tamanho do empreendimento não é um problema: "Teoricamente, poderíamos produzir um projeto do tamanho do *Via Cenni* em menos de três semanas" (Stora Enso, 2014 , pag. 2). Para Mikkola, o projeto *Via Cenni* é a melhor prova "de que a construção em altura em madeira até nove andares é o estado da arte. Entre os especialistas, há mesmo uma conversa de dez andares ou mais" (Stora Enso, 2014 , pag. 2). "O projeto também mostra que a construção em madeira não é mais dispendiosa do que a construção em alvenaria ou betão armado e, portanto, corresponde à criação de habitação a preços acessíveis", segundo Mikkola (Stora Enso, 2014 , pag. 2). A acessibilidade de preço não foi o único aspeto a ter em conta, sendo que, o princípio do convívio social também esteve envolvido no planeamento do *Via Cenni*. Desta forma, foi criado um grande parque interior dentro do complexo residencial (com aproximadamente 1000 m²), que circunda o prédio, e serve como um centro para a vida social entre os ocupantes. Tal como as torres residenciais feitas em madeira, o parque representa um símbolo memorável para a sustentabilidade, devido ao carácter renovável do material de construção.

3.1.3.2. COMPORTAMENTO AO SISMO

O complexo residencial *Via Cenni* foi o primeiro edifício CLT com 9 andares a ser construído numa zona com risco sísmico, tratando-se de um projeto inovador e pioneiro. Ensaio experimentais (Piazza *et al.*, 2013) feitos numa mesa vibratória num edifício de 7 andares foram realizados em Tóquio e comprovaram a excelente segurança a eventos sísmicos por parte dos edifícios feitos em CLT. Nesse ensaio ficou demonstrado que os edifícios em CLT têm uma maior capacidade resistente a eventos sísmicos do que estruturas em betão armado, facto que se deve, à maior flexibilidade das ligações estruturais entre os elementos presentes nos edifícios em madeira. Assim, as ligações metálicas utilizadas na estrutura têm um papel muito relevante para a resistência estrutural do edifício aos eventos sísmicos.

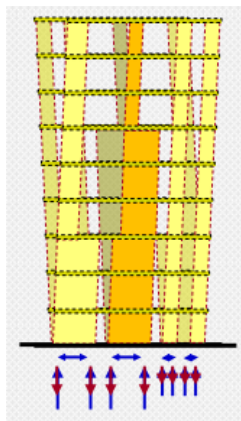


Fig. 45 – Exemplo das deformações e forças criadas na ocorrência de um evento sísmico. (Bernasconi, 2012).

Por forma a obter-se uma estrutura com uma boa capacidade resistente a eventos sísmicos é necessária uma abordagem cuidada por parte dos projetistas por forma a criar uma estrutura com desempenho elevado a eventos sísmicos. Assim, os engenheiros estruturais devem ter em consideração todos os aspetos relevantes que contribuam para um melhor dimensionamento da estrutura. Assim, o centro de rigidez da estrutura deve estar o mais próximo possível do centro geométrico da mesma, devem procurar incorporar paredes estruturais suficientes, de maneira a resistir às solicitações horizontais quer do vento, quer dos eventos sísmicos, ter especial cuidado no dimensionamento das ligações metálicas dos elementos, etc.

Analisando a Fig. 46, percebemos que existem várias análises a serem efetuadas para determinarmos a segurança de um edifício ao sismo e que é necessária a criação de um modelo num software apropriado a uma análise sísmica. O software MEF adotado deve permitir efetuar, tal como sugere a Fig. 46, a análise estática estrutural, dinâmica e ainda uma análise numérica paramétrica. Por exemplo, na análise estrutural estática são calculadas as forças internas nos componentes da estrutura bem como das forças nas ligações, estando estas dependentes do nível de risco sísmico da zona em que a construção é implementada.

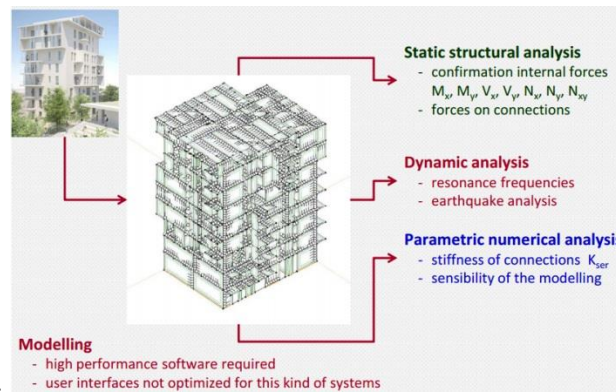


Fig. 46 – Análises a serem efetuadas através da criação de um modelo de dimensionamento de uma estrutura a eventos sísmicos (Bernasconi, 2012).

3.1.3.3. COMPORTAMENTO AO FOGO

Relativamente ao dimensionamento ao fogo, os engenheiros definiram a classe de resistência ao fogo de REI60 para os compartimentos de incêndio e a classe R60 para os restantes elementos estruturais. De maneira a ser mais compreensível o significado das classes adotadas, é explicado o significado de cada sigla, bem como o número.

R: O elemento estrutural não deve entrar em colapso ou deformar para além dos níveis permitidos quando submetidos ao fogo.

E: A integridade do compartimento deve ser mantida. O avanço das chamas não é permitido.

I: A temperatura no lado não exposto do elemento estrutural não deve subir mais do que 140 ° C acima da temperatura ambiente, como uma medição da média, e não mais do que 180 ° C, em qualquer localização.

60: Resistência do material ao fogo superior ou igual a 60 minutos.

Todos os elementos estruturais devem ser revestidos por placas resistentes ao fogo EI60. A Fig. 47 demonstra como deve ser efetuada a colocação das placas de revestimentos ao fogo para os pavimentos, paredes internas e externas.

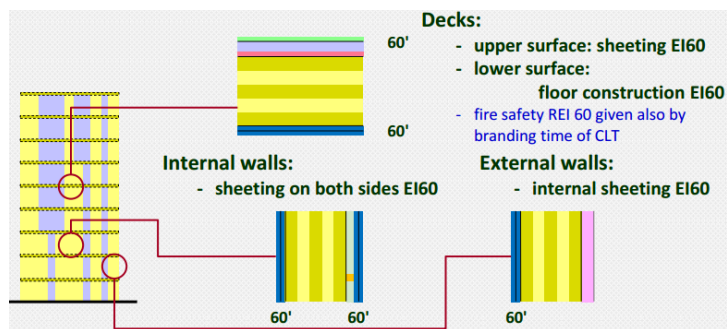


Fig. 47 – Localização das placas EI60 nos elementos estruturais do complexo residencial Via Cenni (Bernasconi, 2012).

Deve-se ter particular cuidado com revestimento do CLT estrutural, de maneira a evitar-se deficiências na proteção dos elementos. Assim, o princípio passa por incorporar as placas de proteção ao fogo o mais próximo possível ao elemento CLT (contacto direto), sendo de evitar situações em que exista espaço entre os elementos, pois isso acarretará riscos e problemas à proteção da estrutura contra o fogo. Tal como é sugerido na Fig. 48, deve-se evitar a colocação das instalações entre o painel CLT e as placas EI60, sendo a solução mais apropriada apresentada à direita da imagem.

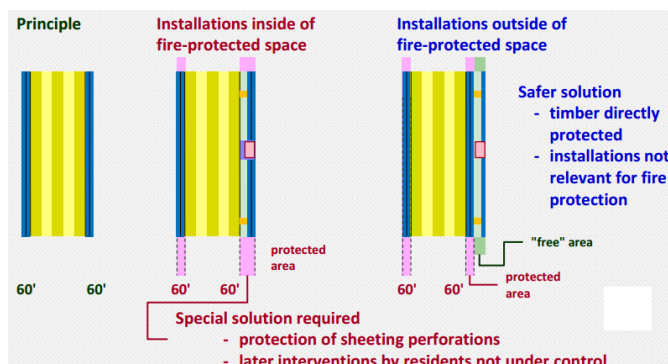


Fig. 48 – Princípio da colocação dos painéis EI60 e exemplificação da correta disposição das instalações do edifício (Bernasconi, 2012).

3.2. PROJETOS EM FASE DE ESTUDO

Existem inúmeros projetos em fase de estudo incluindo o CLT como material de construção, contudo, os de maior relevância recorrem a soluções híbridas. Este facto deve-se à ambição de construir, cada vez mais edifícios com maior envergadura, sendo adotadas novas soluções estruturais. Neste tópico serão abordados alguns dos projetos mais relevantes sobre a construção em altura recorrendo a sistemas híbridos.

3.2.1. FFFT SYSTEM

Os arquitetos canadianos, Michael Green e Eric Karsh (2012), estão desde 2008 a desenvolver um novo modelo de construção em altura, FFFT system (Find the Forests Through the Trees), que visa tirar o máximo partido das capacidades do CLT. Trata-se de um sistema bastante ambicioso e arrojado, uma vez que procura construir arranha-céus até 30 pisos. Os edifícios que usam o conceito estrutural FFFT (Karacabeyli e Lum, 2013) podem ser destinados tanto a escritórios como a uso residencial.

3.2.1.1. SISTEMA ESTRUTURAL

O sistema FFFT baseia-se no conceito estrutural coluna forte/ viga fraca, em que as colunas "fortes" consistem em grandes painéis de parede em CLT, ligados às vigas de aço estruturais incorporadas na espessura dos mesmos, através de uma ligação “fraca”, mas com comportamento dúctil. A ligação entre os elementos de viga com os painéis de parede proporciona rigidez ao sistema, ao mesmo tempo que permite o controlo sobre a intensidade das forças sísmicas, durante um evento sísmico grave. O sistema faz isso, criando rótulas plásticas de absorção de energia, tal como um fusível limita o nível de potência que passa através de um sistema elétrico. A aplicação padrão em betão armado está prevista para as fundações e todas as estruturas com possível interação com o solo.

O *FFTT system* apresenta quatro configurações estruturais possíveis, estando estas divididas de acordo com o limite de andares que cada solução estrutural proporciona. Por exemplo, na configuração 1 é viável construções até 12 andares, empregando um núcleo constituído por paredes estruturais em madeira lamelada colada cruzada e pilares em madeira laminada colada no perímetro da estrutura, funcionando como estrutura de suporte. Nas configurações 2 e 3, é necessária uma estrutura de reforço adicional, uma vez que, estas soluções permitem alcançar maiores alturas de construção, até 20 andares. Paredes interiores estruturais em CLT e paredes exteriores estruturais em CLT fornecem este reforço adicional nas configurações 2 e 3, respetivamente. A configuração 4 consiste na junção da opção 2 com a 3, tornando-se numa solução estrutural com paredes interiores e exteriores estruturais, esta solução permite construções até 30 andares.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

A Fig. 49 apresenta a planta estrutural e a Fig. 50 a esquematização 3D do sistema estrutural relativo à 4ª configuração estrutural que o *FFTT system* propõe.

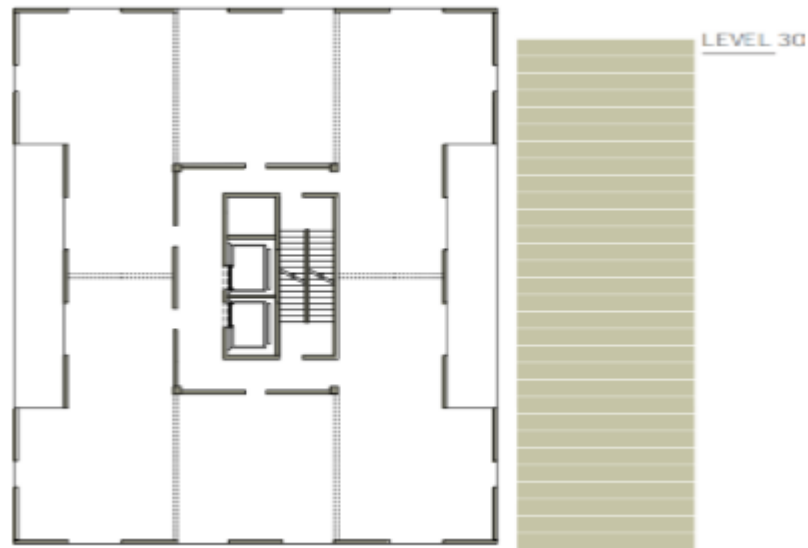


Fig. 49 – Configuração 4 - configuração estrutural para edifícios até 30 pisos (Green e Karsh,2012).

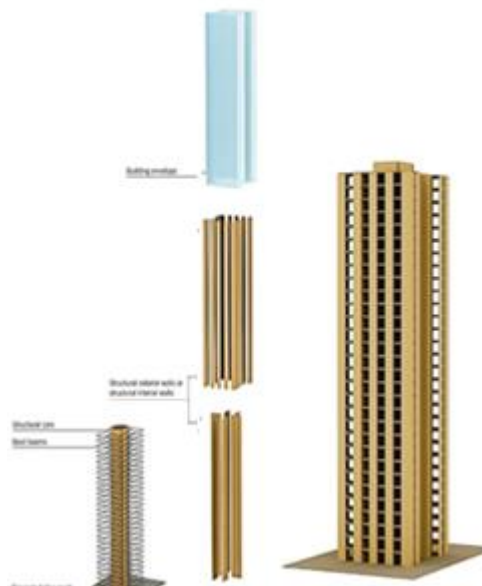


Fig. 50 – Esquematização 3D do sistema estrutural relativo à configuração 4 (Green e Karsh,2012).

3.2.2. URBAN TIMBER SYSTEM

O Urban Timber system encontra-se em desenvolvimento na Universidade do Minho (Silva *et al.*, 2014) e visa combater algumas das limitações do sistema construtivo de edifícios altos em madeira. Ou seja, consiste num projeto, em fase de estudo, que procura satisfazer as exigências impostas ao sector da construção civil, devido ao crescimento populacional nos centros urbanos. Após a verificação das limitações inerentes à construção em altura com recurso à madeira lamelada colada cruzada, foi adotado um novo sistema estrutural híbrido que a nível arquitetónico, possibilita maior liberdade volumétrica aos edifícios, permitindo ângulos entre o solo e as fachadas.

3.2.2.1. SISTEMA ESTRUTURAL

Estruturalmente, o *UT system* é inspirado no conceito em que todos os elementos verticais estão ligados entre si, fazendo com que a estrutura trabalhe como um bloco único. A vantagem desse tipo de conceito é que a resposta tridimensional da estrutura resulta numa melhoria da resistência e da rigidez, fornecida pelas armações transversais do edifício (Silva *et al.*, 2013).

O sistema estrutural híbrido adotado é constituído exclusivamente por madeira, contudo é composto por dois tipos de madeiras estruturais diferentes, o CLT e a madeira lamelada colada (MLC). O CLT será utilizado em paredes, vigas de profundidade e pavimentos, enquanto que a MLC é destinada a execução das vigas. Uma das vantagens inerentes é o facto de os pavimentos atuarem em conjunto com as vigas em MLC na distribuição das cargas até às paredes em CLT, evitando o colapso progressivo, devido ao aumento da rigidez estrutural. A implementação de vigas de profundidade pelo perímetro do edifício visa garantir uma maior coesão dos elementos estruturais, proporcionando, fundamentalmente, uma maior resistência às cargas horizontais e uma maior rigidez à estrutura.

Uma das grandes vulnerabilidades dos edifícios em altura é a resistência às forças laterais, especialmente às cargas de vento, devendo o perímetro do edifício possuir um carácter mais estrutural. Desta forma, o *UT system* propõe uma solução estrutural em que a maior parte dos elementos estruturais com resistência a cargas laterais se encontra localizado no perímetro do edifício, havendo também alguns componentes estruturais de menor dimensão no interior. O

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

sistema de resistência às cargas laterais é efetuado por paredes em CLT posicionadas no perímetro do edifício e orientadas perpendicularmente à fachada.

A Fig. 51, Fig. 52 e Fig. 53 apresentam uma proposta de um edifício com base nos princípios do *UT system*, estando os elementos resistentes às cargas laterais orientados segundo as duas direções principais ortogonais. A capacidade de resistência ao carregamento lateral pode ser melhorada através do uso de paredes maiores e/ou mais grossas em CLT localizadas nos cantos do edifício, e orientadas em ambos os eixos principais do sistema estrutural.

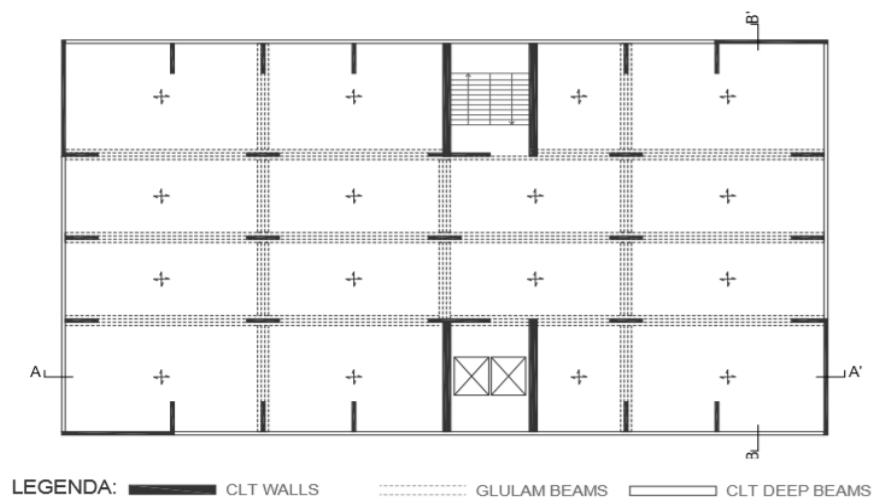


Fig. 51 – Esquema estrutural proposto pelo *UT system* (Silva *et al.*, 2013)

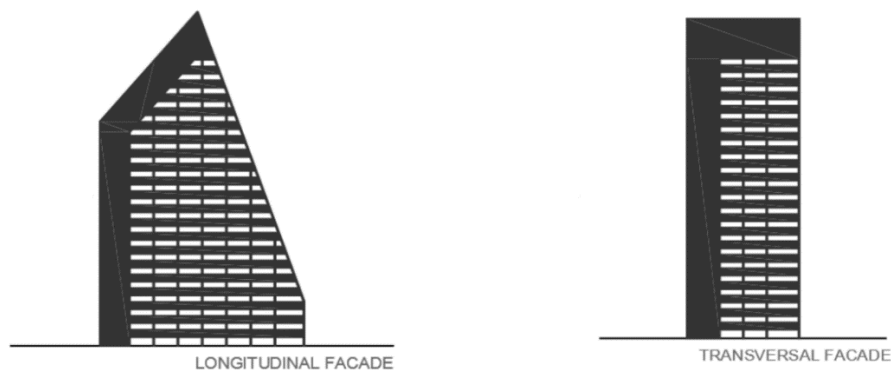


Fig. 52 – Fachadas propostas pelo *UT system* (Silva *et al.*, 2013).

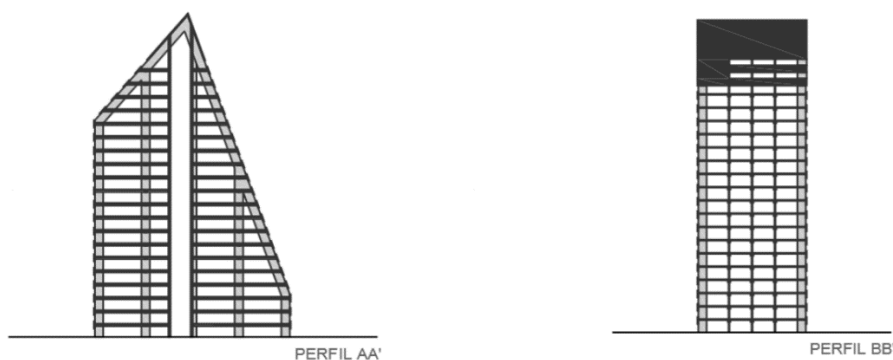


Fig. 53 – Corte transversal (BB') e longitudinal (AA') do edifício proposto pelo *UT system* (Silva *et al.*, 2013).

3.2.3. PRES-LAM SYSTEM

Sistemas pré-esforçados com alto desempenho sísmico (resistentes a danos sísmicos) e baixo custo foram desenvolvidos pela primeira vez na década de 1990, como um dos principais resultados do programa PREcast Seismic Structural Systems (PRESSSS), coordenado pela Universidade da Califórnia em San Diego (Nakaki *et al.*, 1999; Priestley, 1991; Priestley, 1996). Entre as diferentes soluções de ligação pilar-viga e parede-fundação desenvolvidas no programa PRESSSS, o sistema híbrido provou ser uma solução promissora e eficiente. O sistema é híbrido baseia-se na combinação de contribuições de auto-centralização e dissipação, fornecidas por cabos de pré-esforço e reforços de aço macio, respetivamente. Este conceito foi subsequentemente alargado às estruturas de aço (Christopoulos *et al.*, 2002) provando a sua adaptabilidade independentemente do material estrutural utilizado.

Recentemente, a tecnologia híbrida PRESSSS foi aplicada a sistemas estruturais de madeira (Palermo *et al.*, 2006a; Smith, 2006; Iqbal *et al.*, 2007). Esta adaptação do sistema híbrido é denominada por sistemas estruturais Pres-Lam (Prestressed Laminated timber) e consistem em grandes estruturas de madeira ou paredes materializadas por produtos de madeira estrutural (LVL, MLC, CLT, etc) capazes de resistir a ações sísmicas com danos mínimos nos elementos de madeira. O sistema estrutural Pres-Lam foi desenvolvido na Nova Zelândia, através de uma extensa campanha experimental e numérica realizada na Universidade de Canterbury. Nos últimos anos, tem vindo a ser construídos alguns edifícios comerciais de madeira com vários andares utilizando a tecnologia Pres-Lam, sendo o Nelson Marlborough Institute of Technology

(Deveroux *et al.*, 2011) e o Carterton Events Center (Dekker *et al.*, 2012) exemplos disso mesmo.

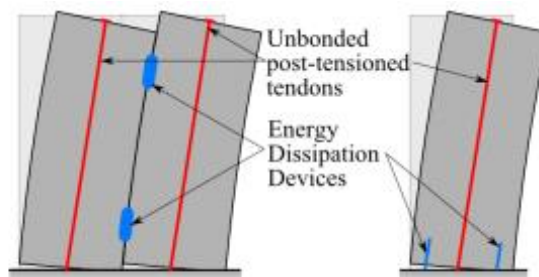


Fig. 54 – Conceito híbrido utilizado em sistema de paredes (Sarti *et al.*, 2012).

3.2.3.1. DESEMPENHO SÍSMICO

O comportamento dúctil requerido num edifício de vários pisos pode acarretar um elevado custo quando se forma deformações plásticas irreversível na estrutura (Marriott, 2014). A prevenção de danos é uma filosofia de projeto que visa reduzir o custo de reparação de edifícios através de respostas sísmicas de baixo dano e dispositivos de dissipação de energia de fácil substituição após eventos sísmicos, garantindo um comportamento dúctil à estrutura. A combinação de mecanismos de resposta de baixo dano com um material de construção não dúctil, tal como madeira, possui potenciais benefícios, uma vez que proporciona a ductilidade necessária e previne a rotura frágil.

O mecanismo de oscilação é uma resposta sísmica de baixo dano. A oscilação ocorre quando uma parede é levantada da fundação e gira em torno de um dos cantos devido a uma carga lateral. O peso próprio da parede, bem como qualquer carga residencial, provoca uma força de restabelecimento no centro de gravidade da parede. Esta força de restabelecimento inverte o movimento da oscilação, e o momento originado faz com que a parede oscile para além do ponto de equilíbrio. Permitir que uma estrutura oscile para trás e para frente dissipa energia através do movimento global da parede, bem como do impacto nos cantos do painel, reduzindo o dano estrutural global (Marriott, 2014; Ma, 2010).

O movimento de oscilação perpendicular ao plano das paredes é limitado pela ação do sistema de vigas duplas aplicadas nas faces das paredes, formando uma estrutura do tipo “sandwich”. As paredes são geralmente fixadas às vigas duplas através de ligadores metálicos do tipo cavilha.

3.2.3.2. COMPONENTES HÍBRIDOS

O sistema estrutural Pres-Lam é constituído por um sistema híbrido formado por cabos de pré-esforço e dispositivos dissipadores de energia aplicados no centro e na base das paredes, respectivamente. Até à data, têm sido utilizados cabos de pré-esforço do tipo Macalloy com alta resistência à tração (1030 MPa). A escolha deste tipo de cabos em oposição aos cabos constituídos por fios (mais baratos) deve-se à simplicidade de ligação do sistema. Os cabos Macalloy apresentam a vantagem de não necessitarem de ser contínuos até às zonas de ancoragem, ou seja, através de ligadores roscados facilitam a ligação às fundações e a possíveis interrupções na continuidade dos cabos entre pisos. Os cabos Macalloy também possuem uma maior capacidade para lidar com as forças de momento mais elevadas aplicadas nas paredes (Smith, 2008). O uso de cabos Macalloy também torna o processo de tensionamento mais fácil, podendo em alguns casos ser feito através do aperto de uma porca de grandes dimensões em vez da utilização de um macaco hidráulico (detalhes do processo de tensionamento podem ser obtido no catálogo: Macalloy - Post Tensioning System, 2011).

As paredes são geralmente instaladas em pares com elementos dissipadores instalados na base ou entre as faces laterais das paredes. Desta forma, foram desenvolvidos dispositivos internos (ver Fig. 55a) e externos (Fig. 55b e c) que permitissem adicionar dissipação de energia ao sistema Pres-Lam . Os métodos de dimensionamento visam maximizar o potencial de dissipação de energia enquanto mantêm a capacidade de restabelecimento da posição inicial do sistema durante o carregamento lateral.

Os dissipadores são colocados adjacente aos cabos de pré-esforço e para se obter um melhor desempenho das barras aplicadas internamente (em casos em que sejam aplicadas mais do 1 par por parede) deve-se efetuar um escalonamento em altura das mesmas, ou seja, a altura das barras deve ser aumentada à medida que se aproximam dos cabos de pré-esforço verticais.

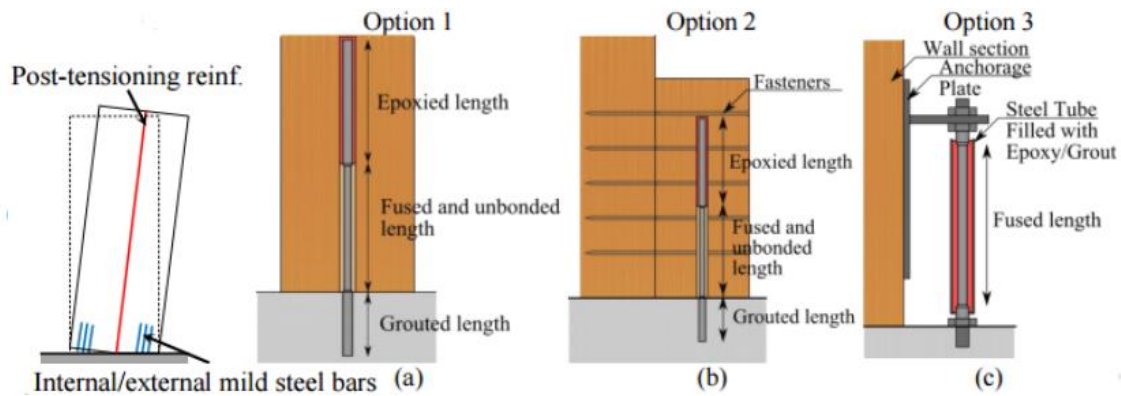


Fig. 55 – Diferentes opções de dissipadores na parede: (a) barras internas, (b) barras internas substituíveis, (c) barras externas fundidas (modificado de Sarti *et al.*, 2012).

Os dissipadores são colocados adjacente aos cabos de pré-esforço e para se obter um melhor desempenho das barras aplicadas internamente (paredes com mais de 1 par de barras aplicadas) deve-se efetuar um escalonamento em altura das mesmas, ou seja, a altura das barras deve ser aumentada à medida que se aproximam dos cabos de pré-esforço verticais.

Os dissipadores instalados nas faces laterais das paredes assumem a forma de placas fletoras em forma de “U”(UFPs). Este sistema foi desenvolvido na década de 1970 (Smith, 2008) e tem sido utilizado em edifícios de betão pré-fabricado já há algum tempo.

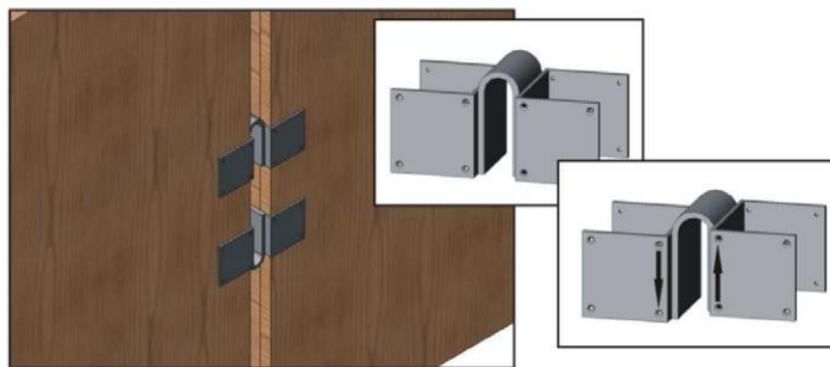


Fig. 56 – Placas fletoras em forma de “U”(UFPs) ligadas às paredes estruturais (Foreman, 2015).

Uma das vantagens deste método consiste na fácil instalação e substituição dos dispositivos após a ocorrência de danos ou deslocamentos na estrutura. Para além disso, possuem uma excelente capacidade de dissipação de energia, permitindo o movimento de oscilação das paredes sob carga sísmica.

3.2.3.3. CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO CONSTRUTIVO

As fundações de edifícios altos em madeira são geralmente efetuadas em betão armado por meio de sapatas e lintéis. As fundações têm por objetivo suportar e efetuar a transferência das forças gravíticas e laterais do edifício para o solo em que estão inseridas. Um facto surpreendente em relação às construções altas em madeira é que apesar do seu peso reduzido, as dimensões das fundações são comparáveis com aquelas usadas para suportar um edifício semelhante em betão armado. A razão para esta particularidade passa pela necessidade de as fundações (sapatas de betão armado e lintéis) terem de resistir ao momento de derrubamento aplicado sobre a base dos pilares e paredes estruturais durante um terremoto (Smith, 2008). Esta situação pode-se alterar caso as cargas gravíticas sejam o maior contribuinte para as cargas globais aplicadas sobre a estrutura ou em situações em que os tipos de solos sejam mais consistentes/resistentes.

Durante o desenvolvimento de um projeto estrutural, Smith (2008) descobriu que o uso de barras de dissipação de aço macio inseridas nas bases das paredes e fundações afetaria a profundidade necessária das fundações, exigindo uma profundidade superior aquela que seria necessário sem estes elementos dissipadores de energia.

As paredes estruturais de edifício altos em madeira são instaladas geralmente na laje de betão armado do 1º piso. Segundo Smith (2008) as lajes devem apresentar uma espessura superior nas zonas onde ocorram as ligações entre as paredes. Desta forma, é formado uma espécie de pódio nas zonas de instalação das paredes para permitir a fixação dos cabos de aço verticais de pré-esforço (geralmente varões de 50 mm de diâmetro Macalloy) e dos dissipadores de energia a serem rebocados dentro de cavidades perfuradas no betão. As paredes são geralmente fabricadas com encaixes pré-epoxidados roscados (TCM) fixados na base para que os dissipadores(barras de aço macio) possam ser aparafusados em obra e posteriormente ligados às barras de aço macio rebocadas na laje de betão armado.

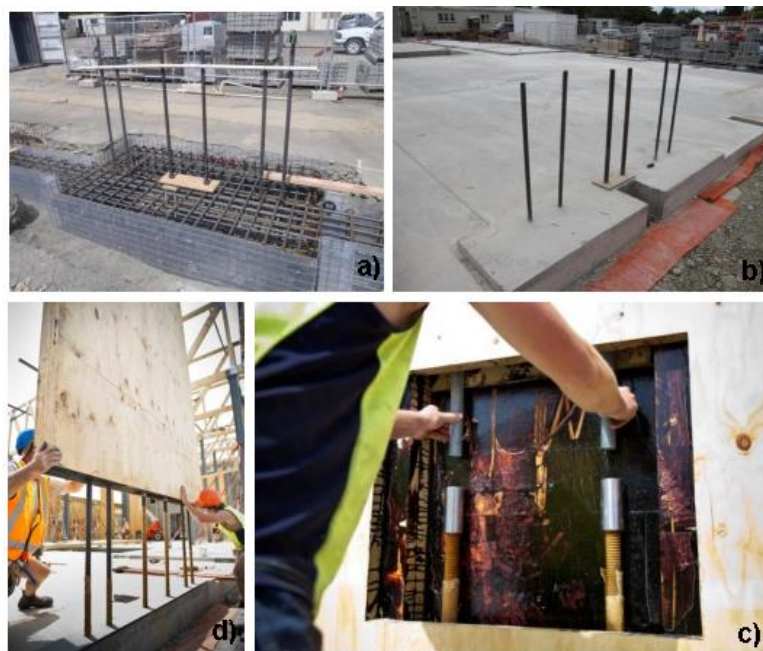


Fig. 57 – Processo construtivo de uma parede pré-esforçada: a) fundações da parede; b) extremidades dos cabos de pré-esforço e dissipadores rebocados às fundações; c) ligação dos cabos de pré-esforço Macalloy e d) colocação em obra do painel LVL (Palermo *et al.*, 2012).

Outro aspeto construtivo importante passa pela aplicação de placas de aço para proteger o esmagamento da madeira nos cantos inferiores dos painéis parede durante o movimento de oscilação. Com o intuito de resistir ao deslizamento dos painéis de parede, originado pelas forças de corte na base das paredes pré-esforçadas, são geralmente fixadas à laje de betão armado perfis metálicos (shear keys) nas extremidades do painel de parede. Como é demonstrado na Fig. 58 (esquerda) os perfis metálicos (shear keys) devem possuir um formato curvo, limitando o deslizamento do painel e ao mesmo tempo permitindo a oscilação do painel sem provocar esmagamento excessivo da madeira no canto do painel. É também possível a utilização de sapatas metálicas para resistir ao mecanismo de deslizamento do painel (ver Fig. 58, direita), contudo nesta situação a utilização de placas de aço nos cantos inferiores dos painéis é aconselhável para reforçar a madeira à compressão.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

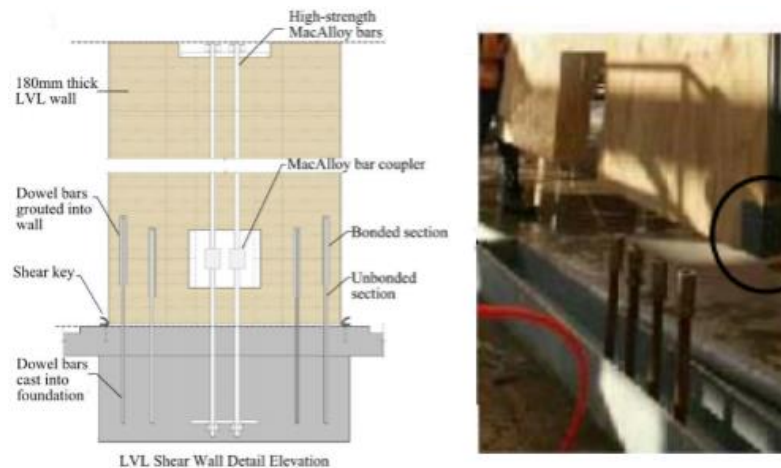


Fig. 58 – Aplicação dos perfis metálicos curvados (esquerda) e das placas de aço (direita) nas extremidades do painel de parede (Palermo *et al.*, 2012 e Foreman, 2015).

As paredes podem ser ligadas verticalmente para se estenderem em altura através de ligações emendadas (ver Fig. 59).

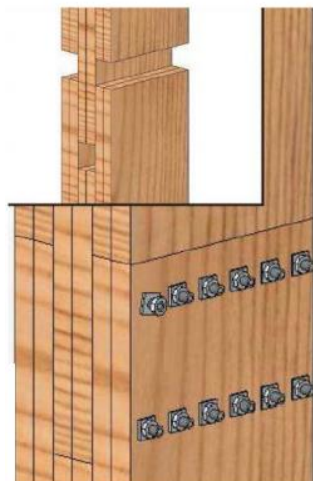


Fig. 59 – Ligação emendada de uma parede/pilar de um edifício de madeira pré-esforçado (Foreman, 2015).

As paredes verticais podem apresentar aberturas na base e no topo de modo a ser possível aceder aos cabos de pré-esforço facilmente (ver Fig. 60). Este método construtivo mantém a parte superior da parede livre para uma ligação sem obstáculos à estrutura do telhado. Um vez que os cabos de pré-esforço vão perdendo tensão ao longo do tempo, é necessário efetuar inspeções periódicas do estado dos cabos e da tensão atuante. Caso seja necessário deve-se efetuar o aperto do sistema ou efetuar a substituição dos cabos em caso de rotura.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

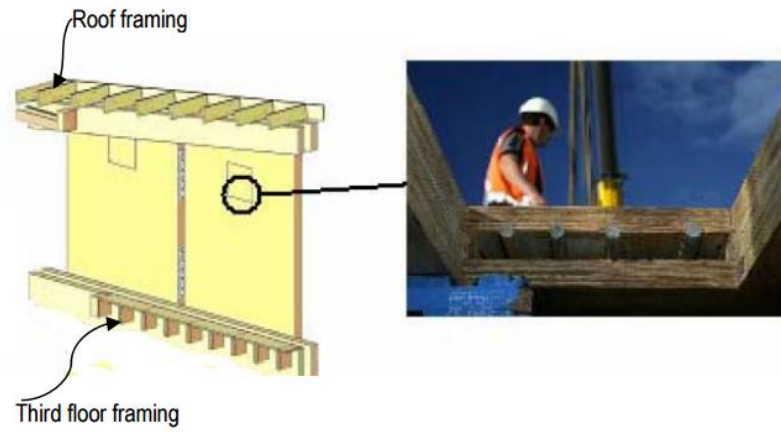


Fig. 60 – Localização da abertura de acesso aos cabos de pré-esforço no 3º andar do edifício NMIT Arts and Media (Foreman, 2015).

4. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE CLT

4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CLT

As propriedades mecânicas do CLT são obtidas a partir das fichas técnicas de produto fornecidas por cada fabricante, sendo essas regulamentadas por aprovações técnicas europeias (ETAs). As propriedades mecânicas dos painéis CLT diferem de fabricante para fabricante, devido aos seguintes fatores: diferenças na gama de espessuras de painéis produzidos por cada fabricante (Tabela 2); diferenças nas espessuras das camadas de um painel com a mesma espessura (Fig. 61) e variação nas propriedades do material base selecionado por cada fabricante CLT (Tabela 3).

Tabela 2 – Gama de espessuras de painéis produzidos pelos fornecedores KLH, Binderholz, MMK e Stora Enso (Pérez *et al.*, 2016).

Manufacturer	Panel overall thicknesses (mm)													
KLH	60	78	--	90	95	100	108	117	120	125	140	145	--	162
Binderholz	60	--	80	90	--	100	--	--	120	--	140	--	160	--
MMK	60	--	80	90	--	100	--	--	120	--	140	--	160	--
Stora Enso	60	--	80	90	--	100	--	--	120	--	140	--	160	--

Manufacturer	Panel overall thicknesses (mm)													
KLH	180	182	200	201	208	--	226	230	--	248	260	280	300	320
Binderholz	180	--	200	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
MMK	180	--	200	--	--	220	--	--	240	--	260	280	--	--
Stora Enso	180	--	200	--	--	220	--	--	240	--	260	280	300	320

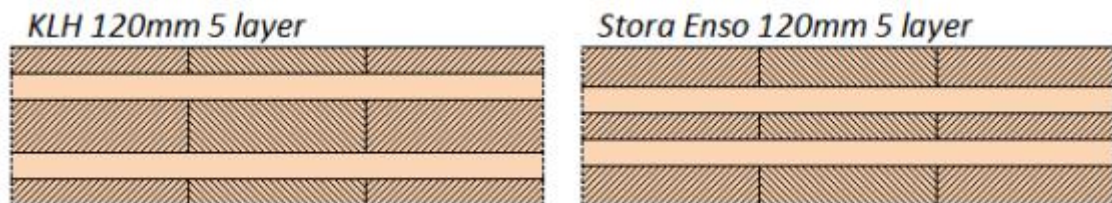


Fig. 61 – Diferença na espessura das camadas de um painel CLT com a mesma espessura total (120 mm), mas produzido por empresas diferentes (KLH e Stora Enso) (Pérez *et al.*, 2016).

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

A EN 16351:2015 define os padrões mínimos para a produção do CLT, bem como, todos os requisitos essenciais para ensaiar, calcular e compreender o material CLT. A publicação da norma EN 16351:2015 pode ajudar a eliminar as diferenças nas propriedades mecânicas do CLT entre fabricantes. Atualmente esta temática ainda não foi ultrapassada, criando desafios e ineficiências no processo de aquisição de um edifício CLT, uma vez que o engenheiro de estruturas para efetuar o dimensionamento preciso do edifício necessita primeiro de selecionar o fornecedor. Por outro lado, com o intuito de democratizar o projeto de estruturas em CLT, um grupo de especialistas do CEN TC 250 está atualmente a trabalhar na inclusão de regras específicas para o dimensionamento de CLT no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1).

Tabela 3 – Comparação das propriedades mecânicas obtidas pelos principais fabricantes CLT (lamelas da classe C24), com aquelas sugeridas por Novak *et al.* (2014), segundo o EN 16351:2015 (adaptado de Pérez *et al.*, 2016).

MANUFACTURER		Binderholz	KLH	MMK	Stora Enso	EC
Density (kg/m ³)	ρ_{mean}	480	550	480	500	450
Actions perpendicular to the panel (N/mm²)						
Modulus of Elasticity	$E_{0,mean}$	11000	12000	11600	12500	11000
	$E_{0,05}$	7400	9500	7772	7400	9160
	$E_{90,mean}$	370				
Shear Modulus	G_{mean}	690	690	650	690	690
	$G_{R,mean}$	50				
Bending Strength	$f_{m,k}$	24	24	24	26	24
Tensile Strength	$f_{t,90,k}$	0.4	0.12	0.12	0.12	—
Compressive Strength	$f_{c,90,k}$	2.5	2.7	2.5	2.5	2.5
Shear Strength	$f_{v,k}$	2.5	2.7	2.5	4	2.5
	$f_{R,v,k}$	0.7	1.5	1.1	1.25	1.1
Actions in plane of the panel (N/mm²)						
Modulus of Elasticity	$E_{0,mean}$	11000	12000	11600	12500	11000
	$E_{0,05}$	7400	9500	7772	7400	9160
	$E_{90,mean}$	370				
Shear Modulus	G_{mean}	250	250	250	460	690
Bending Strength	$f_{m,k}$	24	23	24	24	24
Tensile Strength	$f_{t,0,k}$	14	16.5	14	14	14
Compressive Strength	$f_{c,0,k}$	21	24	21	21	21
Shear Strength	$f_{v,k}$	2.5	5.2	5	2.5	5

4.2. MÉTODOS DE CÁLCULO DISPONÍVEIS PARA CLT

4.2.1. GERAL

Os painéis CLT são geralmente utilizados horizontalmente em pisos ou coberturas e verticalmente em paredes. Quando usados horizontalmente a distribuição de cargas é feita predominantemente numa direção (uniaxialmente), geralmente são orientados segundo a direção com maior vão. Em situações onde os painéis de piso sejam apoiados pontualmente ou em coberturas com saliência bilateral, a distribuição de cargas é feita segundo as duas direções ortogonais. Os painéis apresentam uma rigidez de corte superior quando orientados na vertical (paredes), uma vez que os esforços são absorvidos pelas camadas verticais do painel, originando tensões paralelas às fibras da madeira.

A capacidade de carga de um painel CLT é definida segundo duas direções: a direção principal (0°), que contém a rigidez mais elevada e a direção secundária (90°), onde a rigidez é consideravelmente menor. A orientação dos painéis CLT é de extrema relevância para a potencialização da capacidade de carga máxima dos elementos estruturais, ou seja, os painéis devem ser orientados segundo a direção que produza uma maior rigidez aos respectivos esforços. Desta forma, a direção principal da capacidade de carga de um painel CLT está associada geralmente à direção das camadas exteriores dos painéis.

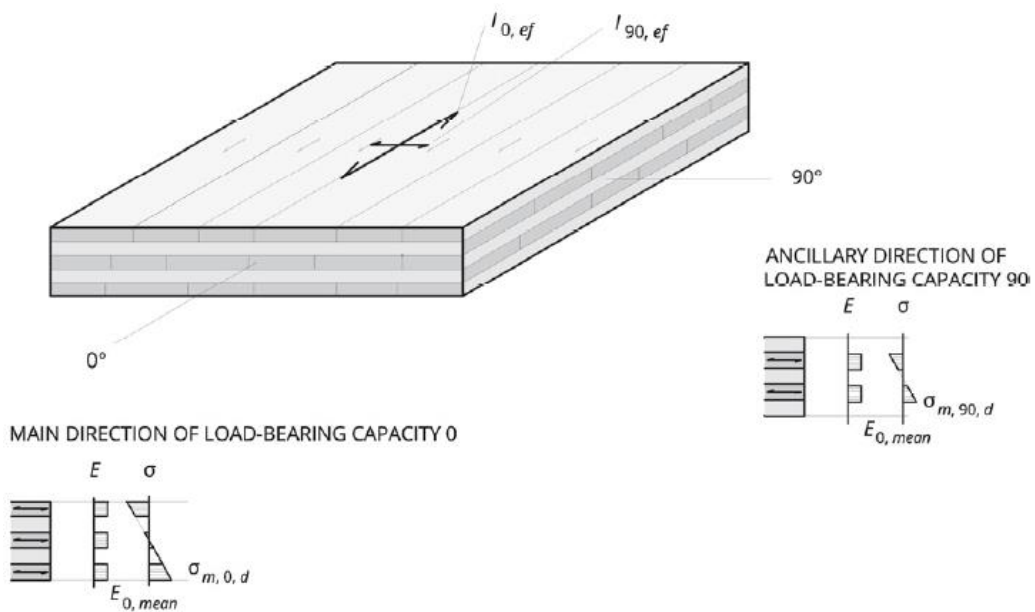


Fig. 62 – Direção principal (0°) e secundária (90°) da capacidade de carga de um painel CLT com 5 camadas (Novak *et al.*, 2014)

4.2.2. PAINÉIS DE PISO OU DE COBERTURA (CARREGAMENTO FORA DO PLANO)

Quando se dimensiona um painel CLT sujeito à flexão fora do plano segundo a direção principal da capacidade de carga (0°), apenas as camadas que possuam a mesma orientação são incluídas no cálculo da rigidez efetiva de flexão, $E_0 \cdot I_{ef}$. Assim, as camadas transversais não apresentam tensões longitudinais (0°), sendo-lhes atribuído um módulo de elasticidade igual a zero, $E_{90} = 0$. Nestas situações, as camadas transversais estão apenas sujeitas a tensões de corte, devendo ser analisadas segundo a capacidade de carga e deformação do CLT. Quando um painel sujeito à flexão fora do plano sofre uma rutura por corte, são geralmente observadas quebras tangenciais nos anéis anuais das lamelas das camadas transversais (Fig. 63, esquerda). Este fenómeno é denominado de rutura por corte rasante e ocorre frequentemente em painéis CLT, devido à baixa resistência ao corte rasante, $f_{V,R,k}$, das camadas transversais. A deformação de corte rasante num painel CLT sujeito à flexão está associada ao deslizamento relativo das camadas longitudinais e conseqüentemente a uma perda de rigidez de flexão (Fig. 63, direita). De referir que a madeira é um material que apresenta um módulo de corte rasante muito baixo e que quanto maior for espessura das camadas transversais de um painel, maior será a deformação de corte rasante do mesmo (Fellmoser e Blass, 2004). O módulo de corte rasante, G_r , é geralmente assumido como 10% do módulo de corte, G_0 , paralelo às fibras das lamelas. Uma vez que o módulo de corte, G_0 , para madeiras macias é aproximadamente igual a 1/16 do módulo de elasticidade, E_0 , assumir $G_r = 50 \text{ MPa}$ é conservativo.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

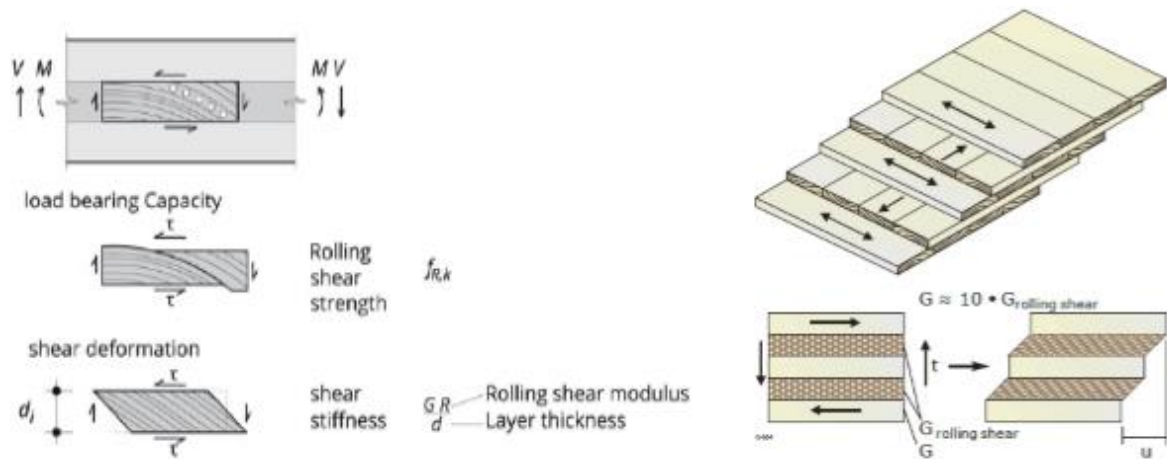


Fig. 63 – Comportamento de corte das camadas transversais (esquerda); deformação de corte rasante num painel CLT com 5 camadas (direita) (adaptado de Novak et al., 2014; Gagnon e Pirvu, 2011).

Segundo Gagnon e Pirvu (2011), a resistência e rigidez de corte rasante no CLT têm sido identificadas como um fator chave que pode governar o dimensionamento e desempenho dos sistemas de piso ou parede CLT.

Na maioria dos casos, os painéis de pavimentos/cobertura CLT são simplesmente apoiados ao longo de 2 extremidades paralelas e livres ou ligados a outros painéis, ao longo das outras duas arestas. Assim, os painéis de pavimento/cobertura CLT atuam principalmente segundo a direção principal, quando carregados perpendicularmente ao plano. Contudo, um comportamento bidirecional dos mesmos pode ocorrer para diferentes condições de apoio e este deve ser cuidadosamente estudado. Tal avaliação deve ter em consideração a influência das condições de apoio, uma vez que, diferentes condições de apoio podem modificar a rigidez relativa efetiva dos painéis em zonas de apoio. Os painéis de pavimento/cobertura CLT são apoiados em paredes, vigas, pilares ou por uma mistura destas condições de apoio. O comportamento bidirecional deve ser fundamentalmente estudado para painéis de pavimento/cobertura suportados em apoios pontuais (pilares) e apoiados ao longo de 3 ou 4 arestas.

Com base na *Plates Theory* (Timoshenko, 1959) e assumindo alguns princípios relativos ao dimensionamento de lajes maciças de betão armado em duas direções, Gagnon e Pirvu (2011) propõem uma metodologia de dimensionamento para painéis de pavimento/cobertura CLT apoiados segundo as 4 arestas. Para painéis CLT com comprimento superior ao dobro da largura

($l / b > 2$), o dimensionamento deve ser realizado segundo a direção com menor vão (Fig. 64, caso A). Já para painéis CLT com comprimento inferior ou igual ao dobro da largura ($l / b \leq 2$), o dimensionamento deve ser realizado segundo as 2 direções (Fig. 64, caso B).

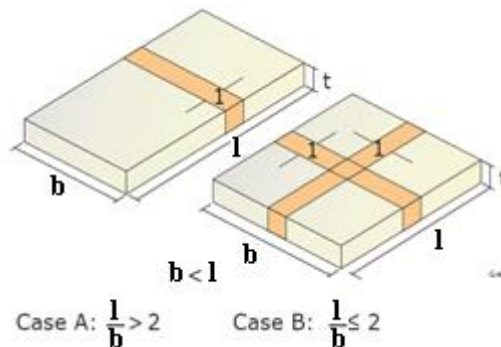


Fig. 64 – Comportamento unidirecional (caso A) e bidirecional (caso B) de um painel de pavimento CLT apoiado segundo as 4 arestas e carregado perpendicularmente ao plano (Gagnon e Pirvu, 2011).

De referir que o cálculo dos momentos de flexão e das deformações de painéis CLT retangulares é bastante complexo quando uma abordagem bidirecional é assumida. A complexidade do cálculo está associada a um vasto número de parâmetros a ter em consideração (condições de apoio, rigidez relativa efetiva dos painéis em zonas de apoio, módulos de elasticidade das camadas longitudinais e transversais, corte rasante em ambas as direções, etc.), tornando, na maioria dos casos, a análise bidirecional não compensatória, uma vez que, o dimensionamento de uma laje segundo uma direção, resulta numa solução mais conservadora. Gagnon e Pirvu(2011) sugerem um número mínimo de 5 camadas para situações de pavimentos/coberturas CLT com comportamento bidirecional e propõem que a sua verificação deve ser feita apenas excluindo as camadas longitudinais externas, ou seja, apenas as camadas internas do painel são consideradas para o dimensionamento.

4.2.2.1. MÉTODOS DE CÁLCULO UTILIZADOS

Neste tópico serão abordados e descritos detalhadamente os métodos analíticos mais utilizados para a determinação das propriedades mecânicas básicas de painéis de piso/cobertura CLT. O dimensionamento de pisos/coberturas CLT (determinação da espessura mínima e extensão máxima dos vãos) é maioritariamente condicionado por critérios de serviço (por exemplo: vibração, deformação e fluência) do que por critérios de resistência (por exemplo: resistência à flexão e ao corte), estando estes fatores associados à leveza do sistema construtivo CLT.

4.2.2.1.1. MECHANICALLY JOINTED BEAMS THEORY (GAMMA METHOD)

Este método foi desenvolvido em 1955 pelo professor Karl Mohler e atualmente bastante utilizado na Europa, encontrando-se incluído no anexo B do Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004). Foi originalmente criado para vigas em formato “I” e “T” ligadas através de ligadores aparafusados com uma determinada rigidez, K , uniformemente espaçada, ao longo do comprimento das vigas. Segundo este método, as propriedades de rigidez das vigas ligadas através de ligadores aparafusados são definidas através da rigidez à flexão efetiva (EI_{ef}), que depende das propriedades da secção das vigas e, segundo o fator de eficiência da ligação, γ . O fator γ depende das características de deslizamento dos ligadores, obtendo o valor zero para vigas sem qualquer ligação aparafusada e o valor 1 para vigas rigidamente ligadas.

Este método sofreu algumas alterações para ser implementado em produtos CLT, uma vez que a ligação das camadas (vigas) é feita através de um processo de colagem, em detrimento de ligadores aparafusados. É assumido que apenas as camadas orientadas na direção longitudinal contribuem para a rigidez à flexão e que a rigidez de corte rasante (deformabilidade) das camadas transversais é associada à rigidez (deformação) de “ligadores aparafusados imaginários” que ligam as camadas longitudinais. Por outras palavras, as camadas longitudinais dos painéis CLT são assumidas como “vigas” ligadas por “ligadores aparafusados” que têm rigidez igual à rigidez de corte rasante das camadas cruzadas. Para a determinação do fator γ o quociente s/K_i , referente à rigidez de corte dos ligadores em cada interface “i” deve ser substituído pelo módulo de corte rasante de acordo a equação (1).

$$\frac{s}{K_i} = \frac{\bar{h}_i}{G_R \cdot b} \quad (1)$$

Onde G_R é o módulo de corte perpendicular às fibras (módulo de corte rasante), \bar{h}_i é a espessura das camadas na direção perpendicular à ação, b é a largura do painel (normalmente 1 m), s é o espaçamento entre os ligadores aparafusados e K_i é o módulo de deslizamento dos ligadores aparafusados.

O método *Gamma* (γ) baseia-se na teoria de flexão simples, sendo válidos todos os princípios básicos da mesma. As deformações de corte apenas são consideradas para as camadas transversais através da avaliação da deformação de corte rasante (sendo desprezadas para as

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

camadas longitudinais). A aplicação do método *Gamma* (γ) deve estar restrita a painéis de piso com quocientes elevados entre o vão e a espessura do painel ($l/h_{CLT} \geq 30$), devido ao desprezo da contribuição da deformação de corte nas camadas longitudinais. Este método apenas providencia soluções exatas para equações diferenciais de painéis simplesmente apoiados e com uma distribuição de carga sinusoidal. Contudo, as diferenças entre a solução exata e aquelas que o método fornece para situações de cargas uniformemente distribuídas ou cargas pontuais são consideradas irrelevantes para a prática da engenharia.

A *mechanically jointed beams theory* assume que os pisos CLT são apoiados simplesmente com um vão, l , respectivamente. Para pisos CLT em consola é sugerido que o comprimento do vão, l , utilizado nos cálculos seja igual ao dobro do comprimento da consola, l_c . Para determinar a rigidez de flexão efetiva (EI_{ef}) em vigas apoiadas continuamente são propostas duas abordagens: procedimento simplificado ou iterativo. O fator γ (e, por conseguinte, a rigidez efetiva) depende do comprimento entre os 2 pontos com momento nulo (pontos de inflexão) de cada tramo da viga apoiada continuamente. O procedimento simplificado admite que o comprimento entre dois pontos de inflexão é igual a 80% do comprimento total de cada tramo de viga ($0,8 \cdot l_{ref}$). Já no procedimento iterativo é calculada uma rigidez de flexão efetiva (EI_{ef}) inicial para um determinado comprimento de viga (geralmente $0,8 \cdot l_{ref}$) e utilizado um software de cálculo simples para determinar os pontos de inflexão para uma viga com a rigidez de flexão efetiva calculada (EI_{ef}). A segunda interação passa por calcular uma nova a rigidez de flexão efetiva através do comprimento entre os 2 pontos de inflexão obtido pelo *software* de cálculo. Após apenas algumas interações é encontrada uma solução estável para a rigidez de flexão efetiva (EI_{ef}).

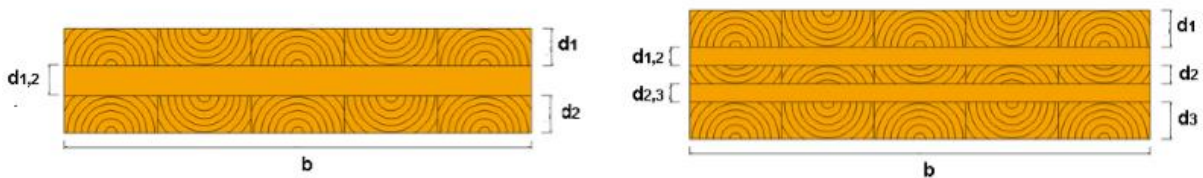


Fig. 65 – Seção transversal de um painel CLT com 3 camadas (esquerda) e 5 camadas (direita).

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^3 (I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad \text{com: } A_i = b \cdot d_i \quad e \quad I_i = \frac{b_i \cdot d_i^3}{12} \quad (2)$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$\gamma_1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot d_{1,2}}{l_{\text{ref}}^2 \cdot b \cdot G_{R,1,2}}\right)} ; \quad \gamma_2 = 1 \quad e \quad \gamma_3$$

$$= \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot d_{2,3}}{l_{\text{ref}}^2 \cdot b \cdot G_{R,2,3}}\right)}$$
(3)

$$a_1 = \left(\frac{d_1}{2} + d_{1,2} + \frac{d_2}{2}\right) - a_2$$
(4)

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot \frac{E_1}{E_c} \cdot A_1 \cdot \left(\frac{d_1}{2} + d_{1,2} + \frac{d_2}{2}\right) - \gamma_3 \cdot \frac{E_3}{E_c} \cdot A_3 \cdot \left(\frac{d_2}{2} + d_{2,3} + \frac{d_3}{2}\right)}{\sum_{i=1}^3 \left(\gamma_i \cdot \frac{E_i}{E_c} \cdot A_i\right)}$$
(5)

$$a_3 = \left(\frac{d_2}{2} + d_{2,3} + \frac{d_3}{2}\right) + a_2$$
(6)

A verificação do desempenho à flexão é feita para as extremidades da secção transversal do painel, onde os valores da tensão são máximos. A resistência de flexão, $f_{m,d}$, é determinada por ensaios experimentais baseados em normas existentes (por exemplo: EN ou DIN) e através do CUAP 03.04/06 (2005). Este documento estipula que a resistência de flexão, $f_{m,d}$, deve ser definida em relação ao módulo de secção efetiva, W_{ef} , do elemento CLT

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot \left(\gamma_1 \cdot a_1 + \frac{d_1}{2}\right) \leq f_{m,d}$$
(7)

A verificação do desempenho ao corte é feita através da determinação das tensões de corte em dois planos distintos da secção transversal (Fig. 66). O dimensionamento ao corte requer a validação de duas condições, nomeadamente, a verificação da tensão máxima de corte no eixo central do painel e a verificação das tensões de corte rasante na zona imediatamente acima à camada central, pertencente à camada transversal adjacente.

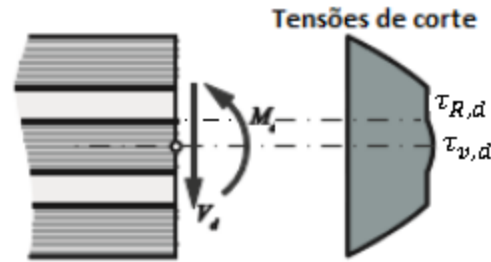


Fig. 66 – Tensões de corte no painel CLT. (adaptado de Thiel e Schickhofer, 2010)

A verificação do desempenho ao corte é feita através das seguintes fórmulas:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d \cdot S_{(E(i),Z(i))}}{E \cdot I_{ef} \cdot b} \leq f_{v,d} \quad (8)$$

$$\tau_{R,d} = \frac{V_d \cdot S_{(E(i),Z(i))}}{E \cdot I_{ef} \cdot b} \leq f_{R,d} \quad (9)$$

Onde V_d é o valor de cálculo do esforço de corte, $S_{(E(i),Z(i))}$ é o primeiro momento de área, dependente do módulo de elasticidade, E , e do centro de gravidade, Z , das camadas, I_{ef} é o momento de inércia efetivo e b é a largura do painel (1 m, geralmente).

O cálculo através da fórmula supracitada pode ser extenso, podendo ser simplificado através da verificação da tensão máxima de corte rasante com a resistência máxima de corte rasante permitida.

$$\tau_{R,d} = \frac{1,5 \cdot V_d}{b \cdot h} \leq f_{R,d} \quad (10)$$

Este método simplificado é conservativo e não deverá criar problemas, uma vez que, o dimensionamento ao corte não é, na maioria dos casos, o fator condicionante de dimensionamento do CLT.

4.2.2.1.2. COMPOSITE THEORY – K METHOD

A *Composite Theory* é um método de cálculo originalmente utilizado para a madeira compensada (contraplacado), onde as camadas perpendiculares às fibras dos painéis de contraplacado não são tidas em consideração para o cálculo das propriedades em flexão ($E_{90} = 0$). Blass e Fellmoser (2004) adaptaram a *Composite Theory* ao material CLT, através de

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

algumas alterações ao método original. Assim, destacam-se os seguintes aspetos: o método passou a considerar a rigidez e resistência das camadas carregadas paralelamente às fibras, bem como das camadas ortogonais carregadas perpendiculares às fibras do CLT; a rigidez das camadas transversais usadas para os cálculos é igual a: $E_{90} = E_0/30$; existe uma relação linear de tensão-deformação e a hipótese de Bernoulli (secções transversais permanecem planas) é válida; a deformação de corte não é tida em consideração e foram criados fatores de composição (k_i) para certas configurações de carga (Tabela 4).

A resistência e a rigidez do painel são determinadas através das propriedades da secção bruta multiplicadas por um fator de composição “ k ”, que tem em consideração a constituição das camadas do painel. O fator de composição “ k ” é obtido através da relação entre a resistência ou rigidez do painel, tendo em conta o deslizamento das juntas entre camadas, em relação à secção transversal homogénea fictícia de igual espessura, com a direção das fibras de todas as camadas paralelas à direção da tensão.

A *Composite Theory* não tem em consideração a deformação de corte em elementos sujeitos à flexão e, por este motivo, apenas deve ser adotada para elementos que apresentem uma relação entre vão (l) e espessura (h_{clt}) elevada, visto que, os efeitos de deformação de corte nessas situações são relativamente pequenos. Este método apenas deve ser utilizado para: $l/h_{clt} \geq 30$, quando a carga é perpendicular ao plano e paralela às fibras das camadas exteriores e $l/h_{clt} \geq 20$, quando a carga é perpendicular ao plano e perpendicular às fibras das camadas exteriores.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 4 – Fatores de composição, “k”. (Blass e Fellmoser, 2004)

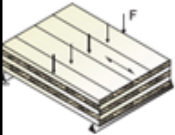
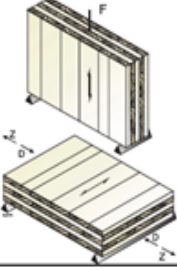
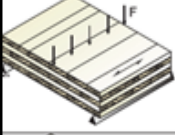
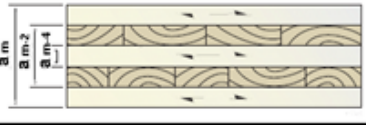
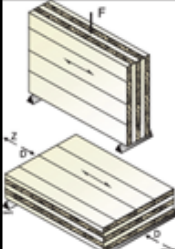
Load Configuration	k_1	Load Configuration	k_1
	$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$		$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$
	$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$		
	$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$		

Tabela 5 – Valores da resistência e rigidez efetiva dos painéis CLT. (Blass e Fellmoser, 2004)

Carregamento	Fibras das camadas exteriores	Valor da resistência efetiva	Valor da rigidez efetiva
Carregamento Perpendicular ao plano			
Flexão	Paralelas	$f_{m,0,ef} = f_{m,0} \cdot k_1$	$E_{m,0,ef} = E_0 \cdot k_1$
	Perpendiculares	$f_{m,90,ef} = f_{m,0} \cdot k_2 \cdot a_m / a_{m-2}$	$E_{m,90,ef} = E_0 \cdot k_2$
Carregamento Paralelo ao plano			
Flexão	Paralelas	$f_{m,0,ef} = f_{m,0} \cdot k_3$	$E_{m,0,ef} = E_0 \cdot k_3$
	Perpendiculares	$f_{m,90,ef} = f_{m,0} \cdot k_4$	$E_{m,90,ef} = E_0 \cdot k_4$
Tração	Paralelas	$f_{t,0,ef} = f_{t,0} \cdot k_3$	$E_{t,0,ef} = E_0 \cdot k_3$
	Perpendiculares	$f_{t,90,ef} = f_{t,0} \cdot k_4$	$E_{t,90,ef} = E_0 \cdot k_4$
Compressão	Paralelas	$f_{c,0,ef} = f_{c,0} \cdot k_3$	$E_{c,0,ef} = E_0 \cdot k_3$
	Perpendiculares	$f_{c,90,ef} = f_{c,0} \cdot k_4$	$E_{c,90,ef} = E_0 \cdot k_4$

Segundo Blass e Fellmoser (2004), a rigidez e a resistência dos painéis CLT tendo em conta a *Composite Theory* pode ser determinada utilizando os valores de rigidez e resistência da classe GL28h. Esta abordagem é possível devido ao efeito de laminação do material que confere melhorias significativas às propriedades do mesmo. Diversos ensaios realizados comprovaram que os valores de resistência e rigidez de painéis CLT constituídos por lamelas da classe C24 podem ser calculados através das propriedades mecânicas da classe GL28h, sendo esta assunção conservativa. As tensões máximas de flexão podem ser obtidas por:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_{\text{gross}}} = \frac{M}{I} \cdot 0,5 \cdot h_{\text{tot}} \quad (11)$$

4.2.2.1.3. SHEAR ANALOGY METHOD (BY KREUZINGER)

Ensaaios experimentais realizados na FPIInnovations confirmaram, de acordo com a literatura nomeadamente, Blass e Fellmoser (2004), que o *shear analogy method* é o método de cálculo mais preciso para o dimensionamento de elementos CLT. Através da ajuda de um programa de análise estrutural bidimensional é possível considerar os diferentes módulos de elasticidade e de corte das camadas individuais para quase qualquer sistema de configuração (por exemplo: número de camadas, relação entre vão e espessura). Este método tem em consideração a deformação de corte nas camadas longitudinais e transversais, sendo as características do painel CLT divididas em duas vigas imaginárias (viga A e viga B) conectadas por escoras com rigidez axial infinita. Devido à rigidez infinita da ligação a deformação vertical da viga A será sempre igual à da viga B ($w_A = w_B$). A viga imaginária superior é denominada por viga A e incorpora a resistência à flexão inerente às camadas individuais ao longo do seu próprio eixo neutro. Relativamente à viga imaginária B (viga inferior), é-lhe atribuída os pontos de "Steiner" pertencentes à resistência à flexão, a resistência ao corte flexível do painel, bem como a flexibilidade de todas as ligações. As tensões finais da secção transversal do painel CLT podem ser obtidas através da sobreposição das tensões de flexão e das tensões de corte de ambas as vigas.

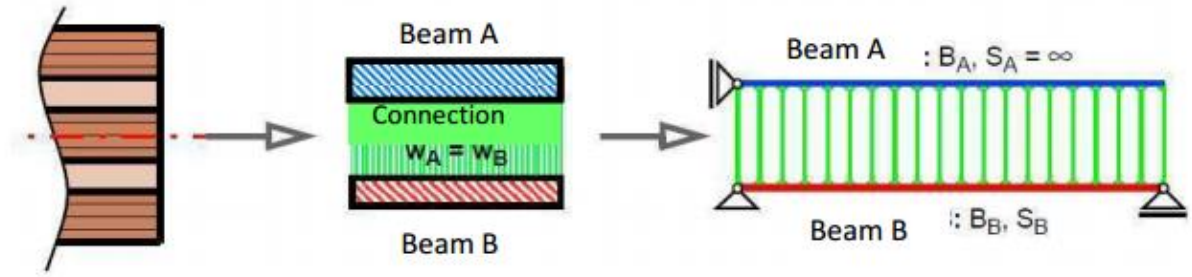


Fig. 67 – Conceito do *Shear Analogy Method* (Guggenberger, 2012)

A rigidez de flexão e corte da viga A pode ser expressa por:

$$B_A = \sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \frac{b_i \cdot h_i^3}{12} \quad (12)$$

$$S_A = \infty \quad (13)$$

Onde B_A é a rigidez de flexão da viga A, S_A é a rigidez de corte da viga A, b_i é a largura de cada camada individual (geralmente assumida como 1 m) e h_i é a espessura de cada camada individual. A rigidez de flexão e corte da viga B pode ser expressa por:

$$B_B = \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad (14)$$

$$\frac{1}{S_B} = \frac{1}{a^2} \cdot \left[\frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b_i} + \frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b_n} \right] \quad (15)$$

$$a = h_{\text{tot}} - \frac{h_1}{2} - \frac{h_n}{2} \quad (16)$$

Onde B_B é a rigidez de flexão da viga B, S_B é a rigidez de corte da viga B, b_i é a largura de cada camada individual (geralmente assumida como 1 m), h_i é a espessura de cada camada individual, G_i é o módulo de corte da cada camada individual e a é a distância entre os centros de gravidade das camadas exteriores.

O *Shear Analogy Method* correlaciona a deformação vertical de corte usando E_0 e G_0 para as camadas longitudinais e E_{90} e G_{90} para camadas transversais. O E_0 toma o valor do módulo de elasticidade paralelo às fibras das lamelas constituintes de cada camada, já o E_{90} é definido

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

como: $E_{90} = E_0/30$. Além disso, os módulos de corte são definidos como: $G_0 = E_0/16$ e $G_{90} = E_0/160$. O momento fletor e as forças de corte da viga A podem ser calculados segundo:

$$M_{A,i} = \frac{E_i \cdot I_i}{B_A} \cdot M_A \quad (17)$$

$$V_{A,i} = \frac{E_i \cdot I_i}{B_A} \cdot V_A \quad (18)$$

As tensões de flexão e de corte são expressas por:

$$\sigma_{A,i} = \frac{M_{A,i}}{I_i} \cdot \frac{h_i}{2} \quad (19)$$

$$\tau_{A,i} = \frac{E_i \cdot I_i}{B_A} \cdot 1,5 \cdot \frac{V_A}{b \cdot h_i} \quad (20)$$

As forças axiais e as tensões normais da viga B podem ser calculadas por:

$$N_{B,i} = \frac{E_i \cdot A_i \cdot z_i}{B_B} \cdot M_B \quad (21)$$

$$\sigma_{B,i} = \frac{N_{B,i}}{b_i \cdot h_i} = \frac{E_i \cdot z_i}{B_B} \cdot M_B \quad (22)$$

As tensões de corte da viga B são expressas por:

$$\tau_{B,i,i+1} = \frac{V_B}{B_B} \cdot \sum_{j=i+1}^n E_j \cdot A_j \cdot z_j \quad (23)$$

Onde V_B é a força de corte da viga B.

4.2.3. PAINÉIS DE PAREDE (CARREGAMENTOS NO PLANO)

As paredes CLT estão sujeitas a três tipos de carregamentos, nomeadamente: carregamento vertical no plano da parede, proveniente de cargas gravíticas; carregamento lateral no plano da parede, proveniente de ações sísmicas e/ou vento e carregamento lateral fora do plano da parede, proveniente da ação do vento. As paredes CLT devem ser orientadas segundo a direção vertical, uma vez que, os esforços são absorvidos pelas camadas longitudinais ($\alpha = 0^\circ$), originando tensões paralelas às fibras da madeira. O dimensionamento deste tipo de elementos

é, geralmente, condicionado pela verificação à instabilidade por encurvadura. Uma vez que as paredes CLT são constituídas por elementos estruturais do tipo placa, a verificação à encurvadura só faz sentido ser realizada para a direção perpendicular ao plano do painel, sendo a encurvadura na direção do plano do painel desprezável.

Em painéis com aberturas de portas ou janelas, os lintéis formados são geralmente dimensionados como vigas bi-encastadas, sendo desprezadas as lamelas verticais. Devido ao fraco desempenho à flexão dos lintéis CLT (apenas as camadas orientadas na direção horizontal contribuem para a rigidez de flexão), é prática comum a utilização de vigas (lintéis) GLT apoiadas nas paredes CLT que formam as aberturas.

4.2.3.1. MÉTODOS DE CÁLCULO UTILIZADOS

Existem vários procedimentos disponíveis para calcular as tensões nos elementos estruturais CLT, causadas por cargas no plano. Algumas aprovações técnicas calculam as tensões no plano com base na secção transversal parcial (ver ETA Z-9.1-721, 2008), enquanto outras baseiam-se na secção transversal bruta, geralmente para a determinação dos valores de resistência ao corte (ver ETA-11/0189, 2011).

Uma abordagem bastante utilizada para elementos CLT sujeitos a esforços de corte no plano é baseada num elemento representativo de volume (RVE) e num sub-elemento representativo de volume (RVSE) (ver Schickhofer *et al.*, 2010; Bogensperger *et al.*, 2010). Os elementos CLT carregados no plano são divididos em vários RVEs. Cada RVE consiste numa amostra retirada do painel com uma largura equivalente à espessura de uma das lamela exterior (incluindo metade do espaçamento entre lamelas de ambos os lados), uma altura equivalente à espessura de uma das lamelas interiores (incluindo metade do espaçamento entre lamelas de ambos os lados) e uma espessura igual à do painel CLT, t_{CLT} (Fig. 68). Os RVEs possuem geralmente uma superfície quadrada, devido à utilização de lamelas longitudinais e transversais com a mesma largura, por parte dos fabricantes CLT. Cada RVE é subdividido em RVSEs, que possuem a mesma superfície quadrada e uma espessura t_i^* , que é determinada pelo valor mínimo da espessura das lamelas adjacentes a uma zona de colagem(plano de simetria do RVSE) (Fig. 68). Teoricamente, o RSVE tem por base a assunção de um número infinito de camadas com espessura constante. Portanto, as condições de fronteira são negligenciados, como consequência de um número finito de camadas e uma possível variação na espessura das

mesmas. Assim, as condições de fronteira devem ser consideradas separadamente, sendo esse processo apresentado no tópico 4.4.5. De referir que os RVEs só se encontram carregados no plano (tensões normais, n_x e n_y , e tensões de corte, n_{xy}), assim sendo, as tensões e deformações mantem-se constantes por toda a espessura (Fig. 68).

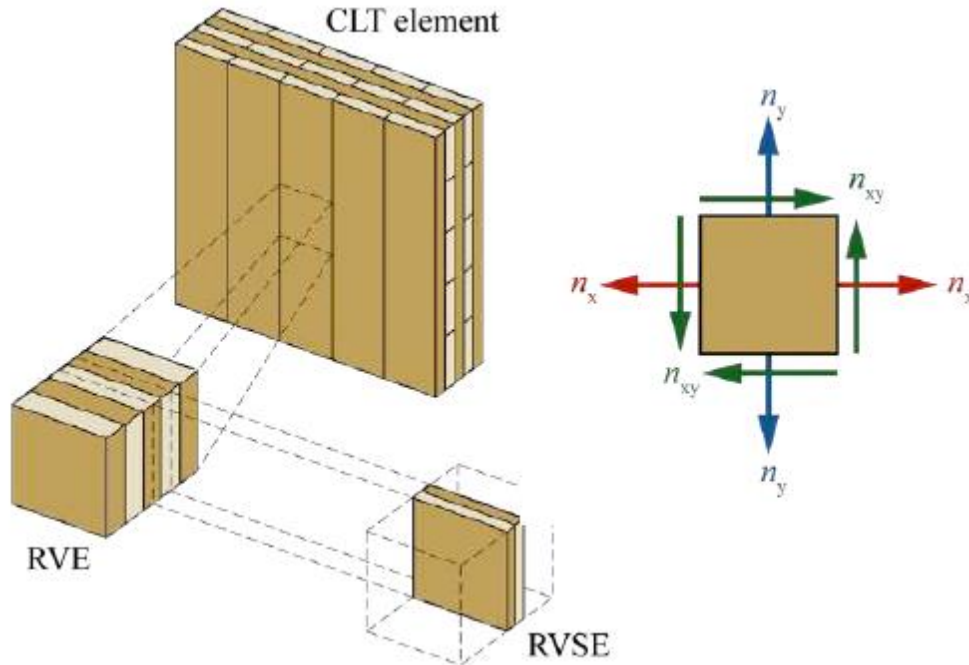


Fig. 68 – Ilustração de um RVE e RVSE pertencente a um elemento CLT (esquerda) e forças atuantes sobre um RVE (direita) (Harris *et al.*, 2013).

Para paredes CLT esbeltas sujeitas a compressão, a possibilidade de encurvadura lateral pode ser considerada através do método da viga equivalente. Para elementos carregados concetricamente e axialmente em compressão, a equação (24) deve ser satisfeita.

$$\frac{N_d}{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} \leq 1,0 \quad (24)$$

O dimensionamento de pilares sujeitos a carregamento axial (no plano) em combinação com carregamento lateral (flexão fora do plano) é geralmente efetuado segundo a teoria dos efeitos de segunda ordem. Para paredes CLT é necessário efetuar o cálculo da esbelteza efetiva, λ_{ef} , segundo a *Mechanically Jointed Columns Theory*. Este método está descrito no anexo C do Eurocódigo 5.

$$\lambda_{ef} = l \cdot \sqrt{\frac{A_{tot}}{I_{ef}}} \quad (25)$$

Onde A_{tot} é a área total da secção transversal, l é o comprimento de encurvadura (altura da parede) e I_{ef} é o momento de inércia efetivo.

$$I_{ef} = \frac{(EI)_{ef}}{E_{mean}} \quad (26)$$

Onde $(EI)_{ef}$ é a rigidez de flexão (calculada segundo: *γ method*, *shear analogy method* ou *k-method*) e E_{mean} é o módulo de elasticidade das lamelas paralelas à força axial.

A esbelteza efetiva, λ_{ef} , pode então ser substituída na equação 6.21 do Eurocódigo 5, e a resistência à compressão de paredes CLT, sob carregamento axial ou axial e fletor combinados, pode ser calculada através do tópico 6.3 do Eurocódigo 5.

4.2.4. PAINÉIS DE PAVIMENTO/COBERTURA (CARREGADOS NO PLANO)

Tal como referido no tópico 2.10.1., os pavimentos e as coberturas são elementos estruturais horizontais que funcionam como diafragmas e apresentam uma extrema importância na construção em madeira, uma vez que, são responsáveis pela transferência dos carregamentos verticais e laterais para as paredes estruturais e, posteriormente, para as fundações. Atualmente, ainda não se encontra definido o tipo de diafragma, rígido ou flexível, aplicável ao material CLT, sendo de extrema relevância o desenvolvimento de investigações sobre a rigidez e resistência no plano de diafragmas CLT. Segundo o *International Building Code* (IBC, 2006), deve-se efetuar duas abordagens distintas de dimensionamento de uma estrutura, adotando, numa primeira fase, diafragmas com comportamento rígido e, posteriormente, diafragmas do tipo flexível. A abordagem que proporcionar uma solução mais crítica deve ser assumida para o dimensionamento final da estrutura.

4.3. DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DOS PAINÉIS CLT

4.3.1. RIGIDEZ À FLEXÃO

A rigidez de flexão de um elemento CLT, K_{CLT} , é calculada de acordo com equação (27). O módulo de elasticidade médio, E_{mean} , varia conforme a orientação das camadas do painel, ou seja, para camadas com orientação $\alpha = 0^\circ$, deve ser assumido $E_{0,mean}$ e para as camadas com $\alpha = 90^\circ$, utiliza-se $E_{90,mean}$, sendo estes valores fornecidos pelo fabricante CLT. A contribuição das camadas ortogonais ($\alpha = 90^\circ$) para a rigidez de flexão de um elemento CLT, K_{CLT} , pode ser desprezada devido à elevada relação entre $E_{0,mean}/E_{90,mean} \approx 30$. Dependendo da metodologia de cálculo utilizada, a rigidez à flexão pode ser calculada assumindo que o módulo de elasticidade das camadas ortogonais, $E_{90,mean}$, é nulo (*γ method*), ou igual a $E_{0,mean}/30$ (*k-method* e *shear analogy method*).

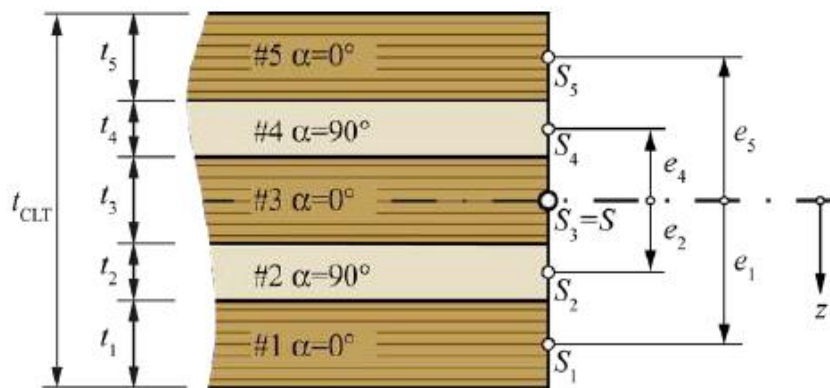


Fig. 69 – Secção transversal de um elemento CLT com 5 camadas (Harris, 2013).

$$K_{CLT} = \sum (E_i \cdot I_i) + \sum (E_i \cdot A_i \cdot e_i^2) \quad (27)$$

Onde I_i é o momento de inércia da camada “i” em relação ao seu eixo neutro, E_i é o módulo de elasticidade da camada “i”, ($E_{0,i}$ ou $E_{90,i}$), A_i é a área da secção transversal da camada “i” e e_i é a distância entre o centro de gravidade “Si” da camada “i” e o centro de gravidade “S” do elemento CLT.

4.3.2. RIGIDEZ AXIAL

O cálculo da rigidez axial deve ter em consideração a contribuição das camadas transversais do painel CLT. A rigidez axial, $(EA)_{ef} = D_x$ (rigidez na direção x), para um membro linear, é dada pela equação (28).

$$(EA)_{ef} = D_x = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot A_i) \quad (28)$$

Os valores da rigidez axial, D_x e D_y , de uma parede CLT (com 1 m de largura) carregada no plano, são baseados na secção transversal efetiva. Ou seja, apenas as camadas que são orientados na direção específica do carregamento são tidas em consideração ($E_{90,mean} = 0$)

$$D_x = E_{0,mean} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{i,x}) \quad (29)$$

$$D_y = E_{0,mean} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{i,y}) \quad (30)$$

Onde D_x é a rigidez axial na direção “x”, D_y é rigidez axial na direção “y”, $t_{i,x}$ é a espessura da camada “i” com as fibras orientadas paralelas à direção “x” e $t_{i,y}$ é a espessura da camada “i” com as fibras orientadas paralelas à direção “y”.

4.3.3. RIGIDEZ DE CORTE PARA PAINÉIS CARREGADOS NO PLANO

A rigidez de corte, de um elemento CLT carregado no plano, S_{xy} , é calculada através do produto do módulo de corte efectivo, G^* , com a espessura do painel CLT, t_{CLT} . Silly (2010) determinou através de estudo de elementos finitos um fator de ajustamento, α_T . Esse fator é dependente da relação entre a espessura e largura das lamelas e caso ocorram variações nas dimensões (t e a), deverá ser utilizado o valor médio.

$$S_{xy} = G^* \cdot t_{CLT} \quad (31)$$

$$G^* = \frac{G_{0,mean}}{1 + 6 \cdot \alpha_T \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2}, \text{ com } \alpha_T = 0,32 \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^{-0,77} \quad (32)$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Onde $G_{0,mean}$ é o valor médio do módulo de corte do material base (lamelas), t é a espessura (média) das camadas e a é a largura (média) das lamelas ou distância (média) das ranhuras.

4.3.4. RIGIDEZ DE CORTE PARA PAINÉIS CARREGADOS FORA DO PLANO.

A rigidez de corte, S_{CLT} , de elementos CLT carregados fora do plano está dependente da rigidez ao corte de uma viga composta rígida, S_{tot} , (sem deformação da área transversal) e do coeficiente de correção de corte, κ . No cálculo da rigidez ao corte de uma viga composta rígida, S_{tot} , são aplicados o módulo de corte médio, $G_{CLT,mean}$ e o módulo de corte rasante médio (perpendicular às fibras), $G_{r,CLT,mean}$, para as camadas longitudinais e transversais, respectivamente.

$$S_{CLT} = S_{tot} \cdot \kappa \quad (33)$$

$$S_{tot} = \sum (G_i \cdot b_i \cdot t_i) = \sum (G_i \cdot A_i) \quad (34)$$

$$\kappa = \frac{1}{S_{tot} \cdot \frac{1}{K_{CLT}^2} \cdot \int_{t_{CLT}} \frac{S^2(z, E(z))}{G(z) \cdot b(z)} dz} \quad (35)$$

Onde G_i é o módulo de corte da camada “i” (G_i ou $G_{r,i}$), b_i é a largura da camada “i”, t_i é a espessura da camada “i”, $S(z, E(z))$ é o primeiro momento de área dependente da coordenada “z”, $G(z)$ é o módulo de corte dependente da coordenada “z” e $b(z)$ é a largura da secção transversal dependente da coordenada “z”.

O cálculo do coeficiente de correção de corte, κ , é feito por integração numérica ao longo de toda a secção transversal, de acordo com a equação (35). A figura 70 apresenta um gráfico auxiliar para a determinação do valor do coeficiente de correção de corte, κ , segundo o número de camadas (3, 5 ou 7) e o rácio da espessura das camadas longitudinais, t_0/t_{CLT} . Através do software *Calculatis* foram analisados os coeficientes de correção de corte, κ , para toda a gama de produtos CLT no mercado com 3, 5 e 7 camadas e, posteriormente, comparados com as soluções analíticas (verificar zona a sombreado da Fig. 70). Devido à influência de corte transversal flexível das camadas transversais, o coeficiente de correção de corte, κ , para um elemento CLT, na atual gama de produtos, é aproximadamente 0,25, ou seja, a rigidez de

cortede um painel CLT carregado fora do plano, S_{CLT} , é cerca de $\frac{1}{4}$ da obtida para uma secção transversal retangular unidirecional, S_{tot} . O cálculo do coeficiente de correção de corte, κ , de acordo com a equação (35), não considera a influência de diferentes larguras de lamelas ou de espaçamentos entre as lamelas da mesma camada. Segundo Feichter (2013), a ocorrência destes dois fenómenos levam a uma redução de 10 a 15% no coeficiente de correção de corte, κ ,

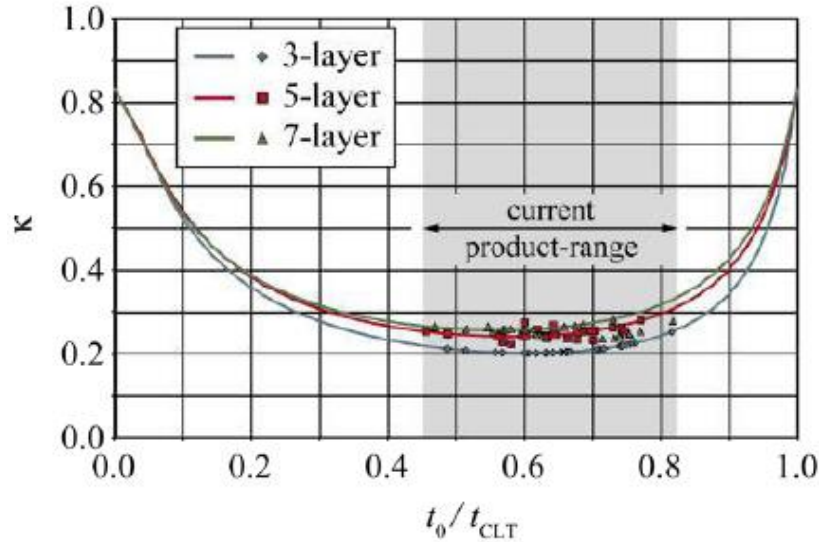


Fig. 70 – Coeficiente de correção de corte, κ , dependente do rácio da espessura das camadas longitudinais, t_0/t_{CLT} , (assumindo que $G_0/G_r = 10$). Comparação entre as soluções analíticas e aquelas avaliadas por meio do software *Calculatis*. Onde t_0 é a soma das espessuras de todas as camadas longitudinais ($\alpha = 0^\circ$) (Harris, 2013).

4.3.5. RIGIDEZ DE TORÇÃO

Segundo Silly (2010), a rigidez de torção, D_{xy} , de uma placa homogénea com material ortotrópico, é definida de acordo com a equação (36). Para validação desta equação, o módulo de corte, G_{xy} , deve ser tomado como constante, ao longo de toda a espessura, t_{CLT} . Esta equação é válida apenas para os elementos CLT composto por camadas com colagem lateral das lamelas e sem rachaduras. Caso não sejam cumpridos os requisitos citados, a rigidez de torção tem que ser reduzida, segundo as seguintes equações (37) e (38) (ver Silly (2010)). O número de camadas e a geometria das lamelas são parâmetros que influenciam a rigidez de torção, D_{xy} . A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros p e q , determinados com base num estudo numérico efetuado por Silly (2010). Caso ocorram diferenças na largura, a , e espessura, t , das lamelas, os valores médios devem ser usados.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

$$D_{xy} = G_{xy} \cdot \frac{t_{CLT}^3}{12} \quad (36)$$

$$D_{xy}^* = G_{xy}^* \cdot \frac{t_{CLT}^3}{12} = \kappa_{CLT,P} \cdot G_{xy} \cdot \frac{t_{CLT}^3}{12} = \kappa_{CLT,P} \cdot D_{xy} \quad (37)$$

$$\kappa_{CLT,P} = \frac{1}{1 + 6 \cdot \alpha_{FIT} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2}, \text{ com } \alpha_{FIT} = p \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^q \quad (38)$$

Onde D_{xy} é a rigidez de torção de uma placa homogénea com material ortotrópico ou de elementos CLT com as lamelas coladas lateralmente e sem rachaduras, D_{xy}^* é a rigidez de torção reduzida para elementos CLT, sem as lamelas coladas lateralmente e/ou com rachaduras, G_{xy}^* é o módulo de corte reduzido para elementos CLT, sem as lamelas coladas lateralmente e/ou com rachaduras, $\kappa_{CLT,P}$ é o fator de redução para a rigidez de torção, t é a espessura da lamela e a é a largura da lamela.

Tabela 6 – Fator de redução $\kappa_{CLT,P}$ e parâmetros p e q , de acordo com Silly (2010).

t/a	$\kappa_{CLT,P}$		
	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	0.50	0.54
p	0.89	0.67	0.55
q	-0.67	-0.74	-0.77

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 7 – Determinação do módulo de corte reduzido, G_{xy}^* , para os seguintes parâmetros: $t/a = 1/4$ e $G_{xy} = 650 / \text{mm}^2$, de acordo com Silly (2010).

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

4.4. DIMENSIONAMENTO AOS ESTADOS LIMITE ÚLTIMOS (ELU)

Neste tópico serão abordados os procedimentos de dimensionamento aos ELU para a maioria dos casos de carga em elementos CLT de parede, pavimento e cobertura. De referir que as verificações são restringidas a elementos CLT com material uniforme em todas as camadas.

4.4.1. FLEXÃO (CARGAS FORA DO PLANO)

Para elementos CLT carregados fora do plano, a tensão máxima de dimensionamento por flexão (extremidade da secção transversal) tem que ser menor do que o valor de cálculo da resistência à flexão do CLT (equação (39)).

$$\frac{\sigma_{\max,d}}{f_{m,\text{CLT},d}} \leq 1,0 \quad (39)$$

O cálculo das tensões (equação (40)) baseia-se na teoria de viga Timoshenko. Nesta teoria, é válido o modelo de viga de Euler-Bernoulli, onde as secções transversais permanecem planas, mesmo durante a deformação. Desta forma, a distribuição de tensões de flexão ao longo da secção transversal permanece linear. Os espaçamentos existentes entre as lamelas de cada camada do CLT não permitem que haja transferências da tensão normal (tração e compressão perpendicular às fibras) entre as camadas cruzadas. Assim, no dimensionamento à flexão é geralmente desprezada a contribuição das camadas transversais ($E_{90} = 0$), provocando um aumento das tensões nas camadas longitudinais. Esse aumento origina resultados de dimensionamento sobrestimados, proporcionando ao engenheiro estrutural uma maior segurança.

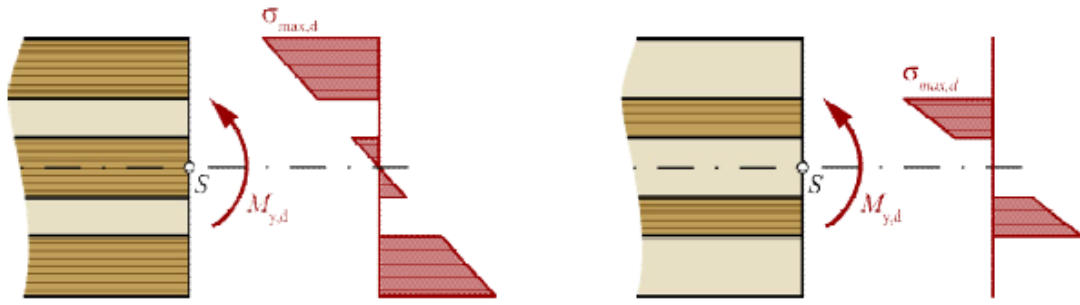


Fig. 71 – Distribuição das tensões normais ao longo da seção transversal de um painel CLT devido a um momento fora do plano ($E_{90} = 0$) (Thiel *et al.*, 2016).

$$\sigma(z) = \frac{M_y}{K_{CLT}} \cdot z \cdot E(z) \quad (40)$$

A resistência característica à flexão, $f_{m,CLT,k}$ é determinada experimentalmente pelos fabricantes CLT. Contudo, é também possível determiná-la analiticamente, com base nas propriedades mecânicas das lamelas individuais em combinação com modelos de suporte de carga associados à madeira lamelada colada (GLT).

O valor de cálculo da resistência à flexão (equação (41)) depende do fator de sistema, k_{sys} , do fator de modificação, k_{mod} , e do fator de segurança parcial, γ_M .

$$f_{m,CLT,d} = k_{sys} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{m,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (41)$$

4.4.2. TRAÇÃO (CARGAS NO PLANO)

Partindo da hipótese de que o módulo de elasticidade paralelo às fibras, $E_{0,mean}$, de todas as camadas é igual, a verificação das tensões de tração dos elementos CLT, carregados no plano, é realizada de acordo com a equação (42). Para a determinação da área parcial efetiva, $A_{net,ef}$, apenas as camadas orientadas paralelamente à direção da força são consideradas. O efeito sistema da interação entre as lamelas paralelas é tido em consideração através do fator de sistema, $k_{sys,t,0}$. Atualmente, o software *Calculatis* considera o valor desse fator igual a 1,0.

$$\frac{N_d}{A_{net,ef}} \leq f_{t,0,CLT,net,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,CLT,net,k}}{\gamma_M} = k_{sys,t,0} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (42)$$

4.4.3. COMPRESSÃO (CARGAS NO PLANO)

Para elementos CLT carregados concêntricamente e axialmente em compressão a equação (43) deve ser satisfeita.

$$\frac{N_d}{A_{\text{net,ef}}} \leq f_{c,0,\text{CLT,net,d}} \quad (43)$$

No entanto, para elementos esbeltos em compressão, a possibilidade de encurvadura lateral tem de ser considerada. A verificação à encurvadura pode ser feita através do método de viga equivalente ou de acordo com a teoria dos efeitos de segunda ordem.

4.4.3.1. MÉTODO DA VIGA EQUIVALENTE

Utilizando o método da viga equivalente, a equação (44) tem de ser verificada.

$$\frac{N_d}{A_{\text{net,ef}}} \leq k_c \cdot f_{c,0,\text{CLT,net,d}} \quad (44)$$

A resistência à compressão, $f_{c,0,\text{CLT,net,d}}$, do elemento CLT é reduzida segundo o fator de instabilidade, k_c , de acordo com a equação (46). O fator de instabilidade depende da esbelteza relativa, λ_{rel} , da forma da secção transversal e da qualidade de fabrico (fator de linearidade, β_c). A esbelteza relativa, λ_{rel} , (equação (49)) é dependente da carga de encurvadura elástica ideal, n_{cr} (equação (45)). Este método possui a particularidade de considerar a flexibilidade de corte, um parâmetro importante para elementos CLT. Os valores característicos correspondentes ao quartil 5% da rigidez à flexão, $K_{\text{CLT},05}$, e da rigidez de corte, $S_{\text{CLT},05}$, são calculados de acordo com a equação (27) e (33), através das propriedades características correspondentes ao quartil 5% ($E_{0,05}$, $G_{\text{CLT},05}$ e $G_{r,\text{CLT},05}$), em vez dos seus valores médios ($E_{0,\text{mean}}$, $G_{\text{CLT,mean}}$ e $G_{r,\text{CLT,mean}}$).

$$n_{\text{cr}} = \frac{K_{\text{CLT},05} \cdot \pi^2}{l_k^2 \cdot \left(1 + \frac{K_{\text{CLT},05}}{S_{\text{CLT},05} \cdot l_k^2} \right)} \quad (45)$$

$$k_c = \min \left\{ \frac{1,0}{k + \sqrt{k^2 \cdot \lambda_{rel}^2}} \right. \quad (46)$$

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) \quad (47)$$

$$\beta_c = 0,1 \quad (48)$$

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,k}}{n_{cr}}} \quad (49)$$

4.4.3.2. TEORIA DOS EFEITOS DE 2ª ORDEM

Para elementos sujeitos a compressão no plano e simultaneamente flexão perpendicular ao plano é geralmente utilizada uma análise de segunda ordem (equilíbrio no sistema deformado). Desta forma, são considerados os efeitos da deformação induzidos por forças internas e por momentos, ocorrendo uma situação de carga combinada com uma força axial e um momento de flexão. A equação (50) deve ser satisfeita.

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{K_c \cdot f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (50)$$

4.4.4. COMPRESSÃO (CARGAS FORA DO PLANO)

O dimensionamento de elementos CLT sujeitos a esforços de compressão perpendiculares ao plano do painel é realizado de acordo com a EN 1995-1-1 (2004) e a sua verificação deve satisfazer a equação (52).

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{c,90}} \quad (51)$$

$$\sigma_{c,90,CLT,d} \leq k_{c,90,CLT} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,CLT,k}}{\gamma_M} = k_{c,90,CLT} \cdot f_{c,90,CLT,d} \quad (52)$$

Onde $f_{c,90,CLT,k}$ é a resistência à compressão característica perpendicular ao plano de um cubo CLT, $k_{c,90,CLT}$ é o fator que tem em conta a configuração de carga, possibilidade de

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

deslizamento e o grau de deformação à compressão e $A_{c,90}$ é a área real de contacto, que transmite a carga ao elemento CLT.

A resistência à compressão perpendicular ao plano do CLT é influenciada por diversos parâmetros. Halili (2008) conduziu ensaios experimentais em cubos CLT com o intuito de definir alguns desses parâmetros, nomeadamente: a largura dos anéis anuais de crescimento, o posicionamento da carga, o número de camadas e a relação de espessura das camadas adjacentes (longitudinais e transversais). Salzmann (2010) utilizou provetes CLT (160 mm x 160 mm), fornecidos pelo mesmo fabricante e compostos por 5 camadas com espessuras diferentes (variando de 150 mm a 197 mm) para efetuar ensaios sujeitos a cargas pontuais em diferentes posições. Serrano e Enquist (2010) ensaiaram elementos CLT de 3 camadas, com uma espessura constante de 120 mm, sobrecarregados uniformemente por uma carga linear (50 mm x 300 mm) em diferentes posições.

Com base nas diversas investigações, o valor da resistência à compressão característica perpendicular ao plano de um cubo CLT é de $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$. Apesar de a espessura do painel e o efeito de laminação afetar a resistência à compressão característica perpendicular ao plano, $f_{c,90,CLT,k}$, o valor proposto ($2,85 \text{ N/mm}^2$) negligencia essa influência e encontra-se pelo lado da segurança. Os valores do fator $k_{c,90,CLT}$ foram determinados por meio de ensaios experimentais e por análises de elementos finitos. Dependendo da situação de carga, os valores de $k_{c,90,CLT}$ variam entre 1,0 e 1,8, encontrando-se definidos na Tabela 8 e Tabela 9.

Nota: De acordo com a norma EN 1995-1-1 (2004) a área de contato efetiva perpendicular ao plano, A_{ef} , deve ser determinada tendo em conta o comprimento efetivo de contacto relativamente às fibras paralelas, devendo o comprimento de contacto real ser aumentado em 30 mm em cada lado. É importante referir que os valores propostos para $k_{c,90,CLT}$ são baseados na área de contato real, $A_{c,90}$.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 8 – Valores propostos de $k_{c,90,CLT}$ para painéis sujeitos a uma carga pontual, admitindo $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$ e uma área real de contato, $A_{c,90}$ (Salzmann, 2010; Bogensperger *et al.*, 2011).

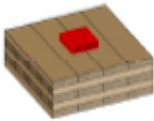



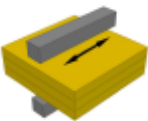


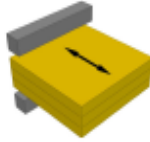
	Situação de carga	$K_{c,90,CLT}$
	Central	1,8
	Borda, paralela à direção das fibras da camada exterior	1,5
	Borda, perpendicular à direção das fibras da camada exterior	1,5
	Canto	1,3

Tabela 9 – Valores propostos de $k_{c,90,CLT}$ para painéis sujeitos a uma carga linear, admitindo $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$ e uma área real de contato, $A_{c,90}$ (Serrano e Enquist, 2010)

	Situação de carga	$K_{c,90,CLT}$
	Central, paralela à direção principal	1,3
	Central, perpendicular à direção das fibras da camada exterior	1,8
	Borda, paralela à direção das fibras da camada exterior	1,0

	Situação de carga	$K_{c,90,CLT}$
	Borda, perpendicular à direção das fibras da camada exterior	1,5

4.4.5. CORTE (CARGAS NO PLANO)

A verificação ao corte de elementos CLT sujeitos a cargas no plano é geralmente realizada baseando-se num elemento representativo de volume (RVE) e num sub-elemento representativo de volume (RVSE) (ver Schickhofer *et al.*, 2010; Bogensperger *et al.*, 2010). Apesar de alguns dos produtos CLT possuírem as lamelas coladas lateralmente, a ocorrência de fissuras devido ao inchamento e o encolhimento das lamelas não pode ser evitada. Desta forma, as tensões de corte só podem ocorrer nas secções perpendiculares à direção das fibras, estando as faces laterais das lamelas livres dessas tensões. Por conseguinte, as forças de corte apenas podem ser transferidas indiretamente através do cruzamento de duas lamelas em camadas adjacentes. A ocorrência de forças de corte a atuarem segundo planos diferentes, provoca tensões de torção na zona de colagem das respetivas camadas (Fig. 72).

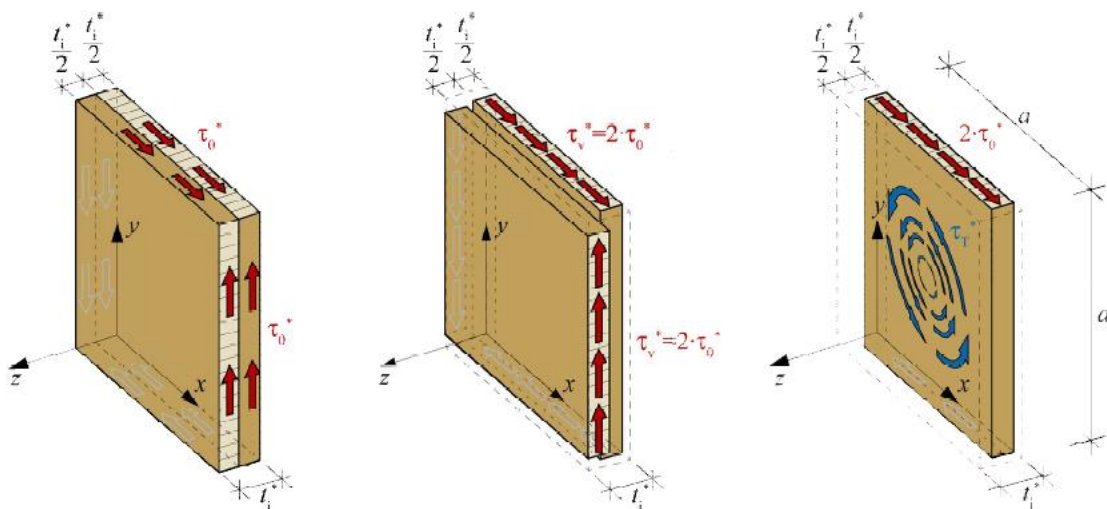


Fig. 72 – Tensões num RVSE com as lamelas coladas lateralmente e sem fissuras (à esquerda) e tensões num RVSE sem as lamelas coladas lateralmente e/ou com fissuras: mecanismo I - corte (centro) e mecanismo II – torção (à direita) (Schickhofer *et al.*, 2010)

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

O mecanismo I (corte) representa a ocorrência de tensões de corte nas secções perpendiculares à direção das fibras, enquanto o mecanismo II (torção) representa a ocorrência de esforços de torção na zona de colagem entre as respectivas camadas do RVSE. Ambos os mecanismos (Fig. 73) têm que ser verificados separadamente.

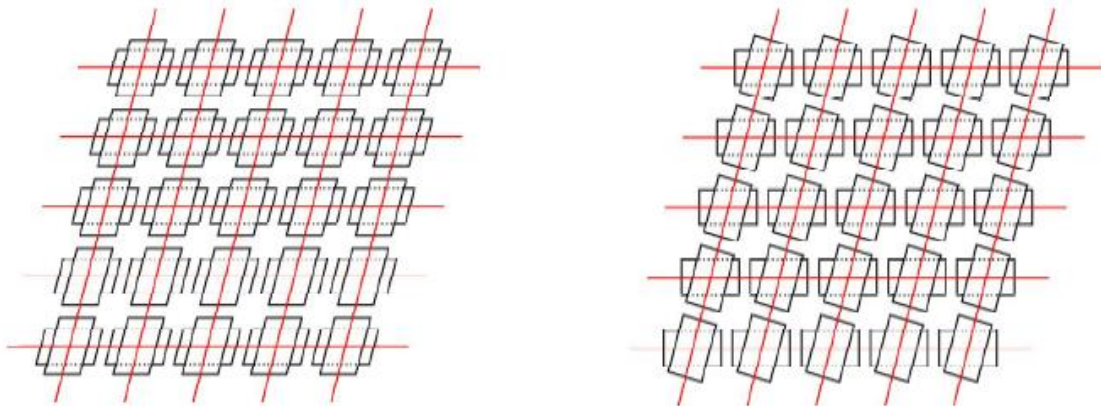


Fig. 73 – Mecanismo I - corte (esquerda) e mecanismo II - torção (direita) (Schickhofer *et al.*, 2010)

Este método de dimensionamento, de acordo com Schickhofer *et al.*, 2010 e Bogensperger *et al.*, 2010, baseia-se no uso de elementos de volume representativo (RVE) e sub-elementos de volume representativo (RVSE) e é geralmente aplicável para elementos CLT bidimensionais carregados no plano. Caso o CLT seja utilizado como elemento linear (unidimensional) carregado no plano, devem ser adotadas diferentes considerações, propostas por Blaß e Flaig (2012).

As dimensões de um RVSE são obtidas através da área de intersecção de duas lamelas pertencentes a camadas adjacentes (incluindo metade do valor dos espaçamentos), vezes a espessura ideal, t_i^* , de acordo com o esquema mostrado na Tabela 10. Com este esquema, as condições de fronteira de um número finito de camadas e a variação da espessura das camadas são tidas em consideração. Naturalmente, esta abordagem pode conduzir a resultados conservadores, uma vez que, em situações com diferentes espessuras entre as camadas adjacentes, apenas a camada mais fina é tida em consideração.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Tabela 10 – Esquema para a determinação da espessura ideal, t_i^* , de um elemento CLT com “n” camadas.

Nó 1 (nó no topo)	Camada 1	(topo)	$t^*_1 = \min(2 \cdot t_1, t_2)$
	Camada 2	(central)	
Nó i (nó central)	Camada i	(central)	$t^*_i = \min(t_i, t_{i+1})$
	Camada i+1	(central)	
Nó n-1 (nó no fundo)	Camada n-1	(central)	$t^*_{n-1} = \min(t_{n-1}, 2 \cdot t_n)$
	Camada n	(fundo)	

A espessura total, t^* , (equação (53)) de todos os RVSEs é determinada através do somatório das espessuras ideais, t_i^* , e portanto, é sempre menor ou igual à espessura total geométrica, t_{CLT} , do elemento CLT.

$$t^* = \sum_{i=1}^{n-1} t_i^* \leq t_{CLT} \quad (53)$$

A força de corte proporcional, $n^*_{xy,RVSE(i)}$, num elemento CLT com “n” camadas, pode ser determinada pela equação (54).

$$n^*_{xy,RVSE(i)} = \frac{n_{xy}}{t^*} \cdot t^*_i \quad (54)$$

A tensão de corte nominal principal, $\tau^*_{0,RVSE(i)}$, do RVSE “i”, pode ser calculada dividindo a força de corte proporcional, $n^*_{xy,RVSE(i)}$, através da espessura, t^*_i . Isto leva a uma tensão normal de corte constante, τ^*_0 , para todos os RVSEs (equação (55))

$$\tau^*_{0,RVSE(i)} = \frac{n^*_{xy,RVSE(i)}}{t^*_i} = \frac{n_{xy}}{t^*} = \tau^*_0 \quad (55)$$

4.4.5.1. MECANISMO I – CORTE

Para mecanismo I, o valor da tensão de corte efetiva, τ^*_v , de um RVSE, pode ser calculado através da equação (56), sendo, o dobro da tensão de corte nominal principal, τ^*_0 , para todos os RVSEs.

$$\tau^*_v = 2 \cdot \tau^*_0 \quad (56)$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Por último, a tensão de cálculo tem de ser inferior ou igual à resistência ao corte (equação (57)).

$$|\tau_{v,d}^*| \leq f_{v,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (57)$$

Nota: Para a determinação da tensão de corte é assumida uma distribuição constante ao longo da largura da lamela, em vez de uma distribuição quadrática, geralmente utilizada em secções transversais retangulares de elementos lineares (τ_{max} é superior 3/2 em relação ao suposto valor constante). Isto pode ser esperado porque os pressupostos da teoria de viga (distribuição de forças de corte constante, bem como ausência de deformação de corte na fronteira) não estão satisfeitos. Além destes fatores, pode-se supor que a interferência da estrutura rígida (efeito de laminação) de um painel CLT, conduzirá a uma distribuição de tensões de corte mais ou menos constante.

Em oposição ao método anteriormente mencionado, algumas aprovações técnicas efetuam a verificação do mecanismo I, baseando-se na área de secção transversal parcial. De referir que ambos os métodos produzem resultados semelhantes para painéis com as camadas de espessuras constantes, contudo, para diferentes espessuras das camadas, podem ocorrer variações de resultados entre os métodos.

4.4.5.2. MECANISMO II – TORÇÃO

Para o mecanismo II, cada nó (zona de colagem) do RVE tem que ser verificado. O RVSE com a maior espessura ideal, t_i^* , é determinante para o dimensionamento, uma vez que, é nesse nó onde ocorre o momento máximo de torção, $M_{T,i}$ (equação (58)).

$$M_{T,i} = \tau_0^* \cdot t_i^* \cdot a^2 \quad (58)$$

As tensões de torção, $\tau_{T,i}^*$, (equação (59)) são definidas através da divisão do momento torsor, $M_{T,i}$, pelo momento polar de resistência, W_P (equação (60)).

$$\tau_{T,i}^* = \frac{M_{T,i}}{W_P} = \frac{\tau_0^* \cdot t_i^* \cdot a^2}{\frac{a^3}{3}} = 3 \cdot \tau_0^* \cdot \frac{t_i^*}{a} \quad (59)$$

$$W_P = \frac{I_P}{\frac{a}{2}} = \frac{a^3}{3} \quad (60)$$

O momento polar de resistência, W_P , é composto pelo momento de inércia polar da zona de colagem, I_P , de acordo com a equação (61), e a distância da borda, $a/2$ (assumindo: a dimensão da zona de colagem $a \cdot a$).

$$I_P = I_y + I_z = \frac{a \cdot a^3}{12} + \frac{a^3 \cdot a}{12} = \frac{a^4}{6} \quad (61)$$

O mecanismo II é verificado quando a equação (62) é satisfeita.

$$|\tau^*_{T,d}| \leq f_{T,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{T,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (62)$$

O mecanismo II é regulamentado em algumas aprovações técnicas. No entanto, as equações previstas nas aprovações técnicas são válidas apenas para elementos CLT retangulares, com espessura das camadas constante, sem aberturas no painel e sob corte constante. Nesse caso, a abordagem aqui proposta produzirá resultados idênticos àqueles descritos nas aprovações técnicas. Contudo, se houver uma grande variação na espessura das camadas, diferenças significativas entre as metodologias de cálculo podem ocorrer.

4.4.6. CORTE (CARGAS FORA DO PLANO)

A distribuição das tensões de corte ao longo da secção transversal, resultantes de cargas fora do plano, pode ser calculada através da equação (63). A assunção de que apenas as camadas longitudinais contribuem para a rigidez de corte da secção transversal ($E_{90} = 0$), conduz a um valor constante em vez de uma distribuição quadrática das tensões de corte nas camadas transversais ($\alpha = 90^\circ$). A tensão de corte máxima ocorre segundo o centro de gravidade da secção transversal. No entanto, devido às diferentes orientações das camadas, é necessário efetuar duas verificações para um elemento CLT de material uniforme (Fig. 74). Em camadas longitudinais é necessária uma análise das tensões de corte, $\tau_{max,d}$, em relação à resistência de corte, $f_{v,CLT,d}$. Nas camadas transversais é necessária a verificação entre a tensão de corte, $\tau_{r,max,d}$ e a resistência ao corte rasante, $f_{r,CLT,d}$.

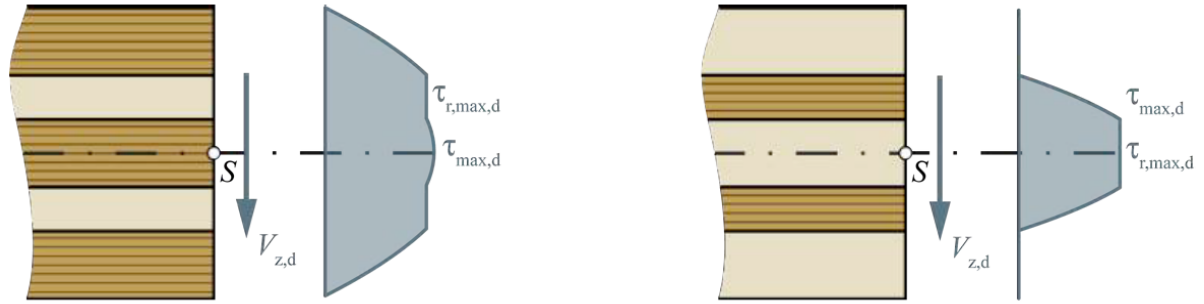


Fig. 74 – Distribuição das tensões de corte ao longo da secção transversal de um painel CLT com 5 camadas (assumindo $E_{90} = 0$): orientado segundo a direção da carga (esquerda); orientado perpendicularmente à direção da carga (direita), (Thiel *et al.*, 2016)

$$\tau(z_0) = \frac{V_z \cdot \int_{A_0} E(z) \cdot z \cdot dA}{K_{CLT} \cdot b(z_0)} \quad (63)$$

$$\frac{\tau_{max,d}}{f_{v,CLT,d}} \leq 1 \quad e \quad \frac{\tau_{r,max,d}}{f_{r,CLT,d}} \leq 1 \quad (64)$$

4.5. DIMENSIONAMENTO AOS ESTADOS LIMITE DE SERVIÇO (ELS)

4.5.1. DEFORMAÇÃO (CARGAS FORA DO PLANO)

Para elementos CLT sujeitos a cargas fora do plano é crucial a verificação das deformações. Devido à flexibilidade de corte das camadas cruzadas é fundamental a consideração das deformações causadas pelo corte, de acordo com a equação (65).

$$w_{ges} = \frac{1}{K_{CLT}} \cdot \int (M \cdot \bar{M}) dx + \frac{1}{S_{CLT}} \cdot \int (V \cdot \bar{V}) dx \quad (65)$$

A deformação máxima, a meio vão, de uma viga simplesmente apoiada sujeita a uma carga uniformemente distribuída, pode ser calculada através da equação (66).

$$w\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot K_{CLT}} + \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot S_{CLT}} \quad (66)$$

Os valores de rigidez, K_{CLT} e S_{CLT} , podem ser calculados de acordo com as equações (27) e (33), utilizando os valores médios do módulo de elasticidade e do módulo de corte. A

deformação instantânea (tempo: $t = 0$) e a deformação final e final parcial (tempo: $t = \infty$) têm que ser verificadas. As deformações finais e finais parciais têm em consideração os efeitos a longo prazo devido à fluência. Devido ao efeito do corte rasante, presente nas camadas transversais, o fator de deformação, k_{def} , do CLT é superior ao da madeira maciça ou da madeira lamelada colada (GLT). A norma prEN 16351 e Jöbstl (2007) indicam os valores do coeficiente de deformação, k_{def} , para elementos CLT de 3 a 7 camadas, dependendo da classe de serviço. Para a classe de serviço 1 e 2, respetivamente, valores de $k_{def} = 0,85$ e $1,10$ são propostos. Para elementos CLT com mais de 7 camadas os valores utilizados para contraplacados podem ser aplicados ($k_{def,CS 1} = 0,8$ e $k_{def,CS 2} = 1,0$). As combinações de ações podem ser retiradas a partir da norma EN 1995-1-1 (2004) e dos Documentos de Aplicação Nacional.

4.5.2. VIBRAÇÃO (CARGAS FORA DO PLANO)

Para elementos CLT com vãos superiores a 4 m, o dimensionamento é geralmente governado pela vibração. Atualmente existe vários métodos para a determinação da vibração e diferentes valores limite para a mesma.

Geralmente, a verificação de pavimentos CLT à vibração contempla os seguintes procedimentos: verificação de acordo com a EN 1995-1-1 (2004); sugestões de Hamm / Richter em (Schickhofer *et al.*, 2010) e versão modificada das sugestões Hamm / Richter (Thiel *et al.*, 2012). A metodologia de cálculo dos três métodos passa, fundamentalmente, pela verificação da frequência natural, dos critérios de rigidez e da aceleração de vibração. Segundo EN 1995-1-1 (2004), a velocidade de vibração deve também ser verificada. Contudo, essa verificação é requerida principalmente para pisos leves, não sendo relevante para os pisos CLT.

4.5.2.1. FREQUÊNCIA NATURAL

A frequência natural de uma viga de vão único, $f_{1,beam}$, é dada pela equação (67).

$$f_{1,beam} = \frac{k_m}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_{l,ef}}{\bar{m}}} [Hz] \quad (67)$$

Onde $(EI)_{l,ef}$ é a rigidez à flexão efetiva na direção longitudinal.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

A rigidez à flexão efetiva, na direção longitudinal, $(EI)_{1,ef}$, é constituída pela rigidez à flexão do elemento CLT, K_{CLT} , e pela rigidez à flexão de uma possível betonilha final, mas sem a ação compósita (apenas com o seu próprio momento de inércia, sem as partes de Steiner). Além disso, a flexibilidade de corte pode ser tida em consideração, através da utilização da rigidez à flexão efetiva aparente (baseada em deformações de flexão e corte) em vez de K_{CLT} .

O fator, k_m , assume diferentes valores de acordo com as condições de apoio e o respetivo Eigenmode (um dos modos normais de vibração de um sistema oscilante). Smith *et al.* (2009) propõem os valores apresentados na Tabela 11 para o primeiro Eigenmode ($m = 1$).

Tabela 11 – Valores do fator, k_m , considerando diferentes condições de apoio para o 1º Eigenmode (Smith *et al.*, 2009).

Condições de apoio	k_m
Apoio duplo em ambas as extremidades	$\pi^2 = 9,87$
Encastramento em ambas as extremidades	22,4
Consola	3,52

Para sistemas de vigas contínuas, o efeito de continuidade entre vigas pode ser considerado através do fator k_{f2} . O fator k_{f2} depende do quociente entre l_{min}/l_{max} e o seu valor varia entre 1.0 e 1.5 (equação (68))

$$k_{f2} = -5,3828 \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right)^6 + 16,6637 \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right)^5 - 19,7305 \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right)^4 + 10,3840 \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right)^3 - 1,9017 \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right)^2 - 0,5879 \left(\frac{l_{min}}{l_{max}}\right) + 1,5537 \quad (68)$$

A frequência natural é calculada de acordo com o método de *Morleigh* (ver Petersen C., 2000). Adicionalmente aos efeitos de flexão, este método também considera a influência da flexibilidade de corte e da ligação elástica. Como já foi referido, a flexibilidade de corte é de extrema importância para elementos CLT, sendo altamente aconselhável tomá-la em consideração no contexto das vibrações.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Para uma laje duplamente apoiada nos quatro lados, o efeito de transporte de carga segundo a direção transversal pode ser tido em consideração (laje funcionando bidireccionalmente). A frequência natural dessa laje é calculada através da equação (69). Tanto a rigidez de torção, (equação (37)), como a rigidez de flexão efetiva (equação (27)), na direção transversal, podem ser consideradas. O aumento da frequência natural depende amplamente do quociente entre a extensão e largura do vão da laje, l/b .

$$f_{1,plate} = f_{1,beam} \cdot \sqrt{1 + \frac{2 \cdot D^*_{xy}}{(EI)_{l,ef}} \cdot \frac{l^2}{b^2} + \frac{(EI)_{b,ef}}{(EI)_{l,ef}} \cdot \frac{l^4}{b^4}} \text{ [Hz]} \quad (69)$$

A frequência natural calculada deve ser superior à frequência crítica, f_{crit} . As frequências críticas para requisitos normais e elevados são apresentadas na Tabela 12, segundo os três métodos de dimensionamento à vibração.

Tabela 12 – Frequência crítica, f_{crit} , para requisitos elevados e normais.

Método aplicado	Requisitos elevados	Requisitos normais
EN 1995-1-1	8 Hz	8 Hz
Hamm / Richter	8 Hz	6 Hz
Hamm / Richter modificado	8 Hz	8 Hz

4.5.2.2. CRITÉRIO DE RIGIDEZ

Na análise do critério para a rigidez, a deformação vertical máxima instantânea provocada por uma força vertical concentrada estática, $F = 1 \text{ kN}$, em qualquer ponto do pavimento tendo em consideração a distribuição de carga, deve ser calculada e comparada com o valor limite $W_{crit,1kN}$.

Para uma viga simplesmente apoiada, a deformação máxima, $w(F, b_f)$, pode ser calculada segundo a equação (70). A distribuição de carga será considerada pela largura efetiva, de acordo com a equação (71). De referir que a flexibilidade de corte não deve ser desprezada para o cálculo da deformação.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$w(F, b_f) = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_{l,ef} \cdot b_f} + \frac{F \cdot l}{4 \cdot (GA)_{ef} \cdot b_f} \quad (70)$$

$$b_f = \frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_{b,ef}}{(EI)_{l,ef}}} \quad (71)$$

Tabela 13 – Valores limite do critério de rigidez, $w_{crit,1kN}$, para requisitos elevados e normais.

Método aplicado	Requisitos elevados	Requisitos normais
EN 1995-1-1 ¹	1 mm	2 mm
Hamm / Richter	0,25 mm	0,5 mm
Hamm / Richter modificado	0,25 mm	0,5 mm

¹ O EN 1995-1-1 permite valores limite variáveis para o critério de rigidez, contudo, é altamente recomendável permanecer dentro dos valores limite.

4.5.2.2.1. ACELERAÇÃO DA VIBRAÇÃO

A aceleração da vibração, a , deve ser verificada caso o valor da frequência natural, f_1 , esteja entre os valores da frequência mínima, $f_{min} = 4,5 \text{ Hz}$, e da frequência crítica, f_{crit} ($f_{min} \leq f_1 \leq f_{crit}$). A aceleração da vibração, a , é calculada de acordo com a equação (72) e depende da massa (generalizada) efetiva da laje, M_{gen} , da frequência de excitação, f_f , da frequência natural, f_1 , do coeficiente de Fourier da oscilação parcial harmônica predominante, α_{i,f_1} , do peso próprio da pessoa excitatória, $F_0 = 700 \text{ N}$, bem como da taxa de amortecimento modal, ζ . A aceleração da vibração, a , deve ser inferior à aceleração crítica, a_{crit} , para requisitos elevados e normais (Tabela 16).

$$a = \frac{0,4 \cdot \left(\frac{F_0 \cdot \alpha_{i,f_1}}{M_{gen}} \right)}{\sqrt{\left(\left(\frac{f_1}{f_f} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2 \cdot \zeta \cdot \frac{f_1}{f_f} \right)^2}} \quad [m/s^2] \quad (72)$$

Para a determinação do cálculo da massa (generalizada) modal, M_{gen} , considerando a influência de um material ortotrópico, a equação (73) em conjunto com a largura efetiva b_f (devendo ser

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

menor ou igual a metade da largura do pavimento) é proposta. De referir que para uma análise mais realista de um material ortotrópico é necessária uma maior investigação sobre o assunto.

$$M_{\text{gen}} = M \cdot \frac{l}{2} \cdot b_f \quad [kg] \quad , \quad \text{com } b_f \leq \frac{b}{2} \quad (73)$$

Os valores publicados dos coeficientes de Fourier e das frequências de excitação não estão em conformidade. Assim, a Tabela 14 mostra os valores segundo Schweiz (2003).

Tabela 14 – Coeficientes de Fourier e frequências de excitação, de acordo com Schweiz (2003)

Frequência natural	Coeficientes de Fourier (α_{i,f_1})	Frequência de excitação
		(f_f) [Hz]
$4,5 < f_1 \leq 5,1$	0,20	f_1
$5,1 < f_1 \leq 6,9$	0,06	f_1
$6,9 < f_1 \leq 8,0$	0,06	6,9

A taxa de amortecimento, ζ , para pisos CLT situa-se entre 2,5% e 3,5%, dependendo do tipo de construção do piso e das condições de suporte (Fitz, 2008).

Tabela 15 – Valores recomendado para a taxa de amortecimento, ζ , dependente do tipo de construção do piso (Fitz, 2008).

Tipo de construção do piso	Taxa de amortecimento	
	(ζ)	
	Apoiada em 2 lados	Apoiada nos 4 lados
Piso CLT com uma construção leve ou sem construção.	2,0%	2,0%
Piso CLT com uma construção pesada	2,5%	3,5%

Tabela 16 – Valores críticos da aceleração de vibração, a_{crit} , para requisitos elevados e normais (adaptado de Harris *et al.*, 2013).

Método aplicado	Requisitos elevados	Requisitos normais
EN 1995-1-1 *)		
Hamm / Richter	0,05 m/s^2	0,10 m/s^2
Hamm / Richter modificado		

4.6. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL AO FOGO

O dimensionamento estrutural ao fogo é baseado no método das secções transversais reduzidas de acordo com a norma EN 1995-1-2. O Euro código 5 apresenta ainda um método alternativo para o cálculo da resistência ao fogo, designadamente, o método das propriedades reduzidas, em que é admitindo uma redução das propriedades do material para o seu dimensionamento a quente, contudo, este método não é utilizado por algumas normas nacionais de alguns países.

Segundo o método das secções transversais reduzidas, o conhecimento da profundidade de carbonização ao longo do tempo é determinante para o dimensionamento dos elementos ao fogo. A profundidade de carbonização, d_{char} , depende de 3 fatores, nomeadamente: taxa de carbonização, β , tipo de cola aplicada e presença de proteção ao fogo. A taxa de carbonização é definida da seguinte forma: CLT sem espaçamentos ou espaçamentos até 2 mm: $\beta = 0.65 \text{ mm/min}$; CLT com espaçamentos até 6 mm: $\beta = 0.80 \text{ mm/min}$. O tipo de cola utilizado é relevante para o dimensionamento, uma vez que, o comportamento ao fogo irá depender da capacidade resistente a temperaturas elevadas da cola escolhida.

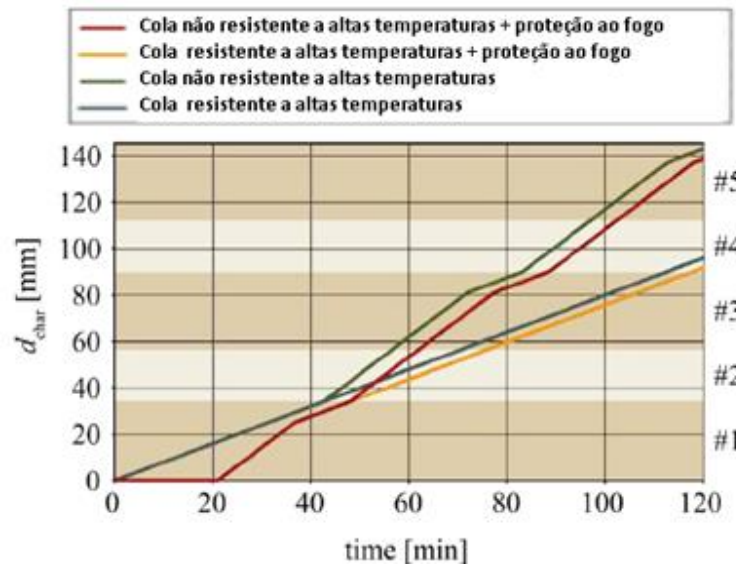


Fig. 75 – Representação de vários cenários possíveis para a profundidade de carbonização ao longo do tempo de um elemento CLT com 5 camadas (adaptado de Harris *et al.*, 2013).

Analisando a Fig. 75 podemos constatar diferentes cenários para a profundidade carbonização, dependendo do tempo de carbonização. As 4 análises apresentadas no gráfico variam conforme a presença/ausência de revestimento contra incêndios e com a resistência/não resistência a altas temperaturas do tipo de cola utilizada. Pode-se ainda constatar, desde a rutura do revestimento contra incêndios, até ao momento em que a camada de proteção de carvão vegetal é formada, uma taxa de carbonização dupla tem de ser considerada. O mesmo se aplica nos casos em que são utilizadas colas que não são à prova de altas temperaturas. Durante ensaios ao fogo realizados em elementos CLT carregados fora do plano, observou-se desprendimento de camadas carbonizadas (ver Frangi *et al.*, 2009). Contudo, em elementos de parede CLT carregados no plano, o desprendimento das camadas carbonizadas não se verifica. Na Fig. 76 são apresentadas as definições da secção transversal reduzida. A profundidade é reduzida pela profundidade de carbonização eficaz, d_{ef} , de acordo com a equação (74), onde k_0 aumenta linearmente de 0 para 1 nos primeiros 20 minutos de exposição ao fogo. Em consequência, depois de um tempo de carbonização de 20 min, é adicionada à profundidade carbonização, d_{char} , uma espessura adicional de $d_0 = 7\text{ mm}$, que representa a zona de material termicamente modificado.

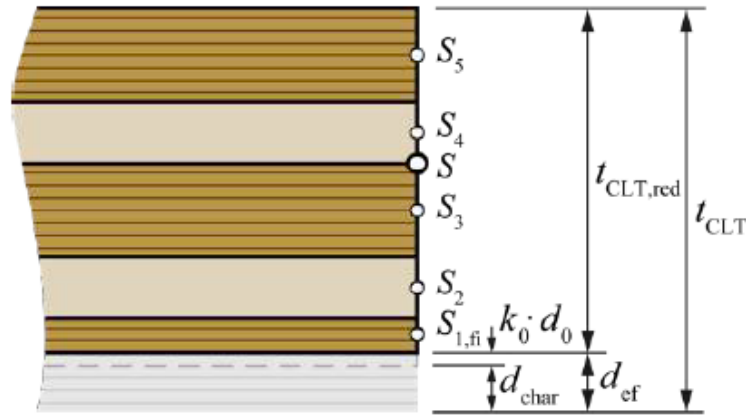


Fig. 76 – Definições relativas a secção transversal reduzida provocadas pelo incêndio. (Harris *et al.*, 2013).

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 \cdot d_0 \quad \text{com } k_0 = \min \left\{ \frac{t}{20}, 1.0 \right\} \quad (74)$$

Segundo o software *Calculatis*, os elementos CLT horizontais e verticais sem proteção apresentam taxas de carbonização, β_0 , distintas. Para pavimentos ou coberturas CLT, a taxa de carbonização, β_0 , é igual a 0,65 mm/min, quando apenas a primeira camada é exposta ao fogo. Para cada camada adicional exposta ao fogo a taxa de carbonização, β_0 , aumenta para o valor de 1,3 mm/min, até à formação de uma camada de carvão com 25 mm de espessura, retomando o valor de 0,65 mm/min até à próxima zona de colagem entre camadas (Fig. 77, esquerda). Para paredes CLT a taxa de carbonização, β_0 , é igual a 0,63 mm/min, quando apenas a primeira camada é exposta ao fogo. Para cada camada adicional exposta ao fogo a taxa de carbonização, β_0 , aumenta para o valor de 0,86 mm/min ao longo de toda a espessura (Fig. 77, direita).

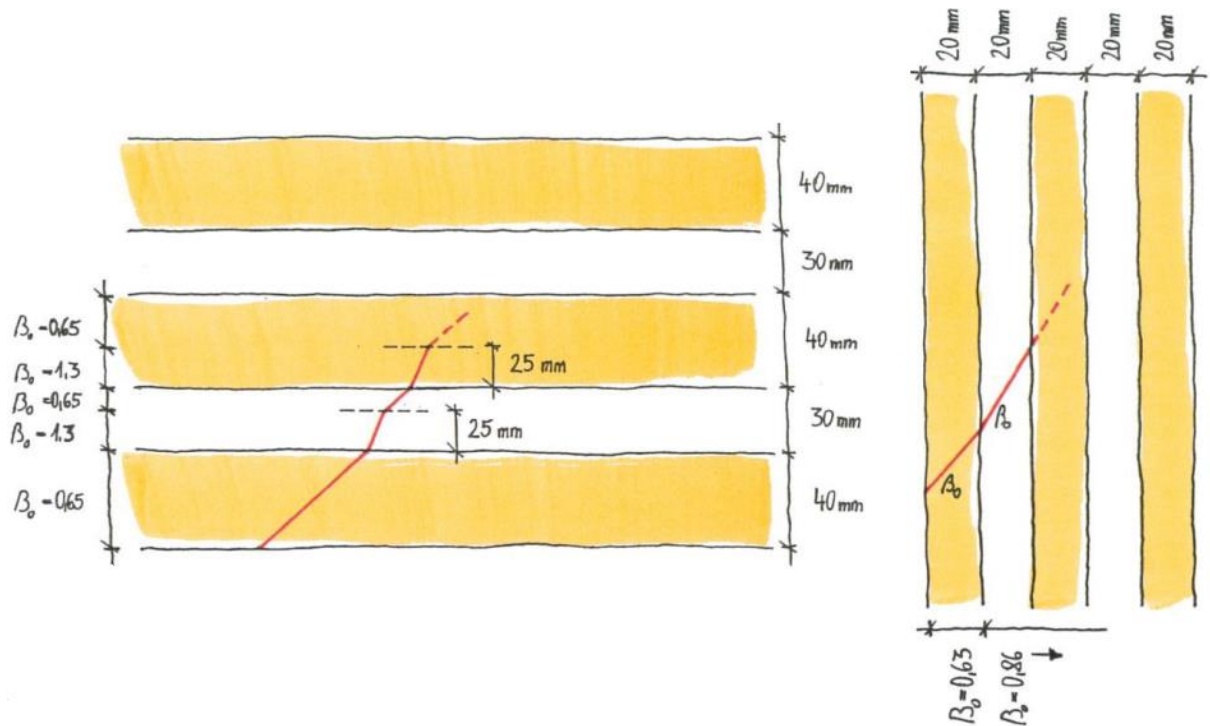


Fig. 77 – Diferentes taxas de carbonização, β_0 , para elementos CLT horizontais (esquerda) e verticais (direita) (Stora Enso - Documentation on fire protection, 2016).

Ao utilizar o método de secção transversal reduzida, o processo de verificação em caso de incêndio pode ser feito de acordo com a equação (75), utilizando a resistência de dimensionamento ao fogo, $f_{d,fi}$. Assim, a resistência referente ao quartil 20%, f_{20} (com $k_{fi}=1.15$, supondo variações/dispersões da resistência semelhantes para o CLT e GLT), o fator de modificação, $k_{mod,fi} = 1.0$, e o fator de segurança parcial, $\gamma_{M,fi} = 1.0$, podem ser aplicados.

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{com } f_{20} = k_{fi} \cdot f_k \quad (75)$$

5. CÁLCULO DE UM EDIFÍCIO ALTO EM CLT

5.1. INTRODUÇÃO

O uso da madeira como elemento estrutural em edifícios em altura encontra-se em fase de crescimento no mercado da construção. A crescente aceitação pelo mercado da construção está associada aos elevados padrões de desempenho, bem como aos custos competitivos de construção obtidos pelas estruturas construídas até à data. O dimensionamento minucioso deste tipo de estruturas é de extrema importância, uma vez que, possíveis problemas associados a incorretos dimensionamentos (por exemplo: incêndio devastador ou um problema de durabilidade com custos elevados) podem originar à exclusão do mercado da construção devido à má reputação obtida.

5.2. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

Inspirado em novas propostas híbridas de CLT / aço e CLT / betão, bem como nas suas vantagens em relação ao sistema monolítico CLT, foi desenvolvido por Silva *et al.* (2014), na Universidade do Minho, um sistema estrutural híbrido CLT / madeira lamelada colada, denominado *UT system* (sistema de madeira urbana). Esta proposta visa solucionar: a problemática associada ao contínuo aumento da densidades urbanas, a limitada flexibilidade característica dos sistemas monolíticos em CLT e a necessidade de um perfil mais sustentabilidade para o sector da construção.

O capítulo 5 visa estudar a viabilidade do *UT system* através do dimensionamento estrutural de um edifício multifamiliar em altura. O edifício proposto tem a sua localização em Lisboa, apresenta formato retangular em planta (Fig. 78), tem aproximadamente 33,6 m de comprimento por 24,6 m de largura e possui uma envergadura aproximadamente de 30 m, sendo constituído por 10 pisos com uma altura entre pisos constante de 3 metros (Fig. 79). A estrutura é composta por 4 vãos na direção longitudinal (8,8 m; 8 m; 8 m e 8,8 m) e 4 vãos na direção transversal (6,3 m; 6 m; 6 m e 6,3 m).

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

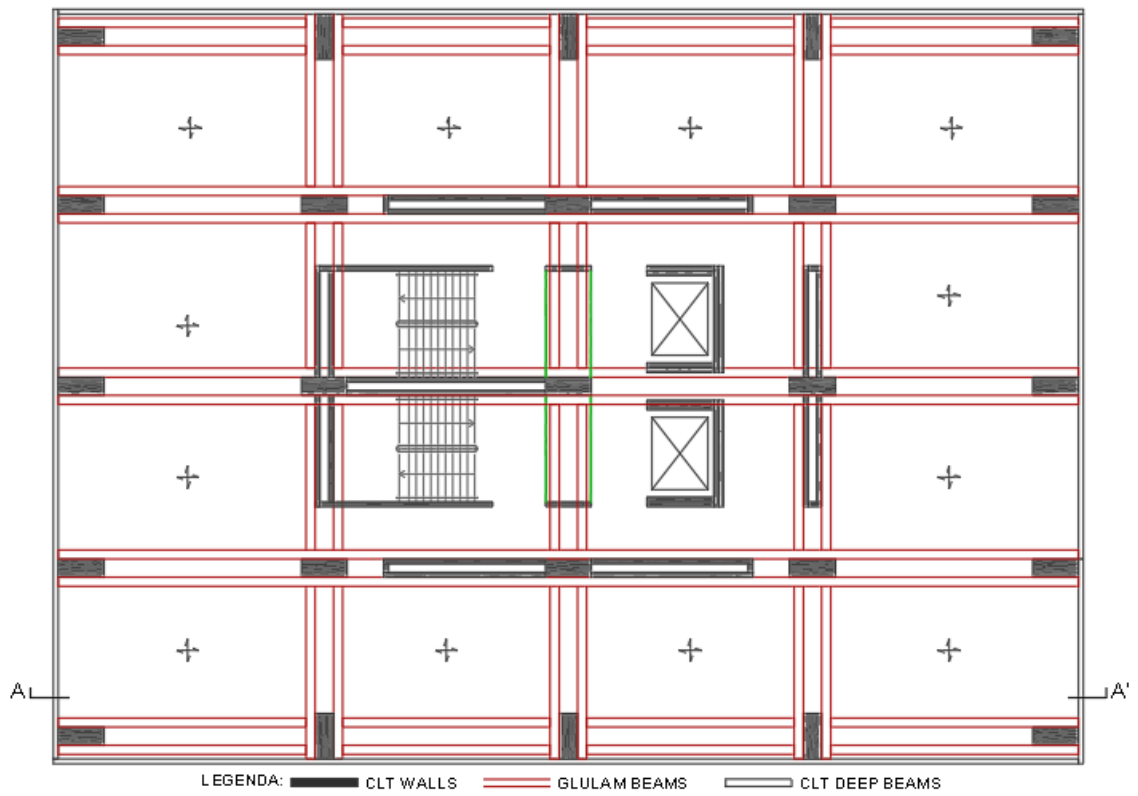


Fig. 78 – Planta do edifício proposto pelo *UT system*.

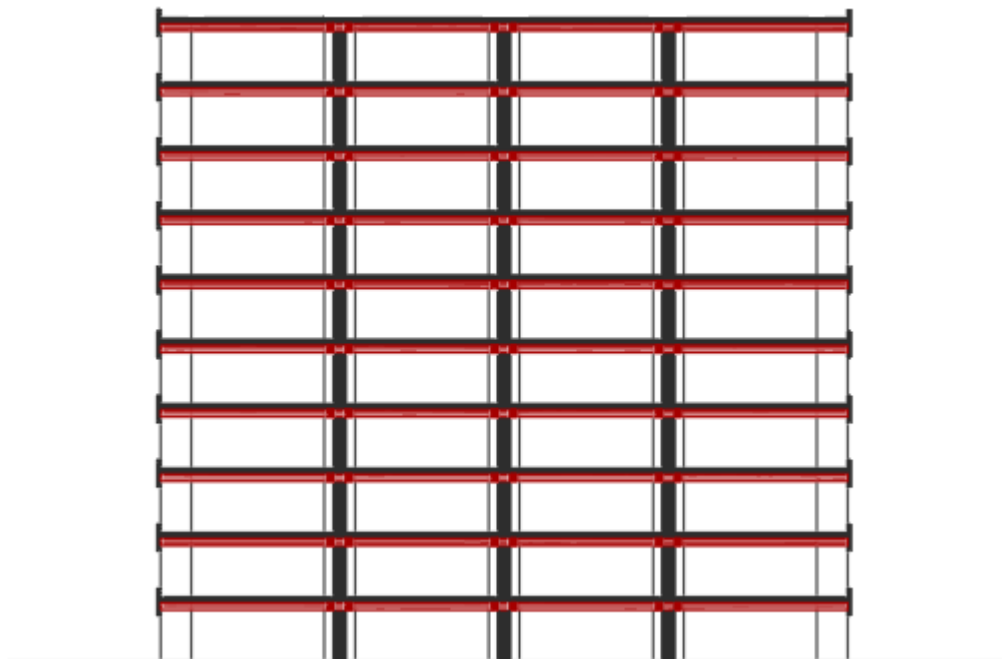


Fig. 79 – Perfil AA' do edifício proposto pelo *UT system*.

5.2.1. SISTEMA ESTRUTURAL

Inspirado no conceito de tubo empacotado, o *UT system* funciona como um conjunto de tubos individuais ligados entre si de modo a fazê-los comportarem-se como uma unidade única, resultando numa melhoria da resistência e rigidez global da estrutura (Ali & Moon, 2007). As paredes CLT são os principais responsáveis pela transferência das cargas gravíticas, segundo um percurso vertical, até às fundações. As paredes funcionam ainda como paredes resistentes ao corte e encontram-se orientadas perpendicularmente às fachadas de maneira a aumentar a resistência estrutural aos carregamentos laterais (Ali & Moon, 2007). Os pisos CLT trabalham em conjunto com vigas duplas de madeira lamelada colada na distribuição das cargas para as paredes CLT, melhorando a rigidez do edifício e evitando o efeito do colapso progressivo. Por último, as vigas altas CLT produzem o efeito de amarração de todos os tubos individuais (paredes CLT) ao longo do perímetro do edifício. Ilustrado na Fig. 80, o *UT system* consiste num sistema híbrido, combinando elementos estruturais de CLT e madeira lamelada colada. O CLT é o material utilizado em maior escala, sendo aplicado em pisos, paredes e vigas altas (*deep beams*), já o uso da madeira lamelada colada é restrito ao sistema duplo de vigas e vigas adicionais de suporte.

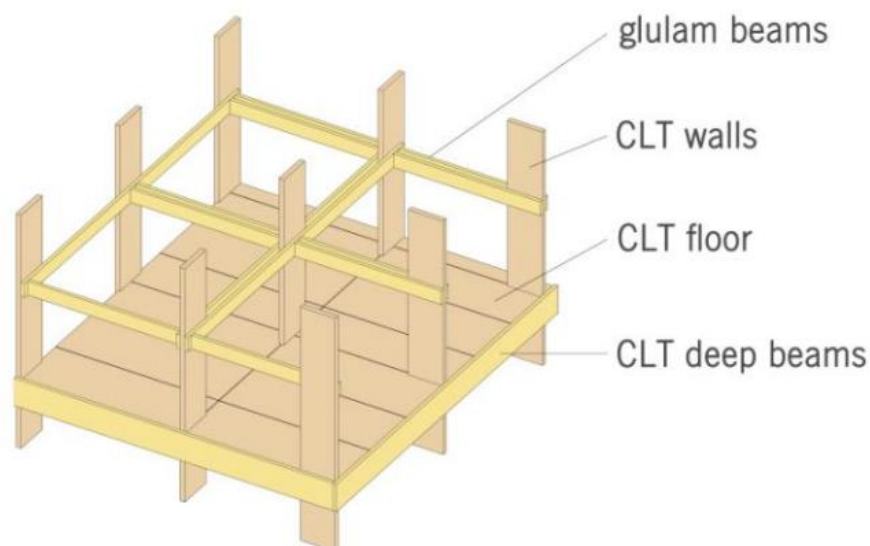


Fig. 80 – Sistema estrutural tipo do *UT system* (Silva *et al.*, 2014).

5.2.2. SISTEMA CONSTRUTIVO

Similar à maioria dos sistemas de madeira, o *UT system* é um sistema baseado num elevado número de elementos pré-fabricados. A colocação dos painéis / vigas de madeira em obra é feita por um guindaste e a sua instalação pode ser feita segundo o sistema *platform system* ou *balloon frame*. No caso particular do *UT system*, o sistema de construção *balloon frame* foi considerado como a melhor opção, devido às instalações da construção e especificidades do próprio material e sistema estrutural.

Além dos ganhos na velocidade de construção associados ao elevado grau de pré-fabricação, este sistema de construção permite ainda erguer o edifício em patamares até 4 pisos de cada vez, visto que as paredes CLT podem facilmente atingir os 12 metros necessários para o efeito. Tal como é ilustrado na Fig. 81, as primeiras paredes CLT são erguidas e devidamente apoiadas na laje de betão armado, segue-se para cada andar a mesma sequência de montagem: (1) vigas duplas de madeira lamelada colada são fixadas às paredes CLT, (2) pisos CLT são fixados às vigas de madeira lamelada colada e finalmente (3) vigas altas CLT são fixadas ao longo do perímetro, de modo a amarrar todos os elementos verticais. Para o edifício proposto, serão necessário 3 conjuntos de painéis de parede CLT para atingir a envergadura total do edifício. Desta forma, todos os painéis de paredes do edifício em análise apenas apresentam apenas duas descontinuidades segundo a direção longitudinal (Fig. 85).

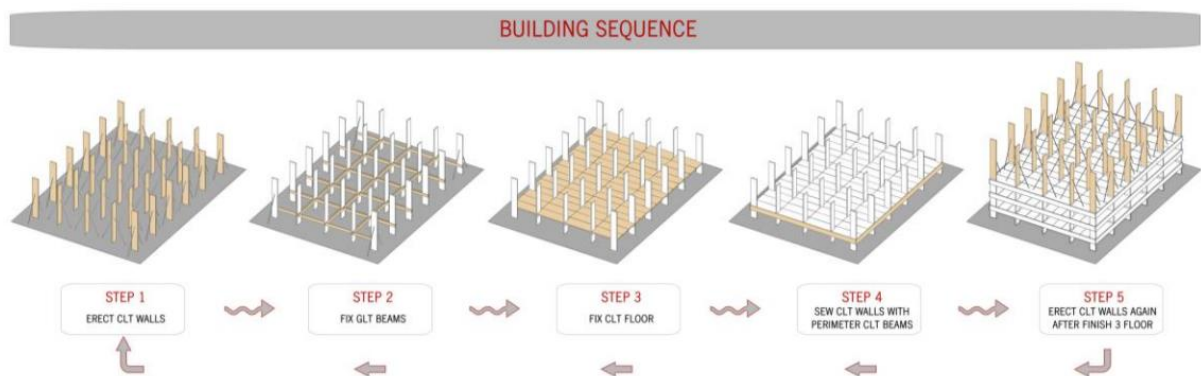


Fig. 81 – Sequência de montagem do *UT system*, usando o sistema construtivo *balloon frame* (Silva *et al.*, 2014).

5.2.3. SOLUÇÃO CONSTRUTIVA DO *UT SYSTEM*

A solução construtiva adotada para o *UT system* teve em consideração diversos fatores, nomeadamente, os efeitos de retração/inchamento da madeira, a proteção dos elementos estruturais contra a humidade e contra o fogo, desempenho acústico dos pavimentos e paredes e o tipo de ligações a efetuar entre os elementos estruturais.

Como já foi referido, o *UT system* é baseado no sistema construtivo balloon frame, sendo este associado a um melhor aproveitamento da cércea do edifício quando comparado com o sistema *platform system*. Isto deve-se ao facto do sistema ser constituído por painéis de parede CLT contínuos entre pisos, onde os painéis de pavimento não descansam diretamente nas paredes CLT, minimizando os problemas dos efeitos de retração/inchamento ao longo da espessura do painel. Portanto, os pavimentos não possuem qualquer ligação com as paredes estruturais, sendo adotado um espaçamento ao redor das paredes estruturais, com o intuito de acomodar possíveis deslocamentos entre os dois elementos estruturais e variações provocadas por efeitos de retração/inchamento.

Uma preocupação inerente aos edifícios CLT típicos está relacionada com a exposição dos painéis de fachada a dois ambientes distintos (exterior e interior), o que pode causar algumas distorções nos elementos estruturais. Com o intuito de mitigar este problema, o *UT system* coloca paredes estruturais perpendiculares à fachada independentemente do tipo de fachada adotado (varandas ao longo de todo o perímetro do edifício ou fachada de vidro contínua externa).

A presença de umidade pode conduzir à podridão da madeira, ao mofo e bolor, que podem eventualmente resultar em problemas estruturais para o edifício. As fachadas de um edifício necessitam de um plano de drenagem eficaz em toda a superfície das paredes, incluindo uma camada impermeável à chuva ou uma caixa de ar entre o revestimento da parede e o revestimento exterior, para permitir que a umidade seja drenada para fora dos elementos de construção (Build it Green, 2008-2011). Conforme ilustrado na Fig. 82, o *UT system* propõe quatro possibilidades diferentes para a drenagem de fachadas. As duas primeiras possibilidades exigem vedação e revestimento do CLT adequados, uma vez que os elementos estruturais estão diretamente em contato com o ambiente externo. Para este tipo de soluções recomenda-se a aplicação separada de uma barreira de vapor de água e uma barreira de vento. A barreira contra

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

o vapor de água deve ser aplicada diretamente na face do CLT enquanto a barreira contra o vento deve ser aplicada após o isolamento (Skogstad *et al.*, 2011). As duas últimas opções evitam a vedação ou revestimento do CLT, sugerindo uma parede de cortina contínua simples ou dupla. Estas soluções possuem um melhor desempenho em termos de durabilidade da envolvente do edifício, contudo, a presença de um elevado número de envidraçados de grandes dimensões na fachada reduzem a eficiência térmica e acústica, quando comparadas com a construção CLT padrão. Assim, torna-se fulcral que o *UT system* utilize envidraçados de alto desempenho, capazes de melhorar a eficiência energética, reduzir os ganhos e perdas de calor, reduzir os níveis de ruído, reduzir a condensação, melhorar o conforto, aumentar a entrada da luz do dia e as vistas.

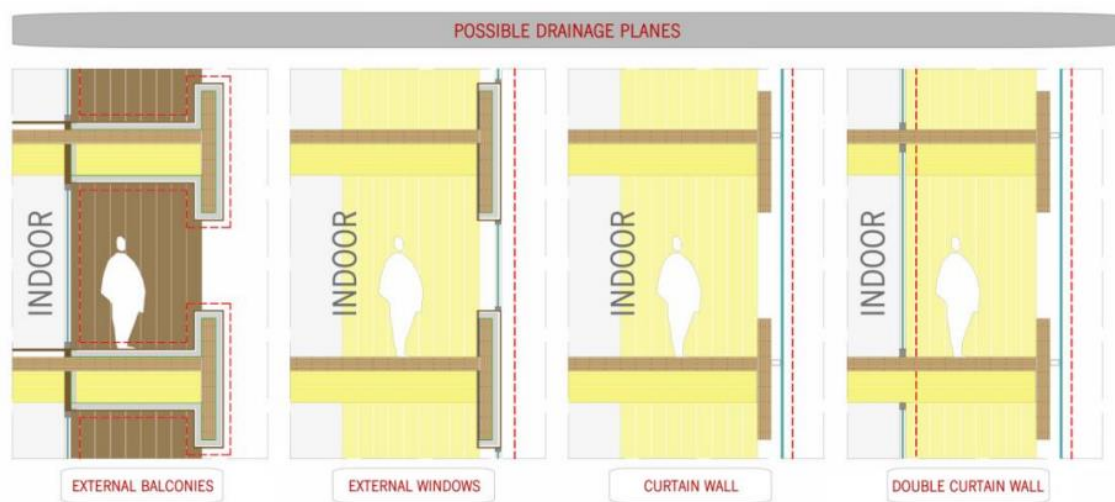


Fig. 82 – Possíveis soluções construtivas das fachadas a adotar no *UT system* (Silva *et al.*, 2014).

O *UT system* foi projetado a pensar nas vantagens estéticas associadas à madeira exposta, mesmo que para isso seja necessário sobre dimensionar elementos estruturais e usar dispositivos de proteção contra incêndio ativos visando a deteção, alarme e supressão de incêndios. No entanto, se necessário, o *UT system* também poderá utilizar sistemas passivos de proteção contra incêndios que limitam o fogo e o fumo a zonas designadas para o efeito, protegendo os elementos de madeira através de revestimentos não combustíveis. A diminuição da resistência das ligações de aço quando expostas a altas temperaturas (Gerard & Barber, 2013) é um fator tido em consideração pelo *UT system* através da utilização, sempre que possível, de ligações embutidas no CLT ou através do uso de revestimentos não combustíveis em zonas de ligações expostas.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

O desempenho acústico dos sistemas de pavimentos e paredes é um parâmetro de extrema importância para tornar os apartamentos mais atraentes para potenciais compradores, especialmente no caso de edifícios de madeira multifamiliares. Assim, devem ser criadas barreiras verticais e horizontais que garantam que a transferência de perturbações sonoras seja evitada de um compartimento para o outro (Sigrist *et al.*, 1999). Relativamente aos elementos de parede, o *UT system* sugere um sistema leve sem suporte de carga baseado em placas de gesso com altos níveis de isolamento acústico. A Fig. 83 ilustra as soluções construtivas baseadas em sugestões apresentadas no capítulo 9 do CLT Handbook (Hu & Adams, 2013) e adotadas pelo *UT system* para elementos de pavimento CLT. A primeira solução (ver Fig. 83, esquerda) propõe pisos CLT com pavimentos revestidos e tetos falsos enquanto que na segunda opção (ver Fig. 83, direita) são excluídos os tetos falsos. Ambas as soluções respeitam as classes de transmissão de som (STC) e classe de isolamento de impacto (IIC) e contribuem para a redução das transmissões flangeadoras entre compartimentos, através dos componentes de construção estrutural compartilhados (Sigrist *et al.*, 1999).

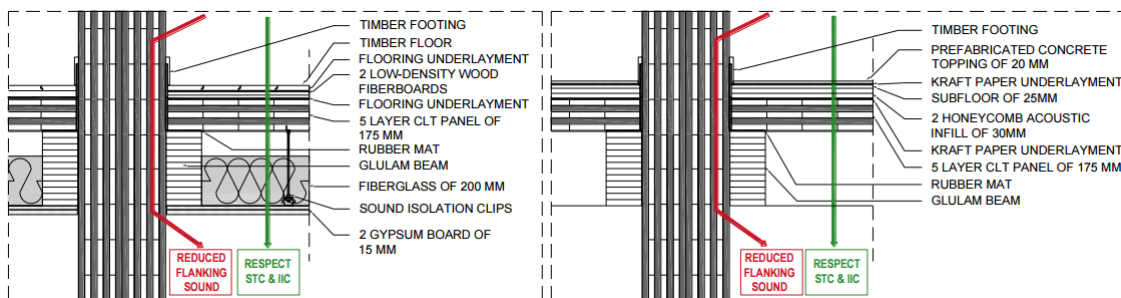


Fig. 83 – Soluções construtivas adotadas pelo *UT system* para o desempenho acústico dos pisos e paredes CLT (Silva *et al.*, 2014).

As ligações dos elementos estruturais do *UT system* são baseadas em parafusos auto-perfurantes de rosca completa e cavilhas de aço. As principais ligações do *UT system* são realizadas entre os painéis CLT e as vigas de madeira lamelada colada. Os painéis de pavimento CLT são ligados às vigas duplas de madeira lamelada colada através da aplicação de cavilhas perpendiculares ao eixo das fibras. As vigas duplas de madeira lamelada colada são fixadas às paredes através de um grupo de cavilhas de aço que atravessam as duas vigas e a parede CLT localizada entre elas e têm por função assegurar um apoio contínuo ao pavimento CLT (Fig. 84). As cavilhas de aço foram preferidas em relação aos parafusos auto-perfurantes, a fim de fazer com que as duas vigas trabalhem em conjunto e com o intuito de melhorar a rigidez da ligação, formando um conjunto coeso. A ligação dos pilares CLT e dos pavimentos CLT com

as vigas altas CLT é realizada por parafusos auto-perfurantes de rosca completa inseridos sob um ângulo de 45 ° entre o eixo do parafuso e o eixo do membro de modo a proporcionar uma capacidade de carga mais elevada em comparação com as ligações de corte comuns, devido à elevada capacidade de extração dos parafusos auto-perfurantes (Fig. 84).



Fig. 84 – Tipos de ligações adotados pelo *UT system* entre os diversos elementos estruturais (Silva *et al.*, 2014).

5.3. MODELAÇÃO DO *UT SYSTEM*

O dimensionamento estrutural do edifício foi efetuado através de um modelo tridimensional usando o software de elementos finitos *RFEM-5* da empresa Dlubal. A existência do módulo adicional *RF-Laminate* foi determinante para escolha do software *RFEM-5*, uma vez que este permite cálculo das deformações e das tensões em superfícies laminadas. O *RF-Laminate* permite a criação de modelos com material isotrópicos, ortotrópicos e modelos híbridos através da combinação de materiais ortotrópicos com isotrópicos numa única superfície. Para modelos ortotrópicos (caso do CLT) as camadas individuais podem ser giradas segundo um ângulo β , sendo permitido ao utilizador ter em consideração diferentes propriedades segundo uma direção necessária. O módulo permite ainda ao utilizador definir se pretende considerar ou não o acoplamento de corte (*shear coupling*) das camadas individuais para o cálculo estrutural. Para além disto, o software está dotado de uma base de dados que engloba todos os tipos de painéis CLT fabricados pelos principais fabricantes de CLT. Assim, basta selecionar o fabricante desejado, o tipo de painel pretendido (de parede ou de pavimento), o material base (pinho ou abeto) e a espessura do painel, que o programa define todos os parâmetros referentes às propriedades mecânicas e a respetivas resistências do material de acordo com as informações técnicas fornecidas pelos fabricantes. Em suma, o *RFEM-5* torna-se a ferramenta ideal para

dimensionar estruturas em CLT, devido às funcionalidades supracitadas presentes no módulo adicional *RF-Laminate*.

5.3.1. DIMENSÕES DOS COMPONENTES ESTRUTURAIS

Como já referido no tópico 2.2 as dimensões máximas dos painéis é limitadas pelas dimensões de transporte do camiões sendo importante que os projetistas tenham em consideração esses limites quando efetuam o dimensionamento das estruturas. Assim, para a modelação da estrutura foi adotado um comprimento máximo de 12,5 m e uma largura máxima inferior a 2,95 m para todos os painéis CLT. A Tabela 17 apresenta a variação das dimensões de cada componente estrutural adotadas no modelo de elementos finitos e tem por objetivo fornecer ao leitor uma noção do elevado número de descontinuidades/ligações presentes no modelo da estrutura.

Tabela 17 – Variação das dimensões de cada componente estrutural adotadas no modelo de elementos finitos.

Elemento estrutural	Dimensões		
	Comprimento (m)	Largura (m)	Espessura (mm)
Pilares	9.24; 9 e 12.24	1,5	600
Paredes verticais	Núcleo central e coretes	$1.5 \leq L \leq 2.6$	160
	Caixa de elevadores	$1,6 \leq L \leq 2,35$	320
Pavimentos	3.1; 5.45; 5.8; 8 e 8.8	2 ou 2,1	260
Vigas altas	6; 6.3; 8 e 8.8	1,28	160

5.3.2. SIMPLIFICAÇÕES E ALTERAÇÕES EFETUADAS NA MODELAÇÃO

Ao desenvolver o modelo tridimensional da estrutura foi necessário efetuar algumas alterações à solução apresentada na planta estrutural (ver Fig. 78). Devido ao sistema duplo de vigas foi necessário alterar as paredes que formam as coretes para uma solução com uma única parede de espessura semelhante aos pilares CLT. Esta alteração é devida à limitação das dimensões das coretes devido à espessura dos pilares CLT, pois as vigas duplas têm obrigatoriamente de ser fixadas na lateral das paredes das coretes. Assim é possível alterar as seções transversais de todas as paredes estruturais sem efetuar qualquer alteração na disposição das paredes no modelo.

Para a modelação do edifício proposto foi assumido uma continuidade entre as paredes estruturais entre os pisos 1-3; 4-6 e 7-10 (Fig. 85). Desta forma, os painéis de parede CLT são diferenciados em 3 seções diferentes ao longo da envergadura do edifício. As ligações/descontinuidades dos painéis ocorrem 24 cm acima do pavimento e 24 cm abaixo do início da viga profunda CLT (Fig. 85).

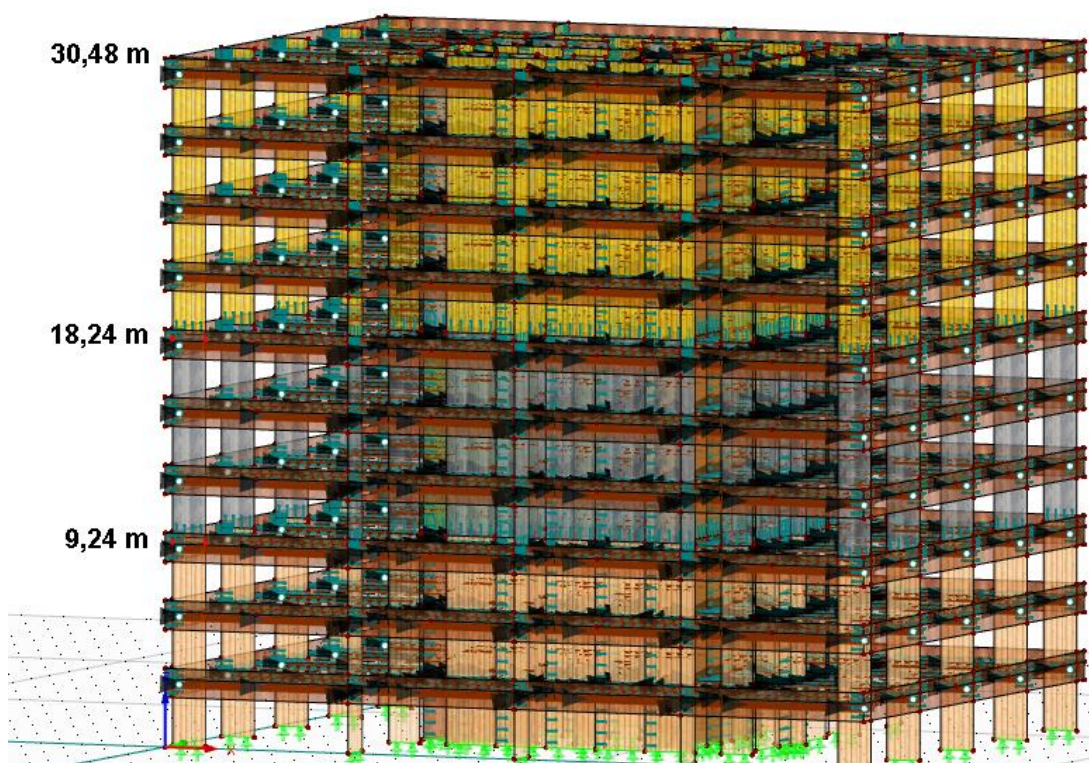


Fig. 85 – Modelo tridimensional do edifício proposto - localização das descontinuidades/ligações entre os painéis de parede pertencentes aos pisos 1-3 (bege), 4-6 (cinza) e 7-10 (amarelo).

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Para além do sistema de vigas duplas presentes na planta estrutural do edifício, foi necessário adicionar vigas de madeira lamelada colada para efetuar a distribuição das cargas para as paredes CLT nas zonas de escadas e caixas de elevadores (ver Fig. 86). Foram ainda adicionadas 4 vigas (ver Fig. 86 (2)) para efetuar a ligação entre os pilares CLT e as paredes pertencentes ao núcleo central e à caixa de elevadores, formando assim um núcleo central fechado com 13,22 m por 7,95 m (sem a inclusão das 3 coretes afastadas do núcleo central).

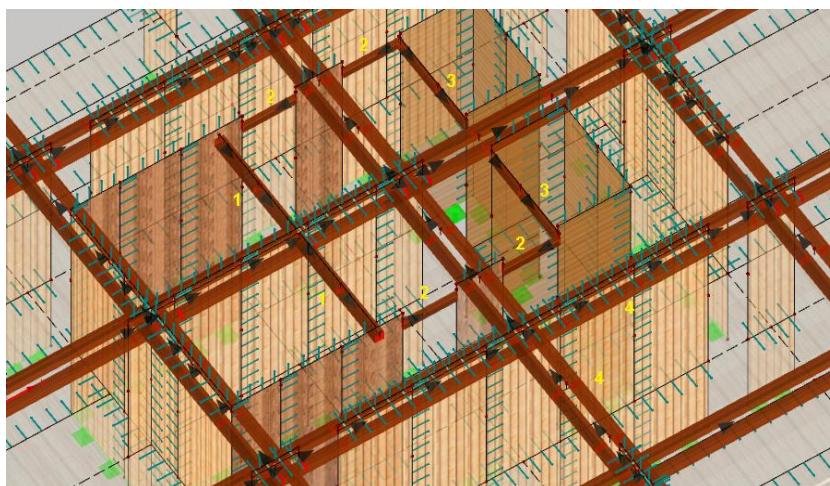


Fig. 86 – Numeração dos diferentes tipos de vigas de madeira lamelada colada existentes no sistema estrutural: (1) Vigas de suporte das escadas; (2) Vigas núcleo central; (3) Vigas caixa de elevadores e (4) Vigas duplas.

Tabela 18 – Secção transversal e espaçamento das vigas do sistema estrutural.

Elemento estrutural	Secção transversal		
	Base (mm)	Altura(mm)	Espaçamento entre vigas (mm)
Vigas de suporte das escadas (1)	300	300	-
Vigas núcleo central (2)	160 ¹	300	-
Vigas caixa de elevadores (3)	160	300	-
Vigas duplas (4)	300	300	600 ²

¹ A base varia consoante a espessura das paredes do núcleo central.

² O espaçamento entre vigas varia consoante a espessura dos pilares CLT.

5.3.3. DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES

5.3.3.1. AÇÕES PERMANENTES

Uma vez que as ações permanentes dependem das seções transversais dos painéis CLT, apenas serão apresentadas as ações permanentes para a solução final obtida após a fase de pré-dimensionamento da estrutura. De referir que a espessura dos elementos estruturais CLT apresentados na Tabela 20 e na Tabela 21 é referente aos painéis de parede situados entre os pisos 1-3 da estrutura de madeira (sem considerar o 1º piso e as fundações que são em betão armado), havendo variações na espessura para os pisos 4-6 e 7-10 do edifício.

Tabela 19 – Ações permanentes dos pavimentos interiores

Composição do pavimento interior			
Espessura (mm)	Material	Peso (kg/m³)	Carga (kN/m²)
16	Soalho (faia-europeia - <i>Fagus sylvatica L.</i>)	720 kg/m ³	0,1152
2 x 12	Placas de OSB	640 Kg/m ³	0,1536
2 x 2.5	Subpavimento em cortiça - AcoustiCORK C31	150-200 kg/m ³	0,01
280	CLT (Abeto) – L7s-2 (stora enso) 80/40/40/40/80	480-500 kg/m ³	1,4
13	Gesso cartonado – Pladur® N 13	750-800 kg/m ³	0,104
	Tubos e condutas ¹		0,5
		Total	2,28
		Total (sem CLT)	0,88

¹ A fim de ter em conta as cargas adicionais provenientes dos tubos e condutas para serviços, são adicionados 0,5 kN/m² às ações permanente dos pavimentos interiores .

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 20 – Ações permanentes dos pilares CLT.

Pilares CLT e Coretes			
Espessura(mm)	Material	Peso (kg/m³)	Carga (kN/m²)
15	Gesso cartonado contra fogo, tipo Pladur® A1 15	1000kg/m ³	0,15
300	CLT (Abeto) – L8s-2 (stora enso) 80/30/80/30/80	480-500 kg/m ³	1,5
15	Gesso cartonado contra fogo, tipo Pladur® A1 15	1000kg/m ³	0,15
		Total	1,80
		Total (sem CLT)	0,30

Tabela 21 – Ações permanentes das paredes do núcleo central.

Paredes do núcleo central			
Espessura (mm)	Material	Peso (kg/m³)	Carga (kN/m²)
15	Gesso cartonado contra fogo, tipo Pladur® A1 15	1000kg/m ³	0,15
140	CLT (Abeto) – L5s (stora enso) 40/20/20/20/40	480-500 kg/m ³	0,7
15	Gesso cartonado contrafogo, tipo Pladur® A1 15	1000kg/m ³	0,15
		Total	1,00
		Total (sem CLT)	0,30

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 22 – Ações permanentes das paredes da caixa de elevadores.

Paredes da caixa de elevadores			
Espessura (mm)	Material	Peso (kg/m³)	Carga (kN/m²)
15	Gesso cartonado contrafogo, tipo Pladur® A1 15	1000kg/m ³	0,15
320	CLT (Abeto) – L8s-2 (stora enso) 80/40/80/40/80	480-500 kg/m ³	1,6
-	Elevador ¹	1020 kg	0,042
		Total	1,792
		Total (sem CLT)	0,192

¹ Foi admitida uma carga permanente de 10 kN para cada elevador sendo o seu peso distribuído pelas respetivas paredes da caixa de elevadores.

Tabela 23 – Ações permanentes das fachadas.

Fachadas			
Espessura (mm)	Material	Peso (kg/m^{2/3})	Carga (kN/m²)
	Fachada cortina mista vidro/madeira tipo Uniglas façade	80 kg/m ²	0,8
	Caixilharia interior em madeira + vidro (8 + 8 mm)	50 kg/m ²	0,5
160	CLT (Abeto)L5s (stora enso) 40/20/40/20/40	480-500 kg/m ³	0,8
		Total	2,1
		Total (sem CLT)	1,3

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 24 – Ações permanentes da cobertura.

Composição da cobertura			
Espessura (mm)	Material	Peso (kg/ m³)	Carga (kN/m²)
50	Placas de betão pré-fabricadas+ estrutura de fixação	105 kg/m ²	1,05
2 x 80	Isolamento térmico rígido	35kg/m ³	0,056
2x 3.3	Membrana impermeabilizante autoadesiva à base de betume, tipo BYTUM SLATE 3500	3.5kg/m ²	0,035
280	CLT (Abeto) – L7s-2 (stora enso) 80/40/40/40/80	480-500 kg/m ³	1,4
13	Gesso cartonado – Pladur® N 13	750-800 kg/m ³	0,104
		Total	2,645
		Total (sem CLT)	1,245

Tabela 25 – Ações permanentes das caixas de escadas.

Caixa de escadas			
Espessura (mm)	Material	Peso (kg/m³)	Carga (kN/m²)
2	Piso vinílico	2.5kg/m ²	0,025
200	CLT (Abeto) – L5s- (stora enso) 40/40/40/40/40 + degraus (166,7:300 mm)	480-500 kg/m ³	1,33
13	Gesso cartonado – Pladur® N 13	750-800 kg/m ³	0,104
		Total	1,459
		Total (sem CLT)	0,129

5.3.3.2. AÇÕES VARIÁVEIS

5.3.3.2.1. CARGAS RESIDENCIAIS IMPOSTAS NOS PAVIMENTOS

De acordo com a EN 1991-1-1:2002 o edifício multifamiliar proposto é englobado na categoria de uso A e as cargas residenciais impostas nos pavimentos CLT podem ser identificadas na Tabela 26.

Tabela 26 – Cargas impostas em pavimentos, varandas e escadas em edifícios (EN 1991-1-1:2002).

Categories of loaded areas	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Category A		
- Floors	1,5 to <u>2,0</u>	<u>2,0</u> to 3,0
- Stairs	<u>2,0</u> to 4,0	<u>2,0</u> to 4,0
- Balconies	2,5 to 4,0	<u>2,0</u> to 3,0

Segundo o ponto 6.3.1.2 (8) do EN 1991-1-1:2002 para paredes divisórias móveis com um peso próprio inferior ou igual a 1,0 kN/m é considerada uma carga variável residencial adicional de $q_k = 0,5$ kN/m² aos pavimentos da estrutura. Assim, os pavimentos CLT serão sujeitos a uma carga variável residencial de $q_k=2,5$ kN/m² e nas caixas de escadas serão aplicadas cargas lineares ao longo das paredes e vigas de suporte, sendo o valor dessas cargas referente à carga variável uniformemente distribuída de $q_k=2,0$ kN/m². As fachadas são constituídas por uma parede de cortina contínua simples (ver Fig. 82, 3ª imagem), não existindo qualquer tipo de varandas na estrutura.

5.3.3.2.2. CARGAS IMPOSTAS NA COBERTURA

Segundo o EN 1991-1-1, a cobertura do edifício pertence à categoria H, referente a coberturas não acessíveis, exceto para manutenção e reparo. Assim, para a categoria H é recomendada uma carga variável imposta com um valor de: $q_k=0,4$ kN/m².

5.3.3.2.3. AÇÃO DA NEVE

O software *RFEM 5* possui um gerador automático da ação da neve para coberturas planas. Como é ilustrado na Fig. 87 o software gera a ação da neve através da EN 1991-1-3 e permite ao utilizador definir qual o anexo nacional a considerar, sendo escolhido o anexo nacional português. De seguida é necessário definir o número da zona em que se encontra o edifício em

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

estudo. Como o edifício será localizado em Lisboa a zona Z3 foi selecionada. O próximo passo foi definir a altitude a que o edifício se encontra. Como não foram fornecidas as coordenadas exatas da localização do edifício foi assumida uma altitude de 100 m para a zona de Lisboa.

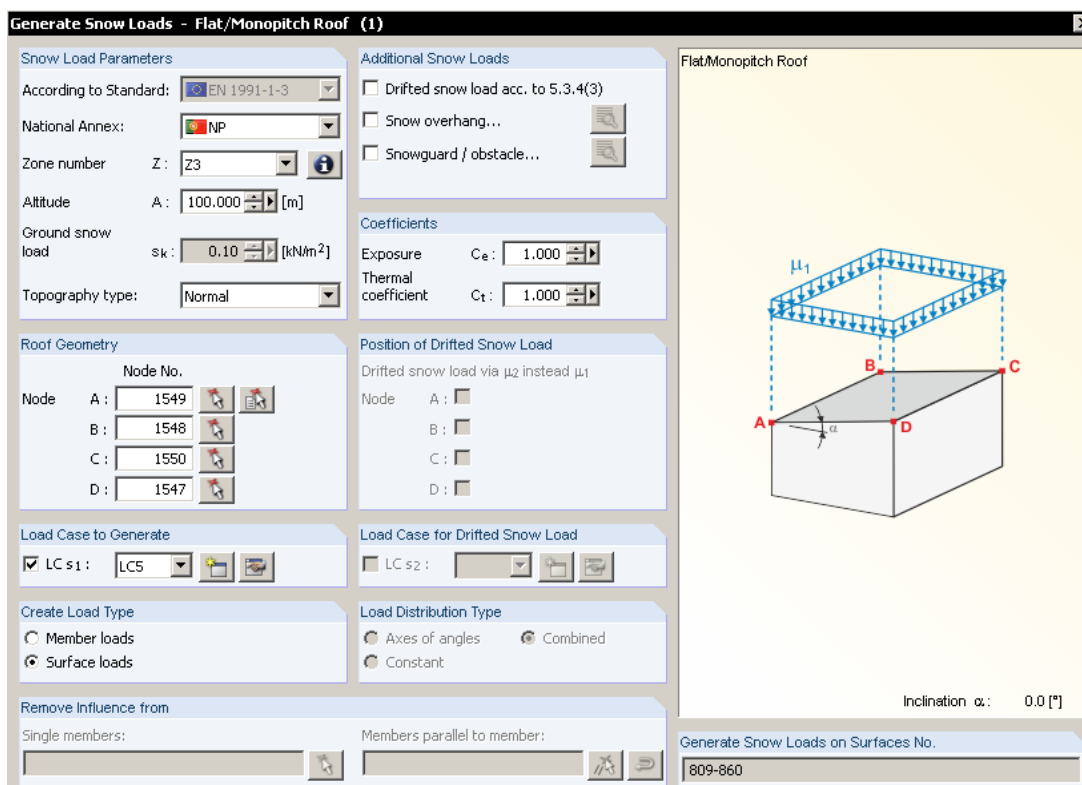


Fig. 87 – Gerador automático da ação da neve para coberturas planas (*RFEM-5*).

Por ultimo foram definidos os nós da cobertura (A, B, C, D) e ação da neve foi associada à combinação LC5. O valor obtido pelo gerador automático do *RFEM-5* para a ação da neve foi de: $s_k=0,08 \text{ kN/m}^2$.

5.3.3.2.4. AÇÃO DO VENTO NAS FACHADAS

Tal como acontece para a ação da neve, o software *RFEM 5* também possui um gerador automático da ação do vento para edifícios com coberturas planas.

Como é ilustrado na Fig. 88, o software gera a ação do vento através da EN 1991-1-4, sendo novamente selecionado o anexo nacional português. De seguida é necessário definir a zona de vento em que se encontra o edifício em estudo. Como o edifício será localizado em Lisboa a zona A foi selecionada. O próximo passo foi definir a categoria do terreno IV por se tratar de

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

uma área urbana com mais de 15% da área coberta por edifícios com altura média superior a 15m. Uma vez que os edifícios multifamiliares CLT não devem estar em contacto com o solo, devido aos problemas associados à presença de humidade na madeira, foi acrescentado um piso em betão armado na base da estrutura. Portanto o edifício atinge uma envergadura total de 33,48 m, devido a um acréscimo de 3 m pertencentes ao 1º piso em betão armado.

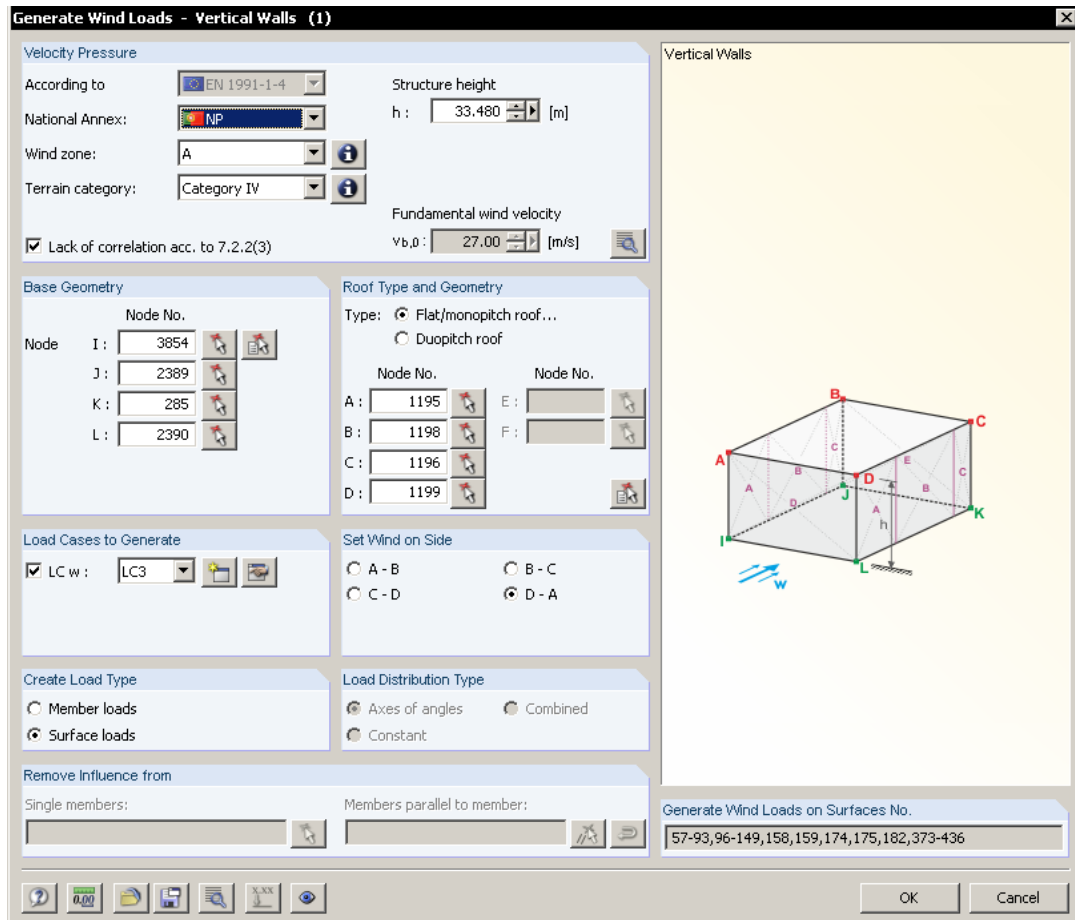


Fig. 88 – Gerador automático da ação do vento para as fachadas (RFEM-5)

Foram definidos os nós da base (I, J, K, L) e os nós da cobertura (A, B, C, D). A ação do vento foi considerada segundo a direção X (D-A) e segundo a direção Y (A-B). A ação do vento na direção X foi associada à combinação LC3 e a LC4 foi associada à ação do vento na direção Y. Os valores obtidos pelo gerador automático do RFEM-5 para a ação da vento são apresentados na Tabela 27 e variam conforme as zonas A, B, C, D e E.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Tabela 27 – Ação do vento nas fachadas.

Zona	LC3 – Vento em X	LC4 – Vento em Y
A	$w_k = 1,11 \text{ kN/m}^2$	$w_k = 1,11 \text{ kN/m}^2$
B	$w_k = 0,74 \text{ kN/m}^2$	$w_k = 0,74 \text{ kN/m}^2$
C	$w_k = 0,39 \text{ kN/m}^2$	$w_k = 0,74 \text{ kN/m}^2$
D	$Z > 24.2\text{m}: w_k = - 0,63 \text{ kN/m}^2$	$w_k = - 0,64 \text{ kN/m}^2$
	$Z < 24.2\text{m}: w_k = - 0,56 \text{ kN/m}^2$	
E	$w_k = 0,46 \text{ kN/m}^2$	$w_k = 0,41 \text{ kN/m}^2$

5.3.3.2.5. AÇÃO DO VENTO NA COBERTURA

A Fig. 89 ilustra o processo de geração da ação do vento na cobertura plana, sendo muito semelhante ao descrito no tópico anterior. A única diferença passa por considerar a inclusão de um parapeito com 0,48 m, referente às vigas perimetrais profunda CLT.

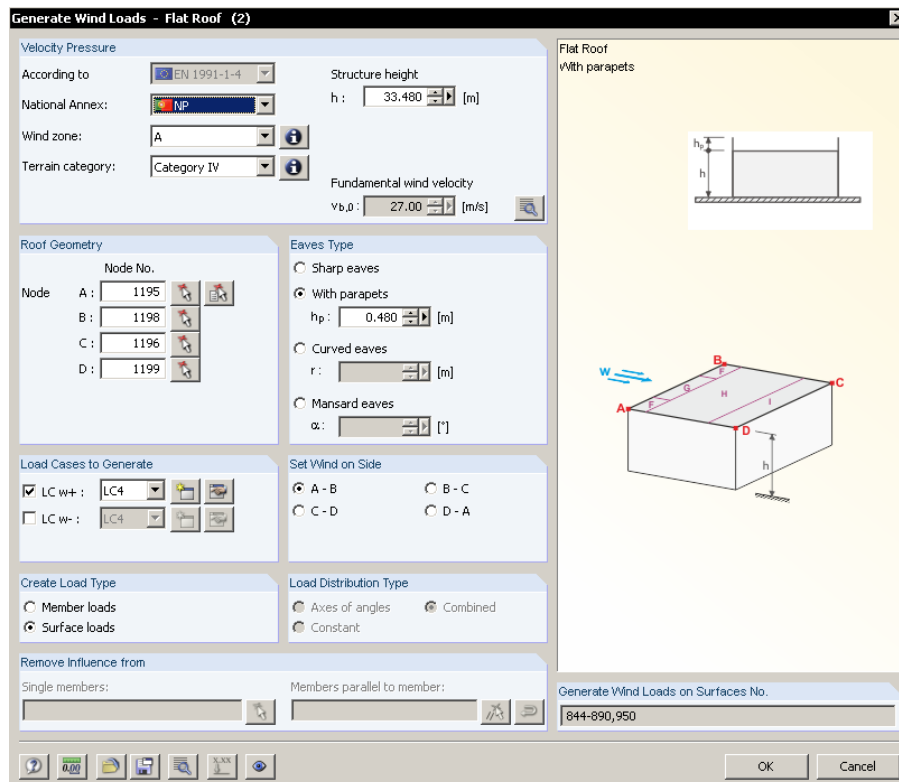


Fig. 89 – Gerador automático da ação do vento para a cobertura plana com parapeito (RFEM-5).

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Os valores obtidos pelo gerador automático do *RFEM-5* para a ação da vento na cobertura são apresentados na Tabela 28 e variam conforme as zonas F, G, H e I.

Tabela 28 – Ação do vento na cobertura.

Zona	LC3 – Vento em X	LC4 – Vento em Y
F	$w_k = 1,56 \text{ kN/m}^2$	$w_k = 1,56 \text{ kN/m}^2$
G	$w_k = 1,06 \text{ kN/m}^2$	$w_k = 1,06 \text{ kN/m}^2$
H	$w_k = 0,65 \text{ kN/m}^2$	$w_k = 0,65 \text{ kN/m}^2$
I	$w_k = -0,19 \text{ kN/m}^2$	$w_k = -0,19 \text{ kN/m}^2$

5.3.4. PRÉ-DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Nos seguintes tópicos as paredes estruturais e os pavimentos CLT serão analisados em termos da sua capacidade de carga a ações verticais. Por outra palavras, os elementos estruturais serão analisados e, se necessário, modificados no contexto dos seus estados limite últimos (ELU) e dos seus estados limite de serviço (SLS). De referir que se trata apenas de um mero pré-dimensionamento estrutural sem ter em consideração as ações laterais na estrutura. As ações laterais serão consideradas para o dimensionamento estrutural numa fase posterior, nomeadamente, após a obtenção dos esforços nos elementos estruturais através de um modelo tridimensional de elementos finitos, considerando todas ligações entre os elementos estruturais rígidas.

5.3.4.1. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS CLT

Para poder avaliar as dimensões necessárias dos elementos CLT e das vigas de madeira lamelada colada foram usadas para o cálculo as classes de resistência C24 e GL24h, respetivamente. Uma vez que as propriedades do CLT não se encontram padronizadas, foi selecionada empresa Stora Enso como fornecedora dos painéis CLT. O pré-dimensionamento dos pavimentos CLT foi realizado através do software de cálculo *Calculatis*, desenvolvido no *Institute for Timber Engineering* e na *Wood Technology of Graz University*. O software encontra-se disponibilizado gratuitamente no site da empresa Stora Enso (*Calculatis* software – Stora Enso).

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Embora possa ser utilizado um comportamento estrutural bidimensional para criar um dimensionamento económico estrutural dos sistemas de pavimentos CLT, este pré-dimensionamento é restrito a um sistema de viga unidimensional utilizando uma faixa de pavimento com 1m de largura. Vale a pena mencionar que o sistema de viga unidirecional é considerado um método de dimensionamento conservador, uma vez que este considera a situação mais desfavorável no contexto da elevada importância dos estados limite de serviço (SLS). Desta forma, foi efetuado o pré-dimensionamento apenas para o vão contínuo que apresenta maior extensão dos respetivos vãos do sistema de pavimento (ver Fig. 90)

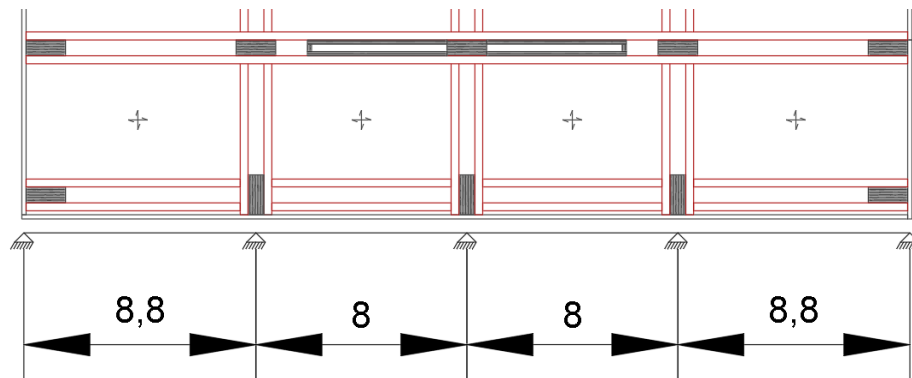


Fig. 90 – Vão contínuo sujeito ao pré-dimensionamento (distâncias em metros).

O software de cálculo *Calculatis* possui uma opção de otimização que determina as 3 melhores opções de acordo com as verificações do painel CLT aos ELU, ELU fogo, ELS e à vibração. Assim, o utilizador apenas tem de definir alguns parâmetros para obter os resultados de acordo com uma base de dados que possui todas as seções CLT produzidas pela empresa Stora Enso. Para o pré-dimensionamento do pavimento foram inseridos os seguintes parâmetros: Classe de resistência C24 – abeto; Cargas: Peso próprio adicional do pavimento, $g_{2,k} = 0,88 \text{ kN/m}^2$ e carga residencial imposta, $q_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$; Vibração: Coeficiente de amortecimento, $\xi = 5\%$ e largura total do pavimento de 6,3 m; ELU fogo: classe de resistência ao fogo de 120 min – R120 e placa de gesso 12,5 mm tipo A. Os valores da deformação permitida para o ELS já se encontram pré-definidos no software ($w_{\text{int}} = L/300$; $w_{\text{net,fin}} = L/250$ e $w_{\text{fin}} = L/150$).

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.



Fig. 91 – Resultados obtidos no software *Calculatis* para os pavimentos CLT

O software indica 3 possibilidades para a espessura do pavimento: CLT 240 L7s (98%), CLT 260 L7s-2 (98%) e CLT 280 L7s-2 (91%). Analisando os resultados das 3 soluções pode-se afirmar que o dimensionamento é governado pelos ELS, mais concretamente pela vibração. O painel CLT 240 L7s e CLT 260 L7s-2 apresentam a mesma percentagem de utilização (98%), isto deve-se ao facto de a verificação dos dois painéis à vibração ser idêntica, contudo o painel com menor espessura apresenta uma percentagem de utilização de 93% aos ELS, bastante superior aos 52% do painel CLT 260 L7s-2 (ver Fig. 91). Uma vez que o dimensionamento de estruturas CLT é tipicamente governado pelos ELS, o painel CLT 240 L7s foi excluído por estar muito próximo do limite da verificação aos ELS, sendo admitido o painel CLT 260 L7s-2 para todos os painéis de pavimento da estrutura.

5.3.4.2. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES CLT

Ao contrário dos pavimentos CLT, os painéis de parede são pré-dimensionados para um comportamento estrutural bidirecional dos pavimentos. Isto significa que os painéis de parede situados perpendicularmente à direção principal dos painéis de pavimento CLT, também são

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

influenciados pela ação vertical dos pavimentos. Foi utilizado o programa de elementos finitos REFEM-5 para determinar as forças verticais das paredes em relação à tensão do pavimento predominante, através de um modelo 3D de um piso inteiro do edifício proposto. Neste modelo foi aplicada ao pavimento CLT uma carga unitária de 1 kN/m^2 . Os valores das reações obtidas para cada painel de parede podem ser consideradas como coeficientes de influência a utilizar nos cálculos do pré-dimensionamento. A Fig. 92 representa o modelo tridimensional de um piso do edifício proposto, com a carga unitária uniformemente distribuída aplicada em todo o pavimento CLT.

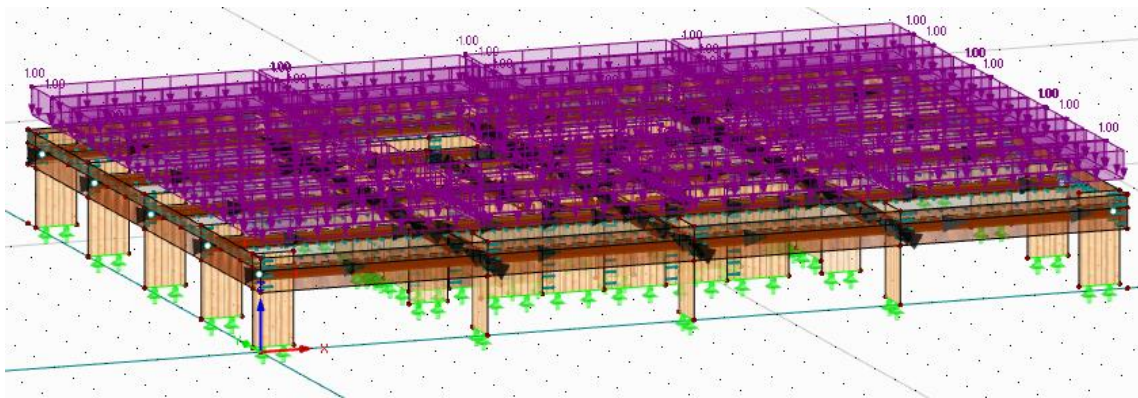


Fig. 92 – Modelo tridimensional de um único piso do edifício proposto pelo *UT system*, usando o programa *RFEM-5*.

Como pode ser constatado na Fig. 92, os painéis de parede são fixados através de apoios articulados lineares, produzindo forças de reação com uma determinada carga por metro. De referir que estas cargas são inconstantes (geralmente mais elevadas nas extremidades das paredes livres) devido à geometria do piso. Assim, foi efetuada a média das forças de reação para as paredes sujeitas ao pré-dimensionamento. Devido ao elevado número de painéis de parede foram apenas selecionados aqueles que possuem o maior valor de coeficiente de influência para cada categoria de paredes : pilares CLT e coretes , paredes do núcleo central e caixa de elevador (ver Fig. 93, paredes selecionadas a vermelho).

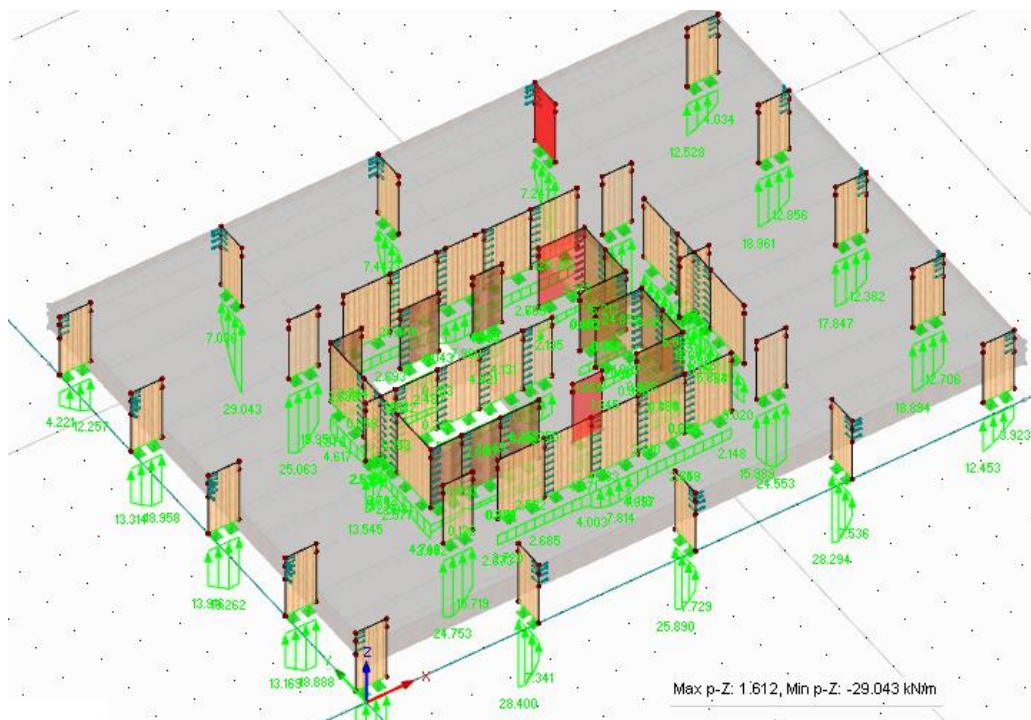


Fig. 93 – Paredes com maior coeficiente de influência de acordo com as 3 categorias (Núcleo central, caixa de elevador, pilares e coretes) existentes na estrutura.

Com o intuito de considerar o peso próprio da fachada para o cálculo das forças internas de dimensionamento do pilar CLT mais solicitado, foi determinado um novo coeficiente de influência, sendo este referente à aplicação de uma carga unitária uniformemente distribuída de 1kN/m^2 na fachada do edifício. A carga foi aplicada nas vigas profunda CLT perimetrais, tendo sido convertida para o valor $2,35\text{ kN/m}^2$, referente ao quociente entre o a distância entre pisos (3m) e a altura da viga (1,28 m).

Tabela 29 – Valor médio dos coeficientes de influência para as três paredes mais solicitadas de acordo com as diferentes categorias.

Tipo de parede	Coeficiente de influência (carga residencial imposta e neve)	Coeficiente de influência (Peso próprio da fachada)
Núcleo central (N.C.)	5,28	-
Caixa de elevador (C.E.)	1,4	-
Pilar \perp à fachada (P.)	19,84	16,38

5.3.4.2.1. DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS INTERNAS DE DIMENSIONAMENTO

Como seria de esperar, os esforços axiais mais elevados, $\max n_{y, dN}$, ocorrem nas paredes situadas ao nível do rés-do-chão, sendo esses valores determinados através da seguinte combinação de ação (ação variável principal: carga residencial).

$$E_d = \sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} \cdot G_{k,i} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (76)$$

As ações permanentes e variáveis foram definidas no tópico 5.3.3 e encontram-se resumidas na Tabela 30.

Tabela 30 – Ações atuantes nos elementos de parede

Ação	Peso (kN/m ²)	Permanente	Variável
Peso total da cobertura plana, $G_{k,1}$	2,65	x	
Peso total do pavimento interior + condutas, $G_{k,2}$	2,28	x	
Peso total da paredes interna (P./N.C./C.E.), $G_{k,3}$	1,8 / 1,0 / 1,9	x	
Peso total da viga CLT profunda + fachada, $G_{k,4}$ ¹	2,1	x	
Carga residencial Imposta + P. divisórias, $Q_{k,1}$	2,5		x
Neve, $Q_{k,2}$	0,08		x

¹ A carga $G_{k,4}$ apenas é tida em consideração no pré-dimensionamento da parede da categoria: Pilar (\perp à fachada)

Como já foi referido anteriormente as paredes das estruturas apresentam 2 descontinuidades ao longo da envergadura do edifício. Para otimizar as seções dos painéis, torna-se necessário determinar os esforços axiais máximos para os três segmentos das paredes CLT mais esforçadas de cada categoria.

O cálculo do esforço axial máximo para o pilar CLT perpendicular à fachada mais esforçado é efetuado através da seguinte metodologia:

1º segmento do pilar (entre os pisos 1-3)

$$\max n_{y,dN} = 1,35 \cdot (G_{k,1} + n \cdot G_{k,2}) \cdot 19,84 + 1,35 \cdot (G_{k,3} \cdot n_{tot} \cdot h) + 1,35 \cdot (G_{k,4} \cdot n_{tot}) \cdot 16,38 + 1,5 \cdot Q_{k,1} \cdot n + 1,5 \cdot 0,5 \cdot Q_{k,2} \quad (77)$$

Onde: n é o número de pavimentos suportados pelo segmento, sem incluir a cobertura e n_{tot} é o número de pavimentos suportados pelo segmento, incluindo a cobertura.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$\begin{aligned} \max n_{y,dN} &= 1,35 \cdot (2,65 + 9 \cdot 2,28) \cdot 19,84 + 1,35 \cdot (1,8 \cdot 10 \cdot 3) + 1,35 \\ &\quad \cdot (2,1 \cdot 10) \cdot 16,74 + 1,5 \cdot 2,5 \cdot 9 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 0,08 \\ &= 1828,6 \text{ kN/m} \end{aligned} \quad (78)$$

2º segmento do pilar (entre os pisos 4-6)

$$\begin{aligned} \max n_{y,dN} &= 1,35 \cdot (2,65 + 6 \cdot 2,28) \cdot 19,84 + 1,35 \cdot (1,8 \cdot 7 \cdot 3) + 1,35 \\ &\quad \cdot (2,1 \cdot 7) \cdot 16,74 + 1,5 \cdot 2,5 \cdot 6 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 0,08 \\ &= 1252,6 \text{ kN/m} \end{aligned} \quad (79)$$

3º segmento do pilar (entre os pisos 7-10)

$$\begin{aligned} \max n_{y,dN} &= 1,35 \cdot (2,65 + 3 \cdot 2,28) \cdot 19,84 + 1,35 \cdot (1,8 \cdot 4 \cdot 3) + 1,35 \\ &\quad \cdot (2,1 \cdot 4) \cdot 16,74 + 1,5 \cdot 2,5 \cdot 3 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 0,08 \\ &= 682,1 \text{ kN/m} \end{aligned} \quad (80)$$

Os restantes valores dos esforços axiais máximo para as outras 2 paredes são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Esforços axiais máximo obtidos para cada segmento da parede mais esforçada de cada categoria.

Esforço axial máximo, E_d (kN/m)			
Categoria	1º segmento (1-3)	2º segmento (4-6)	3º segmento (7-10)
Pilar	1828,6	1252,6	682,1
Núcleo central	384,2	261,0	139,5
Caixa de elevador	168,1	116,3	64,6

O pré-dimensionamento das paredes foi realizados através do software de cálculo *Calculatis* através da introdução dos esforços axiais máximos calculados para cada segmento das 3 paredes mais solicitadas. A Tabela 32 apresenta as seções adotadas, bem como a respetiva percentagem de verificação aos ELU (compressão e encurvadura) dos painéis de parede.

Tabela 32 – Percentagem de utilização das seções adotadas aos ELU.

Categoria	Seções adotadas	Verificação aos ELU (%)
Pilar	CLT 300 L8s-2	80%
	CLT 240 L7s-2	69%
	CLT 160 L5s	79%
Núcleo central	CLT 140 L5s	59%
	CLT 120 L5s	62%
	CLT 90L3s	67%
Caixa de elevador	CLT 320 L8s-2	7%
	CLT 320 L8s-2	5%
	CLT 320 L8s-2	3%

Um aspeto importante a referir é que o pré-dimensionamento apenas tem em consideração as ações gravíticas. Portanto, as seções adotadas para as paredes estruturais não se encontram otimizadas, uma vez que, para isso é necessário também a determinação das tensões originadas pelas ações laterais na estrutura. A utilização de uma secção com elevada rigidez para as caixas de elevadores é fundamental para o comportamento das estruturas às ações laterais do vento e sismo. Assim, é adotada uma secção constante ao longo da envergadura do edifício com 320 mm de espessura, apesar da reduzida solicitação da secção aos carregamentos gravíticos.

5.3.5. VERIFICAÇÃO DO MODELO TRIDIMENSIONAL

Com o intuito de validar o material CLT foram comparados os resultados obtidos no software de elementos finitos *RFEM 5 – RF-Laminate* com aqueles obtidos por processos analíticos e pelo software *Calculatis* (software de dimensionamento de elementos simples CLT). Os resultados obtidos encontram-se em anexo no tópico 8.4 e são referente às tensões numa laje CLT sujeita à flexão e numa parede CLT sujeita à compressão e flexão no plano. Posteriormente, foi criado um modelo tridimensional para o primeiro piso do edifício proposto,

servindo como modelo base para os restantes. Todos os painéis CLT (pavimentos, paredes e vigas altas) foram inseridos através de elementos de superfície lamelada (*laminated surface elements*) com recurso ao módulo adicional *RF-Laminate* do software *RFEM-5*. O material selecionado para todos os painéis CLT do modelo foi a madeira da classe C24 e as propriedades do CLT estão em conformidade com valores fornecidos pela empresa Stora Enso (ver Tabela 33). Para a inserção das vigas duplas de madeira lamelada colada o software apresenta uma biblioteca onde se pode encontrar uma secção transversal de vigas duplas retangulares de madeira espaçadas segundo um determinado espaçamento. Para as vigas adicionais (caixa de escadas, caixa de elevadores e vigas do núcleo central, ver Fig. 86) foram adotadas vigas únicas retangulares. O material selecionado para todas as vigas do modelo foi a madeira lamelada colada da classe GL24h e as suas propriedades estão em conformidade com a norma EN 1995-1-1:2009-10.

A modelação do edifício proposto passará por duas fases distintas: inicialmente as ligações dos elementos estruturais são consideradas rígidas (modelo rígido) e numa segunda fase será tida em consideração a rigidez das ligações (modelo flexível). Através dos esforços internos obtidos no modelo rígido será possível efetuar o pré-dimensionamento das ligações para o modelo flexível.

As ligações entre os diversos painéis CLT no modelo base foram assumidas como rígidas, apesar de não ser de toda uma situação realística. Os painéis CLT são geralmente ligados entre si através de parafusos auto-perfurantes totalmente roscados, contudo este tipo de ligações não restringe as rotações segundo o eixo da ligação entre os painéis. Desta forma, com o objetivo de tornar o modelo mais realista, foram libertadas as rotações em “x” (ϕ_x), através de *line hinges* (ver Fig. 94 – pequenos traços a azul claro), para todas as ligações entre painéis CLT, tornando as ligações do modelo rígido mais realista.

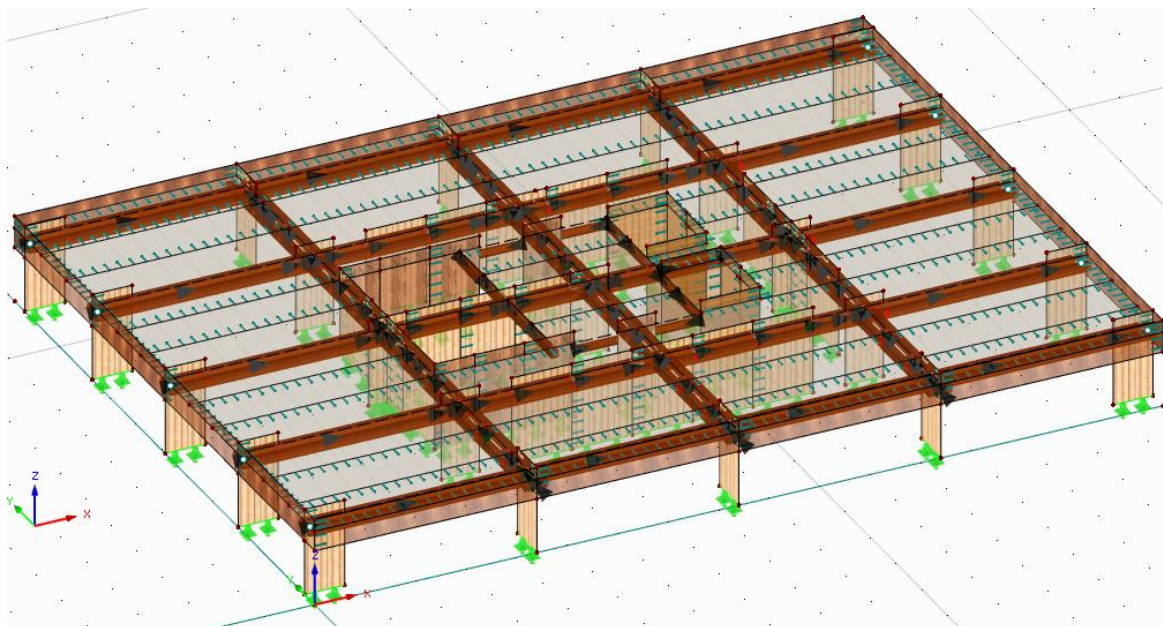


Fig. 94 – Representação gráfica de todas as rotações φ_x (*line hinges*) libertadas entre os elementos estruturais do modelo tridimensional base rígido.

Todas as vigas presentes na estrutura encontram-se posicionadas imediatamente abaixo dos painéis de pavimento, tendo sido definido que a face superior das vigas coincida com a face inferior do pavimento. Uma vez que os painéis de pavimento CLT são apoiados nas vigas duplas e ligados através de cavilhas é uma vez mais importante libertar as rotações em “x” (com recurso a *line releases*) dos painéis de pavimento que estão em contacto com as vigas duplas (ver Fig. 95). Esta abordagem permite prevenir a transferência de momentos dos pavimentos para as vigas, obtendo-se uma modelação simples do efeito contínuo do pavimento, sem a utilização de elementos de ligação.

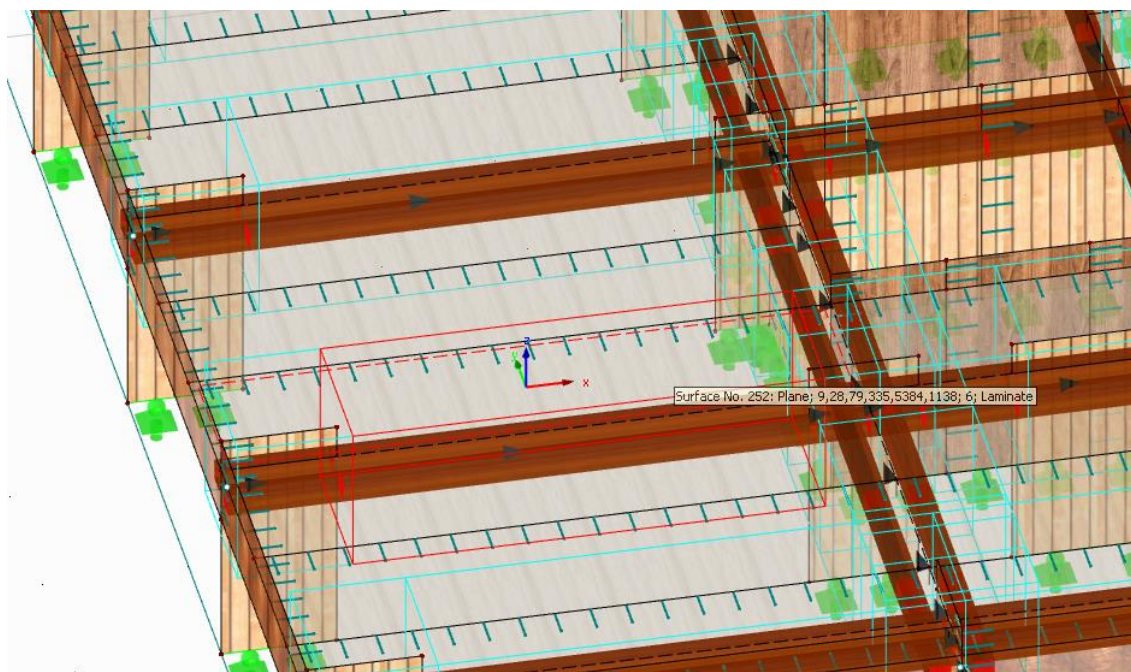


Fig. 95 – Representação gráfica da libertação das rotações φ_x (*line release*) entre os pavimentos (superfície 252 e 253) que estão conectados às vigas duplas.

As ligações entre as vigas e as paredes CLT são assumidas como rígidas nesta fase preliminar, sendo a sua rigidez quantificada numa fase mais avançada da modelação. Os pavimentos CLT foram ligados rigidamente às paredes CLT por questões de simplificação na modelação. A separação entre os painéis de pavimentos e as paredes estruturais tornaria o modelo demasiado complexo, devido ao elevado número de elementos de ligação necessários para efetuar a ligação entre as vigas duplas e as paredes CLT.

Por último, as extremidades das vigas duplas de madeira lamelada colada foram ligadas às vigas altas CLT perimetrais através de ligação articulada, com intuito de eliminar a ocorrência da transferência de momentos entre os dois elementos estruturais.

5.3.6. RESULTADOS DO MODELO BASE

O principal objetivo da criação do modelo base passa pela verificação aos ELU dos pavimentos CLT quando sujeitos à combinação fundamental $1,35 G_k + 1,5 Q_k$. Desta forma, os valores de pré-dimensionamento obtidos através do software *Calculatis* serão comparados com os valores obtidos através do software de elementos finitos *RFEM-5*, recorrendo ao módulo adicional *RF-Laminate*. A Tabela 33 apresenta a secção transversal/espessura de todos elementos estruturais

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

inseridos no modelo tridimensional de 1 piso. A Fig. 96 apresenta os tensões máximas atuantes para a combinação fundamental $1,35 G_k + 1,5 Q_k$. Após uma cuidada análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que os pavimentos são os elementos estruturais mais solicitados, não sendo totalmente verificados aos ELU. Isto deveu-se à presença de elevadas tensões de compressão + flexão (1,28) localizadas nas camadas ortogonais (90°) dos painéis pavimento junto às aberturas das caixa de escadas (ver Fig. 97)

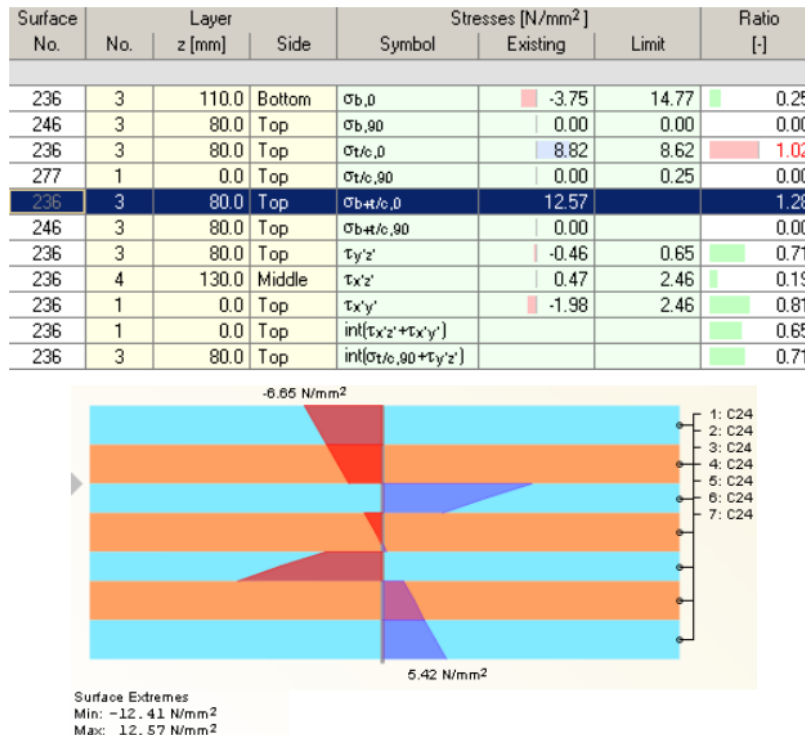


Fig. 96 – RF- Laminate: resultados máximos obtidos para a combinação fundamental $1,35 G_k + 1,5 Q_k$.

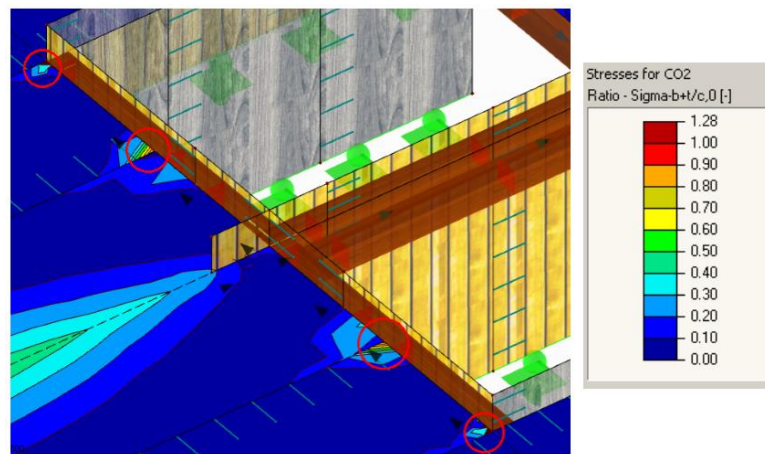


Fig. 97 – Localização dos painéis de pavimento cujas tensões de compressão + flexão não foram verificadas aos ELU.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

As deformações máximas ocorrem aproximadamente a meio vão dos painéis CLT de pavimento que se encontram junto à abertura da caixa de escadas (ver Fig. 98). As ações permanentes e de sobrecarga de utilização provocam deformações instantâneas máximas na ordem dos 23,4 mm nos pavimentos CLT. Analisando os resultados pode-se afirmar que seria prudente aumentar a espessura dos painéis de pavimento de modo a controlar as deformações máximas a meio vão e com o intuito de verificar as tensões de compressão nas camadas ortogonais dos painéis junto às aberturas das caixas de escadas. Uma vez que se trata de um modelo com ligações rígidas entre os painéis CLT as deformações obtidas não representam a realidade. Portanto, a consideração da rigidez efetiva das ligações entre os painéis CLT contribui para um aumento significativo das deformações, tornando as estruturas em CLT geralmente condicionadas pelos ELS. Pelos motivos supramencionados, a espessura dos painéis de pavimento foi aumentada para 280 mm.

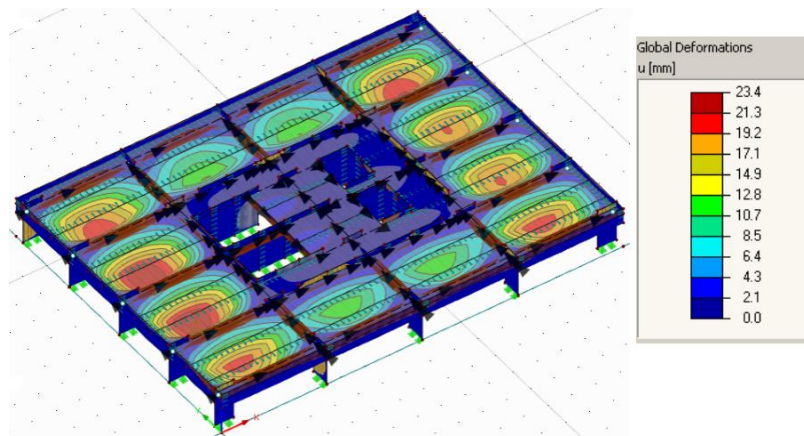


Fig. 98 – Deformações nos elementos estruturais devido à combinação $1,35 G_k + 1,5 Q_k$.

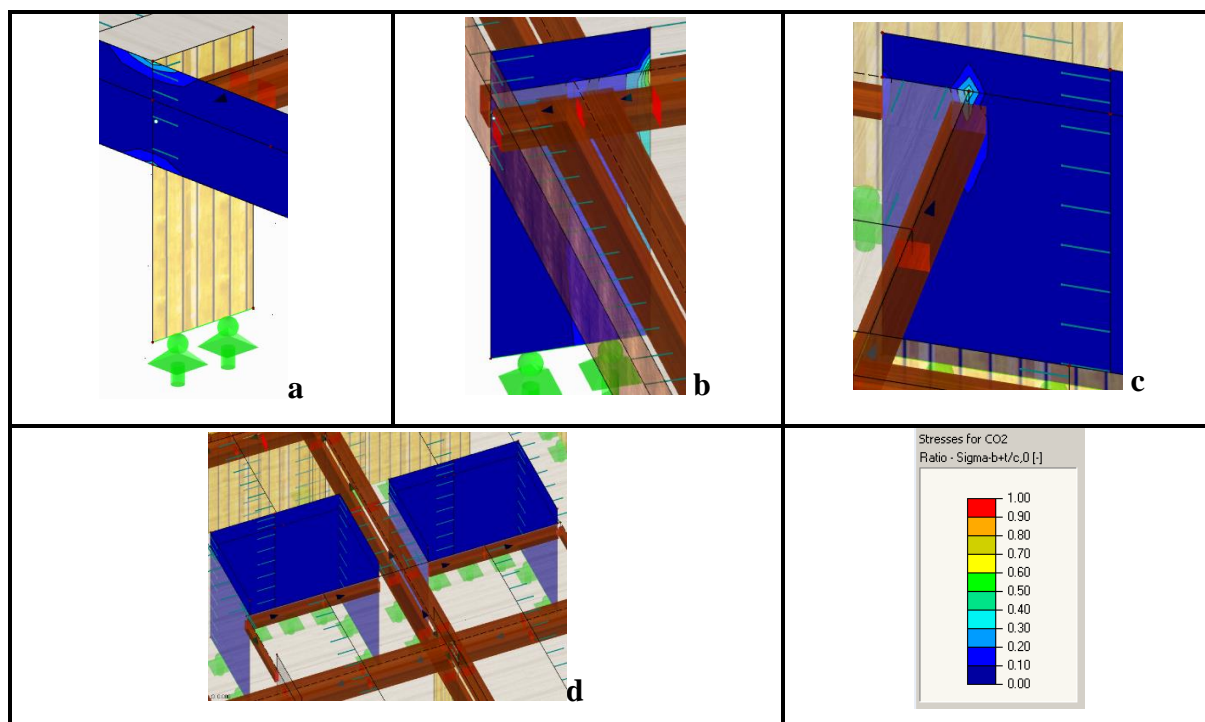


Fig. 99 – Verificação das tensões máximas de compressão + flexão (rácio) nos restantes tipos de elementos estruturais: a) vigas altas; b) pilares CLT; c) núcleo central e d) caixa de elevadores.

Analisando a Fig. 99 pode-se concluir que as paredes estruturais não apresentam um rácio de utilização à compressão + flexão elevado. Uma vez que o modelo possui apenas 1 piso, as cargas gravíticas não são suficientemente elevadas para que se considere para os painéis de parede apresente um rácio de utilização à compressão elevado. Um aspeto relevante a salientar é a ocorrência de compressões localizadas nas zonas de ligação entre as paredes CLT e as vigas de madeira lamelada colada (ver Fig. 99 b e c). A Tabela 33 apresenta os valores das tensões máximas para cada tipo de elementos estrutural, nomeadamente o corte em Vz nas vigas de madeira lamelada colada e as tensões de compressão + flexão nos painéis CLT. Após a realização de uma análise com pavimentos CLT de 280 mm de espessura, constatou-se que todos os painéis CLT verificam os ELU para a combinação fundamental. A deformação máxima passou de 23,4 mm para 18,6 mm e a verificação à tensão de flexão composta passou de 128% para 91% (ver Tabela 33). Os valores referentes aos outros elementos estruturais não sofreram alterações significativas.

Tabela 33 – Resumo dos resultados obtidos dos diversos elementos estruturais aos ELU para a combinação fundamental.

Elemento estrutural	Secção transversal	Verificação aos ELU
Vigas de suporte das escadas (1)	300 x 300 mm ²	84% (τ_{V_z})
Vigas núcleo central (2)	90 x 300 mm ²	36% (τ_{V_z})
Vigas caixa de elevadores (3)	160 x 300 mm ²	27% (τ_{V_z})
Vigas duplas (4)	300 x 300 mm ² // 160 mm	78% (τ_{V_z})
	Espessura	Verificação aos ELU
Vigas altas (a)	160 mm	39,9 % ($\sigma_{b,t/c,0}$)
Pilares CLT (b)	160 mm	71 % ($\sigma_{b,t/c,0}$)
Núcleo central (c)	90 mm	37,8% ($\sigma_{b,t/c,0}$)
Caixa de elevadores (d)	320 mm	12,5 % ($\sigma_{b,t/c,0}$)
Pavimentos	260 mm / 280 mm	128 % / 91 % ($\sigma_{b,t/c,0}$)

5.4. MODELO RÍGIDO DO *UT SYSTEM*

Foi realizada uma pré-análise numérica do edifício proposto segundo os estados limite últimos (ELU). As ligações entre os diversos elementos estruturais foram assumidas como rígidas, ou seja, o efeito de redução da rigidez devido à presença de ligadores mecânicos não foi considerado. A realização desta primeira análise tem como principal objetivo o conhecimento do comportamento da estrutura através da obtenção dos esforços internos nos elementos estruturais. Desta forma, o projetista poderá efetuar um pré-dimensionamento das ligações estruturais (definição do número de ligadores a usar e o respetivo espaçamento para cada ligação) consideradas no modelo flexível do edifício proposto, através dos esforços internos determinados no modelo rígido (pré-análise numérica do *UT system*). Para a pré-análise foram utilizadas as seguintes combinações de ações, segundo os ELU:

Tabela 34 – Combinações de ações utilizadas na pré-análise, segundo os ELU.

Sigla	Combinações de ações
CO1	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot Q_{iA} + 0,9 \cdot Q_{W,x} + 0,75 \cdot Q_s$
CO2	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot Q_{iA} + 0,9 \cdot Q_{W,y} + 0,75 \cdot Q_s$
CO3	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot Q_{W,x}$
CO4	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot Q_{W,y}$
CO5	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot Q_{W,x} + 1,05 \cdot Q_{iA} + 0,75 \cdot Q_s$
CO6	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot Q_{W,y} + 1,05 \cdot Q_{iA} + 0,75 \cdot Q_s$

As combinações CO1/CO2 maximizam os esforços e deslocamentos verticais nos pavimentos da estrutura, as CO3/CO4 maximizam o efeito de derrubamento da estrutura e a CO5/CO6 podem ser relevante para os esforços e deslocamentos globais da estrutura. Através da análise dos resultados obtidos segundo a CO4 (direção Y), verificou-se a ocorrência de forças de tração (até os 296 kN/m) nos apoios estruturais de algumas paredes do núcleo central. Além disso, foi efetuada uma estimativa das forças de tensão nas fundações sob cargas extremas de vento ($1,5 \cdot Q_{W\ x/y}$), obtendo-se uma força máxima de tração no apoios lineares de 539 kN/m. Desta forma, pode-se concluir que o edifício em análise é suscetível ao derrubamento sob ações horizontais (ventos fortes ou sismos), devido ao seu peso estrutural reduzido.

Uma vez que o sistema estrutural do *UT system* é baseado na construção balloon frame, as ligações entre as paredes estruturais e o piso de betão armado não poderiam ser efetuadas através dos mesmos sistemas de ligação (cantoneiras para tração e para corte) usados regularmente nos atuais edifícios multifamiliares em CLT, onde é utilizado o sistema construtivo *platform system*. Devido à continuidade das paredes verticais ao longo de vários pisos e à reduzida compartimentação dos espaços interiores (menor número de paredes estruturais) em comparação com os edifícios típicos em CLT, a aplicação das cantoneiras para tração e cantoneiras para corte fica limitada à base das paredes estruturais do edifício. Assim, para que seja possível utilizar o sistema construtivo balloon frame em estruturas altas, é necessário que as ligações entre as paredes estruturais e as fundações sejam resistentes às forças de tração e de corte originadas pelos carregamentos horizontais. Como é óbvio, a aplicação de cantoneiras para tração e corte na base da estrutura de madeira, dificilmente produzirá resistência suficiente para suportar os esforços internos (tração e corte) originados pelos

carregamentos laterais. Além disso, este tipo de ligação tornaria a estrutura suscetível a roturas frágeis das ligações, conduzindo ao derrubamento da estrutura.

Para solucionar esta problemática inerente às estruturas em madeira em altura, foi implementada a tecnologia Pres-Lam (descrita no tópico 3.2.3) em conjunto com o *UT system*. Esta combinação constitui uma solução estrutural inovadora que proporciona ductilidade (através da tecnologia Pres-Lam) a um sistema estrutural tipicamente rígido (*UT system*).

Foram analisadas as tensões resultantes da flexão composta na base das paredes estruturais para a envolvente (CO1 – CO6), com o intuito de verificar a possibilidade de aplicação de pré-esforço na estrutura. Os pilares CLT perpendiculares à fachada na direção longitudinal do edifício apresentam uma tensão na ordem dos 7 MPa. Uma vez que a capacidade resistente do CLT à compressão é de 12,92 MPa ($21 \text{ MPa} * k_{\text{mod}}/\gamma_M$), torna-se possível a aplicação do pré-esforço nas paredes estruturais. Assim, para o modelo flexível do *UT system* foram aplicados cabos de pré-esforço com 25 mm de diâmetro do tipo Macalloy de alta resistência à tração (1030 MPa) no centro de cada painel de parede (Macalloy - Post Tensioning System, 2011). O pré-esforço aplicado, 260 kN, foi calculado através do valor médio das reações de tração da parede mais desfavorável segundo as cargas extremas do vento ($1,5 \cdot Q_{W_{x/y}}$). Por questões de simplificação este valor de pré-esforço foi aplicado para todos os painéis de parede do *UT system*.

5.4.1. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES

A experiência adquirida da construção de edifícios em CLT e os resultados de várias investigações realizadas nos últimos anos sobre o comportamento estático e sísmico das construções em CLT, permitiu a elaboração de algumas regras de projeto de edifícios CLT (Follesa *et al.*, 2011). Geralmente, os diafragmas horizontais (pavimentos CLT) são considerados rígidos, sendo o corte no plano sísmico distribuído para as paredes inferiores de acordo com sua rigidez, tendo em consideração uma excentricidade accidental, para além de qualquer excentricidade entre o centro de massa e o centro de rigidez, em situações de distribuição assimétrica da rigidez. Para obter o comportamento de uma estrutura tipo caixa, é importante prevenir que falhas locais que comprometam esse tipo de comportamento ocorram. Desta forma, é importante distinguir as ligações dedicadas ao comportamento dissipativo (o desenvolvimento do rendimento cíclico deve ser assegurado), daquelas que devem

ser dimensionadas com excesso de resistência suficiente para evitar a rotura frágil antecipada. Segundo Follesa *et al.* (2013) as ligações que devem garantir dissipação de energia nas construções típicas CLT são: ligação com cobrejunta em madeira entre painéis de parede composto por mais de um painel CLT; ligações contra o deslizamento (*angle brackets*) entre as paredes e a face superior dos pavimentos e entre as paredes e a fundação e ligações de ancoragem contra a elevação (*hold-downs*) colocadas nas extremidades e aberturas das paredes. Já o conceito de excesso de resistência é proposto para: ligações entre painéis de pavimento adjacentes de modo a limitar, o máximo possível, o deslizamento relativo e assegurar um comportamento rígido no plano; ligações entre os pavimentos e as paredes inferiores, assegurando assim que em cada andar existe um pavimento rígido ao qual as paredes estão bem ligadas e ligações entre paredes perpendiculares, particularmente nos cantos do edifício, de modo que a estabilidade das próprias paredes e da estrutura em forma de caixa esteja sempre assegurada.

Com base nas sugestões propostas por Follesa *et al.* (2013) foram definidas quais as ligações que devem apresentar comportamento dissipativo e excesso de resistência para o modelo flexível do *UT system*. Portanto, os cabos de pré-esforço e as ligações entre: os pavimentos e as vigas duplas de madeira lamelada colada, vigas duplas e as paredes CLT, painéis de parede que possuam mais do que um painel CLT, foram definidos/as como os elementos dissipadores do sistema estrutural. Todas as outras ligações, painéis de parede perpendiculares, vigas altas CLT e os pavimentos/pilares, painéis de paredes verticais descontínuos e painéis de pavimento adjacentes são consideradas rígidas no modelo flexível do *UT system*. O pré-dimensionamento das ligações dissipativas foi realizado através dos esforços internos obtidos no modelo rígido do *UT system*. Desta forma, será possível quantificar a rigidez das ligações a considerar para o modelo flexível do *UT system*.

Segundo o catálogo da Rothoblaas (Rothoblaas: ficha técnica STA, s.d.), as cavilhas lisas em aço de carbono com zincagem galvânica podem ser usados para acoplagem de estruturas de madeira para uniões de corte madeira-madeira ou madeira-aço. O sua utilização é indicada para madeira lamelar, madeira maciça, CLT, LVL e painéis à base de madeira; podem apresentar comprimentos até 1 m; estão disponíveis diâmetros de 8, 12, 16 e 20 mm e caso requerido, podem possuir uma versão com aderência melhorada, com geometria anti deslizante ou para utilização em zona sísmica. Para ligações estruturais com elevada importância é recomendado a utilização de cavilhas com diâmetros superiores (16 ou 20 mm). Desta forma, foram

escolhidas cavilhas de 16 mm para o pré-dimensionamento das ligações entre as paredes CLT e as vigas duplas de madeira lamelada colada.

5.4.1.1. CAPACIDADE RESISTENTE DE UMA LIGAÇÃO MADEIRA-MADEIRA

A capacidade resistente de uma ligação madeira-madeira recorrendo a ligadores do tipo cavilha foi estudada por Johansen (Johansen, 1949). Foi assumido que tanto os elementos a ligar, como os ligadores apresentam um comportamento rígido-plástico. De acordo com Johansen (Johansen, 1949), a rotura de uma ligação madeira-madeira através de ligadores do tipo cavilha ocorre segundo três modos distintos. Cada modo de rotura corresponde à criação de nenhuma (modo I), uma (modo II) ou duas (modo III) rótulas plásticas no ligador em combinação com o esmagamento da madeira em determinadas zonas da ligação. Em todos os modos, a rotura acontece porque um ou mais mecanismos (esmagamento na madeira e criação de rótulas plásticas) são formados na ligação (ver Fig. 100).

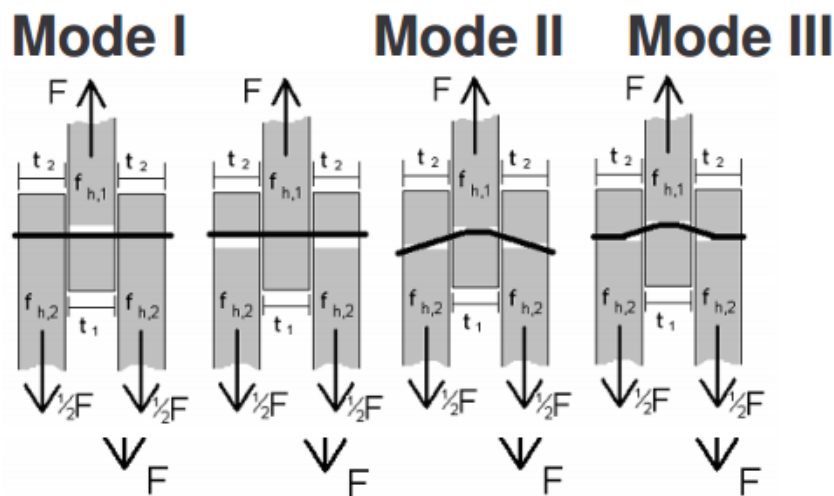


Fig. 100 – Alguns dos modos de rotura possíveis para uma ligação madeira-madeira de corte duplo, com recurso a ligadores do tipo cavilha (Leijten, 2008).

5.4.1.2. CÁLCULO DA CAPACIDADE RESISTENTE DA LIGAÇÃO PAREDES-VIGAS

O Eurocódigo 5 (EC5) considera que para ligações com ligadores do tipo cavilha, deva ser garantida uma penetração mínima no elemento estrutural a ligar de oito vezes o diâmetro do

ligador. Para a determinação da capacidade resistente de uma ligação madeira-madeira de corte duplo com cavilhas o EC5 propõe as seguintes expressões:

$$F_{V,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \end{array} \right. \quad (81)$$

Onde: $\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$; t_1 é a espessura do elemento central; t_2 é a espessura dos elementos laterais; d é o diâmetro do ligador; $f_{h,1,k}$ é a capacidade resistente do material central; $f_{h,2,k}$ é a capacidade resistente do material lateral e $M_{y,Rk}$ é o momento de plastificação do ligador.

A metodologia usada para o cálculo da capacidade resistente da ligação e para a determinação do número de ligadores necessários será efetuada para a ligação entre os painéis de parede CLT dos primeiros pisos (300 mm de espessura) e as vigas duplas de madeira lamelada colada (300 mm de base).

Capacidade resistente do CLT paralela às fibras ($\rho_k = 500 \text{ kg/m}^3$ e $d = 300 \text{ mm}$):

$$f_{h,1,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 34,44 \text{ MPa} \quad (82)$$

Capacidade resistente do CLT perpendicular às fibras ($\rho_k = 500 \text{ kg/m}^3$ e $d = 300 \text{ mm}$):

$$f_{h,1,90,k} = \frac{f_{h,1,0,k}}{1,35 + 0,015 \cdot d \cdot \sin^2(90) + \cos^2(90)} = 21,66 \text{ MPa} \quad (83)$$

Capacidade resistente da madeira lamelada colada paralela às fibras ($\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$ e $d = 300 \text{ mm}$):

$$f_{h,2,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 26,17 \text{ MPa} \quad (84)$$

Capacidade resistente da madeira lamelada colada perpendicular às fibras ($\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$ e $d = 300 \text{ mm}$):

$$f_{h,2,90,k} = \frac{f_{h,2,0,k}}{1,35 + 0,015 \cdot d \cdot \sin^2(90) + \cos^2(90)} = 16,46 \text{ MPa} \quad (85)$$

Para o cálculo da capacidade resistente da ligação foi admitida a capacidade resistente perpendicular às fibras do CLT ($f_{h,1,90,k}$) e da madeira lamelada colada ($f_{h,2,90,k}$). O momento de plastificação das cavilhas foi retirado do catálogo da Rothoblaas, $M_{y,Rk} = 191000 \text{ Nmm}$. A capacidade resistente da ligação com uma cavilha de 16 mm é dada por:

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} 103970 \text{ N} \\ 39509 \text{ N} \\ 48648 \text{ N} \\ 12297 \text{ N} \end{cases} = 12,297 \text{ kN} \quad (86)$$

5.4.1.3. ESPAÇAMENTOS MÍNIMOS

O espaçamento mínimo entre os ligadores tem como função evitar que o efeito de grupo no elemento estrutural de madeira leve à rotura da ligação. Os espaçamentos mínimos apresentam valores distintos segundo a direção paralela e perpendicular às fibras devido às propriedades isotrópicas da madeira. Relativamente às distâncias mínimas aos bordos e topos do elemento estrutural, estas dependem de dois fatores, nomeadamente, do ângulo formado entre a força aplicada e a direção das fibras (α) e da solicitação ou não desses bordos e topos ao carregamento.

A Fig. 101 demonstra de que maneira o espaçamento mínimo contribui para a atenuação do efeito de grupo. Como pode ser constatado na parte b), a redução do espaçamento entre ligadores provoca uma acumulação de tensões perpendiculares às fibras, devido à incapacidade de mobilização de toda a força transmitida na madeira entre os ligadores.

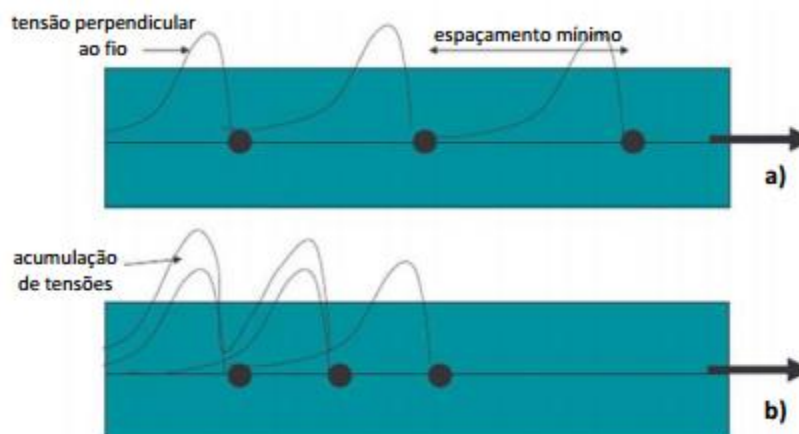


Fig. 101 – Efeito de grupo dos ligadores (adaptado de Leijten,2008)

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

No EC5 encontram-se definidos todos os espaçamentos mínimos a adotar para cada ligador do tipo cavilha. Assim foram definidos os seguintes espaçamentos: a_1 é a distância paralela às fibras entre dois ligadores; a_2 é a distância perpendicular às fibras entre dois ligadores; $a_{3,t}$ é a distância ao topo carregado; $a_{3,c}$ é a distância ao topo não carregado; $a_{4,t}$ é a distância ao bordo carregado; $a_{4,c}$ é a distância ao bordo não carregado.

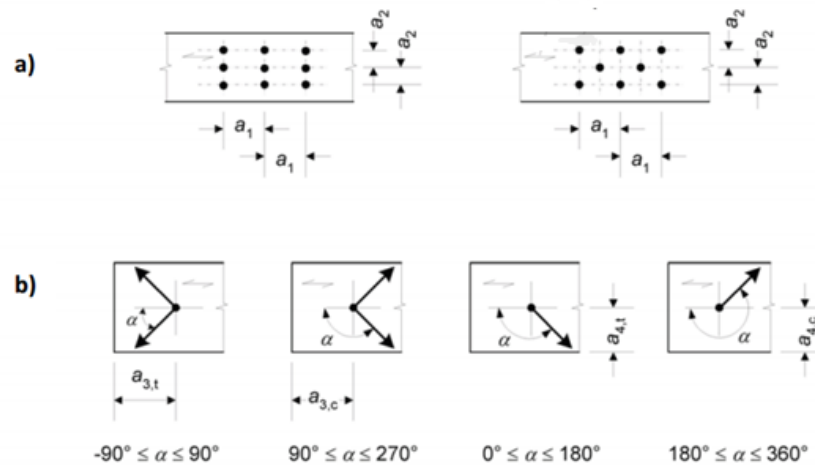


Fig. 102 – Espaçamentos mínimos entre ligadores do tipo cavilha (EN1995-1-1, 2004)

Os espaçamentos mínimos para a ligação parede-vigas, usando cavilhas com diâmetro de 16 mm são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Espaçamentos mínimos entre os ligadores da ligação parede-vigas.

Siglas	Ângulo	Espaçamento mínimo ou distância de bordo/topo
a_1	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cdot \cos(\alpha)) \cdot d = 48 \text{ mm}$
a_2	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3 \cdot d = 48 \text{ mm}$
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7 \cdot d ; 80 \text{ mm}) = 112 \text{ mm}$
$a_{3,c}$	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	$\max (3 \cdot d ; (a_{3,t} \cdot \sin(\alpha)) \cdot d) = 112 \text{ mm}$
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	$3 \cdot d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max (3 \cdot d ; (a_{3,t} \cdot \sin(\alpha)) \cdot d)$
$a_{4,t}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max (3 \cdot d ; (2 + 2 \cdot \sin(\alpha)) \cdot d) = 64 \text{ mm}$
$a_{4,c}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3 \cdot d = 48 \text{ mm}$

5.4.1.4. DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES

Para a determinação dos esforços de corte atuantes nos pavimentos, foram criadas secções, ligeiramente desviadas da zona de ligação entre as paredes e os pavimentos. Posteriormente, foram calculados os esforços de corte médios para cada parede estrutural que possua ligação com as vigas duplas de suporte dos pavimentos. Para além disso, foram verificados os esforços de corte máximos nas vigas duplas de madeira lamelada colada na zona de ligação das vigas às paredes. Por último, o esforço de corte médio dos pavimentos foi somado ao valor máximo de corte das vigas duplas, obtendo-se o esforço de corte de cálculo da ligação. O esforço de corte de cálculo da ligação será dividido pela capacidade resistente da ligação com uma cavilha de 16 mm (12,297 kN), obtendo-se o número de cavilhas necessárias da ligação parede-vigas. O espaçamento será igual à largura da parede menos o dobro da distância ao topo carregado ($2 \cdot a_{3,c}$) a dividir pela número de cavilhas aplicadas na parede. Visto que os carregamentos horizontais não foram tidos em consideração para o dimensionamento ao corte da ligação parede-vigas, as ligações foram subdimensionada através da adição de um número de cavilhas superior ao necessário. Por questões de uniformização foi adotado espaçamento semelhante para todas as paredes que formam as coretes apesar dos esforços de corte serem diferentes. Na parede central que serve de apoio às caixas de escadas foi considerado um número maior de cavilhas devido à presença de esforços de corte localizados. Para a modelação do grupo de cavilhas no software RFEM 5, foi considerada uma rigidez vertical da ligação associada ao efeito de deslizamento das cavilhas. Uma cavilha por si só não apresenta restrição da rotação entre os elementos ligados, contudo quando aplicadas ao longo de todo o comprimento da parede (em grupo), a rotação das vigas em relação à parede fica constringida devido à elevada rigidez rotacional da ligação. A rigidez rotacional da ligação é geralmente difícil de quantificar e a sua consideração implicaria a separação entre os painéis de pavimentos e as paredes estruturais, tornando o modelo tridimensional demasiado complexo. Assim, por questões de simplificação foi apenas considerada a rigidez vertical associada ao efeito de deslizamento do grupo de cavilhas.

Módulo de deslizamento de uma cavilha:

$$K_{\text{ser}} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} = \frac{380^{1,5} \cdot 16}{23} = 5153,1 \text{ kN/m} \quad (87)$$

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Rigidez vertical da ligação:

$$K_{\text{vertical}} = \frac{K_{\text{ser}} \cdot n_{\text{tot}} \cdot n_{\text{shear plane}}}{L} = \frac{5153,1 \cdot 30 \cdot 2}{7,8} = 39690 \text{ kN/m} \quad (88)$$

Tabela 36 – Número de cavilhas, espaçamento e rigidez considerado/a para a ligação parede-vigas.

Ligação	Comprimento [m]	Esforço de corte [kN]	Nº cavilhas necessárias	Nº cavilhas adotadas	Espaçamento [mm]	Rigidez vertical [kN/m ²]
VP (corete Y1)	7,8	273,7	23	30	250	39690
VP (corete Y2)	7,8	315,5	26	30	250	39690
VP (corete X1)	11,94	226,9	19	47	250	40569
VP (corete X2)	11,94	224,1	19	47	250	40569
VP (pilares)	1,5	210,5	18	22	58	151157
VP (caixa de escadas)	6,5	230	22	60	105	95134

As ligações entre os pavimentos CLT e as vigas duplas é feita através de cavilhas de diâmetro 16 mm. Foram também consideradas as ligações das paredes que possuam mais do que um painel CLT (ligação de meia madeira) com recurso a cavilhas de diâmetro 16 mm. Para o pré-dimensionamento destas ligações foi assumido um espaçamento entre cavilhas de 15 cm. Portanto, a rigidez de deslizamento das ligações é dada por:

$$K_{\text{ser}} \cdot n_{\text{per meter}} = \frac{380^{1,5} \cdot 16}{23} \cdot \frac{100}{15} = 25765,4 \text{ kN/m}^2 \quad (89)$$

5.5. MODELO FLEXÍVEL DO UT SYSTEM

5.5.1. VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITE ÚLTIMOS

Para situações onde não ocorra uma distribuição de carga uniaxial, o efeito bidirecional da capacidade de carga dos painéis deve ser considerado. Assim, o projetista deve criar um modelo adequado com respectivos valores de rigidez a serem aplicados para determinar as forças internas do painel a partir dos impactos. Com base na teoria de viga de Timoshenko (de acordo com Reissner-Mindlin) e usando o coeficiente de correção de corte, a rigidez de corte flexível dos painéis pode ser determinada através dos valores da seção transversal em ambas as direções, independentemente do sistema estático. O módulo adicional RF-Laminate permite a consideração da teoria da flexão de placas segundo Mindlin ou Kirchhoff. A deformação de corte é considerada para cálculo de acordo com a teoria de Mindlin, mas desprezada segundo a teoria de Kirchhoff. A teoria de flexão de acordo com Mindlin é adequada para placas maciças (por exemplo: CLT). Já a teoria de flexão de acordo com Kirchhoff é recomendada para placas relativamente finas. A verificação aos ELU e ELS deve ser efetuada analiticamente pelo projetista, com o auxílio dos resultados (tensões/esforços internos, deformações) obtidos pelo software de MEF (RFEM 5: RF-Laminate).

5.5.1.1. SITUAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO

Nos Estados Limite Últimos, deve ser verificado que, em qualquer local da estrutura, o valor da tensão de dimensionamento seja inferior ao valor de dimensionamento da resistência, como descrito no tópico 4.4. Além da verificação da capacidade de carga transversal em termos de tensão atuante, os ligadores e os mecanismos de falha por estabilidade, como encurvadura ou inclinação das paredes estruturais devem ser analisados aos Estados Limite Últimos.

Situação de dimensionamento rara:

$$E_d = \sum_{i \geq 1} \gamma_G \cdot G_{k,i} + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_Q \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (90)$$

Verificação:

$$E_d \leq R_d \quad (91)$$

$$E_d \leq k_{\text{mod}} \cdot \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (92)$$

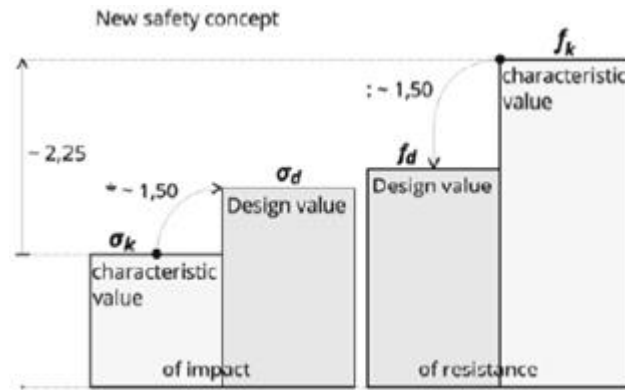


Fig. 103 – Conceito de segurança usado no dimensionamento de estruturas em madeira

Os resultados obtidos pelo módulo adicional RF-Laminate encontram-se apresentados na Tabela 38. Para a envolvente foram utilizadas as seguintes combinações de ações:

Tabela 37 – Combinações de ações utilizadas na pré-análise, segundo os ELU.

Sigla	Combinações de ações
CO1	$1,35 \cdot G + P + 1,5 \cdot Q_{iA} + 0,9 \cdot Q_{W,x} + 0,75 \cdot Q_s$
CO2	$1,35 \cdot G + P + 1,5 \cdot Q_{iA} + 0,9 \cdot Q_{W,y} + 0,75 \cdot Q_s$
CO3	$1,35 \cdot G + P + 1,5 \cdot Q_{W,x}$
CO4	$1,35 \cdot G + P + 1,5 \cdot Q_{W,y}$
CO5	$1,35 \cdot G + P + 1,5 \cdot Q_{W,x} + 1,05 \cdot Q_{iA} + 0,75 \cdot Q_s$
CO6	$1,35 \cdot G + P + 1,5 \cdot Q_{W,y} + 1,05 \cdot Q_{iA} + 0,75 \cdot Q_s$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 38 – Resultados obtidos para a envolvente das combinações de ações (RC1), através do RF-Laminate.

Load- ing	Surface No.	Point No.	Point Coordinates [m]			No.	Layer z [mm]	Side	Stresses [N/mm ²]			Ratio [-]
			X	Y	Z				Symbol	Existing	Limit	
RC1	ULS (STR/GEO) - Permanent / transient - Eq. 6.10											
	46	2098	16.800	8.405	24.000	2	30.0	Top	$\sigma_{b,0}$	5.86	16.62	0.35
	618	222769	24.800	16.195	15.000	3	80.0	Top	$\sigma_{b,90}$	0.00	0.00	0.00
	173	6010	8.800	8.405	9.240	5	140.0	Top	$\sigma_{t/c,0}$	26.98	9.69	2.78
	211	4261	8.800	12.300	9.240	1	0.0	Top	$\sigma_{t/c,90}$	0.00	0.28	0.00
	173	6010	8.800	8.405	9.240	5	140.0	Top	$\sigma_{b+t/c,0}$	26.86		2.79
	618	222769	24.800	16.195	15.000	5	160.0	Top	$\sigma_{b+t/c,90}$	0.00		0.00
	483	15759	8.800	14.300	6.000	3	80.0	Top	$\tau_{y'z'}$	-0.61	0.73	0.84
	46	2098	16.800	8.405	24.000	2	45.0	Middle	$\tau_{x'z'}$	-1.28	2.77	0.46
	618	222769	24.800	16.195	15.000	1	0.0	Top	$\tau_{x'y'}$	-3.95	2.77	1.43

De referir que os resultados apresentados na Tabela 38 apenas apresentam os valores das tensões máximas atuantes na estrutura, segundo a envolvente considerada. Analisando os resultados, pode-se concluir que algumas superfícies não foram verificadas à compressão/tração ($\sigma_{t/c,0}$) e ao corte segundo o plano dos painéis ($\tau_{x'y'}$). Desta forma, foi necessário verificar graficamente todas as tensões de compressão/tração e de corte em $x'y'$ para todas as camadas dos diversos os elementos estruturais CLT pertencentes à estrutura. Após uma cuidada análise, verificou-se a existência de tensões de compressão/tração excessivas localizadas nas camadas ortogonais e tensões de corte xy excessivas localizadas nas camadas externas dos painéis CLT. A Tabela 39 apresenta as tensões de compressão/tração (nas camadas ortogonais) e de corte $x'y'$ (nas camadas externas) máximas para cada tipo de elemento estrutural.

Tabela 39 – Tensões máxima de compressão, tração e de corte no plano $x'y'$ para cada tipo de elemento estrutural.

Elementos	$\sigma_{c,0}$ [MPa]	$f_{c,d}$ [MPa]	$\sigma_{t,0}$ [MPa]	$f_{t,d}$ [MPa]	$\tau_{x'y'}$ [MPa]	$f_{v,d}$ [MPa]
Pavimentos CLT - 280 mm	-14	12,92	11,91	9,69	-3,95	2,77
Vigas altas CLT - 160 mm	-10,72	12,92	4,25	9,69	3,25	2,77
Pilares + Coretes - 300 mm	-16,33	12,92	15,55	9,69	-2,48	2,77
Pilares + Coretes - 240 mm	-26,72	12,92	26,98	9,69	-2,91	2,77
Pilares + Coretes - 140 mm	-14,92	12,92	17,85	9,69	-2,25	2,77
Paredes N. C. - 140 mm	-6,69	12,92	4,59	9,69	-1,94	2,77
Paredes N.C. - 120 mm	-6,18	12,92	5,12	9,69	-1,51	2,77
Paredes N.C. - 90 mm	-6,49	12,92	3,66	9,69	0,98	2,77
Caixa de elevadores	-10,43	12,92	11,24	9,69	-1,42	2,77

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

As tensões de corte no plano $x'y'$ não foram verificadas aos Estados Limite Últimos em todos os pavimentos CLT devido à ocorrência de esforços internos de corte xy localizados. Esses esforços ocorrem nos cantos dos painéis de pavimento CLT (camadas externas) que se encontram apoiados nas vigas duplas de madeira lamelada colada e ligados às paredes verticais.

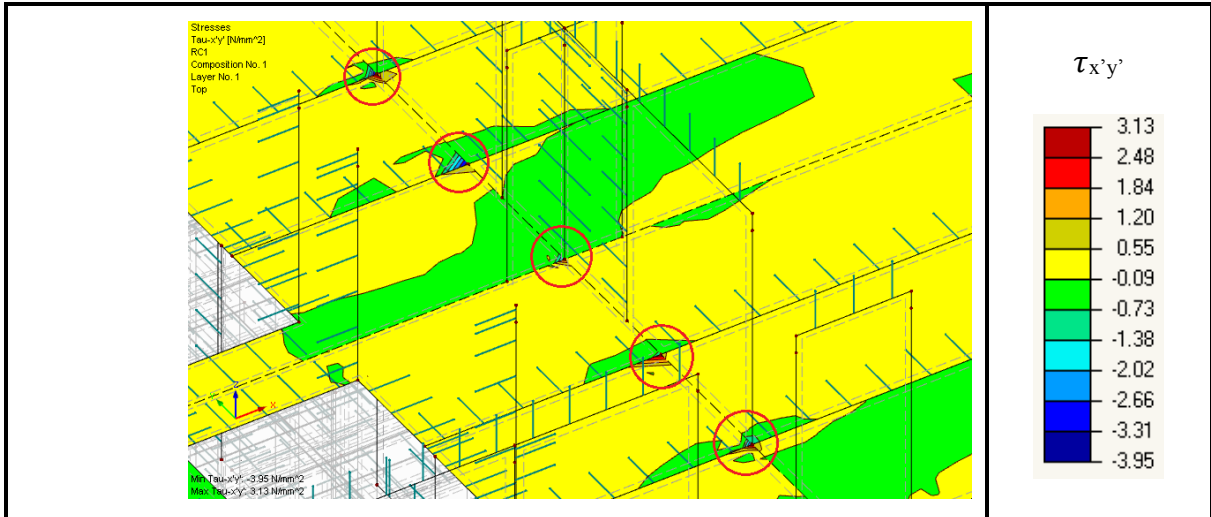


Fig. 104 – Tensões de corte $x'y'$ localizadas nos pavimentos CLT.

Foram também constatadas tensões de compressão e tração localizadas nas camadas ortogonais dos pavimentos, pilares, coretes e paredes das caixas de elevadores CLT. Como se pode verificar na Fig. 105 (ver círculos a vermelho), as tensões de compressão e tração ocorrem nos nós de ligação entre 4 painéis de pavimento CLT e as vigas duplas de suporte na direção Y. Salienta-se o facto de estas tensões ocorrem em todas as lajes da estrutura.

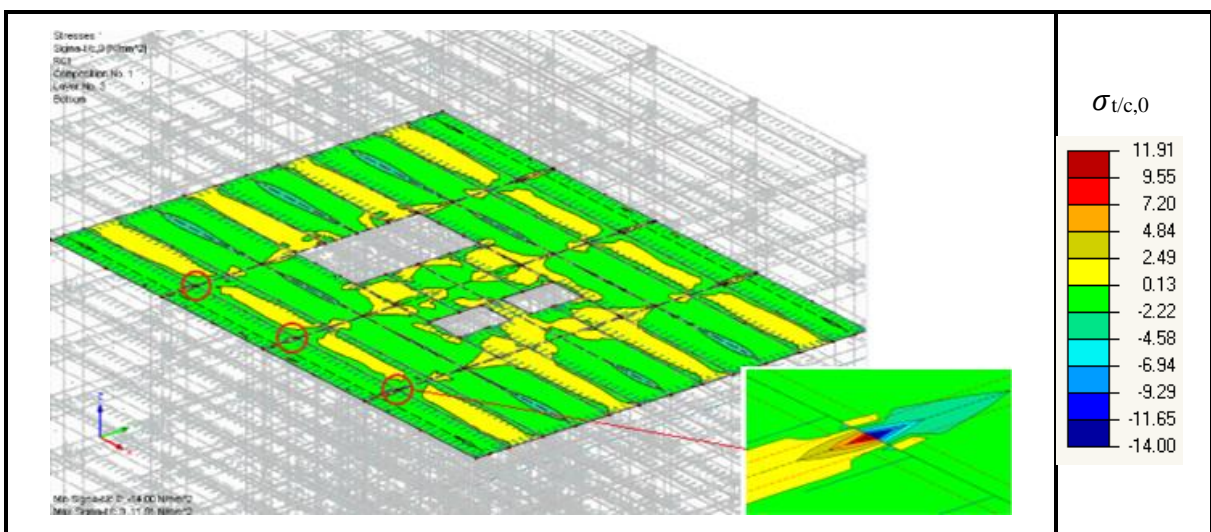


Fig. 105 – Tensões de compressão/tração localizadas nos pavimentos CLT.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Uma situação semelhante ocorreu para as paredes que formam as coretes (ver Fig. 106) e as caixas de elevadores (ver Fig. 107), onde também ocorreram tensões de compressão/tração localizadas nos nós de ligação entre vários painéis de parede CLT, especialmente nas zonas de descontinuidade das paredes verticais. Para além disso, ocorreram tensões de tração localizadas na zona de ligação das vigas com os pilares CLT (ver Fig. 106).

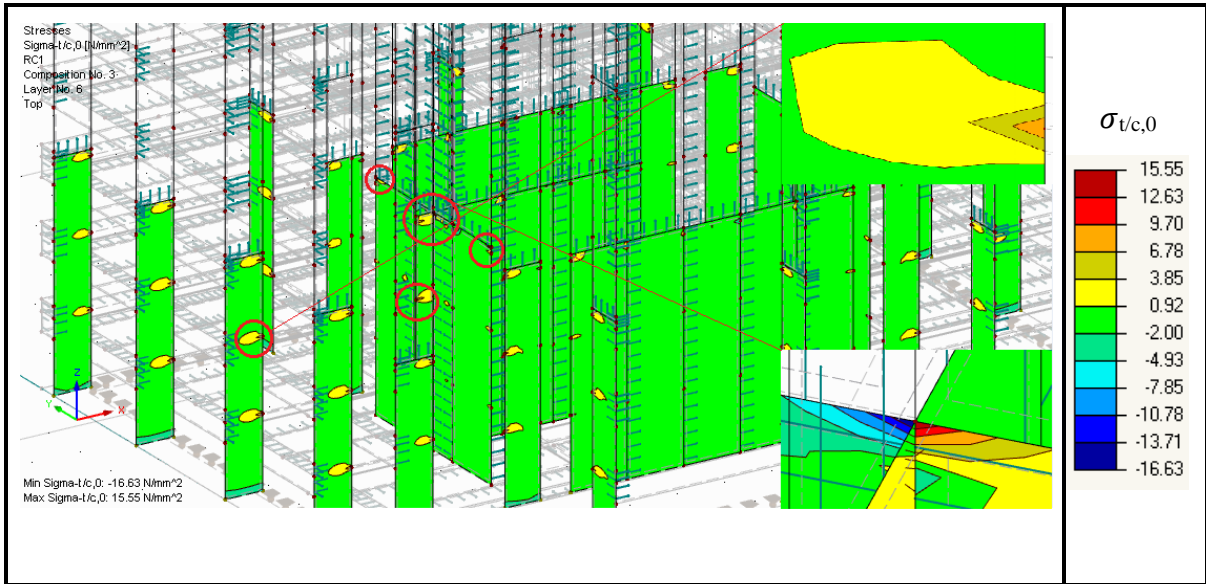


Fig. 106 – Tensões de compressão/tração localizadas nos pilares e coretes CLT.

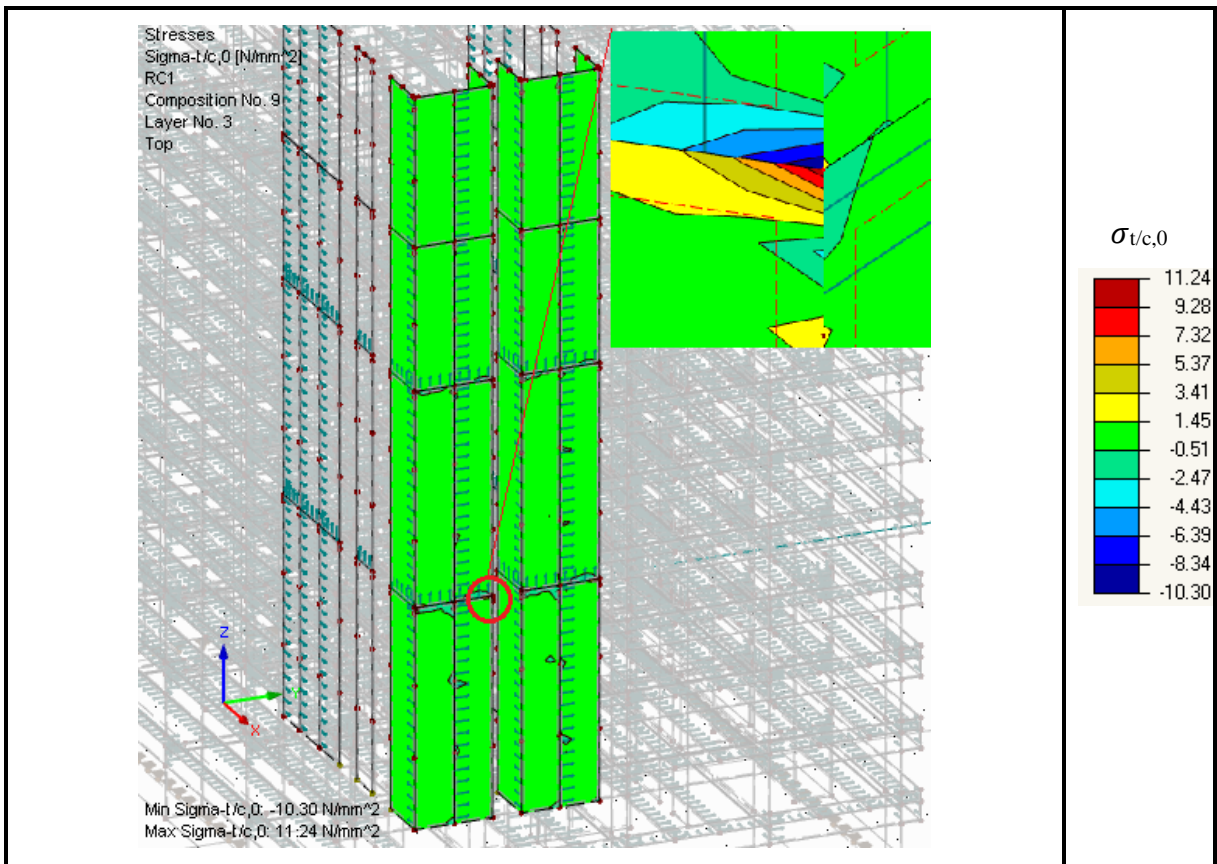


Fig. 107 – Tensões de compressão/tração localizadas nas paredes das caixas de elevadores.

5.5.1.2. ESTABILIDADE

5.5.1.2.1. ENCURVADURA DA PAREDE CLT DEVIDA À COMPRESSÃO

Em teoria, em caso de encurvadura, a flexibilidade de corte das camadas transversais deve ser tida em consideração. Contudo, segundo Novak *et al.* (2014) a sua influência pode ser desprezada, uma vez que, normalmente é inferior a 2%.

Segundo Novak *et al.* (2014), o dimensionamento de uma parede estrutural aos ELU deve limitar a esbelteza para o valor: $\lambda_y \leq \lambda_{lim} = 150$. Para o dimensionamento ao fogo, Novak *et al.* (2014) recomendam o valor: $\lambda_{y,fi} \leq \lambda_{fi,lim} = 200$.

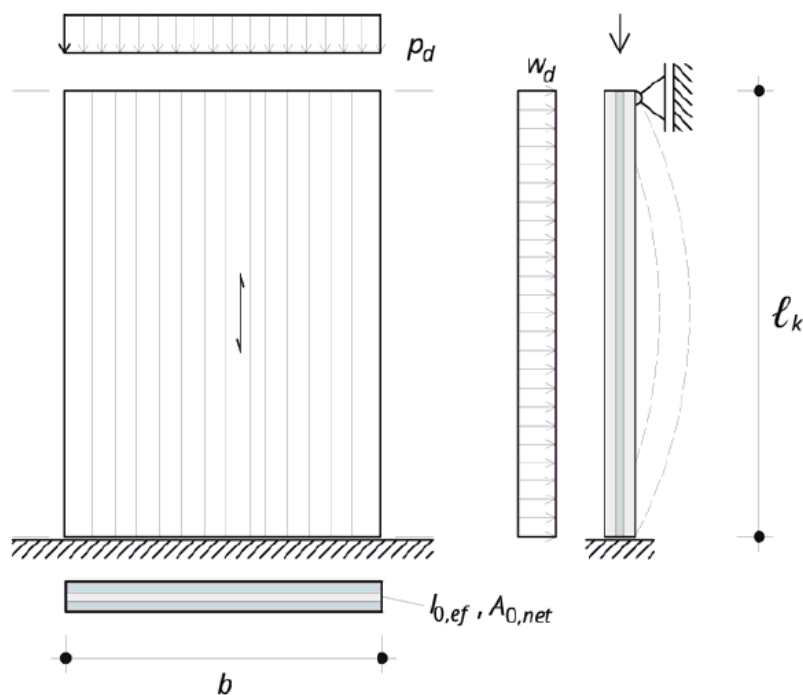


Fig. 108 – Encurvadura da parede CLT segundo o eixo Y (perpendicular ao plano, menor inércia) (Novak *et al.*, 2014).

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Em estruturas que apresentem paredes CLT com largura reduzida a encurvadura deve ser também verificada segundo o plano do elemento (encurvadura segundo o eixo Z).

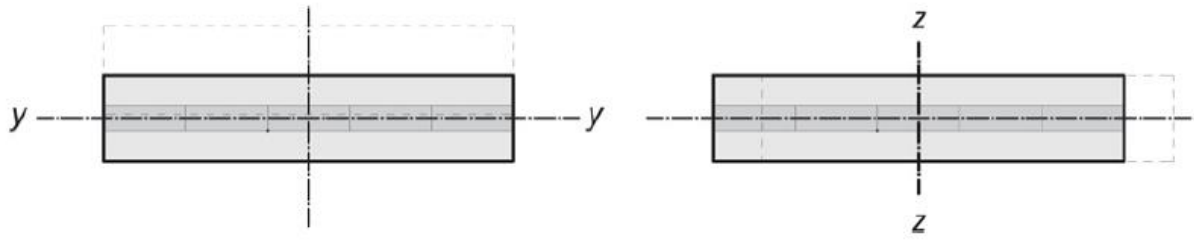


Fig. 109 –Encurvadura segundo as duas direções (Y e Z) de uma parede CLT com largura reduzida (Novak *et al.*, 2014).

A verificação à encurvadura será realizada para o pilar CLT mais esforçado localizado na base da estrutura junto à fachada longitudinal do edifício. Uma vez que o pilar CLT apresenta uma largura elevada (aproximadamente 1,5 m) a encurvadura segundo a direção com maior inercia (Z) será desprezada.

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0 \quad (93)$$

$$i_{y,0,ef} = \sqrt{\frac{I_{y,0,ef}}{A_{0,net}}} = \sqrt{\frac{3,096 \cdot 10^9}{360000}} = 92,73 \quad (94)$$

$$\lambda_y = \frac{\ell_{k,i}}{i_{y,0,ef}} = \frac{3000}{92,74} = 32,34 \quad (95)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{32,34}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,549 \quad (96)$$

O coeficiente de imperfeição, β_c , é igual a 0,2 para o CLT.

$$\begin{aligned} k_y &= 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \\ &= 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (0,54 - 0,3) + 0,54^2) = 0,675 \end{aligned} \quad (97)$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,675 + \sqrt{0,675^2 - 0,549^2}} = 0,935 \quad (98)$$

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Nota: As resistências de cálculo foram determinadas usando os seguintes coeficientes: $k_{\text{mod}} = 0,8$; $\gamma_M = 1,3$ e $k_{\text{sys}} = 1,1$.

A determinação da encurvadura para o pilar mais esforçado na base da estrutura é dada por:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{8,93}{0,935 \cdot 12,92} + \frac{0,09}{16,25} = 0,745 \leq 1,0 \quad \text{ok} \quad (99)$$

5.5.1.3. VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE CORTE DAS LIGAÇÕES

Para efetuar a verificação ao corte das ligações entre: vigas duplas de madeira lamelada colada e paredes CLT (VP), vigas duplas de madeira lamelada colada e lajes CLT (VL) e paredes CLT adjacentes (PP); foram determinados os valores de corte médios para cada tipo de ligação, através da envolvente de esforços internos. A verificação ao corte foi apenas efetuada para todas as ligações mais desfavoráveis da estrutura, com recurso aos resultados gráficos. Para tal, foram criadas no software de cálculo secções ligeiramente desviadas à direita e à esquerda das zonas de ligação, por forma a obterem-se os esforços internos atuantes em cada uma das ligações adotadas. Posteriormente, o esforço de corte médio (kN/m) foi multiplicado pelos respetivos comprimentos de cada ligação, obtendo-se o esforço de corte total presente na ligação. Por último, o esforço de corte total foi dividido pelo número total de cavilhas consideradas na fase de pré-dimensionamento, obtendo-se o esforço de corte atuante por cavilha, devendo este valor ser inferior à resistência de corte da cavilha (12,3 kN - determinada no tópico 5.4.1.2). A Tabela 40 apresenta os valores obtidos para as ligações consideradas no modelo flexível do *UT system*.

Tabela 40 – Verificação ao corte das ligações consideradas no modelo flexível do UT system.

Ligação	Comprimento [m]	Nº cavilhas adotadas	Espaçamento [mm]	Esforço de corte médio [kN/m]	Esforço de corte total [kN]	Esforço de corte por cavilha [kN]	Resistência de corte por cavilha [kN]
VP (corete Y1)	7,8	30	250	26,4	205,92	6,86	12,3
VP (corete Y2)	7,8	30	250	42,6	332,28	11,1	12,3
VP (corete X1)	11,94	47	250	32,2	384,47	8,18	12,3
VP (corete X2)	11,94	47	250	31,1	371,33	7,9	12,3
VP (pilares)	1,5	22	58	59,8	89,7	4,1	12,3
VP (caixa de escadas)	6,5	60	105	92,3	599,95	10	12,3
VL	4,72	30	150	15,6	73,63	2,45	12,3
PP	30,48	202	150	64,4	1962,91	9,72	12,3

5.5.2. VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITE DE SERVIÇO

5.5.2.1. SITUAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO

Nas construções em madeira, as verificações aos Estados Limite de Serviço são realizadas para a situação de projeto característica e quase-permanente. As porções de deformação dos impactos individuais devem ser sobrepostas para a respetiva situação de projeto de acordo com EN1995-1-1 e EN 1990. A porção da deformação referente ao peso próprio da estrutura pode ser desprezada para as verificações na situação de projeto característica. Contudo, nesse caso ocorrem diferentes interpretações dos Eurocódigos e diferentes métodos de determinação nacionais, resultando em diferenças nas deformações totais usadas para as verificações. Assim, na presente dissertação a deformação devida ao peso próprio estrutural será sempre tida em consideração (hipótese conservadora).

5.5.2.2. LIMITAÇÃO DAS DESFORMAÇÕES

A limitação das deformações verticais tem dois objetivos principais, nomeadamente, garantir que o aspeto da estrutura seja mantido e que danos em elementos estruturais subordinados ou possíveis limitações de uso devido às deformações sejam evitados/as.

No Eurocódigo 5, encontram-se definidos os intervalos para a deformação permitida. Dentro desses intervalos, as deformações máximas são determinadas nos documentos de aplicação nacionais. Para cada projeto, os critérios de serviço devem ser determinados de acordo com os requisitos de utilização e acordados com o proprietário da construção.

A deformação final é obtida através da deformação inicial, w_{int} , mais a deformação por fluência, w_{creep} . A deformação por fluência é obtida através da multiplicação da porção de deformação associadas à situação de projeto quase-permanente ($\psi_{2,i}$) pelo coeficiente de deformação, k_{def} (dependente da classe de utilização e do material de construção).

A verificação das deformações aos ELS foi realizada apenas para os painéis de pavimento CLT e para as vigas altas CLT que apresentaram maiores deformações aos ELU. Assim, foram selecionadas as vigas altas CLT localizadas na base e no topo da estrutura, sujeitas à sucção do vento na direção X e Y e dois painéis de pavimento localizados no 9º andar do edifício. A Tabela 41 apresenta os resultados da deformação inicial (CO19), de fluência (CO20) e final (CO21) para a situação de projeto quase-permanente e os resultados da deformação inicial (CO22 – vento em X e CO23 – vento Y) e final (CO24 – vento em X e CO25 – vento Y) para a situação de projeto característica.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 41 – Resultados dos limites de deformação aos ELS para as vigas altas CLT (Suface No. 421 e 424) e painéis de pavimento (Suface No. 801 e 843) mais deformados.

Surface No.	Point No.	Point Coordinates [m]			Loading	Type of Combination	Displacements [mm]		Ratio u_z [-]
		X	Y	Z			u_z	Limit u_z	
421	341	0.000	24.680	29.200	CO19	Quasi-permanent	0.7		
	341	0.000	24.680	29.200	CO20	Quasi-permanent	0.4		
	341	0.000	24.680	29.200	CO21	Quasi-permanent	1.1	35.2	0.03
	106822	3.952	24.680	29.200	CO22	Characteristic 1	12.9	29.3	0.44
	106822	3.952	24.680	29.200	CO23	Characteristic 1	5.8	29.3	0.20
	106822	3.952	24.680	29.200	CO24	Characteristic 2	13.2	44.0	0.30
424	5796	0.000	0.000	29.200	CO19	Characteristic 1	0.7	29.3	0.02
	5796	0.000	0.000	29.200	CO20	Characteristic 1	0.4	29.3	0.01
	5796	0.000	0.000	29.200	CO21	Quasi-permanent	1.1	35.2	0.03
	107403	3.952	0.000	29.200	CO22	Characteristic 1	12.9	29.3	0.44
	107430	4.446	0.000	30.480	CO23	Characteristic 1	7.6	29.3	0.26
	107403	3.952	0.000	29.200	CO24	Characteristic 2	13.1	44.0	0.30
801	242977	24.800	18.300	27.000	CO19	Quasi-permanent	10.4		
	242977	24.800	18.300	27.000	CO20	Quasi-permanent	6.7		
	242977	24.800	18.300	27.000	CO21	Quasi-permanent	17.1	35.2	0.48
	242977	24.800	18.300	27.000	CO22	Characteristic 1	15.6	29.3	0.53
	242977	24.800	18.300	27.000	CO23	Characteristic 1	15.4	29.3	0.53
	242977	24.800	18.300	27.000	CO24	Characteristic 2	22.3	44.0	0.51
843	6555	33.600	22.500	27.000	CO19	Quasi-permanent	9.1		
	6555	33.600	22.500	27.000	CO20	Quasi-permanent	5.9		
	6555	33.600	22.500	27.000	CO21	Quasi-permanent	15.1	35.2	0.43
	6555	33.600	22.500	27.000	CO22	Characteristic 1	14.4	29.3	0.49
	6555	33.600	22.500	27.000	CO23	Characteristic 1	14.3	29.3	0.49
	6555	33.600	22.500	27.000	CO24	Characteristic 2	20.3	44.0	0.46
Maximum Displacement / Maximum Displacement Ratio									
801	242977	24.800	18.300	27.000	CO24	Characteristic 2	22.3	44.0	0.51
	242977	24.800	18.300	27.000	CO22	Characteristic 1	15.6	29.3	0.53

Max ratio: 0.53 ≤ 1

5.5.2.2.1. MANUTENÇÃO DO ASPECTO DOS PAVIMENTOS NA SITUAÇÃO DE PROJECTO QUASE-PERMANENTE

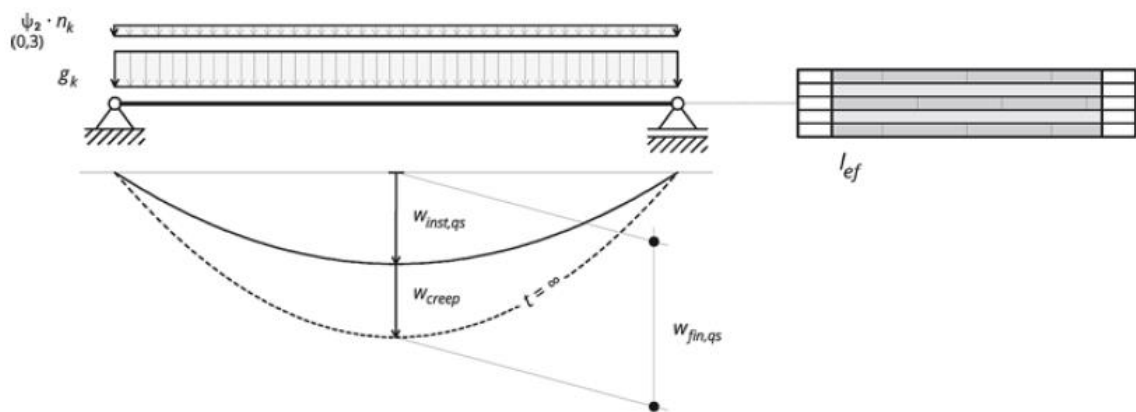


Fig. 110 – Deformações segundo a situação de projeto quase-permanente (Novak *et al.*, 2014).

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

A verificação é realizada para os painéis de pavimento CLT que apresentaram maior deformação aos ELU.

$$w_{inst,qs} = w_G + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot w_{Q,i} = 10,4 \text{ mm} \quad (100)$$

$$w_{creep} = k_{def} \cdot w_{inst,qs} = 6,7 \text{ mm} \quad (101)$$

$$w_{fin,qs} = w_{inst,qs} + (1 + k_{def}) \leq \ell/250 = 17,1 \text{ mm} \leq 35,2 \text{ mm} \text{ ok} \quad (102)$$

5.5.2.2.2. PREVENÇÃO DE DANOS E DA LIMITAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DOS PAVIMENTOS NA SITUAÇÃO DE PROJETO CARACTERÍSTICA

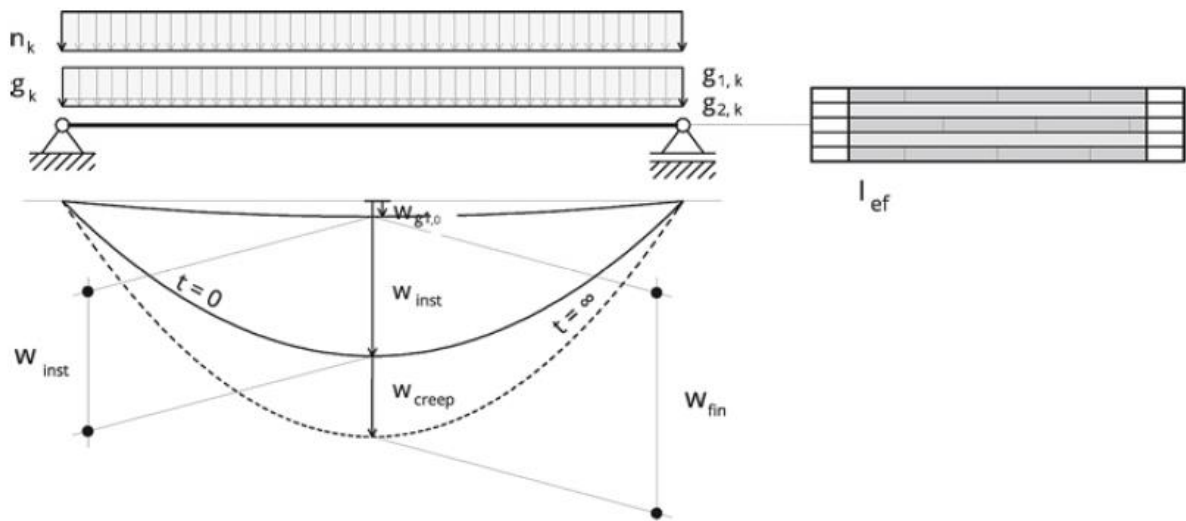


Fig. 111 – Deformações segundo a situação de projeto caraterística (Novak *et al.*, 2014).

$$w_{inst} = (w_{g,1} + w_{g,2}) + w_{q,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot w_{q,i} \leq \ell/300 \quad (103)$$

$$= 15,6 \text{ mm} \leq 29,3 \text{ mm} \text{ ok}$$

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} \leq \ell/200 = 22,3 \text{ mm} \leq 44 \text{ mm} \text{ ok} \quad (104)$$

5.5.2.3. DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS ENTRE PISOS

Os deslocamentos horizontais foram avaliados para todas as combinações da envolvente, contudo apenas serão apresentados os resultados das combinações que produziram valores de deslocamento mais elevados segundo a direção longitudinal (X) e transversal (Y) do modelo rígido e do modelo flexível do *UT system*.

5.5.2.3.1. MODELO RÍGIDO

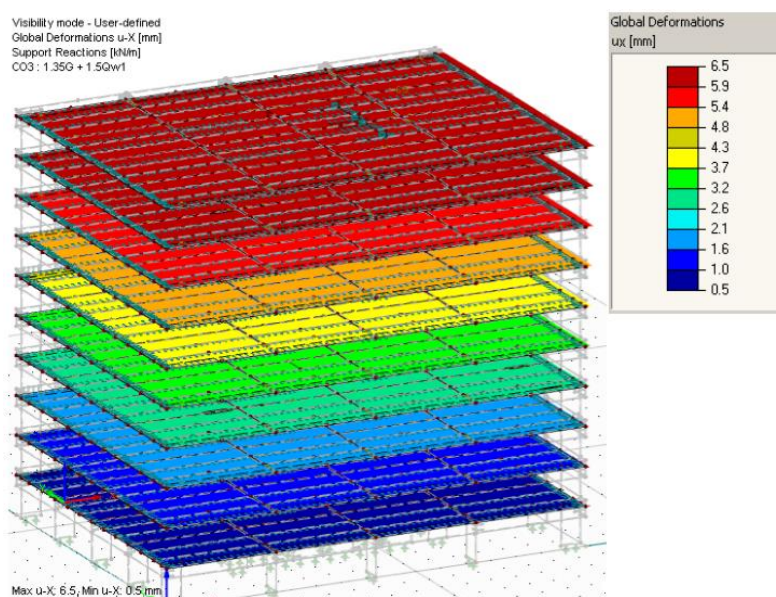


Fig. 112 – Deslocamento entre pisos segundo a direção longitudinal (X) do modelo rígido do *UT system*.

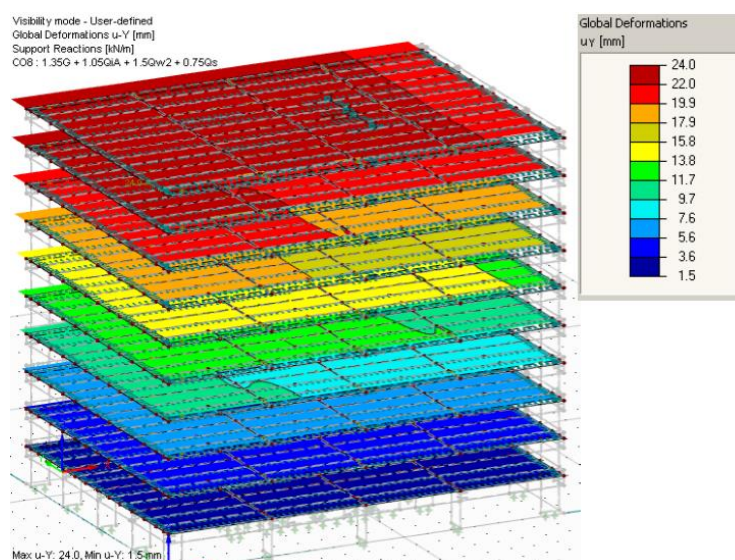


Fig. 113 – Deslocamento entre pisos segundo a direção transversal (Y) do modelo rígido do *UT system*.

5.5.2.3.2. MODELO FLEXÍVEL

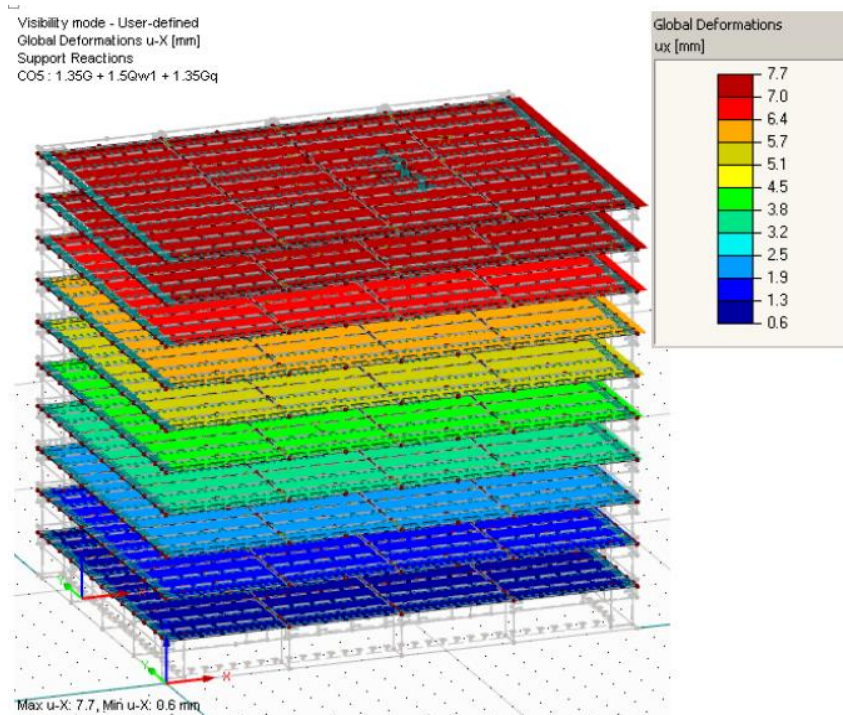


Fig. 114 – Deslocamento entre pisos segundo a direção longitudinal (X) do modelo flexível do *UT system*.

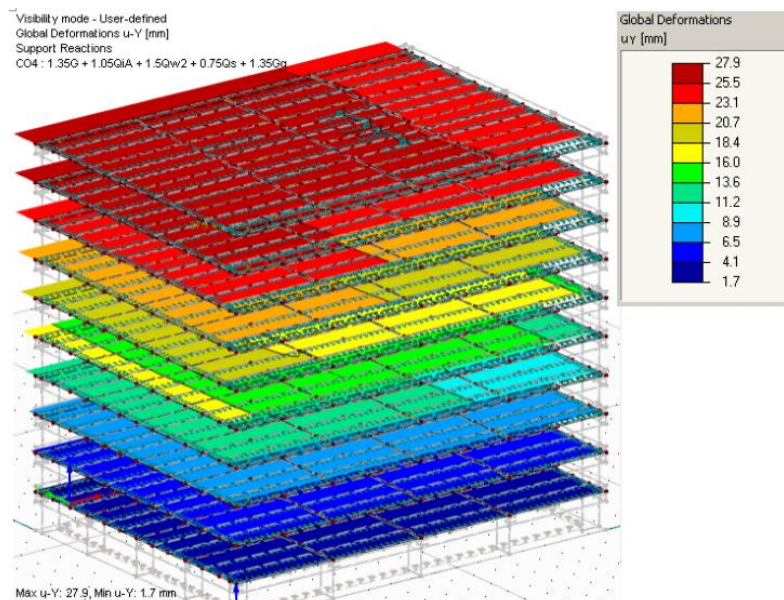


Fig. 115 – Deslocamento entre pisos segundo a direção transversal (Y) do modelo flexível do *UT system*.

5.6. ASPETOS RELEVANTES PARA O DIMENSIONAMENTO ÀS SOLICITAÇÕES HORIZONTAIS

Independentemente da localização, o dimensionamento de um edifício em altura é geralmente governado pela ação do vento ou sismo. Assim, a forma estrutural do edifício está condicionada pela necessidade de inclusão de elementos estruturais que providenciem rigidez lateral ao edifício. O dimensionamento de estruturas em altura deve estar focado na obtenção da rigidez estrutural em vez da resistência estrutural, uma vez que, as deformações governam o mesmo. Na construção em CLT a rigidez lateral estrutural é obtida através de painéis de parede CLT, sendo de extrema importância a obtenção de uma proporção adequada dos mesmos, por norma a tornar a estrutura resistente a carregamentos laterais e limitando as deformações entre pisos.

Outra função dos painéis de parede CLT consiste no transporte das cargas gravíticas até às fundações. Em situações onde as estruturas não apresentem paredes suficientes para transportar toda a carga gravítica, os pavimentos são geralmente suportados por sistemas de vigas e pilares de madeira lamelada colada. Segundo Buchanan e Smith (2015) a necessidade de limitar os deslocamentos laterais condiciona a forma estrutural do edifício e pode governar o dimensionamento das ligações entre os elementos estruturais. As estruturas em CLT são caracterizadas por um elevado número de ligações devido às limitações impostas pelo tamanho de produção dos painéis, transporte dos painéis ou ainda pela sua colocação em obra. Cada uma dessas ligações origina uma zona onde a rigidez do sistema estrutural é reduzida. O dimensionamento preliminar das estruturas deve ter em consideração o impacto das ligações sobre a rigidez total do edifício, caso contrário pode ser necessário aumentar o número de paredes ou utilizar ligadores com custos elevados numa fase de dimensionamento detalhado.

A quantificação da rigidez de todos os elementos de madeira, bem como das suas ligações é um aspeto fulcral para caracterizar corretamente o sistema resistente a cargas laterais de um edifício. Os fabricantes de ligações tipicamente utilizadas nas construções em CLT (cantoneira para tração e para corte) fornecem geralmente os valores de resistência dos dispositivos de ligação, contudo existe uma falta de informação sobre a rigidez dos mesmos. Desta forma, os projetistas estão dependentes dos resultados obtidos através de ensaios experimentais, uma vez que o cálculo analítico da rigidez segundo o EC5 não têm em consideração a deformabilidade elástica e plástica das placas metálicas e dos parafusos de rosca aplicados na base das ligações, originando valores substancialmente superiores aqueles obtidos experimentalmente.

Os edifícios altos em madeira possuem uma elevada flexibilidade devido ao elevado número de ligações e às características mecânicas da madeira. Essa característica faz com que o período natural da estrutura seja elevado, ou seja, o dimensionamento ao corte na base da estrutura, proveniente das cargas laterais associadas à ação do vento é geralmente superior aquelas originadas por possíveis sismos, mesmo em zonas sísmicas elevadas. Outro problema associado a todas as construções em altura passa pelo controlo das vibrações induzidas pelo vento no edifício, proporcionando conforto aos ocupantes. Nas construções em madeira em altura essa problemática pode ser mais difícil de ultrapassar, devido ao baixo peso e rigidez dos edifícios em madeira em comparação com o aço ou betão. Existem no entanto soluções disponíveis, nomeadamente, a utilização de amortecedores de massa sintonizados (*tuned mass dampers*) ou através da realização de ensaios num túnel de vento, com o intuito de melhor compreender os efeitos de vibração induzidos pelo vento na estrutura e posteriormente efetuar as devidas modificações no perfil do edifício.

Os diafragmas desempenham um papel importante na resistência de uma estrutura às solicitações do vento, uma vez que, proporcionam a união dos elementos de resistência de carga lateral, que é crucial para um bom desempenho e estabilidade estrutural. Outro aspeto relevante passa pela necessidade de garantir a transferência de carga entre os elementos da fachada para os elementos resistentes à carga vertical. As cargas uniformemente distribuídas ao longo das bordas do diafragma, originadas pela ação do vento, devem ser transferidas para as restantes zonas do diafragma de modo a ativá-lo na sua totalidade. O efeito de sucção do vento nas fachadas dos edifícios obriga á utilização de ligações resistentes à tração entre os diversos painéis pertencentes aos diafragmas e entre todos os componentes pertencentes às fachadas.

O dimensionamento ao sismo de uma estrutura de madeira em altura não pode em circunstância alguma ser negligenciado, mesmo que os valores das cargas do vento sejam superiores às cargas sísmicas de dimensionamento. Dentro das inúmeras razões para não se desprezar o dimensionamento ao sismo pode-se destacar as seguintes: as normas de dimensionamento ao sísmico fornecem valores esperados máximos que por vezes são amplamente excedidos, um edifício residencial alto em madeira possui consequências de colapso muito superiores em relação a construções de baixa envergadura, as ligações podem ocasionalmente ter roturas frágeis caso o dimensionamento não seja adequado. Todos os edifícios em madeira altos devem ser projetados para manter os objetivos segurança dos ocupantes sob carga sísmica máxima credível.

O projeto sísmico de uma estrutura em madeira em altura deve ter em consideração aspetos como: a ductilidade das ligações, dimensionamento da capacidade, os efeitos modais mais elevados e o dimensionamento dos diafragmas. A ductilidade de uma estrutura de madeira é geralmente obtida segundo o dimensionamento de cedência dos ligadores de aço, ou seja, através da formação de rótulas plásticas nos ligadores do tipo cavilha (pregos, parafusos, cavilhas, etc.). Uma vez que, a madeira apresenta um comportamento frágil após a fase elástica, a ductilidade fornecida pelas ligações é fundamental para a manutenção da resistência adequada da estrutura e na prevenção do colapso para carregamentos superiores aqueles previstos no dimensionamento. Os ligadores aplicados nos elementos de madeira apresentam geralmente um comportamento de compressão típico nos seus ciclos histeréticos devido à rotura por esmagamento da madeira (*embedment failure*). Quando uma ligação apresenta um mecanismo de rotura onde ocorra apenas esmagamento da madeira, a resistência da ligação segundo carregamentos cíclicos é nula até que se atinja novamente a carga máxima que provocou o esmagamento da madeira. Para garantir alguma resistência residual é importante garantir que o mecanismo de rotura das ligações seja governado pela formação de rótulas plásticas nos ligadores de aço, em vez da ocorrência de esmagamento da madeira. A utilização de ligadores do tipo cavilha com diâmetros reduzidos conduz geralmente a mecanismos de rotura desejados, contudo para cavilhas maiores ou ligações com elevada resistência deve-se ter especiais cuidados no dimensionamento, por norma a evitar roturas frágeis.

Outro aspeto importante para o dimensionamento sísmico de um edifício passa por assegurar que o carregamento sísmico para além da resistência elástica de um edifício conduza apenas a roturas dúcteis, evitando as roturas frágeis súbitas. Geralmente este objetivo é alcançado quando os componentes dúcteis (ligações) da estrutura são dimensionados para suportarem grandes deformações cíclicas e todos os outros elementos estruturais com comportamento menos dúctil ou frágil são dimensionados segundo fatores de sobre resistência. Este principio é denominado por dimensionamento da capacidade e pode ser melhor compreendido através da analogia de uma corrente (ver Fig. 116), onde a capacidade resistente máxima é ditada pelo elo de ligação mais fraco e quando esse tem um comportamento dúctil, toda a corrente se torna dúctil.

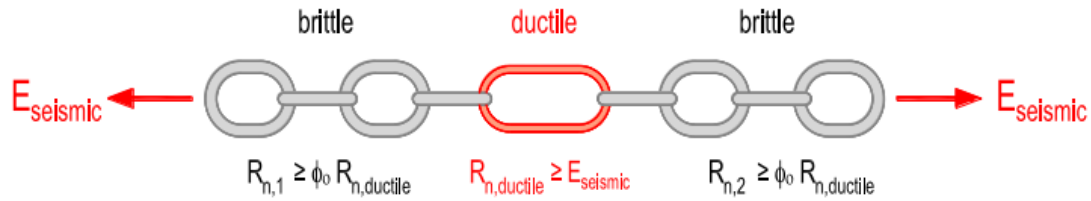


Fig. 116 – “Capacity design” através da analogia da corrente (modificado de Paulay and Park (1975).

Onde: $E_{seismic}$ é ação sísmica; $R_{n,ductile}$ é a resistência dúctil do elemento; ϕ_0 é o fator de sobre resistência do elemento dúctil e $R_{n,i}$ é a resistência do elemento frágil “i”) (modificado de Paulay and Park (1975)

Moroder *et al.* (2016) investigaram o comportamento dinâmico de vários edifícios multifamiliares em madeira submetidos à carga sísmica. Através de análises dinâmicas temporais não lineares concluíram que as forças de corte de base aplicadas nos diafragmas apresentam uma distribuição quase constante ao longo da altura do edifício e podem ser 2 a 5 vezes superiores às forças determinadas por uma análise estática equivalente. Portanto, para estrutura de madeira altas a utilização de uma análise estática equivalente, prescrita pelo EC8, não produzirá ações de dimensionamento sísmico exatas para paredes, pórticos e diafragma de pavimentos. Segundo este método simples de dimensionamento sísmico, a resposta dinâmica de uma estrutura é governada pelo primeiro período natural, proporcionando uma distribuição linear das forças de corte de base, ao longo da altura do edifício. Uma análise estática equivalente não caracteriza o comportamento flexível do sistema de resistência de carga lateral. Segundo Moroder *et al.* (2016), as estruturas em madeira em altura (número de pisos superior a quatro) são fortemente afetadas pelos efeitos modais mais elevados, devido à baixa rigidez dos sistemas de resistência de carga lateral em comparação com outros materiais de construção. Moroder *et al.* (2016) referem ainda que a amplificação dinâmica e os fatores de sobre resistência devem ser tidos em consideração na fase de projeto dos elementos estruturais com capacidade protegida. Num edifício de madeira em altura onde se espera uma resposta essencialmente elástica, os métodos de análise dinâmica lineares tornam-se mais aceitáveis. Assim, uma análise linear modal por espectros de resposta proporcionará uma melhor representação da contribuição dos efeitos modais mais elevados no sistema de resistência de carga lateral.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Moroder *et al.* (2016) investigaram a influência da rigidez dos diafragmas no comportamento dinâmico das estruturas de madeira em altura e concluíram que: os diafragmas de madeira tendem a ser mais flexíveis em comparação com os de betão; a flexibilidade dos diafragmas de madeira não influencia significativamente o corte máximo por piso e a distribuição do momento máximo em sistemas estruturais porticados ou de paredes; a utilização de diafragmas flexíveis em sistemas estruturais de paredes pode proporcionar um aumento nos esforços nos diafragmas nos pisos inferiores, para diafragmas flexíveis os deslocamentos entre pisos são consideravelmente superiores aos deslocamentos das paredes estruturais, tornando-se necessário limitar os deslocamentos no plano dos diafragmas de forma a proteger os elementos não estruturais, estruturas secundárias ou qualquer elementos estrutural de suporte gravítico.

6. CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Com o crescimento populacional nos centros urbanos, a construção em altura torna-se cada vez mais uma realidade para o setor da construção civil. A aplicação do sistema construtivo CLT à construção em altura tem suscitado interesse por parte do sector da construção (investigadores, engenheiros, arquitetos, empreiteiros, fabricantes), sendo apontada como uma possível alternativa sustentável aos perfis construtivos correntes (betão armado e aço).

O CLT é um material fabricado através de madeira colhida de florestas geridas de forma sustentável e possui uma série de características ambientais positivas, nomeadamente: o armazenamento a longo prazo do carbono absorvido pelas árvores cultivadas de forma sustentável e a produção de CLT está associada a emissões de gases de efeito estufa muito inferiores em comparação com outros materiais de construção tradicionais (betão, aço, alvenaria, etc). Muitas das estruturas CLT construídas recentemente beneficiam dessas considerações ambientais. Por exemplo, o edifício multifamiliar Stadhaus, localizado em Londres, usou o fato de as construções em madeira possuírem perfis ambientais mais favoráveis do que o betão armado, para obter aprovação preferencial das autoridades locais de planeamento das construções.

A versatilidade do CLT como sistema construtivo é uma característica que tem suscitado interesse a arquitetos e engenheiros, uma vez que os painéis podem ser usados em todos os elementos estruturais de uma construção (paredes, pisos e telhados) e permitem a criação de vão com grandes dimensões (até 7,5 m sem a utilização de vigas ou pilares). Para a obtenção de vão superiores é necessário a utilização de pilares ou vigas e treliças ou sistemas de vigas e pilares com cabos de pré-esforço. De referir que as os painéis de pavimento podem ser apoiados diretamente em pilares sem a utilização de vigas, devido à capacidade de transporte de carga bidirecional dos painéis CLT e ao potencial efetivo de distribuição das cargas pontuais. A sua capacidade de ser utilizado como um sistema panelizado e/ou modular torna-o ideal para a utilização em edifícios existentes. O CLT pode ser usado em conjunto com qualquer outro material e permite o uso de uma vasta gama de acabamentos pré-instalados em fábrica.

Devido ao peso reduzido do CLT, cerca de um quinto do peso do betão armado, a utilização de gruas móveis é suficiente para a montagem dos painéis no local da obra. Desta forma, é possível economizar custos substanciais na montagem devido à redução de despesas na contratação de maquinarias e de mão-de-obra. Como a maioria do trabalho ocorre na fábrica, não existe necessidade de grandes operações especializadas no local da obra, sendo apenas necessário habilidades de carpintaria e ferramentas elétricas. A necessidade de execução de argamassa húmidas são amplamente eliminadas, o desperdício é consideravelmente reduzido, existe uma maior segurança no local de obra, existe um menor incómodo para os vizinhos (níveis de ruído reduzidos).

A simplicidade de manipulação dos painéis CLT na construção e o elevado nível de prefabricação envolvido permitem um tempo de ereção rápido, reduzindo consideravelmente as durações gerais do cronograma da construção. As aberturas para janelas, portas, escadas e instalações podem ser pré-cortadas em fábrica usando máquinas CNC. Os painéis CLT são geralmente transportados até ao local da obra através de camiões com reboque articulado padrão (capacidade máxima de 25 toneladas) e posteriormente são erguidos por uma grua móvel até ao local de montagem efetuada por meio de sistemas de fixação mecânica (parafusos auto-perfurantes de rosca completa, cavilhas, cantoneira para tração e corte, placas metálicas de pregos, etc).

Assim, o sistema construtivo CLT torna-se economicamente vantajoso quando aplicado a empreendimentos de larga escala (edifícios multifamiliares, escolas, edifícios comerciais, etc.) devido aos benefícios associados ao elevado grau de pré-fabricação: tempos de execução mais rápidos, maior segurança e higiene na obra, menor necessidade de espaço na obra, menor número de operários especializados e maquinarias necessários/as e menor desperdício dos materiais.

A baixa condutividade térmica da madeira proporciona às construções em CLT a redução da transferência de calor e o desperdício de energia, e permite a redução dos problemas associadas às pontes térmicas entre os ambientes internos e externos. Construções com desempenhos térmicos elevados necessitam de menores quantidades de energia para manter a temperatura ambiente segundo os níveis de conforto, traduzindo-se numa redução das emissões de carbono. Especial atenção deve ser dada às paredes externas, pois estas não devem ser expostas

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

diretamente às condições externas devido aos problemas de durabilidade da madeira na presença de umidade. Assim, os edifícios CLT possuem geralmente uma camada protetora em alvenaria ou uma fachada de alumínio ou fibrocimento.

O desempenho acústico do sistema construtivo CLT é excelente e semelhante a outros tipos de construção tradicionais. Tal como acontece com outros tipos de construção, os sistemas CLT não dependem inteiramente do material base para obter o desempenho requerido pelas normas. Ou seja, o desempenho geral depende da utilização de materiais isolantes, paredes duplas, tetos falso, tiras de amortecimento de vedante de poliuretano ou borracha natural laminada nas juntas entre pavimentos e paredes, etc.

Segundo ensaios sísmicos realizados por várias entidades (IVALSA, LNEC, etc.) os prédios CLT apresentaram comportamento dúctil e boa dissipação de energia. Contudo, foi demonstrado que o comportamento é amplamente influenciado pelas ligações mecânicas utilizadas entre os diversos elementos estruturais da estrutura.

À medida que os edifícios de madeira se tornam mais altos, existe também a expectativa de que os edifícios de madeira possam apresentar desempenho ao fogo semelhantes aos edifícios altos constituídos por materiais não combustíveis, quando sujeitos a condições de incêndio. As normas internacionais da construção estabelecem como prioritária a segurança de vida dos ocupantes na presença de fogo. Para tal, é obrigatório a instalação de sistemas de deteção e notificação precoce de incêndios, meios de supressão ativa de incêndios e meios adequados de evacuação. Um conceito-chave imposto pelos requisitos ao fogo das construções é a resistência ao fogo, contudo esta pode não estar necessariamente relacionada com a combustibilidade do CLT. Os elementos CLT possuem uma excelente resistência de fogo devido às secções transversais espessas que, quando expostas ao fogo, são carbonizadas a uma taxa lenta e previsível. Contudo, para estruturas de madeira, a resistência ao fogo é geralmente conseguida através da proteção da madeira exposta com placa de gesso cartonado ou sobre dimensionando os elementos estruturais de madeira expostos, garantindo uma capacidade de carga sustentada por um período de tempo superior aquele necessário para a extinção do fogo pelas corporações dos bombeiros. A compartimentação típica dos edifícios CLT em combinação com os placas de gesso cartonado torna mais complicada a propagação do fogo para salas ou pisos adjacentes. Para edifícios em altura é obrigatório a criação de compartimentos antifogo de modo a acomodar os ocupantes que não consigam ser evacuados no decorrer do incêndio. As

legislações ainda não permitem que esses compartimentos antifogo sejam constituídos por materiais combustíveis. Desta forma, a construção destes compartimentos em CLT necessita de cuidados de proteção adicionais (proteção com materiais incombustíveis ou sistemas de extinção de incêndio) e fica sujeita à aprovação por parte das entidades legislativas da construção.

6.2. FUTURAS INVESTIGAÇÕES

Devido à brevidade da implementação do sistema construtivo CLT existem temáticas que necessitam de ser investigadas e/ou aprofundadas, tais como:

A resistência das estruturas a carregamentos laterais é vista como um dos principais obstáculos associado à construção em altura em CLT. Desta forma, o desenvolvimento de fatores de ductilidade (R) para os diversos sistemas resistentes a carregamentos laterais existentes (paredes CLT e sistemas híbridos), a criação de normas de dimensionamento a carregamentos laterais (sismo e vento) e a realização de ensaios de desempenho sísmico, são temáticas prioritárias a desenvolver em futuras investigações. Os diafragmas são componentes estrutural críticos para o dimensionamento às solicitações laterais de qualquer estrutura em altura. Apesar de os diafragmas CLT serem mais robustos que os diafragmas de estruturas de madeira tradicionais, a avaliação quantitativa das suas propriedades de resistência e rigidez deve ser determinada de modo a proporcionar um dimensionamento estrutural racional. A realização de ensaios experimentais à escala real, segundo diferentes configurações de ligações, é fundamental para quantificar o comportamento e os modos de rotura dos diafragmas CLT. Em suma, seria importante o desenvolvimento e a validação de normas referentes a metodologias de dimensionamento e análise de diafragmas CLT, com recurso aos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais à escala real.

O aparecimento de novos sistemas estruturais híbridos, como é o caso do *UT system* e do *Pres-Lam system*, veem potenciar a capacidade resistente das estruturas CLT às solicitações laterais, através da incorporação de dispositivos com capacidade dissipadora de energia, conferindo à estrutura um grau de ductilidade superior e um desempenho resiliente durante um possível evento sísmico. Salienta-se a necessidade de investigações adicionais no âmbito da compatibilidade de deformações entre os elementos responsáveis pela transmissão de cargas

gravíticas e os sistemas resistentes às cargas laterais, visando garantir um desempenho de construção satisfatório de toda a estrutura, durante um evento sísmico de larga escala.

À medida que a cércea e as dimensões de um edifício em madeira aumentam existe a necessidade da criação de ligações e detalhes construtivos com capacidade superior. Desta forma, haverá uma necessidade constante de inovação nos sistemas de ligação por forma a suprir as necessidades impostas pelo setor da construção civil. Ou seja, à medida que são desenvolvidos novos sistemas de ligação, surge a necessidade de realizar ensaios e pesquisas para validar os seus desempenhos e posteriormente desenvolver diretrizes de dimensionamento dos mesmos. É provável este o trabalho de investigação seja conduzido pela indústria, contudo salienta-se a necessidade para o desenvolvimento de metodologias que permitam a determinação da rigidez das ligações, visto que, a indústria apenas fornece valores para as capacidades resistentes da ligação, tornando-se complicado quantificar realisticamente a rigidez das ligações nos softwares de dimensionamento.

Devido à leveza do material, existem necessidades de normas de dimensionamento que permitam determinar o desempenho dos pisos CLT à vibração, uma vez que o dimensionamento dos mesmos é geralmente controlado pela rigidez em vez de pela resistência. A vibração provocada pela ação do vento em edifícios de madeira altos é outra consideração de projeto que necessita de maior investigação. Desta forma, é de extrema importância que todos os mecanismos que provoquem vibração à estrutura sejam suavizados para os níveis mínimos admissíveis, garantindo o conforto do ocupante e, respetivamente um bom desempenho estrutural.

É urgente o desenvolvimento de métodos de dimensionamento padronizados, bem como um nível superior de investigações, que permitam sustentar a aceitação legislativa do sistema construtivo CLT pelos Euro códigos. Para ocorrer um crescimento sustentado da indústria CLT, é necessário que os edifícios altos de CLT com 8 a 20 pisos se tornem num tipo de construção padronizado e reconhecido pelos Euro códigos. Para tal, será necessário uma pesquisa e recolha extensa de dados sobre o desempenho das construções CLT, a nível estrutural, conservação e incêndio. Eventualmente, o desenvolvimento de edifícios CLT economicamente viáveis com desempenho sísmico superior ao requerido pelos Euro códigos será um objetivo a alcançar pelos centros de investigação e engenheiros.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Paralelamente ao que acontece com outros produtos de madeira estrutural, (LVL e vigas em I) as propriedades mecânicas do CLT são dependentes do fabricante. As propriedades mecânicas são fornecidas por cada fabricante com base nas propriedades obtidas através de ensaios, sendo necessário o conhecimento prévio do fabricante aquando do processo de dimensionamento. A norma europeia do produto CLT, EN 16351 [4], foi recentemente lançada, contudo persiste a necessidade de estabelecimento de um sistema de classes de resistência para o CLT, considerando as propriedades mecânicas do material base (lamela) e das condições de referência: teor de umidade, seção transversal, número de camada, espaçamento entre lamelas, etc. A padronização das propriedades mecânicas do CLT poderia ser estabelecida de forma semelhante ao sistema de classes de resistência da madeira lamelada colada, estabelecido no Eurocódigo 5.

A realização de ensaios padronizados de desempenho ao fogo, bem como a criação de uma base de dados deveriam ser desenvolvidos e acordados dentro da indústria. Ensaios e a respetiva classificação devem ser realizados para ligações com diferentes níveis de ocultação. O impacto ao fogo dos diferentes adesivos, utilizados no processo de fabrico do CLT, deve ser sujeito a análise de modo a estabelecer termos de comparação entre os diferentes tipos de adesivos.

Existe a necessidade de desenvolver modelos numéricos que permitam determinar o desempenho ao fogo das construções em CLT e subsequentemente permitam efetuar análises de risco. Apesar de o CLT apresentar um desempenho ao fogo superior em relação a outros tipo de sistemas porticados de madeira, existe ainda a necessidade de se provar que os sistemas de proteção contra incêndio aplicados às construções em altura em CLT apresentam um desempenho semelhante às construções em altura com materiais não combustíveis.

A revisão das normas de construção referentes à segurança contra incêndios deve ser prioritária, de forma a possibilitar a aprovação dos projetos de dimensionamento das estruturas altas em CLT ao fogo com maior facilidade. Para tal, as normas devem prestar menor atenção à combustibilidade dos elementos estruturais e focarem-se mais nos aspetos referente à segurança de vida e resistência ao fogo.

É necessária uma pesquisa quantitativa de dados baseados em aspetos que permitam a redução de custos em projetos CLT. O desenvolvimento de estudos de caso com informações detalhadas sobre custos, estudos de impacto económico completos e pesquisas do mercado geral associada

a custos seriam bastante benéficos para a avaliação dos custos associados ao sistema construtivo CLT.

6.3. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS PARA O DIMENSIONAMENTO DO *UT SYSTEM*

A elaboração deste trabalho de investigação teve como principal objetivo a realização de um estudo de viabilidade do *UT system*, sistema estrutural inovador aplicado a estruturas altas em CLT, em desenvolvimento na Universidade do Minho.

Como foi supramencionado no tópico 5.6, o *UT system* em combinação com a tecnologia Pres-lam constituem uma solução com potencial para solucionar as principais problemáticas associadas à construção altura de edifícios em madeira. Apesar do vasto trabalho de investigação desenvolvido na presente dissertação, salienta-se a necessidade da continuação do mesmo. Assim, serão citados alguns dos aspetos mais relevantes a ter em consideração em futuras investigações para o dimensionamento do *UT system*.

- realização da análise dinâmica sísmica (por exemplo: análise de força estática equivalente, com base na análise de espectro de resposta multimodal);
- realização da análise dinâmica do vento;
- realização do dimensionamento estrutural ao fogo do *UT system*;
- estudo aprofundado dos efeitos da vibração na estrutura provocados pelas ações horizontais;
- ensaios experimentais num modelo à escala do *UT system* de modo a caracterizar corretamente o sistema estrutural quando sujeito a carregamentos dinâmicos;
- estudo sobre novas soluções de ligação entre os elementos estruturais, nomeadamente, ligação vigas parede através de um grupo de cavilhas aplicados na zona central das paredes CLT;
- estudo sobre a influência do sistema Pres-Lam no comportamento dinâmico da estrutura, nomeadamente, controlo das deformações entre pisos, dissipação de energia do sistema e seus componentes e quantificação dos danos estruturais;
- estudo da rigidez dos diafragmas no comportamento dinâmico do *UT system*;
- estudo sobre simplificações a efetuar na modelação de edifícios altos em CLT;
- estudo económico de viabilidade do *UT system*.

6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES DA ANÁLISE AO UT SYSTEM

Após realizada a modelação do edifício alto em CLT proposto, chegou-se à conclusão que o sistema estrutural *UT system*, em desenvolvimento na Universidade do Minho, representa uma solução estrutural extremamente viável para a construção em altura de edifícios CLT multifamiliares. Através dos resultados obtidos segundo as verificações aos ELU e ELS é possível afirmar que o sistema estrutural apresenta um bom comportamento relativamente às ações verticais e horizontais consideradas. De referir que verificação da ação sísmica não foi tida em consideração para esta dissertação devido à complexidade da estrutura (elevado número de elementos finitos a ter em consideração), impossibilitando a realização da análise de força estática equivalente, com base na análise de espectro de resposta multimodal.

Ao utilizar um software de análise de elementos finitos é necessário muitas das vezes efetuar-se simplificações de detalhes geométricos, cargas e situações de fronteira para que o tempo de análise do modelo não se torne demasiado grande. Contudo, estas simplificações podem conduzir a singularidades no modelo, nomeadamente, a ocorrência de tensões elevadas localizadas. Outro fator que pode contribuir para singularidades no modelo é incorreto refinamento da malha de elementos finitos. Assim, cabe ao engenheiro estrutural a tarefa de definir o grau de refinamento da malha de elementos finitos a aplicar em cada projeto. De referir que para modelos com elevada dimensão os aspetos supramencionados tornam-se mais evidentes, uma vez que é muito provável que o engenheiro estrutural fique limitado pelas capacidade do hardware (memória RAM e processador).

Analisando os resultados obtidos para a verificação aos ELU, pode-se concluir que as tensões elevadas localizadas podem ser explicadas pelos seguintes fatores: incompatibilidade de deslocamentos entre os painéis CLT ligados adjacientemente ou aplicação de uma malha de elementos finitos pouco refinada. A incompatibilidade de deslocamentos pode estar associada à consideração da rigidez de deslizamento das cavilhas apenas nas na zona de ligação dos pavimentos com as vigas e paredes CLT, originando esforços internos localizados nos nós onde 3 ou 4 painéis CLT estejam ligados entre si. Por norma, é pratica comum desprezar-se os valores das tensões localizadas para a verificação aos Estados Limite Últimos. Desta forma, pode-se afirmar que a estrutura foi verificada aos Estados Limite Últimos em todas as zonas da estrutura.

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Relativamente à verificação à encurvadura dos pilares de parede CLT foi efetuado o cálculo da encurvadura segundo o eixo de menor inércia (perpendicular ao plano do painel) para o pilar mais solicitado, assumido um comprimento de encurvadura, $\ell_k = 1$. O pilar foi verificado à encurvadura com sucesso, contudo salienta-se a necessidade da realização de ensaios experimentais que permitam determinar a rigidez associada às condições de apoio entre paredes pré-esforçadas com a laje de betão armado e com as vigas duplas de madeira lamelada colada.

Analisando os resultados da Tabela 40 pode-se afirmar que a verificação ao corte de todas as ligações consideradas para a modelação foi cumprida com sucesso. Contudo, verifica-se um sobredimensionamento das ligações entre vigas duplas e os pilares CLT e as (VP(pilares)) e entre as vigas duplas e as lajes CLT (VL), apresentando um rácio de utilização ao corte por cavilha de 33% e 20%, respetivamente. Salienta-se a necessidade de um trabalho de investigação mais aprofundado sobre a quantificação da rigidez de todas as ligações associadas ao sistema Pres-Lam, bem como às ligações definidas para o *UT system*. Desta forma, seria relevante efetuar ensaios experimentais num modelo à escala do *UT system* para melhor compreender a rigidez associada às ligações quando sujeitas a carregamentos dinâmicos. Outro aspeto interessante seria investigar soluções estruturais de ligação diferentes, especialmente para as ligações entre as vigas duplas e os painéis de parede CLT. Divido à restrição rotacional da ligação entre as vigas duplas e as paredes CLT, ocorrem deformações nos pavimentos CLT quando os painéis de parede CLT são sujeitos ao efeito de oscilação. Esta incompatibilidade de deslocamentos poderá ser minimizada através da aplicação de um grupo de cavilhas na zona central de cada painel de parede CLT, permitindo assim que os painéis CLT sofram efeitos de oscilação sem que as vigas duplas sejam afetadas por esses deslocamentos, ou seja, permitindo que a ligação funcione como uma ligação rotulada.

No que diz respeito às verificações aos ELS obteve-se um rácio entre a deformação final e o limite máximo de 53% e 44% para o pavimento e viga profunda CLT mais solicitado/a, respetivamente. A verificação à vibração dos pavimentos foi realizada para o pórtico mais desfavorável, na fase de pré-dimensionamento da estrutura, com recurso ao software de cálculo *Calculatis*.

O deslocamento entre pisos foi analisado para ambos os modelos criados no software RFEM 5, rígido e flexível. Como seria de esperar o modelo rígido apresenta deformações inferiores

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

aquelas obtidas no modelo flexível, uma vez que, a consideração da rigidez das ligações em estruturas de madeira é fator determinante para a determinação das deformações das mesmas. A deformação máxima entre pisos foi determinada para o piso de cobertura, segundo direção perpendicular à fachada longitudinal do edifício (Y) para a combinação mais desfavorável (C04: $1,35 \cdot G_k + 1,0 \cdot P + 1,05 \cdot Q_{iA} + 1,5 \cdot Q_{w2} + 0,75 \cdot Q_s$), obtendo valores de 27,9 e 24 mm para o modelo flexível e rígido, respetivamente. Para carregamentos segundo os ELU é geralmente adotado um limite máximo das deformações entre pisos de 2,5% da altura do edifício. Atendendo à envergadura do edifício proposto, obtém-se uma deformação máxima permitida aos ELU de 75 cm. Em suma, o sistema estrutural *UT system* em conjugação com a tecnologia *Pres-Lam* proporcionam uma elevada rigidez e estabilidade às estruturas em altura CLT, sendo este facto sustentado pelas deformações entre pisos aos ELU inferiores a 1% da altura do edifício proposto.

Após realizada a modelação do *UT system* pode-se afirmar que a utilização de um sistema estrutural híbrido, composto por painéis de pavimento CLT em combinação com vigas duplas de madeira lamelada colada, fixadas lateralmente às paredes estruturais, permite a criação de vãos com elevadas dimensões (8,8 m) para uma esbelteza reduzida dos pavimentos (280 mm). Desta forma, comprova-se a excelente flexibilidade arquitectónica do *UT system*, capaz de solucionar os problemas associados à excessiva compartimentação dos sistemas monolíticos CLT.

Analisando os deslocamentos entre pisos obtidos no modelo flexível, pode-se afirmar que a aplicação da tecnologia *Pres-Lam* provou ser um solução estrutural eficaz, capaz de contrariar o efeito de derrubamento do edifício originado pela ação do vento, visto que, a diferença entre o modelo rígido (24,0 mm) e o modelo flexível (27,9 mm) é bastante reduzida (3,9 mm).

A utilização de vigas altas ao longo do perímetro do edifício e o sistema de vigas duplas fixadas mecanicamente nas faces laterais das paredes CLT contribuem para que o sistema estrutural do *UT system* funcione como uma unidade única. Desta forma, o sistema estrutural do *UT system* provou ser bastante rígido e resistente aos carregamentos considerados, assemelhando-se o comportamento global da estrutura ao de uma viga em consola encastrada.

A modelação das ligações do *UT system* provou ser um parâmetro determinante para o comportamento estrutural do edifício, especialmente no que diz respeito à verificação aos

Estados Limite de Serviço. Assim, é deveras importante que o engenheiro estrutural defina quais as ligações que devem ser consideradas como rígidas e quais as ligações que devem ser sujeitas a quantificação. Uma vez que o sistema construtivo CLT ainda não se encontra inserido no EC 5, o processo de quantificação da rigidez dos ligadores e dos dispositivos de ligação deve ser sujeito a ensaios laboratoriais, de modo a aproximar a modelação das ligações ao comportamento real das mesmas.

A aplicação do *UT system*, em combinação com a tecnologia *Pres-Lam*, às construções em altura (até 10 pisos) representam uma solução estrutural com enorme potencialidade para suprir a crescente necessidade de alojamento nas zonas urbanas. Além disso, a necessidade de um perfil construtivo mais sustentável, visando a diminuição dos níveis de CO₂ na atmosfera, poderá ser um fator determinante para a viabilidade do *UT system* e de todas as construções em madeira como sistemas alternativos às construções tradicionais em betão armado.

6.5. SÍNTESE

O sistema construtivo CLT apresenta características económicas, estéticas, ambientais e estruturais benéficas quando aplicado a construções em larga escala (edifícios comerciais, edifícios multifamiliares, etc.). No entanto, devido à brevidade do sistema construtivo CLT, existe ainda a necessidade de desenvolver normas europeias que permitam aos designers desenvolver facilmente projetos que cumpram com todos requisitos impostos pelas normas europeias da construção. Ou seja, é necessário a criação de normas referentes ao produto, ensaios e dimensionamento, modelos de carga padronizados para cálculo das propriedades do CLT com base nas propriedades das lamelas do material base, permitindo o uso de espécies e qualidades de madeira da região e o desenvolvimento de sistemas de ligação adequados para a montagem económica dos elementos CLT e que permitam um crescente grau de utilização em relação ao potencial de carga dos elementos CLT nas juntas. As normas europeias encontram-se em fase de revisão, tendo como objetivo incluir o sistema construtivo CLT no Eurocódigo 5. É ainda recomendado que sejam estabelecidas normas internacionais, que visem expandir os campos de aplicação do sistema construtivo CLT no mercado da construção, permitindo que o CLT faça concorrência aos materiais de construção baseados em minerais sólidos. Para tal, é fundamental o contributo proactivo dos centros de investigação, da indústria do CLT, do sistema de ensino e dos engenheiros e arquitetos. O crescimento exponencial da produção do CLT na Europa, ao longo dos últimos anos, é um indicador de que a construção em CLT é cada

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

vez mais uma realidade no mercado da construção. A necessidade de um perfil construtivo mais sustentável no sector da construção civil, visando a diminuição dos níveis de carbono, responsáveis pelo aquecimento global, vem impulsionar ainda mais a aposta no CLT como material de construção de eleição. Além disso, o sucesso na construção de edifícios como o Forté e o Stadthaus vêm comprovar a viabilidade do sistema construtivo CLT, mostrando ao público em geral que é possível a construção estruturas de madeira de alto desempenho com tamanhos e alturas até agora impensáveis. Espera-se que o mercado do CLT continue a crescer à medida que são executados novos projetos com sucesso, aumentando a confiança pública sobre este novo tipo de construção. O aprimoramento do sistema educativo relativamente à construção em madeira é fundamental, uma vez que o conhecimento humano é a chave de crescimento de qualquer indústria.

7. BIBLIOGRAFIA

- Ali, M.M. & Moon, K.S., "Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects", *Architectural Science Review*, vol. 50(3), 205–223, 2007.
- Athena Sustainable Materials Institute, 2012a. "Impact estimator". Retrieved July 12, 2012, from <http://calculatelca.com>.
- Athena Sustainable Materials Institute, 2012b. "Life cycle assessment of cross-laminated timber produced at Nordic Engineered Wood Products". Ottawa, ON: Athena Sustainable Materials Institute
- Augustin, M., 2008. "Timber structures - Handbook 1 of Educational materials for designing and testing of timber structures". Leonardo da Vinci Pilot Project No. CZ/06/B/F/PP/168007. Ostrava, Czech Republic: VSB-Technical University of Ostrava.
- Bernasconi A., 2012. "Timber construction in the city of Milan - 4 residential buildings with 9 storey". European Wood Network Meeting 2012 9-storey CLT Building in via Cenni a Milano.
- Blass J. & Fellmoser P., 2004. "Design of Solid Wood Panels with Cross Layers".
- Blass J. & Flaig M., 2012. "Stabförmige Bauteile aus Brettsperholz, *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau Band 24*". ISBN 978-3-86644-922-0, 2012 (German).
- Blass J. & Uibel T., 2006. "Load Carrying Capacity of Joints with Dowel Type Fasteners in Solid Wood Panels". International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB-W18/39-7-5, 2006.
- Blass J. & Uibel T., 2007. "Edge Joints with Dowel Type Fasteners in Cross Laminated Timber". International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB-W18/40-7-2, 2007.
- Bogensperger T., Augustin M., Schickhofer G., 2011. "Properties of CLT-Panels Exposed to Compression Perpendicular to their Plane". CIB-W18, 44-12-1, Alghero, 2011.
- Bogensperger T., Moosbrugger T. & Silly G., 2010. "Verification of CLT-plates under loads in plane". WCTE 2010, 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010.
- Build it Green (2008-2011): "Multifamily - Green Building Guidelines", Green Building, Alameda County, pp. 1-64.
- Calculatis, Software online de suporte ao dimensionamento de elementos CLT. Desenvolvido por: Stora Enso
- Ceccotti A. , Sandhaas C., Okabe M. , Yasumura M. , Minowa C. & Kawai N., 2013. "SOFIE project – 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building".
- Chapman J., 2010. "Cross Laminated Timber for Resisting Lateral Loads on Six Level Buildings".
- Christopoulos C., Filiatrault A., Uang C.-M. & Folz B., 2012. "Post tensioned Energy Dissipating Connections for Moment-Resisting Steel Frames". *ASCE Journal of Structural Engineering*. 129(9): 1111-1120, 2002
- Costa A., 2013. Construção de edifícios com Cross Laminated Timber (CLT).
- Coughlan P. & Coughlan D., 2002. "Action research for operations management". *International Journal of Operations & Production Management*, 22, 2 pp. 220-240
- Coutinho C., 2005. "Percursos da Investigação em Tecnologia Educativa em Portugal – uma abordagem temática e metodológica a publicações científicas (1985-2000) (Braga: I.E.)".
- Crespell P. & Gaston C., 2011. "The Value Proposition for Cross-Laminated Timber". FPI Innovation.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

- Devereux P., Holden J., Buchanan H. & Pampanin S., 2011. “*NMIT Arts & Media Building - Damage Mitigation Using Post-Tensioned Timber Walls*”. 9th PCEE, 2011.
- Dujic B., Klobcar S. & Zarnic R., 2008. “*Shear Capacity of Cross-laminated Wooden Walls*”. Research Paper, ResearchGate, viewed 12 October 2015.
- EN 14081-1:2016. “*Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements*”. By British-Adopted European Standard, 05/31/2016
- EN 16351:2015. “*Timber structures: Cross laminated timber – Requirements*”
- EN 1995-1-1:2004 (English). “*Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*”.
- European Technical Approval Z-9.1-721, 2008. “*Deutsches Institut für Bautechnik, 30.9.2008*” (German).
- European Technical Approval ETA-11/0189, 2011. “*Deutsches Institut für Bautechnik, 10.6.2011*”.
- European Technical Assessment -14/039, 2014. “*CLT – Cross Laminated Timber Solid wood slab element to be used as a structural element building*”. Stora Enso Wood Products GmbH, Austria.
- Evans L., s.d. “*Cross Laminated Timber – Taking wood buildings to the next level*”. Sponsored by reThinkWood, American Wood Council and FPInnovations.
- Feichter I., 2013. “*Spannungs- und Traglastberechnungen an ausgewählten Problemen der Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz (BSP)*”. Master Thesis, Graz University of Technology, 2013 (German).
- Fellmoser P. & Blass H., 2004. “*Design of solid wood panels with cross layers*”. World Conference on Timber Engineering, Volume II, Lahti, Finland.
- Fitz M., 2008. “*Untersuchung des Schwingverhaltens von Deckensystemen aus Brettsperrholz (BSP)*”. Diploma Thesis, Graz University of Technology, 2008 (German).
- Follesa M., Brunetti M., Cornacchini R. & Grasso G., 2010. “*Mechanical In-Plane Joints Between Cross Laminated Timber Panels*”, World Conference on Timber Engineering, 2010, Italy.
- Follesa M., Fragiaco M. & Lauriola M., 2011. “*A proposal for revision of the current timber part (Section 8) of Eurocode 8 Part 1*”. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18-Timber Structures. Meeting forty four, Italy, August 2011.
- Fontana M., Frangi A. & Knobloch M., 2008. “*Fire Design Concepts for Tall Timber Buildings*”, Structural Engineering International, IABSE.
- Foreman R., 2015. “*Post-tensioned laminated timber buildings (PRES Structural Seismic System type) and their use in areas prone to high magnitude earthquakes and soil liquefaction*”.
- Frangi A., Boichichio G., Ceccotti A. & Lauriola P., 2008. “*Natural Full-Scale Fire test on a 3 Storey XLam Timber Building*”. At the World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan.
- Frangi A., Fontana M., Knobloch M., & Boichichio G., 2008. “*Fire Behaviour of Cross Laminated Solid Timber Panels*”.
- Frangi A., Fontana M., Hugi E. & Jöbstl A., 2009. “*Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire*”. Fire Safety Journal, 44:1078–1087, 2009.
- Frangi F. & Smith I., 2008. “*Overview of Design Issues for Tall Timber Buildings*”, Structural Engineering International, IABSE.
- Gagnon S. & Pirvu C., 2011. “*CLT Handbook: Cross Laminated Timber*”. Québec, QC. Special Publication SP-529E, FPInnovations.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

- Gerard, R., & Barber, D. (2013): Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 1 Final Report, Arup North America Ltd, San Francisco, pp. 1-131.
- Green, M., & Karsh, E., 2012. “TALL WOOD: The Case for Tall Wood Buildings”. Vancouver: WoodEnterpriseCoalition.
- Guest G., Cherubini F. & Stromman H., 2012. “Global warming potential of carbon dioxide emissions from biomass stored in the anthroposphere and used for bioenergy at the end of life”. Journal of Industrial Ecology doi:10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x.
- Guggenberger M., 2012. “Comparative view on the computation and design procedures of CLT elements loaded in bending in accordance to Canadian and European standards and design guidelines”. Master Thesis, Graz University of Technology
- Gustavsson L. & Mahapatra K., (2009). “Cost-Effectiveness of Using Wood Frames in the Production of MultiStorey Buildings in Sweden”, School of Technology and Design, Växjö University, Sweden, 2009.
- Halili Y., 2008. “Versuchstechnische Ermittlung von Querdruickengrößen für Brettsperholz”. Diploma Thesis, Graz University of Technology, 2008 (German).
- Harris R., Ringhofer A. & Schickhofer G., 2013. “Focus Solid Timber Solutions – European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)”. COST Action FP1004 with TU Graz , Austria.
- Hu, L., & Adams, Davide L. (2013): Sound insulation of cross-laminated timber assemblies, chapter 9 of CLT Handbook, FPInnovations, pp. 1-40.
- International Standard ISO 15712-2:2005(E). “Building acoustics: Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 2: Impact sound insulation between rooms”.
- Iqbal A., Pampanin S., Buchanan A. & Palermo A., 2007. “Improved Seismic Performance of LVL Post-tensioned Walls Coupled with UFP devices”. 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Singapore, 2007.
- Izewska A., 2002. “Acoustical Design Of Multi-Family Dwellings With Taking Into account The New Polish Standard Requirements” . Acoustic Department of Building Research Institute, Warsaw, Poland.
- Jöbstl A., 2007. “Praxisgerechte Bemessung von Brettsperholz”. Ingenieurholzbau – Karlsruher Tage 2007, 50-61, 2007 (German).
- Johansen W., 1949. “Theory of Timber Connections.” International Association for Bridge and Structural Engineering. Vol. 9: 249-262.
- Karacabeyli E. & Douglas B.,2013. “CLT Handbook: Cross-LaminatedTimber”. Pointe-Claire, QC. Special Publication SP-529E, FPInnovations.
- Karacabeyli E. & Lum C., 2013. “Technical Guide for the Design and Construction of Tall Wood Buildings in Canada – 90% draft”. FPInnovations.
- Leijten A., 2008. “Timber Connections, EN1995-1-1: Section 8 – Connections”. Dissemination of information workshop, Brussels, February 2008
- Ma Q., 2010. “The Mechanics of Rocking Structures Subjected to Ground Motion”. Auckland: The University of Auckland.
- Mandegarian A. & Milev S.,2010. “Cross laminatedtimber: Civil 510 – Term Project”. University of British Columbia.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

- Marriott D., 2014. “*The Development of High Performance Post-Tensioned Rocking Systems for the Design of Seismic Structures*”. Christchurch: TheUniversityof Canterbury.
- Mateus D., 2008. “*Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído*”.
- Mestek P., Kreuzinger H. & Winter S., 2008. “*Design of Cross Laminated Timber (CLT)*”. Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering
- Moroder D., 2016. “*Floor diaphragms in multistorey timber buildings*”. PhD Thesis, University of Canterbury, 2016.
- Nakaki D., Stanton F. & Sritharan S, 1999. “*An overview of the PRESSS five-story precast test building*”. PCI journal Vol. 44(2): 26-26.
- Novak M., Koppelhuber J., & Pock K., 2014. “*Cross-Laminated Timber Structural Design - Basic design and engineering principles according to Eurocode*”. proHolz, Austria.
- Osborne L., Dagenais C. & Bénichou N., 2012. “*Preliminary CLT Fire Resistance Testing Report (Project No. 301006155)*”. Final Report 2012/13, Ottawa, Ontario: FPInnovations, 2012.
- Palermo A., Pampanin S. , Fragiacomio M., Buchanan A. & Deam L., 2006. “*Innovative Seismic Solutions for Multi-Storey LVL Timber Buildings*”. 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, U.S.A., 2006.
- Palermo A., Sarti F., Baird A. & Dekker D., 2012. “*From theory to practice: design, analysis and construction of dissipative timber rocking post-Tensioning wall system for Carterton Events Centre, New Zealand.*” World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal
- Paulay T. & Park R., 1975. “*Reinforced concrete structures*”. Wiley & Sons, New York.
- Pérez F. & Wallwork T., 2016. “*Connections between CLT elements and future challenges for CLT in practice*”. Smith and Wallwork Engineers, Cambridge, UK.
- Petersen C., 2000. “*Dynamik der Baukonstruktionen*”. Friedr. Vieweg & Sohn VerlagsgesellschaftmbH, Braunschweig / Wiesbaden, 2000 (German).
- Piazza M, Schickhofer G., Flatscher G., Costa A. & Candeias P., 2013. “*Seismic Performance of Multi-Storey Timber Buildings*”. TUGrazbuilding – Final Report.
- Popovski M. & Karacabeyli E., 2012. “*Seismic Behaviour of Cross-Laminated Timber Structures*”. 15 WCEE, Lisboa.
- Priestley N., 1991. “*Overview of PRESSS research program*”. PCI Journal, 36:4, 50-57.
- Priestley N., 1996. “*The PRESSS program - Current Status and Proposed Plans for Phase III*”. PCI Journal, 41:2, 22-40.
- RFEM 5.07, Software para análise e design no âmbito da Engenharia Estrutural. Desenvolvido por: Dlubal Software GmbH.
- Rothoblaas, s.d. “*STA- Cavilha lisa, aço de carbono com zincagem galvânica*”. Ficha técnica, CE EN14592.
- Salzmann C., 2010. “*Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettsperrholz (BSP)*”. Master Thesis, Graz University of Technology, 2010 (German).
- Sarti F. , Palermo A. , Pampanin S., 2012. “*Simplified Design Procedures for Post-Tensioned Seismic Resistant Timber Walls*”. 15 WCEE , Lisboa 2012
- Sathre R. & O'Connor J., 2010. “*A Synthesis of Reserarchon Wood Products and Greenhouse Gas Impacts*”. 2nd Edition, FPInnovations.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

- Schickhofer G., Bogensperger T. & Moosbrugger T., 2010. “*BSPhandbuch: Holz-Massivbauweise in Brettspertholz – Nachweise auf Basis des neuen europäischen Normen-konzepts*”. Verlag der Technischen Universität Graz, 2010, ISBN 978-3-85125-109-8 (German).
- Schoenwald S., Zeitler B., Sabourin I. & King F., 2013. “*Sound insulation performance of Cross Laminated Timber Building Systems*”. Innsbruck, Austria.
- Serrano E. & Enquist B., 2010. “*Compression strength perpendicular to grain in cross-laminated timber (CLT)*”. WCTE 2010, 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010.
- Sigrist, C., Gerber, C., Weber, H., & Brunner, R., “Evaluation of floor systems for multi-storey buildings”, in proceedings of Pacific Timber Engineering conference. Rotorua, New Zealand, March 14-18, 1999.
- Silly G., 2010. “*Numerische Studien zur Drill- und Schubsteifigkeit von Brettspertholz (BSP)*”. Diploma Thesis, Graz University of Technology, 2010 (German).
- Silva, C.V., Branco, J.M. and Paulo B. Lourenço (2013). “*A project contribution to the development of sustainable multi-storey timber buildings*”. Portugal SB13 – Contribution of Sustainable Building to Meet EU 20-20-20 Targets, 30/10/2013, Guimarães, Portugal. URI: <http://hdl.handle.net/1822/26947>.
- Silva, C.V., Branco, J.M. and Paulo B. Lourenço (2014). “*UT system: a structural system to build taller urban timber houses with the aspired spatial flexibility*”. 40th IAHS World Congress on Housing, 12/2014, Madeira Island, Portugal. URI: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/32404>
- Skogstad, H. B., Gullbrekken, L., & Nore, K., “Air leakages through cross laminated timber (CLT) constructions”, in proceedings of NSB 2011 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland, May-June 29-2, 2011.
- Smith J., 2008. “*Feasibility of Multi-Storey Post-Tensioned Timber Buildings: Detailing, Cost and Construction. Christchurch*”.
- Smith L., Hicks J. & Devine J., 2009. “*P354: Design of Floors for Vibration: A new Approach*”. Revised Edition, February 2009, Ascot 2009.
- Smith T., 2006. “*LVL Rocking Shear Walls: with External Dissipater Attachment*”. 3rd Professional Year Project, University of Canterbury.
- Stepinac M., Hunger F., Tomasi R., Serrano E., Rajcic V. & Van De Kuilen G., 2013. “*Comparison of design rules for glued-in-rods and design rule proposal for implementation in European standards*”. Proceedings of the 46th CIB-W18 meeting Vancouver, Canada 2013.
- Thiel A. & Brandner R., 2016. “*ULS Design of CLT Elements – Basics and some Special Topics*”. Competence Centre holz.bau forschungs gmbh and Institute of Timber Engineering and Wood Technology / TU Graz , Austria.
- Thiel A. & Schickhofer G., 2010. “*CLTdesigner/Calculatis – A Software Tool for Designing Cross Laminated Timber Elements: 1D-Plate-Design*”. World Conference on Timber Engineering 2010
- Thiel A. & Schickhofer G., 2012. “*Design Methods of Cross Laminated Timber concerning Floor Vibrations: A Comparability Study*”. Research Report, holz.bau forschungs gmbh, 2012.
- Timoshenko S. & Woinowsky-Krieger.S., 1959. “*Theory of Plates and Shells*”. McGraw-Hill College.
- Werner F. & Richter K. (2007). “*Wooden building products in comparative LCA*”. A literature review, International Journal of Life Cycle Assessment, 12(7): 470-479.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Wiegand T., Seidel A., Mestek P., Werther N. & Winter S., 2011. “*Building with cross laminated timber - Load-bearing solid wood components for walls, ceilings and roofs*”.

Sites Consultados:

<<http://www.waughthistleton.com/project.php?name=murray>> Consultado em 14/03/16

<<http://www.bdonline.co.uk/bridport-house-east-london-by-karakusevic-carson-architects/5036283.article>>

Consultado em 23/03/16.

<<http://www.aboutpeople.com.au/stories.html>> Consultado em 05/04/16

StoraEnso, 2014. “*Largest timber construction project in Europe made in Austria*” <<http://www.clt.info/wp-content/uploads/2016/01/2014-01-Via-Cenni-Largest-timber-construction-project-in-Europe-made-in-Austria-completed.pdf>> Consultado em 14/06/16

<<http://urbanfilemilano.blogspot.pt/2015/03/zona-quarto-cagnino-via-cenni-leco.html>> Consultado em 14/06/16

IBC, 2006. International Building Code. <<https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/icc.ibr.2006.pdf>> Consultado em 23/6/2016.

6th Adaptation to Technical Progress (ATP) - Regulation 605/2014. Classification, Labelling and Packaging (CLP) of substances and mixtures. <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0605&from=EN>> Consultado em 25/6/2016.

Stora Enso, 2015. “*Wood Products Building Solutions – Technical Folder*”. <<http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Technical-folder-CLT-EN.pdf>> Consultado em 3/7/2016.

Stora Enso, 2016. “*Soundproofing for CLT*”. <<http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Soundproofing-for-CLT-by-Stora-Enso-EN.pdf>> Consultado em 3/7/2016.

Stora Enso, 2016. “*Building Systems :ResidentialMultistoreyBuildings - Design Manual*” <<http://assets.storaenso.com/se/buildingandliving/ProductServicesDocuments/Residential%20Multistorey%20Buildings%20-%20Design%20Manual%20%5bfinal%202016-06-20%3b%20version%201.4%5d%20EN.pdf>> Consultado em 3/7/2016.

Stora Enso, 2016. “*Documentation on fire protection – Cross Laminated Timber*”. <<http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/CLT-Documentation-on-fire-protection-EN.pdf>> Consultado em 1/10/2016.

Macalloy - Bar & Cable System, 2011. “*Post Tensioning System: Macalloy 1030, Macalloy S1030*”. ETA-07/0046. <<http://www.macalloy.com/broszury/post-tensioning-system-in-english>> Consultado em 15/12/2016.

8. ANEXOS

8.1. CLT DIFERENTES TIPOS DE ESTRUTURAS CONSTRUÍDAS EM CLT

Como já foi referenciado ao longo deste trabalho, o CLT tem vindo a ser aplicado em inúmeras estruturas um pouco por todo o mundo. Este material construtivo é maioritariamente utilizado na construção de edifícios com um ou vários pisos, podendo também ser adotado em conjunto com outros tipos de materiais estruturais (estruturas híbridas). A utilização do CLT torna-se economicamente vantajosa para construções de grande dimensão, nomeadamente, escolas, edifícios comerciais e escritórios, edifícios residenciais, edifícios de armazenamento.

8.1.1. EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS



Fig. 117 – Moradias familiares construídas em CLT situadas em Rykkinn, Noruega (esquerda) e Klagenfurt, Áustria (Direita) (Karacabeyli e Douglas, 2013).



Fig. 118 – Edifício multifamiliar construído em CLT situada em Judenburg, Áustria.(Karacabeyli e Douglas, 2013).

8.1.2. EDIFÍCIOS COMERCIAIS E ESCRITÓRIOS



Fig. 119 – Edifício comercial Viken Skog BA, Hønefoss, Noruega (Karacabeyli e Douglas, 2013).



Fig. 120 – Edifício de escritórios Juwi head, Wörrstadt, Alemanha (Karacabeyli e Douglas, 2013).



Fig. 121 – Pavilhão de armazenamento de materiais, Katsch, Áustria (Karacabeyli e Douglas, 2013)

8.1.3. ESTRUTURAS HIBRIDAS



Fig. 122 – Parque de estacionamento em Innsbruck, Áustria (Karacabeyli e Douglas, 2013).



Fig. 123 – Edifício residencial em South Carolina, USA (Karacabeyli e Douglas, 2013).

8.1.4. PONTES

Outra aplicação do CLT é em tabuleiros de pontes. As principais estruturas de pontes são geralmente feitas de aço ou madeira, sendo o material utilizado no tabuleiro o CLT. Na ponte de Spielberg, localizada em Knittelfeld Styria, na Áustria, tanto o tabuleiro como o restante sistema estrutural são feitos de CLT (ver figura 124). Já a imagem à direita, mostra uma ponte pedonal em que o seu tabuleiro é feito em CLT, construída em Feldbach, Styria, Áustria.



Fig. 124 – Ponte CLT Spielberg (esquerda) e ponte Raabsteg Feldbach (direita) (Mandegarian e Milev, 2010).

8.2. EXEMPLOS RESOLVIDOS DE DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS SIMPLES DE CLT

8.2.1. DIMENSIONAMENTO DE UM PAINEL DE PAVIMENTO ATRAVÉS DA *COMPOSITE THEORY (K-METHOD)*.

Recorrendo à tabela de dimensionamento, efetuou-se o pré-dimensionamento de uma laje com um vão de 4500 mm, obtendo-se uma espessura de 140 mm para o painel.

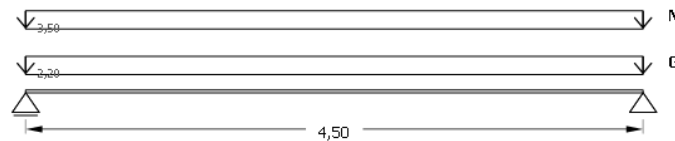


Fig. 125 – Representação esquemática do painel de pavimento CLT (cargas em kN/m e comprimento do vão em m) (*Calculatis*, <http://www.clt.info/>)

A *Composite Theory (K-method)* pode ser utilizada caso a relação entre vão e espessura seja superior a 30.

$$\frac{4500}{140} = 32 > 30, \quad ok \quad (105)$$

Tabela 42 – Cargas de dimensionamento e respetivos esforços.

Cargas		Esforços	
Peso Próprio (CLT + revestimentos e paredes divisórias)	$G = 0,7 + 1,5 = 2,2 \text{ kN/m}$	M_{\max}	V_{\max}
Sobrecarga residencial	$Q = 3,5 \text{ kN/m}$	20,81 kNm/m	18,5 kN/m
Carga de dimensionamento	$q_d = 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot Q = 8,22 \text{ kN/m}$		

Tabela 43 – Propriedades do painel CLT.

Espessura do Painel CLT da classe C24 ¹	140	mm
--	-----	----

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Flexão perp. ao plano, paralela às fibras, $f_{m,k}$	24,0	N/mm ²
Corte perp. ao plano, paralelo às fibras, $f_{v,k}$	4	N/mm ²
Corte rasante perp. ao plano, paralelo às fibras, $f_{t,k}$	1,25	N/mm ²
Módulo de elasticidade médio, paralelo às fibras, $E_{0,mean}$	12500	N/mm ²
Módulo de elasticidade quantil 5%, paralelo às fibras, $E_{0,05}$	7400	N/mm ²
Módulo de elasticidade médio perp. ao plano, perp. às fibras, $E_{90,mean}$ ($E_{0,mean}/30$)	416,7	N/mm ²
Módulo de corte médio, $G_{0,mean}$	690	N/mm ²
Módulo de corte rasante, $G_{R,mean}$	50	N/mm ²
Área bruta, A_{gross}	140000	mm ²

¹De acordo com Blass e Fellmoser (2004), o cálculo pode ser feito com os valores de resistência e rigidez da classe GL28h.

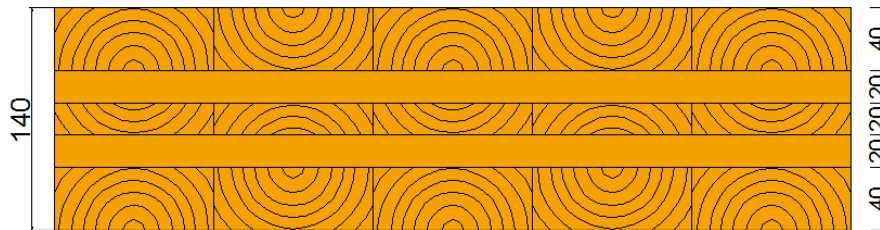


Fig. 126 – Constituição do painel de pavimento CLT.

• **Estado Limite Ultimo**

I. Verificação à flexão

Tabela 44 – Tensões de flexão

Valor de dimensionamento da tensão de flexão	$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{I_{eff}} \cdot y = \frac{20,81 \cdot 10^6}{2,2867 \cdot 10^8} \cdot \frac{140}{2} = 6,37 \text{ N/mm}^2$
Valor de dimensionamento da resistência à flexão	$E_{90} = \frac{E_0}{30} = \frac{12500}{30} = 416,7$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Dados:	$k_1 = 1 - \left[\left(1 - \frac{416,7}{12500} \right) \cdot \frac{60^3 - 20^3}{140^3} \right] = 0,927$
$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	$E_{0,ef} = E_0 \cdot k_1 = 12500 \cdot 0,927 = 11587,5 \text{ MPa}$
$K_{mod} = 0,8$	$f_{m,k,ef} = 24 \cdot 0,927 = 22,25 \text{ N/mm}^2$
$\gamma_M = 1,25$	$f_{m,d} = \frac{22,25 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8 \cdot 1,1}{1,25} = 15,66 \text{ N/mm}^2$
$K_I = 1,1$	

Verificação à flexão (%)	$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{6,37 \text{ N/mm}^2}{15,66 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 40,7\% \text{ ok}$
--------------------------	---

II. Verificação ao corte

Na verificação ao corte, duas situações devem ser verificadas, nomeadamente, a tensão máxima de corte no eixo central do painel e a tensão de corte rasante nas camadas perpendiculares à direção do vão (camadas ortogonais).

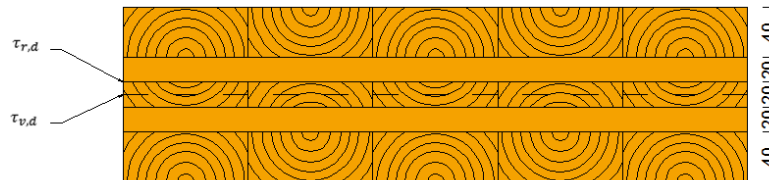


Fig. 127 – Localização das duas tensões a serem verificadas.

Tabela 45 – Tensões de Corte

Valor de dimensionamento da tensão de corte	$S_{(E_{(i)}, Z_{(i)})} = 40 \cdot 1000 \cdot 50 \cdot 12500 + 20 \cdot 1000 \cdot 20$ $\cdot 416,7 + 10 \cdot 1000 \cdot 5 \cdot 12500$ $= 2,5792 \cdot 10^{10} \text{ N.mm}$
---	--

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$\begin{aligned}\tau_{v,d} &= \frac{V_d \cdot S_{(E(i),Z(i))}}{E \cdot I_{ef} \cdot b} \\ &= \frac{18,5 \cdot 10^3 \cdot 2,5792 \cdot 10^{10}}{11587,5 \cdot 2,2867 \cdot 10^8 \cdot 1000} \\ &= 0,18 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Valor de dimensionamento da
resistência ao corte

Dados:

$$f_{v,k} = 4 \text{ N/mm}^2 \qquad f_{v,d} = \frac{4 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,25} = 2,56 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{mod} = 0,8$$

$$\gamma_M = 1,25$$

Verificação ao corte (%) $\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} = \frac{0,18 \text{ N/mm}^2}{2,56 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 7,0 \%$ *ok*

Tabela 46 – Tensões de corte rasante

$$\begin{aligned}S_{(E(i),Z(i))} &= 40 \cdot 1000 \cdot 50 \cdot 12500 + 20 \cdot 1000 \cdot 20 \\ &\quad \cdot 416,7 = 2,517 \cdot 10^{10} \text{ N.mm}\end{aligned}$$

Valor de dimensionamento da
tensão de corte

$$\begin{aligned}\tau_{r,d} &= \frac{V_d \cdot S_{(E(i),Z(i))}}{E \cdot I_{ef} \cdot b} \\ &= \frac{18,5 \cdot 10^3 \cdot 2,517 \cdot 10^{10}}{111587,5 \cdot 2,2867 \cdot 10^8 \cdot 1000} \\ &= 0,176 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Valor de dimensionamento da
resistência ao corte

$$f_{r,d} = \frac{1,25 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,25} = 0,8 \text{ N/mm}^2$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Dados:

$$f_{r,k} = 1,25 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{\text{mod}} = 0,8$$

$$\gamma_M = 1,25$$

Verificação ao corte rasante (%)	$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} = \frac{0,176 \text{ N/mm}^2}{0,8 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 22,0 \% \text{ ok}$
----------------------------------	---

Tabela 47 – Tensões de Corte utilizando o método simplificado

Valor de dimensionamento da tensão de corte	$\tau_{v,d} = \frac{1,5 \cdot 18,5 \cdot 10^3}{140 \cdot 1000} = 0,2 \text{ N/mm}^2$
---	--

Valor de dimensionamento da resistência ao corte

Dados:

$$f_{r,k} = 1,25 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,d} = \frac{1,25 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,25} = 0,8 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{\text{mod}} = 0,8$$

$$\gamma_M = 1,25$$

Verificação ao corte (%)	$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} = \frac{0,2 \text{ N/mm}^2}{0,8 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 25 \% \text{ ok}$
--------------------------	---

- **Estado Limite de Serviço**

- I. Verificação à deformação**

Tabela 48 – Deformação do painel

	$u_{inst,G} = \frac{5 \cdot 2,2 \cdot 4500^4}{384 \cdot 111587,5 \cdot 2,2867 \cdot 10^8} = 4,43 \text{ mm}$
Valor da deformação instantânea	$u_{inst,Q} = \frac{5 \cdot 3,5 \cdot 4500^4}{384 \cdot 111587,5 \cdot 2,2867 \cdot 10^8} = 7,05 \text{ mm}$
	<p style="text-align: center;">Para a combinação característica:</p> $u_{fin,G} = u_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) = 4,43 \cdot (1 + 0,85) = 8,20 \text{ mm}$
	<p style="text-align: center;">Para a combinação quase-permanente:</p> $u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \cdot (1 + k_{def}) \cdot \psi_2 = 7,05 \cdot (1 + 0,85) \cdot 0,3 = 3,91 \text{ mm}$
Valor da deformação final total	<p style="text-align: center;">Para a combinação característica:</p> $u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \cdot (1 + k_{def} \cdot \psi_2) = 7,05 \cdot (1 + 0,85 \cdot 0,3) = 8,84 \text{ mm}$
	<p style="text-align: center;">Para a combinação característica:</p> $u_{inst} \leq \frac{l}{300}$
Condições de falha	$u_{fin} - u_{g,inst} \leq \frac{l}{200}$ $u_{fin} \leq \frac{l}{150}$
	<p style="text-align: center;">Para a combinação quase-permanente:</p> $u_{fin} \leq \frac{l}{250}$

Para a combinação característica:

$$\begin{aligned}u_{\text{inst}} &= u_{\text{inst,G}} + u_{\text{inst,Q}} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot u_{\text{inst,Q},i} \\ &= 4,43 + 7,05 + 0 = 11,48 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\frac{u_{\text{inst}}}{\frac{4500}{300}} \cdot 100 = \frac{11,48}{15} \cdot 100 = 76,53\% \text{ ok}$$

Verificação à deformação (%)

$$u_{\text{fin}} = u_{\text{fin,G}} + u_{\text{fin,Q}} = 8,20 + 8,84 = 17,04 \text{ mm}$$

$$\frac{u_{\text{fin}}}{\frac{4500}{150}} \cdot 100 = \frac{17,04}{30} \cdot 100 = 56,8\% \text{ ok}$$

$$u_{\text{fin}} - u_{\text{inst,G}} = 17,04 - 4,43 = 12,61 \text{ mm}$$

$$\frac{u_{\text{fin}}}{\frac{4500}{200}} \cdot 100 = \frac{12,61}{22,5} \cdot 100 = 56,04\% \text{ ok}$$

Para a combinação quase-permanente:

$$\begin{aligned}u_{\text{fin}} &= u_{\text{inst,G}} \cdot (1 + k_{\text{def}}) + \sum_i \psi_{2,i} \cdot u_{\text{inst,Q},i} \cdot (1 + k_{\text{def}}) \\ &= 4,43 \cdot (1 + 0,85) + 0,3 \cdot 7,05 \\ &\quad \cdot (1 + 0,85) = 12,11 \text{ mm}\end{aligned}$$

Verificação à deformação (%)

$$\frac{u_{\text{fin}}}{\frac{4500}{250}} \cdot 100 = \frac{12,11}{18} \cdot 100 = 67,27\% \text{ ok}$$

8.2.2. DIMENSIONAMENTO DE UM PAINEL DE PAVIMENTO ATRAVÉS DA *MECHANICALLY JOINTED BEAMS THEORY (GAMMA METHOD)*

Neste exemplo são consideradas as mesmas cargas aplicadas ao mesmo painel de pavimento utilizado no exemplo 1.

Tabela 49 – Propriedades do CLT

Espessura do Painel CLT da classe C24 ¹	140	mm
Flexão perp. ao plano, paralela às fibras, $f_{m,k}$	24,0	N/mm ²
Corte perp. ao plano, paralelo às fibras, $f_{v,k}$	4	N/mm ²
Corte rasante perp. ao plano, paralelo às fibras, $f_{r,k}$	1,25	N/mm ²
Módulo de elasticidade médio, paralelo às fibras, $E_{0,mean}$	12500	N/mm ²
Módulo de elasticidade quantil 5%, paralelo às fibras, $E_{0,05}$	7400	N/mm ²
Módulo de elasticidade médio perp. ao plano, perp. às fibras, $E_{90,mean}$	370	N/mm ²
Módulo de corte médio, $G_{0,mean}$	690	N/mm ²
Módulo de corte rasante, $G_{R,mean}$	50	N/mm ²
Área bruta, A_{gross}	140000	mm ²

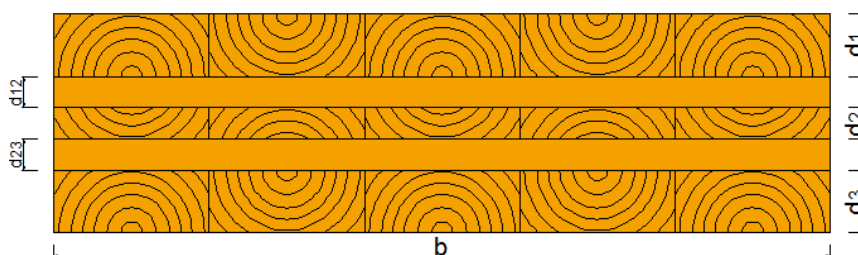


Fig. 128 – Constituição do painel de pavimento CLT.

• **Estado Limite Ultimo**

I. Verificação à flexão

Tabela 50 – Tensões de flexão

$$\gamma_1 = \gamma_3 = 0,911 \quad e \quad \gamma_2 = 1$$

$$I_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^3 (I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2) = 1,93569 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Valor de dimensionamento da
tensão de flexão

$$\begin{aligned} \sigma_{m,d} &= \frac{M_d}{I_{\text{eff}}} \cdot \left(\gamma_1 \cdot a_1 + \frac{d_1}{2} \right) \\ &= \frac{20,81 \cdot 10^6}{1,93569 \cdot 10^8} \cdot \left(0,911 \cdot 50 + \frac{40}{2} \right) \\ &= 7,05 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Valor de dimensionamento da
resistência à flexão

Dados:

$$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{\text{mod}} = 0,8$$

$$\gamma_m = 1,25$$

$$K_1 = 1,1$$

$$f_{m,d} = \frac{24 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8 \cdot 1,1}{1,25} = 16,9 \text{ N/mm}^2$$

Verificação à flexão (%)

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{7,05 \text{ N/mm}^2}{16,9 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 41,7 \% \text{ ok}$$

II. Verificação ao corte

Tabela 51 – Tensão de Corte

$$S_{(Z(i))} = 40 \cdot 1000 \cdot 50 + 20 \cdot 1000 \cdot 20 + 10 \cdot 1000 \cdot 5$$
$$= 2,05 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Valor de dimensionamento da
tensão de corte

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d \cdot S_{(Z(i))}}{I_{ef} \cdot b} = \frac{18,5 \cdot 10^3 \cdot 2,05 \cdot 10^6}{1,93569 \cdot 10^8 \cdot 1000}$$
$$= 0,20 \text{ N/mm}^2$$

Valor de dimensionamento da
resistência ao corte

Dados:

$$f_{v,d} = \frac{4 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,25} = 2,56 \text{ N/mm}^2$$
$$f_{v,k} = 4 \text{ N/mm}^2$$
$$K_{mod} = 0,8$$
$$\gamma_m = 1,25$$

Verificação ao corte (%)

$$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} = \frac{0,20 \text{ N/mm}^2}{2,56 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 7,8 \% \text{ ok}$$

Tabela 52 – Tensão de corte rasante

$$S_{(Z(i))} = 40 \cdot 1000 \cdot 50 + 20 \cdot 1000 \cdot 20$$
$$= 2,00 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Valor de dimensionamento da
tensão de corte

$$\tau_{r,d} = \frac{V_d \cdot S_{(E(i),Z(i))}}{E \cdot I_{ef} \cdot b} = \frac{18,5 \cdot 10^3 \cdot 2,00 \cdot 10^6}{1,93569 \cdot 10^8 \cdot 1000}$$
$$= 0,19 \text{ N/mm}^2$$

Valor de dimensionamento da
resistência ao corte

Dados:

$$f_{r,k} = 1,25 \text{ N/mm}^2$$
$$K_{\text{mod}} = 0,8$$
$$\gamma_m = 1,25$$
$$f_{r,d} = \frac{1,25 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,25} = 0,8 \text{ N/mm}^2$$

Verificação ao corte rasante (%)

$$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} = \frac{0,19 \text{ N/mm}^2}{0,8 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 23,9 \% \text{ ok}$$

- **Estado Limite Serviço**

- I. Verificação à deformação**

Tabela 53 – Deformação do painel

Valor da deformação instantânea

$$u_{\text{inst,G}} = \frac{5 \cdot 2,2 \cdot 4500^4}{384 \cdot 1,93569 \cdot 10^8 \cdot 11000} = 4,85 \text{ mm}$$
$$u_{\text{inst,Q}} = \frac{5 \cdot 3,5 \cdot 4500^4}{384 \cdot 1,93569 \cdot 10^8 \cdot 11000} = 7,72 \text{ mm}$$

Para a combinação característica:

$$u_{\text{fin,G}} = u_{\text{inst,G}} \cdot (1 + k_{\text{def}}) = 4,85 \cdot (1 + 0,85) \\ = 8,98 \text{ mm}$$

Valores da deformação final

Para a combinação quase-permanente:

$$u_{\text{fin,Q}} = u_{\text{inst,Q}} \cdot (1 + k_{\text{def}}) \cdot \psi_2 = 7,72 \cdot (1 + 0,85) \cdot 0,3 \\ = 4,29 \text{ mm}$$

Para a combinação característica:

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$u_{\text{fin,Q}} = u_{\text{inst,Q}} \cdot (1 + k_{\text{def}} \cdot \psi_2) = 7,72 \cdot (1 + 0,85 \cdot 0,3) \\ = 9,69 \text{ mm}$$

Para a combinação característica:

$$u_{\text{inst}} \leq \frac{l}{300}$$

$$u_{\text{fin}} - u_{\text{g,inst}} \leq \frac{l}{200}$$

Condições de falha

$$u_{\text{fin}} \leq \frac{l}{150}$$

Para a combinação quase-permanente:

$$u_{\text{fin}} \leq \frac{l}{250}$$

Para a combinação característica:

$$u_{\text{inst}} = u_{\text{inst,G}} + u_{\text{inst,Q}} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot u_{\text{inst,Q},i} \\ = 4,85 + 7,72 + 0 = 12,58 \text{ mm}$$

Verificação à deformação (%)

$$\frac{u_{\text{inst}}}{\frac{4500}{300}} \cdot 100 = \frac{12,58}{15} \cdot 100 = 83,86\% \text{ ok}$$

$$u_{\text{fin}} = u_{\text{fin,G}} + u_{\text{fin,Q}} = 8,98 + 9,69 = 18,67 \text{ mm}$$

$$\frac{u_{\text{fin}}}{\frac{4500}{150}} \cdot 100 = \frac{18,67}{30} \cdot 100 = 62,23\% \text{ ok}$$

$$u_{\text{fin}} - u_{\text{inst,G}} = 18,67 - 4,85 = 13,82 \text{ mm}$$

$$\frac{u_{\text{fin}}}{\frac{4500}{200}} \cdot 100 = \frac{13,82}{22,5} \cdot 100 = 61,42\% \text{ ok}$$

Para a combinação quase-permanente:

$$\begin{aligned}
 \text{Verificação à deformação (\%)} \quad u_{\text{fin}} &= u_{\text{inst,G}} \cdot (1 + k_{\text{def}}) + \sum_i \psi_{2,i} \cdot u_{\text{inst,Q},i} \cdot (1 + k_{\text{def}}) \\
 &= 4,85 \cdot (1 + 0,85) + 0,3 \cdot 7,72 \\
 &\quad \cdot (1 + 0,85) = 13,27 \text{ mm} \\
 \frac{u_{\text{fin}}}{\frac{4500}{250}} \cdot 100 &= \frac{13,27}{18} \cdot 100 = 73,71\% \text{ ok}
 \end{aligned}$$

8.2.3. DIMENSIONAMENTO DE UM PAINEL DE PAVIMENTO ATRAVÉS DA SHEAR ANALOGY THEORY

Neste exemplo são consideradas as mesmas cargas aplicadas ao mesmo painel de pavimento utilizado no exemplo 1 e 2.

Tabela 54 – Propriedades do CLT

Espessura do Painel CLT da classe C24	140	mm
Flexão perp. ao plano, paralela às fibras, $f_{m,k}$	24,0	N/mm ²
Corte perp. ao plano, paralelo às fibras, $f_{v,k}$	4	N/mm ²
Corte rasante perp. ao plano, paralelo às fibras, $f_{r,k}$	1,25	N/mm ²
Módulo de elasticidade médio, paralelo às fibras, $E_{0,\text{mean}}$	12500	N/mm ²
Módulo de elasticidade quantil 5%, paralelo às fibras, $E_{0,05}$	7400	N/mm ²
Módulo de elasticidade médio perp. ao plano, perpendicular às fibras, $E_{90,\text{mean}}$ ($E_{0,\text{mean}}/30$)	416,7	N/mm ²
Módulo de corte médio, $G_{0,\text{mean}}$ ($E_{0,\text{mean}}/16$)	781,25	N/mm ²
Módulo de corte rasante, G_r ($\min(E_{0,\text{mean}}/160 ; 50)$)	50	N/mm ²
Área bruta, A_{gross}	140000	mm ²

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

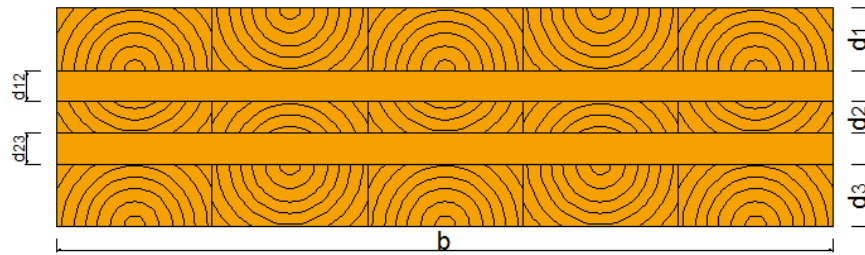


Fig. 129 – Constituição do painel de pavimento CLT.

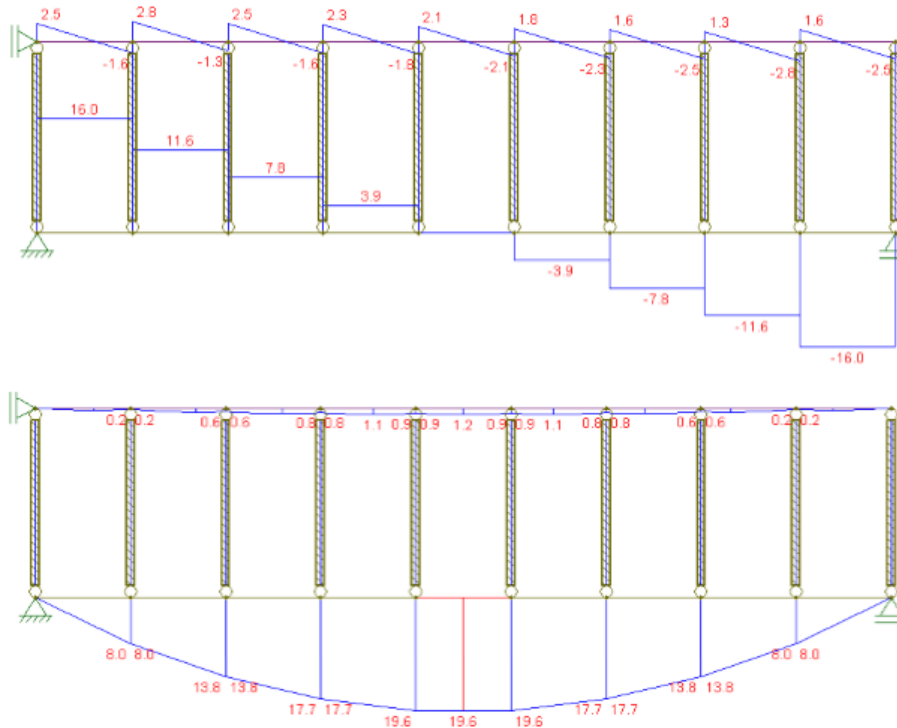


Fig. 130 – Diagrama de esforços das vigas A e B, obtidos através do software Ftool.

Tabela 55 – Esforços atuantes nas vigas A e B

Valor dos esforços internos das vigas A e B

$$M_A = 1,2 \text{ kN.m}$$

$$M_B = 19,6 \text{ kN.m}$$

$$V_A = 2,5 \text{ kN}$$

$$V_B = 16,0 \text{ kN.m}$$

• Estado Limite Ultimo

I. Verificação à flexão

Tabela 56 – Tensões de flexão

	$B_A = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \frac{b_i \cdot h_i^3}{12} = 1,42222E^{11} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$
	$B_B = \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 = 2,50667E^{12} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$
	$M_{A,1} = \frac{E_1 \cdot I_1}{B_A} \cdot M_A = \frac{12500 \cdot \frac{1000 \cdot 40^3}{12}}{1,42222E^{11}} \cdot 1,2E^6$ $= 562500 \text{ N} \cdot \text{mm}$
Valor de dimensionamento da tensão de flexão	$\sigma_{A,1} = \frac{M_{A,1}}{I_1} \cdot \frac{h_1}{2} = \frac{562500}{\frac{1000 \cdot 40}{12}} \cdot \frac{40}{2} = 2,11 \text{ MPa}$
	$N_{B,1} = \frac{E_1 \cdot A_1 \cdot z_1}{B_B} \cdot M_B$ $= \frac{12500 \cdot 1000 \cdot 40 \cdot 50}{2,50667E^{12}} \cdot 19,6E^6$ $= 195478,7 \text{ N}$
	$\sigma_{B,1} = \frac{N_{B,1}}{b_1 \cdot h_1} = \frac{195478,7}{1000 \cdot 40} = 4,89 \text{ MPa}$
	$\sigma_{m,d} = \sigma_{A,1} + \sigma_{B,1} = 7,0 \text{ MPa}$

Valor de dimensionamento da
resistência à flexão

Dados:

$$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{\text{mod}} = 0,8$$

$$f_{m,d} = \frac{24 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8 \cdot 1,1}{1,25} = 16,9 \text{ N/mm}^2$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$\gamma_m = 1,25$$

$$K_1 = 1,1$$

Verificação à flexão (%)	$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{7,00 \text{ N/mm}^2}{16,9 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 41,42\% \text{ ok}$
--------------------------	---

II. Verificação ao corte

Tabela 57 – Tensões de Corte

$$V_{A,3} = \frac{E_3 \cdot I_3}{B_A} \cdot V_A = \frac{12500 \cdot \frac{1000 \cdot 20^3}{12}}{1,42222E^{11}} \cdot 2,5 \text{ E}^3$$
$$= 146,48 \text{ N}$$

$$\tau_{A,3} = \frac{E_3 \cdot I_3}{B_A} \cdot 1,5 \cdot \frac{V_A}{b \cdot h_3} = 1,5 \cdot \frac{146,48}{1000 \cdot 20} = 0,011 \text{ MPa}$$

$$\sum_{j=3}^5 E_j \cdot A_j \cdot z_j = 12500 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 5 + 416,7 \cdot 1000$$
$$\cdot 20 \cdot 20 + 12500 \cdot 1000 \cdot 40 \cdot 50$$
$$= 2,57917 \text{ E}^{10}$$

Valor de dimensionamento da
tensão de corte

$$\tau_{B2,3} = \frac{V_B}{B_B \cdot b} \cdot \sum_{j=3}^5 E_j \cdot A_j \cdot z_j$$
$$= \frac{16 \text{ E}^3}{2,50667E^{12} \cdot 1000} \cdot 2,57917 \text{ E}^{10}$$
$$= 0,165$$

$$\tau_{v,d} = \tau_{B2,3} + \tau_{A,3} = 0,176 \text{ N/mm}^2$$

Valor de dimensionamento da
resistência ao corte

$$f_{v,d} = \frac{4 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,25} = 2,56 \text{ N/mm}^2$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Dados:

$$f_{v,k} = 4 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{\text{mod}} = 0,8$$

$$\gamma_m = 1,25$$

Verificação ao corte (%)	$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} = \frac{0,176 \text{ N/mm}^2}{2,56 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 6,9 \% \text{ ok}$
--------------------------	---

Tabela 58 – Tensões de corte rasante

$$V_{A,4} = \frac{E_4 \cdot I_4}{B_A} \cdot V_A = \frac{416,7 \cdot \frac{1000 \cdot 20^3}{12}}{1,42222E^{11}} \cdot 2,5 E^3$$
$$= 4,88 \text{ N}$$

$$\tau_{A,4} = \frac{E_4 \cdot I_4}{B_A} \cdot 1,5 \cdot \frac{V_A}{b \cdot h_4} = 1,5 \cdot \frac{4,88}{1000 \cdot 20}$$
$$= 0,0004 \text{ MPa}$$

Valor de dimensionamento da
tensão de corte

$$\sum_{j=4}^5 E_j \cdot A_j \cdot z_j = 416,7 \cdot 1000 \cdot 20 \cdot 20 + 12500 \cdot 1000$$
$$\cdot 40 \cdot 50 = 2,51667E^{10} \text{ N.mm}$$

$$\tau_{B3,4} = \frac{V_B}{B_B \cdot b} \cdot \sum_{j=4}^5 E_j \cdot A_j \cdot z_j$$
$$= \frac{16 E^3}{2,50667E^{12} \cdot 1000} \cdot 2,51667E^{10}$$
$$= 0,161 \text{ MPa}$$

$$\tau_{r,d} = \tau_{B3,4} + \tau_{A,4} = 0,1614 \text{ MPa}$$

Valor de dimensionamento da
resistência ao corte

$$f_{r,d} = \frac{1,25 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,25} = 0,8 \text{ N/mm}^2$$

Dados:

$$f_{r,k} = 1,25 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{\text{mod}} = 0,8$$

$$\gamma_m = 1,25$$

Verificação ao corte rasante (%)	$\frac{\tau_{r,d}}{f_{r,d}} = \frac{0,1614 \text{ N/mm}^2}{0,8 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 = 20,2 \% \text{ ok}$
----------------------------------	--

- **Estado Limite Serviço**

- I. Verificação à deformação**

Tabela 59 – Deformação do painel

Para cargas distribuídas uniformemente (q):

$$u\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot (EI)_{\text{ef}}} + \frac{q \cdot l^2 \cdot k}{8 \cdot (GA)_{\text{ef}}}$$

Valor da deformação final total

Para uma carga concentrada a meio vão (P):

$$u\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{1 \cdot P \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_{\text{ef}}} + \frac{P \cdot l}{4 \cdot ((GA)_{\text{ef}}/k)}$$

Dados:

$$q = 1,35 \cdot (0,7 + 1,5) + 1,5 \cdot 3,5 = 8,22$$

$k = 1,2$ (fator forma do
coeficiente de corte)

$$a = h_{\text{total}} - \frac{h_1}{2} - \frac{h_n}{2} = 140 - \frac{40}{2} - \frac{40}{2} = 100 \text{ mm}$$

$$(EI)_{\text{ef}} = B_A + B_B = 2,64889 \text{ E}^{12} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$(GA)_{ef} = S_B = \frac{a^2}{\left[\frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b_i} + \frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b_n} \right]}$$

$$= 1,140511 E^7 N \cdot mm^2$$

$$u\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot (EI)_{ef}} + \frac{q \cdot l^2 \cdot k}{8 \cdot (GA)_{ef}}$$

$$= \frac{5 \cdot 8,22 \cdot 4500^4}{384 \cdot 2,64889 E^{12}}$$

$$+ \frac{8,22 \cdot 4500^2 \cdot 1,2}{8 \cdot 1,140511 E^7} = 18,75 \text{ mm}$$

Para a combinação caraterística:

Condição de falha

$$u_{fin} \leq \frac{l}{150}$$

Verificação à deformação (%)	$\frac{u_{fin}}{\frac{l}{150}} \cdot 100 = \frac{18,75}{30} \cdot 100 = 62,5\% \text{ ok}$
------------------------------	--

8.2.4. DIMENSIONAMENTO DE UM PAINEL DE PAREDE UTILIZANDO A MECHANICALLY JOINTED BEAMS THEORY + RVSES

O painel de parede CLT sujeito a análise possui um comprimento de 1m, uma altura de 2,5m e uma espessura de 90 mm. O painel está sujeito a um carregamento permanente vertical $G_k = 15 \text{ kN/m}$ (mais o peso próprio do painel $G_k = 1,13 \text{ kN/m}$), a uma carga vertical variável residencial $N_k = 100 \text{ kN/m}$ e a uma carga horizontal de vento $W_k = 10 \text{ kN/m}$ aplicada segundo a direção do plano do painel)

Tabela 60 – Propriedades do CLT

Espessura do painel CLT da classe C24	90	mm
Compressão paralela às fibras, $f_{c,k}$	21,0	N/mm ²
Flexão perp. ao plano, paralela às fibras, $f_{m,k}$	24,0	N/mm ²

Construir em altura com CLT. O *UT System* aplicado a um exemplo.

Corte paralelo ao plano, perpendicular às fibras, $f_{v,k}$	2,5	N/mm ²
Corte rasante perp. ao plano, paralelo às fibras, $f_{r,k}$	1,25	N/mm ²
Módulo de elasticidade médio, paralelo às fibras, $E_{0,mean}$	12500	N/mm ²
Módulo de elasticidade quantil 5%, paralelo às fibras, $E_{0,05}$	7400	N/mm ²
Módulo de elasticidade médio perp. ao plano, perp. às fibras, $E_{90,mean}$	370	N/mm ²
Módulo de corte médio, $G_{0,mean}$	690	N/mm ²
Módulo de corte rasante, $G_{R,mean}$	50	N/mm ²
Área bruta, A_{gross}	90000	mm ²
Área efetiva, A_{net}	60000	mm ²

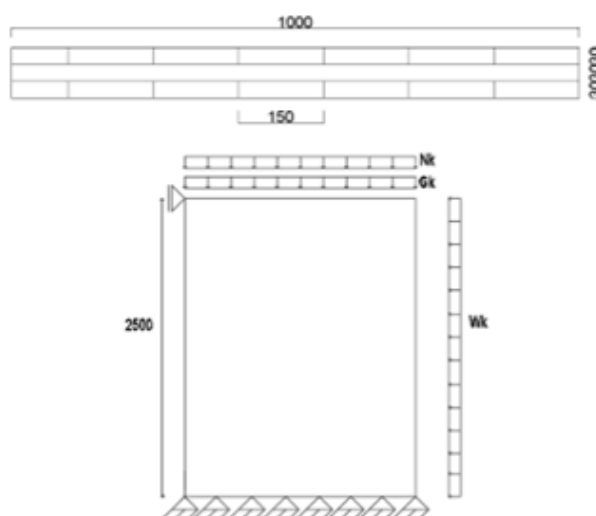


Fig. 131 – Constituição do painel de parede CLT com espessura de 90mm (30x30x30).

Nota: neste exemplo de dimensionamento não ocorrerá tensões de flexão fora do plano, uma vez que, não há nenhuma solicitação horizontal (vento) perpendicular ao plano do painel, nem excentricidades nas cargas de compressão (N_k e G_k).

- **Estado Limite Ultimo**

I. Verificação à compressão e flexão no plano

Verificação das condições de falha por:

Encurvadura

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 100\% \quad (106)$$

Encurvadura por torção lateral

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,z,d}} \right)^2 \leq 100\% \quad (107)$$

Tabela 61 – Tensões de compressão e flexão no plano.

	Combinação 1 (1,35*G_k+1,5*N_k+1,5*0,6*W_k):
	$N_d = 1,35 \cdot (15 + 1,13) + 1,5 \cdot 100 = -171,77 \text{ kN};$
	Combinação 2 (1,35*G_k+1,5*W_k+1,5*0,7*N_k):
	$N_d = 1,35 \cdot (15 + 1,13) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 100 = -126,77 \text{ kN}$
Valor de dimensionamento da tensão de compressão	Combinação 1 (1,35*G_k+1,5*N_k+1,5*0,6*W_k):
	$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{eff}} = \frac{-171,77 \cdot 10^3}{60000} = -2,86 \text{ N/mm}^2$
	Combinação 2 (1,35*G_k+1,5*W_k+1,5*0,7*N_k):
	$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{eff}} = \frac{-126,77 \cdot 10^3}{60000} = -2,11 \text{ N/mm}^2$
	Combinação 1 (1,35*G_k+1,5*N_k+1,5*0,6*W_k):
	$M_{z,d} = \frac{p \cdot l^2}{8} = \frac{(1,5 \cdot 0,6 \cdot 10) \cdot 2,5^2}{8} = 7,03 \text{ kN.m}$
	Combinação 2 (1,35*G_k+1,5*W_k+1,5*0,7*N_k):
	$M_{z,d} = \frac{p \cdot l^2}{8} = \frac{(1,5 \cdot 10) \cdot 2,5^2}{8} = 11,72 \text{ kN.m}$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Valor de dimensionamento da
tensão de flexão

$$\gamma_1 = 0,7378 \quad e \quad \gamma_2 = 1$$

$$Z_{g,ef} = 40,47mm$$

$$a_1 = 34,53 \text{ e } a_2 = 25,47$$

$$\begin{aligned} I_{z,eff} &= I_{z,1} + I_{z,2} + (\gamma_1 \cdot a_1^2 \cdot A_1) + (\gamma_2 \cdot a_2^2 \cdot A_2) \\ &= 5,045854 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Combinação 1 (1,35*G_k+1,5*N_k+1,5*0,6*W_k):

$$\sigma_{m,0,d} = \frac{M_{z,d}}{I_{z,eff}} \cdot \frac{b}{2} = \frac{7,03 \cdot 10^6}{5,045854 \cdot 10^9} \cdot \frac{1000}{2} = 0,7 \text{ N/mm}^2$$

Combinação 2 (1,35*G_k+1,5*W_k+1,5*0,7*N_k):

$$\begin{aligned} \sigma_{m,0,d} &= \frac{M_d}{I_{z,eff}} \cdot \frac{b}{2} = \frac{11,72 \cdot 10^6}{5,045854 \cdot 10^9} \cdot \frac{1000}{2} \\ &= 1,16 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Valor de dimensionamento da
resistência à compressão e flexão,
incluindo efeito de encurvadura

$$\gamma_1 = 0,7378 \quad e \quad \gamma_2 = 1$$

$$Z_{g,ef} = 40,47mm$$

$$a_1 = 34,53 \text{ e } a_2 = 25,47$$

$$\begin{aligned} I_{y,eff} &= I_{y,1} + I_{y,2} + (\gamma_1 \cdot a_1^2 \cdot A_1) + (\gamma_2 \cdot a_2^2 \cdot A_2) \\ &= 5,035392 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{y,eff}}{A_{net}}} = \sqrt{\frac{5,035392 \cdot 10^7}{60000}} = 28,97 \text{ cm}$$

Dados:

$$f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda = \frac{h}{i} = \frac{2500}{28,97} = 86,3$$

$$K_{mod} = 0,8$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{86,3}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{21,00}{7400}} = 1,46$$

$$\gamma_m = 1,25$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$\beta_c = 0,2$$

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 1,69$$

$$k_{sys} = 1,1$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{1,69 + \sqrt{1,69^2 - 1,46^2}}$$
$$= 0,40$$

$$f_{c,0,d} = \frac{21 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,25} = 13,44 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m,0,d} = \frac{24 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,8}{1,25} \cdot 1,1 = 16,9 \text{ N/mm}^2$$

Envolvente:

Verificação à encurvadura (%)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \left(\frac{2,86}{0,4 \cdot 13,44} + \frac{1,16}{16,9} \right) \cdot 100$$
$$= 60,1\% \text{ ok}$$

Envolvente:

$$I_{tor} = 0,3145 \cdot b \cdot h^3 = 229270500 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_y \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W_z}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot \sqrt{7400 \cdot 5,035392 \cdot 10^7 \cdot 460 \cdot 229270500}}{2500 \cdot 10091708}$$
$$= 24,7 \text{ MPa}$$

Verificação à encurvadura por
torção lateral (%)

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24}{24,7}} = 0,986$$

$$k_{crit} = 1 \quad \text{Para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} \quad \text{Para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4$$

$$k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \quad \text{Para } 1,4 < \lambda_{rel,m}$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \cdot 0,918 = 0,82$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,z,d}} \right)^2 &\leq 100\% \\ &= \frac{2,86}{0,4 \cdot 13,44} + \left(\frac{1,17}{0,82 \cdot 16,9} \right)^2 \\ &= 54,5\% \text{ ok} \end{aligned}$$

II. Verificação ao corte no plano

A verificação ao corte no plano é baseada num elemento representativo de volume (RVE) e em sub-elementos representativos de volume (RVSEs).

Tabela 62 – Determinação das espessuras dos RVSEs para cada nó.

Nó 1 (nó no topo)	Camada 1	(topo)	$t^*_1 = \min(2 \cdot t_1, t_2)$
	Camada 2	(central)	$= 30mm$
Nó 2 (nó central)	Camada 2	(central)	$t^*_2 = \min(t_2, 2 \cdot t_3)$
	Camada 3	(fundo)	$= 30mm$

A espessura total de todos os RVSEs é dada por:

$$t^* = \sum_{i=1}^{n-1} t_i^* = 30 + 30 = 60 \text{ mm} \quad (108)$$

O esforço de corte n_{xy} é obtido através dos esforços inteiros de corte segundo a direção y (Vy)

A força de corte proporcional, $n^*_{xy,RVSE(i)}$, dos RVSEs é obtida por:

$$n^*_{xy,RVSE(i)} = \frac{n_{xy}}{t^*} \cdot t^*_i \quad (109)$$

$$n^*_{xy,RVSE(1)} = n^*_{xy,RVSE(2)} = \frac{18,75}{60} \cdot 30 = 9,375 \text{ kN/m} \quad (110)$$

A força de corte n_{xy} é obtida através dos esforços inteiros de corte, segundo a direção y ($V_y = 18,75 \text{ kN}$).

A tensão de corte nominal principal, $\tau^*_{0,RVSE(i)}$, do RVSE 1 e 2 é determinada segundo:

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$\tau_{0,RVSE(1)}^* = \frac{n_{xy,RVSE(1)}^*}{t_i^*} = \tau_0^* = \frac{9,375}{30} = 0,3125 \text{ MPa} \quad (111)$$

$$\tau_{0,RVSE(2)}^* = \frac{n_{xy,RVSE(2)}^*}{t_i^*} = \tau_0^* = \frac{9,375}{30} = 0,3125 \text{ MPa} \quad (112)$$

a. Mecanismo I – corte

Para mecanismo I, o valor da tensão de corte efetiva, τ_v^* , de um RVSE, pode ser calculado por:

$$\tau_v^* = 2 \cdot \tau_0^* \quad (113)$$

$$\tau_{v,1}^* = 2 \cdot 0,3125 = 0,625 \text{ MPa} \quad (114)$$

$$\tau_{v,2}^* = 2 \cdot 0,3125 = 0,625 \text{ MPa} \quad (115)$$

A tensão de cálculo tem de ser inferior ou igual à resistência ao corte

$$|\tau_{v,d}^*| \leq f_{v,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (116)$$

$$0,625 \leq \frac{0,8 \cdot 2,5}{1,25} = 1,6 \quad (117)$$

Verificação ao mecanismo I - corte (%):

$$\frac{|\tau_{v,d}^*|}{f_{v,CLT,d}} \cdot 100 = \frac{0,625}{1,6} \cdot 100 = 39 \% \text{ ok} \quad (118)$$

b. Mecanismo II – torção

É admitido que a espessura das lamelas do CLT é de 150 mm, sendo este valor determinante para o cálculo do momento torsor que ocorre nas zonas de colagem entre camadas adjacentes.

$$M_{T,1} = \tau_0^* \cdot t_1^* \cdot a^2 = 0,3125 \cdot 30 \cdot 150^2 = 210937,5 \text{ N.mm} \quad (119)$$

$$M_{T,2} = \tau_0^* \cdot t_2^* \cdot a^2 = 0,3125 \cdot 30 \cdot 150^2 = 210937,5 \text{ N.mm} \quad (120)$$

Assim, as tensões de torção, $\tau_{T,i}^*$, são definidas por:

$$\tau_{T,i}^* = \frac{M_{T,i}}{W_P} \quad (121)$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$W_P = \frac{I_P}{\frac{a}{2}} = \frac{a^3}{3} = \frac{150^3}{3} = 1125000 \text{ mm}^3 \quad (122)$$

$$\tau^*_{T,1} = \frac{210937,5}{1125000} = 0,19 \text{ MPa} \quad (123)$$

$$\tau^*_{T,2} = \frac{210937,5}{1125000} = 0,19 \text{ MPa} \quad (124)$$

A tensão de cálculo tem de ser inferior ou igual à resistência ao corte por torção

$$|\tau^*_{T,d}| \leq f_{T,CLT,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{T,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (125)$$

$$0,19 \leq \frac{0,8 \cdot 2,5}{1,25} = 1,6 \quad (126)$$

Verificação ao mecanismo II - torção (%):

$$\frac{|\tau^*_{v,d}|}{f_{v,CLT,d}} \cdot 100 = \frac{0,19}{1,6} \cdot 100 = 11,8 \% \text{ ok} \quad (127)$$

8.2.5. DIMENSIONAMENTO DE UMA LAJE À VIBRAÇÃO

O dimensionamento à vibração é efetuado de acordo com a metodologia apresentada na Fig. 132.

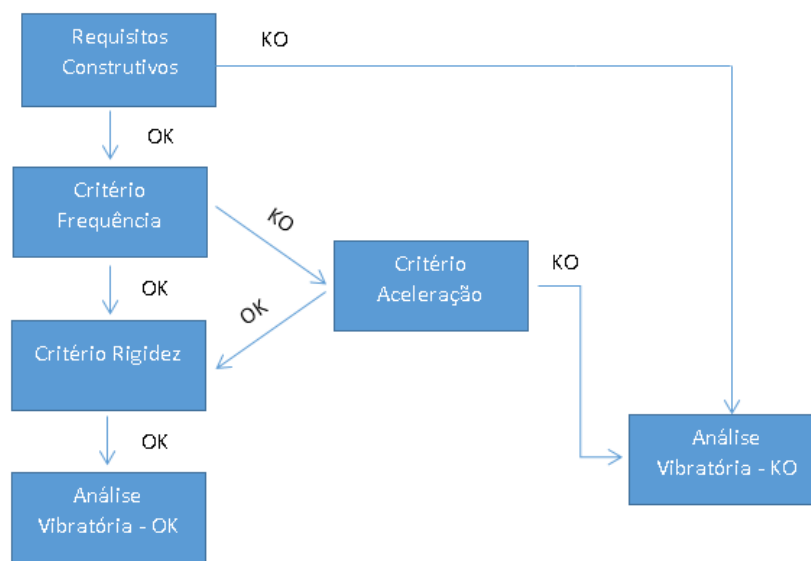


Fig. 132 – Metodologia de verificação da análise à vibração.

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

O dimensionamento será efetuado para uma laje CLT simplesmente apoiada, com um vão de 4,5 m, espessura de 140 mm (40-20-20-20-40) e sujeita a um carregamento permanente ($G_k = PP + G_k = 0,7+1,5$ kN/m) e a um carregamento variável residencial ($N_k = 3,5$ kN/m). As condições são idênticas aos exemplos 1, 2 e 3.

Calculo da rigidez na direção transversal:

$$\begin{aligned}(EI)_T &= 12500 \cdot \left(\frac{1 \cdot 0,02^3}{12} + 1 \cdot 0,02 \cdot 0,02^2 + \frac{1 \cdot 0,02^3}{12} + 1 \cdot 0,02 \cdot 0,02^2 \right) \\ &= 0,216667 \text{ MN} \cdot \text{m}^2/\text{m}\end{aligned}\quad (128)$$

Calculo da rigidez na direção longitudinal:

$$\begin{aligned}(EI)_L &= 12500 \cdot \left(\frac{1 \cdot 0,14^3}{12} - I_T \right) = 12500 \cdot \left(\frac{1 \cdot 0,14^3}{12} - 0,216667 \right) \\ &= 2,641666 \text{ MN} \cdot \text{m}^2/\text{m}\end{aligned}\quad (129)$$

O pavimento apresenta uma largura, b , de 2,95 m, devido ao limite máximo imposto pelas condições de transporte dos painéis CLT.

I. **Frequência fundamental natural, f_1**

Para o cálculo da massa distribuída apenas as cargas de carácter permanente são relevantes, sendo efetuada a conversão de peso (KN/m²) para massa (Kg/m²) através da seguinte formula:

$$\bar{m} = \sum_{j>1} G_{k,j} \cdot \frac{1}{g} = \frac{(1,5 + 0,7) \cdot 1000}{9,81} = 224,3 \text{ Kg/m}^2 \quad (130)$$

O valor de k_m depende das condições de apoio do pavimento. Para uma laje duplamente apoiada em ambas as extremidades assume o valor de π^2 .

$$f_{1,\text{beam}} = \frac{\pi^2}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{\bar{m}}} = \frac{\pi^2}{2\pi \cdot 4,5^2} \cdot \sqrt{\frac{2,641666 \cdot 10^6}{224,3}} = 8,42 \quad (131)$$

Verificação aos requisitos elevados (classe I):

$$f_1 = 8,42 \text{ Hz} > f_{\text{crit}} = 8 \text{ Hz} \text{ ok} \quad (132)$$

Assim sendo, a laje cumpre os requisitos de vibração da classe I, não sendo necessário efetuar cálculos relativos à aceleração vibratória.

II. Critério de aceleração vibratória

A aceleração da vibração, a , deve ser verificada caso o valor da frequência natural, f_1 , esteja entre os valores da frequência mínima, f_{min} , e da frequência crítica, f_{crit} ($4,5 \leq f_1 \leq 8$). Apesar de não ser necessária a verificação deste critério no exemplo adotado, será apresentada a metodologia de cálculo para uma situação em que a frequência natural seja igual a 7,5 Hz. Segundo a Tabela 15, para um pavimento CLT simplesmente apoiado em duas extremidades e com uma construção pesada, a taxa de amortecimento modal, ζ , é de 2,5%. Para o intervalo $6,9 < f_1 \leq 8,0$ a frequência de excitação, f_f , assume o valor de 6,9 Hz e o coeficiente de Fourier, α_{i,f_1} , o valor de 0,06.

$$F_0 \approx 700 \text{ N (peso de uma pessoa)} \quad (133)$$

$$f_f = 6,9 \text{ Hz} \quad (134)$$

$$\alpha_{i,f_1} = 0,06 \quad (135)$$

$$\zeta = 2,5\% \quad (136)$$

$$f_1 = 7,5 \text{ Hz} \quad (137)$$

$$b_f = \frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_T}{(EI)_L}} = \frac{4,5}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{0,216667}{2,641666}} = 2,19 \quad (138)$$

$$M_{\text{gen}} = \bar{m} \cdot \frac{l}{2} \cdot b_f = 224,3 \cdot \frac{4,5}{2} \cdot 2,19 = 1104,7 \text{ kg} \quad (139)$$

$$a = \frac{0,4 \cdot \left(\frac{F_0 \cdot \alpha_{i,f_1}}{M_{\text{gen}}} \right)}{\sqrt{\left(\left(\frac{f_1}{f_f} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2 \cdot \zeta \cdot \frac{f_1}{f_f} \right)^2}} = 0,08 \text{ m/s}^2 \quad (140)$$

Verificação ao requisitos elevados (classe I):

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$a = 0,08 < 0,05 \text{ m/s}^2 \text{ ko} \quad (141)$$

Verificação ao requisitos normais (classe II):

$$a = 0,08 < 0,10 \text{ m/s}^2 \text{ ok} \quad (142)$$

III. Critério de rigidez (Deformação devida a carga pontual)

Para uma viga simplesmente apoiada, a deformação máxima, w_{1KN,b_f} , pode ser calculada por:

$$\begin{aligned} w_{1KN,b_f} &= \frac{1 \cdot L^2}{48 \cdot \frac{1}{1,1} \cdot (EI)_L \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_T}{(EI)_L}}} \\ &= \frac{1 \cdot 4,5^2}{48 \cdot \frac{1}{1,1} \cdot 2,641666 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,216667 \cdot 10^3}{2,641666 \cdot 10^3}}} \\ &= 0,000328 \text{ m} = 0,328 \text{ mm} \end{aligned} \quad (143)$$

Nota: Por uma questão de simplicidade de cálculo, a flexibilidade de corte foi desprezada para o cálculo da deformação. Para uma análise mais detalhada, esta deve ser tida em consideração através da fórmula:

$$w(F, b_f) = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_{l,ef} \cdot b_f} + \frac{F \cdot l}{4 \cdot (GA)_{ef} \cdot b_f} \quad (144)$$

Verificação ao requisitos elevados (classe I):

$$w_{1KN} = 0,328 < 0,25 \text{ mm} \text{ ko} \quad (145)$$

Verificação ao requisitos normais (classe II):

$$w_{1KN} = 0,328 < 0,50 \text{ m/s}^2 \text{ ok} \quad (146)$$

Assim sendo os requisitos de dimensionamento à vibração estão alcançados apenas para a classe II.

8.2.6. DIMENSIONAMENTO AO FOGO DE UMA LAJE CLT

O painel de pavimento usado nos exemplos 1, 2, 3 e 5, é verificado à resistência ao fogo com uma duração de 120 minutos através do método da redução da secção transversal.

A carga de dimensionamento ao fogo é calculada com a combinação de ações acidentais:

$$q_{d,fi} = G + \psi_2 \cdot Q = 2,2 + 0,3 \cdot 3,5 = 3,25 \text{ kN/m} \quad (147)$$

A redução da secção transversal é calculada subtraindo a profundidade carbonização eficaz (d_{ef}) à secção transversal inicial.

$$k_0 = 1 \quad d_0 = 7 \text{ mm} \quad (148)$$

Tempo de carbonização total da 1ª camada (40 mm):

$$t_1 = \frac{40}{0,65} = 61,54 \text{ min} \quad (149)$$

Tempo de carbonização total de cada uma das camadas internas (20 mm):

$$t_2 = t_3 = t_4 = \frac{20}{1,3} = 15,38 \text{ min} \quad (150)$$

$$\begin{aligned} t_1 + t_2 + t_3 + t_4 &= 61,54 + 15,38 + 15,38 + 15,38 \\ &= 107,68 \text{ min} < 120 \text{ min} \end{aligned} \quad (151)$$

Tempo de carbonização da camada 5ª camada (40 mm)

$$t_5 = 120 - 107,68 = 12,32 \text{ min} \quad (152)$$

$$d_{char,n} = 40 + 20 + 20 + 20 + 12,42 \cdot 1,3 = 116 \text{ mm} \quad (153)$$

$$d_{ef} = 116 + 1 \cdot 7 = 123 \text{ mm} \quad d_{fi} = 140 - 123 = 17 \text{ mm} \quad (154)$$

Modulo da secção da secção não queimada:

$$I_{ef} = \frac{1000 \cdot 17^3}{12} = 4,09417 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (155)$$

$$W = \frac{I_{ef}}{\frac{d_{fi}}{2}} = \frac{4,09417 \cdot 10^5}{8,5} = 48166,7 \text{ mm}^3 \quad (156)$$

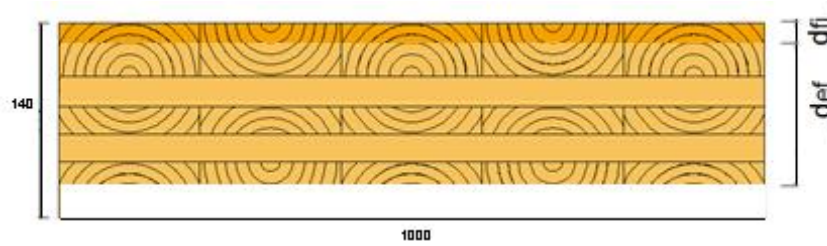


Fig. 133 – Secção transversal reduzida.

$$M_{\max,fi} = \frac{3,25 \cdot 4,5^2}{8} = 8,23 \text{ kNm} \quad (157)$$

$$V_{\max,fi} = \frac{3,25 \cdot 4,5}{2} = 7,31 \text{ kN} \quad (158)$$

• Estado Limite Último

Para obter-se a segurança ao fogo necessária ao longo de um tempo t , deve-se verificar que:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (2.7 - EC5_{1.2}) \quad (159)$$

I. Verificação à flexão:

$$\sigma_{m,d,fi} \leq f_{m,d,fi} \quad (160)$$

$$\sigma_{m,d,fi} = \frac{8,23 \cdot 10^6}{48166,7} = 170,86 \text{ N/mm}^2 \quad (161)$$

$$f_{m,d,fi} = k_{\text{mod},fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{m,fi}} \cdot k_{\text{sys}} \quad (162)$$

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f \quad (163)$$

$$k_{fi} = 1,15 \quad f = 24 \text{ N/mm}^2 \quad (164)$$

$$f_{20} = 1,15 \cdot 24 = 27,60 \text{ N/mm}^2 \quad (165)$$

$$f_{m,d,fi} = 1 \cdot \frac{27,60}{1} \cdot 1,1 = 30,36 \text{ N/mm}^2 \quad (166)$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$170,86 > 30,36 \quad (167)$$

$$\% \text{ de utilização} = \frac{170,86}{30,36} \cdot 100 = 563\% \text{ ko} \quad (168)$$

II. Verificação ao corte:

$$\tau_{v,d,fi} \leq f_{r,d,fi} \quad (169)$$

$$\tau_{v,d,fi} = \frac{1,5 \cdot 7,31 \cdot 10^3}{17000} = 0,65 \text{ N/mm}^2 \quad (170)$$

Apenas as camadas paralelas são tidas em consideração para o cálculo:

$$f_{20} = 1,15 \cdot 5 = 4,6 \text{ N/mm}^2 \quad (171)$$

$$f_{v,r,fi} = 1 \cdot \frac{4}{1} = 4,6 \text{ N/mm}^2 \quad (172)$$

$$0,65 < 4,6 \text{ N/mm}^2 \quad (173)$$

$$\% \text{ de utilização} = \frac{0,65}{4,6} \cdot 100 = 14\% \text{ ok} \quad (174)$$

8.2.7. DIMENSIONAMENTO AO FOGO DE UMA LAJE CLT COM REVESTIMENTO AO FOGO

No exemplo anterior verificou-se que a secção transversal era demasiado pequena para cumprir as condições de falha. Assim, neste exemplo foram adicionadas duas placas de fibra de gesso da classe A com 18 mm de espessura cada.

Devem ser calculados os valores de t_{ch} e t_a de maneira a ser possível determinar a profundidade de carbonização do painel. O valor t_f indica o tempo que demora até que a camada protetora seja totalmente carbonizada. Para placas de fibra de gesso do tipo A o tempo de início de carbonização da secção CLT, t_{ch} , é igual ao tempo de carbonização das placas protetoras, t_f . Após a falha da camada protetora, a taxa de carbonização da madeira sofre um aumento da velocidade que retomará ao seu valor normal após um determinado tempo t_a .

$$t_{ch} = 2,8 \cdot h_p - 14 \quad (3.11 - EC5_{1.2}) \quad (175)$$

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Onde h_p é a espessura das placas de fibra de gesso. Neste caso, como se trata de duas camadas protetoras da classe A, apenas é considerada 50% da espessura da segunda camada para o cálculo de h_p .

$$t_{ch} = 2,8 \cdot (18 + 0,5 \cdot 18) - 14 = 62 \text{ min} \quad (176)$$

$$t_f = 62 \text{ min} \quad (177)$$

$$t_a = \min \left\{ \frac{2 \cdot t_f}{k_3 \cdot \beta_n} + t_f \quad (3.8 - EC5_{1.2}) \right. \quad (178)$$

$$k_3 = 2 \quad \beta_n = 0,65 \text{ mm/min} \quad (179)$$

$$t_a = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot 62 = 124 \text{ min} \\ \frac{25}{2 \cdot 0,65} + 62 = 81 \text{ min} \end{array} \right. \rightarrow t_a = 81 \text{ min} \quad (180)$$

Para o intervalo $t_f \leq t \leq t_a$, a taxa de carbonização deve ser multiplicada por k_3 ($\beta_0 = 2 \cdot 0,65 = 1,3 \text{ mm/min}$), sendo assim possível calcular a profundidade de carbonização em $t = t_a$. O valor da profundidade máxima para t_a é de 25 mm e após esse período de tempo a taxa de carbonização volta ao seu valor normal de 0,65 mm/min até à primeira zona de colagem.

A profundidade de carbonização para $t = t_a$:

$$d_{t_a} = (t_a - t_{ch}) \cdot k_3 \cdot \beta_n = (81 - 62) \cdot 1,3 = 25 \text{ mm} \quad (181)$$

Tempo de carbonização total da 1ª camada (40 mm):

$$t_1 = \frac{25}{1,3} + \frac{15}{0,65} = 19 + 23 = 42 \text{ min} \quad (182)$$

Tempo de carbonização total de cada uma das camadas internas (20 mm):

$$t_2 = t_3 = t_4 = \frac{20}{1,3} = 15,38 \text{ min} \quad (183)$$

$$t_{ch} + t_1 + t_2 = 62 + 42 + 15,38 = 119,38 \text{ min} < 120 \text{ min} \quad (184)$$

Tempo de carbonização da 3ª camada (20 mm)

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

$$t_3 = 120 - 119,38 = 0,62 \text{ min} \quad (185)$$

$$d_{\text{ef}} = 40 + 20 + 0,62 \cdot 1,3 + 1 \cdot 7 = 68 \text{ mm} \quad (186)$$

$$d_{\text{fi}} = 140 - 68 = 72 \text{ mm} \quad (187)$$

Utilizando a *Mechanically Jointed Beams Theory* para o cálculo da inércia efetiva:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 \cdot 12500 \cdot 40000 \cdot 20}{(4500)^2 \cdot 50 \cdot 1000} \right)} = 0,911 ; \quad \gamma_2 = 1,0 \quad (188)$$

$$Z_{G,\text{eff}} = \frac{0,911 \cdot 40000 \cdot \left(\frac{40}{2} + 20 + 12 \right) + 1,0 \cdot 12000 \cdot \left(\frac{12}{2} \right)}{0,911 \cdot 40000 + 1,0 \cdot 12000} = 40,61 \text{ mm} \quad (189)$$

$$a_1 = Z_{G,1} - Z_{G,\text{eff}} = \frac{d_1}{2} + d_{12} + d_2 - Z_{G,\text{eff}} = \left(\frac{40}{2} + 20 + 12 \right) - 40,61 = 11,39 \text{ mm} \quad (190)$$

$$a_2 = Z_{G,\text{eff}} - Z_{G,1} = 40,61 - \frac{12}{2} = 34,60 \text{ mm} \quad (191)$$

$$I_{\text{eff}} = \left(\frac{(12)^3 \cdot 1000}{12} \right) + \left(\frac{(40)^3 \cdot 1000}{12} \right) + (0,911 \cdot (11,39)^2 \cdot 40000) + (1 \cdot (34,60)^2 \cdot 12000) = 24579931 \text{ mm}^4 \quad (192)$$

Módulo da secção não queimada:

$$W_{\text{eff,top}} = \left(\frac{I_{\text{eff}}}{\gamma_1 \cdot a_1 + \frac{d_1}{2}} \right) = \left(\frac{24579931}{0,911 \cdot 11,39 + \frac{40}{2}} \right) = 8,09 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad (193)$$

$$W_{\text{eff,top}} = \left(\frac{I_{\text{eff}}}{\gamma_2 \cdot a_2 + \frac{d_2}{2}} \right) = \left(\frac{37696671}{1 \cdot 15,93 + \frac{40}{2}} \right) = 6,05 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad (194)$$

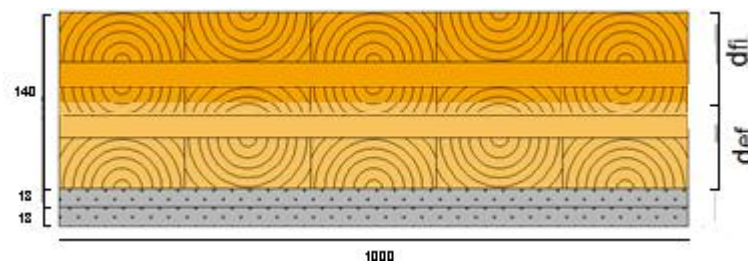


Fig. 134 – Secção transversal reduzida.

$$M_{\max,fi} = 8,23 \text{ kNm} \quad (195)$$

$$V_{\max,fi} = 7,31 \text{ kN} \quad (196)$$

- **Estado Limite Último**

- I. Verificação à flexão:**

$$\sigma_{m,d,fi} = \frac{8,23 \cdot 10^6}{6,05 \cdot 10^5} = 13,60 \text{ N/mm}^2 \quad (197)$$

$$\% \text{ de utilização} = \frac{13,6}{30,60} \cdot 100 = 44\% \quad \text{ok} \quad (198)$$

8.3. TABELAS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

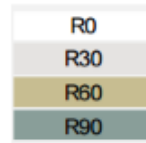
As tabelas de pré-dimensionamento aqui apresentadas foram elaboradas pela empresa Stora Enso e podem ser acedidas através do no site da empresa (<http://www.clt.info>). Estas podem ser usadas para uma análise de pré-dimensionamento simples de painéis de pavimento e parede. As tabelas indicam a espessura necessária que um determinado painel deve apresentar para um determinado caso de carga aplicado ao respetivo vão. Após a escolha do painel, este deve ser verificado através de uma análise mais pormenorizada.

8.3.1. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM PAINEL DE PAVIMENTO

A Tabela 63 permite ao seu utilizador determinar a espessura do pavimento com base no comprimento do vão pretendido e dependendo das cargas impostas à estrutura. É permitida a escolha de vários valores para as cargas e para a extensão do vão da laje. É de referir que esta permite a atribuição de uma carga permanente, g_k , relativa ao peso próprio adicional (revestimentos), sendo que, o peso próprio do painel já é tido em consideração nos cálculos (madeira de densidade igual a 500 kg/m^3). É também possível escolher o valor da sobrecarga residencial, n_k , a aplicar sobre o respetivo vão. Como seria de esperar a espessura dos painéis de pavimento é dependente do tipo de carregamento a que estará sujeito bem como à extensão do vão pretendido

Construir em altura com CLT. O UT System aplicado a um exemplo.

Tabela 63 – Tabela de dimensionamento à deformação de um painel de pavimento (Stora Enso - Floor-Single-Span-Beam-Deformation)



In accordance with approval Z 9.1-559
DIN 1052 (2008) and/or EN 1995-1-1 (2006)

Single-span beam_deformation

Dead weight (gk*)	Imposed load nk	Span of single-span beam									
		3,00 m	3,50 m	4,00 m	4,50 m	5,00 m	5,50 m	6,00 m	6,50 m	7,00 m	
1,00	1,00		80 L3s	90 L3s	120 L3s	120 L3s	140 L5s		160 L5s - 2	180 L5s - 2	200 L5s
	2,00	80 L3s	90 L3s	100 L3s	120 L3s	120 L3s	140 L5s		160 L5s - 2	180 L5s	200 L5s
	2,80							160 L5s - 2			
	3,50	80 L3s	90 L3s	120 L3s	120 L3s	140 L5s		160 L5s - 2			220 L7s - 2
	4,00		100 L3s						200 L5s	200 L5s	
1,50	1,00	80 L3s	90 L3s	100 L3s	120 L3s	140 L5s		160 L5s - 2	180 L5s	200 L5s	
	2,00										
	2,80	80 L3s		120 L3s	120 L3s				180 L5s	200 L5s	220 L7s - 2
	3,50		100 L3s					160 L5s - 2			
	4,00	90 L3s		120 L3s	140 L5s	160 L5s - 2			200 L5s	220 L7s - 2	
2,00	1,00	80 L3s	100 L3s	120 L3s	120 L3s	140 L5s		160 L5s - 2	180 L5s	200 L5s	
	2,00										
	2,80	90 L3s									220 L7s - 2
	3,50		120 L3s	120 L3s	140 L5s			180 L5s			
	4,00	90 L3s		120 L3s		160 L5s - 2			200 L5s	220 L7s - 2	
2,50	1,00	90 L3s	100 L3s	120 L3s			160 L5s - 2	180 L5s			220 L7s - 2
	2,00										
	2,80		120 L3s	120 L3s	140 L5s	160 L5s - 2		180 L5s	200 L5s	220 L7s - 2	
	3,50	90 L3s									240 L7s - 2
	4,00		120 L3s	140 L5s				200 L5s	220 L7s - 2		
3,00	1,00	90 L3s		120 L3s	140 L5s				200 L5s		220 L7s - 2
	2,00	90 L3s	120 L3s								
	2,80					160 L5s - 2		180 L5s	200 L5s	220 L7s - 2	
	3,50	100 L3s		140 L5s							240 L7s - 2
	4,00		120 L3s		160 L5s - 2	160 L5s - 2		200 L5s	220 L7s - 2		
3,00	1,00	90 L3s		120 L3s	140 L5s				200 L5s		220 L7s - 2
	2,00	90 L3s	120 L3s								
	2,80					160 L5s - 2		180 L5s	200 L5s	220 L7s - 2	
	3,50	100 L3s		140 L5s							240 L7s - 2
	4,00		120 L3s		160 L5s - 2	160 L5s - 2		200 L5s	220 L7s - 2		
3,00	1,00	90 L3s		120 L3s	140 L5s				200 L5s		220 L7s - 2
	2,00	90 L3s	120 L3s								
	2,80					160 L5s - 2		180 L5s	200 L5s	220 L7s - 2	
	3,50	100 L3s		140 L5s							240 L7s - 2
	4,00		120 L3s		160 L5s - 2	160 L5s - 2		200 L5s	220 L7s - 2		
3,00	1,00	90 L3s		120 L3s	140 L5s				200 L5s		220 L7s - 2
	2,00	90 L3s	120 L3s								
	2,80					160 L5s - 2		180 L5s	200 L5s	220 L7s - 2	
	3,50	100 L3s		140 L5s							240 L7s - 2
	4,00		120 L3s		160 L5s - 2	160 L5s - 2		200 L5s	220 L7s - 2		
3,00	1,00	90 L3s		120 L3s	140 L5s				200 L5s		220 L7s - 2
	2,00	90 L3s	120 L3s								
	2,80					160 L5s - 2		180 L5s	200 L5s	220 L7s - 2	
	3,50	100 L3s		140 L5s							240 L7s - 2
	4,00		120 L3s		160 L5s - 2	160 L5s - 2		200 L5s	220 L7s - 2		
3,00	1,00	90 L3s		120 L3s	140 L5s				200 L5s		220 L7s - 2
	2,00	90 L3s	120 L3s								
	2,80					160 L5s - 2		180 L5s	200 L5s	220 L7s - 2	
	3,50	100 L3s		140 L5s							240 L7s - 2
	4,00		120 L3s		160 L5s - 2	160 L5s - 2		200 L5s	220 L7s - 2		

* The CLT self-weight is already taken into account in the table at $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$

Service class 1, imposed load category A ($\psi_0 = 0.7; \psi_1 = 0.5; \psi_2 = 0.3$)

Notas referentes à tabela de dimensionamento:

ELU: Verificação às tensões de flexão e de corte ($k_{mod} = 0,8$).

ELS: Situação de dimensionamento quase-permanente: $zul w_{fin} = 250$; Situação de dimensionamento característica (infrequentes): $zul w_{q,inst} = 300$ e $zul w_{fin} - w_{g,inst} = 200$.

Resistência ao fogo: HFA 2011; $v_1 = 0,65 \text{ mm/min}$; Classe de resistência em conformidade com a cor dos sombreados (R0, R30, R60 ou R90).

Esta tabela especifica as espessuras necessárias para a situação de projeto normal (R0). A cor de sombreamento representa o tempo de resistência ao fogo que pode ser alcançado pelo painel escolhido. Caso seja necessário um tempo de resistência ao fogo superior, uma análise distinta deve ser realizada. Esta tabela é apenas para fins de estimativa preliminar, não sendo um substituto para uma análise estrutural.

8.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos pelo software *Calculatis* para o dimensionamento de elementos estruturais simples CLT foram sujeitos a comparação com os métodos analíticos e em relação ao software de elementos finitos, *RFEM 5 – RF-Laminate* (Tabela 64 e Tabela 65). A obtenção de resultados semelhantes entre os dois softwares é de extrema importância para a modelação do edifício em altura CLT sujeito a análise no capítulo 5, uma vez que, garante ao engenheiro estrutural que o comportamento do CLT é caracterizado corretamente pelo software de elementos finitos (validação do material no software).

Recorrendo à tabela de pré-dimensionamento da empresa Stora Enso (Tabela 63), efetuou-se o pré-dimensionamento de uma laje com um vão de 4500 mm, sujeita a um carregamento permanente, $G_k = 1,5 \text{ kN/m}$, e a um carregamento variável residencial, $N_k = 3,5 \text{ kN/m}$, obtendo-se uma espessura de 140 mm para o painel CLT (Fig. 135). O processo analítico de dimensionamento da laje é apresentado segundo o *k-method* (tópico 8.2.1.), o *γ-method* (tópico 8.2.2.) e o *shear analogy method* (tópico 8.2.3.).

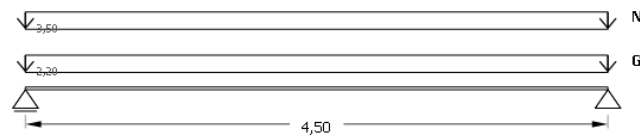


Fig. 135 – Representação esquemática do painel de pavimento CLT sujeito a análise dos diversos métodos (*Calculatis*, <http://www.clt.info/>)

Um painel de parede CLT (90 mm de espessura) com um comprimento de 1 m por 2,5 m de altura foi sujeito a um carregamento permanente, $G_k = 15 \text{ kN/m}$, a uma ação variável residencial, $N_k = 100 \text{ kN/m}$, e à ação do vento segundo o plano do painel, $W_k = 10 \text{ kN/m}$ (ver Fig. 136). O processo analítico de dimensionamento da parede é apresentado no tópico 8.2.4. dos anexos.

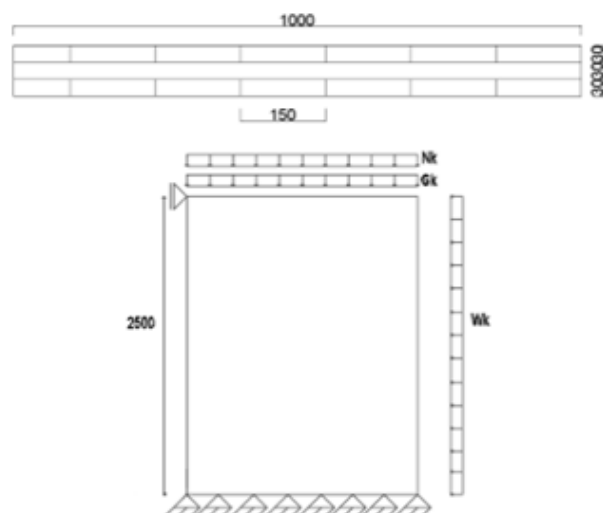


Fig. 136 – Representação esquemática do painel de parede CLT sujeito à comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos de dimensionamento (*Calculatis*, <http://www.clt.info/>)

Tabela 64 – Tensões e deformações obtidas para uma laje sujeita à flexão fora do plano, recorrendo a três métodos analíticos e através dos softwares *Calculatis* e *RFEM 5 – RF-Laminate*.

Laje sujeita à flexão fora do plano					
Valores de dimensionamento	γ -method [MPa]	k-method [MPa]	Shear analogy method [MPa]	Calculatis [MPa]	RFEM 5 – RF-Laminate [MPa]
Flexão	7,05	6,37	7	6,89	6,81
Corte	0,2	0,18	0,176	0,18	0,19
Corte rasante	0,19	0,176	0,1614	0,18	0,18
Deformação final	18,67	17,04	18,75	18,7	18,4

Analisando a Tabela 64 verifica-se uma boa compatibilidade entre os resultados obtidos através dos métodos analíticos com aqueles fornecidos via software (*Calculatis* e *RFEM 5 – RF-Laminate*). Devido à não consideração da deformação de corte nas camadas individuais, o *k-method* apresenta uma maior variação nas tensões e deformações.

Tabela 65 – Tensões obtidas para uma parede sujeita à compressão e flexão no plano, recorrendo ao γ -method + RVSEs e através dos softwares *Calculatis* e *RFEM 5 – RF-Laminate*.

Parede sujeita à compressão e flexão no plano			
Valores de dimensionamento	γ-method + RVSEs [MPa]	Calculatis [MPa]	RFEM 5 – RF-Laminate [MPa]
Compressão	2,86	2,86	2,92
Flexão no plano	1,16	1,17	1,20
Mecanismo I: Corte	0,625	Secção total: 0,31 Secção parcial : 0,94	0,62
Mecanismo II: Torção	0,19	0,21	-

Analisando a Tabela 65 verifica-se uma boa compatibilidade das tensões de compressão e flexão entre os 3 métodos de dimensionamento utilizados. Contudo existe algumas discrepâncias em relação às tensões de corte. O software *Calculatis* faz a distinção entre o corte que origina o mecanismo I para a secção total (90 mm) e para a secção parcial (60 mm). Caso seja efetuada a média dos valores obtidos para as duas secções (0,31 e 0,94 MPa) obtém-se o mesmo valor obtido para o γ -method + RVSEs (0,625 MPa). De referir que o software *RFEM 5 – RF-Laminate* não fornece o valor de corte referente ao mecanismo II – torção.