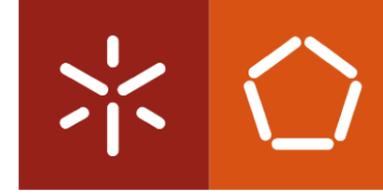




**Sistema construtivo em painéis modulares
para edifícios coletivos com estrutura de madeira**

Marina Costa Urquiza Tenório

Uminho | 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Marina Costa Urquiza Tenório

**Sistema construtivo em painéis modulares
para edifícios coletivos com estrutura
de madeira**

Fevereiro de 2022



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Marina Costa Urquiza Tenório

**Sistema construtivo em painéis modulares
para edifícios coletivos com estrutura
de madeira**

Dissertação de Mestrado
Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge M. Branco

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Jorge M. Branco, pela partilha de conhecimentos fundamentais, pelos direcionamentos precisos e pelo entusiasmo admirável com que sempre trabalha e lutou pelos interesses da pesquisa.

Ao Engenheiro Marcos Oliveira e à Professora Doutora Sandra M. Silva pela dedicação, didática e tempo dispensados para a partilha de conhecimentos e experiências, troca de informações, esclarecimentos, conselhos e orientações adicionais valiosas.

À PORTILAME - Engenharia e Madeira, Lda. pela colaboração técnica e cessão do projeto do edifício tratado no caso de estudo desta dissertação.

Aos meus pais, Dircéa Costa e Admilson Tenorio, pelo suporte, incentivo e zelo incondicionais, determinantes para o êxito de quaisquer dos meus propósitos até aqui, e a todos os familiares e amigos que torceram pelo sucesso desta caminhada, especialmente àqueles que não puderam, em vida, presenciá-lo.

Ao meu companheiro, Daniel Freitas Lima, pela parceria inabalável, cooperação e encorajamento neste e em todos os projetos e sonhos.

Aos meus colegas do Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis da Universidade do Minho por partilharem comigo esta jornada e tornarem-na mais enriquecedora, prazerosa e memorável.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Dado o alarmante cenário climático que revelou a urgência em reverter os padrões de consumo globais, alcançar a neutralidade carbónica até 2050 torna-se uma meta essencial para limitar o aquecimento global. Neste contexto, a construção em madeira assume um papel inovador e promissor na prossecução deste objetivo por parte do setor da construção. No entanto, existem lacunas de conhecimento substanciais acerca da utilização da madeira em edifícios que são decisivas na limitação do uso estrutural da madeira e que têm fomentado a disparidade dos seus avanços e incentivos comparativamente às tecnologias em betão e em aço.

Este trabalho visa não apenas preencher estas lacunas de conhecimento, promovendo a maior aceitação e expansão ao uso da madeira, como oferecer uma solução sustentável alternativa aos materiais convencionais como ferramenta para o cumprimento dos objetivos nacionais de neutralidade carbónica e para o fortalecimento da bioeconomia local através do uso dos recursos florestais locais. A partir do uso da madeira, um material renovável, reservatório de carbono e com excelentes propriedades térmicas, em associação ao processo de pré-fabricação e seus benefícios, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de um sistema construtivo para edifícios até 5 pisos recorrendo a painéis pré-fabricados de madeira com características concebidas e validadas para a aplicação bem sucedida no contexto português.

Neste trabalho, o sistema construtivo é projetado, avaliado e otimizado em termos estruturais, funcionais e logísticos. São discutidas as estratégias de conceção de estruturas de madeira, bem como as necessidades e requisitos inerentes ao contexto português, a serem considerados na elaboração do sistema construtivo. Em seguida, definem-se as regras de conceção identificadas para os painéis, pormenorizando-os segundo cada camada constituinte e as suas propriedades. Os painéis são, então, avaliados quanto ao coeficiente de transmissão térmica (e proteção à humidade, para os painéis de fachada e cobertura) através do *software* Ubakus, quanto ao índice de redução sonora a sons aéreos e de percussão através do *software* INSUL e quanto à resistência e reação ao fogo. Através de um caso de estudo desenvolvido em parceria com a empresa PORTILAME - Engenharia e Madeira, Lda., avalia-se o comportamento estrutural dos componentes dos painéis para um edifício de 4 pisos através dos *software* RFEM e Calculatis.

PALAVRAS-CHAVE

Edifícios em madeira; Neutralidade carbónica; Pré-fabricação; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Given the climate scenario that revealed the urgency of reversing global consumption patterns, achieving carbon neutrality by 2050 becomes an essential target in limiting global warming. In this context, building up in wood plays an innovative and promising role in pursuing this goal by the construction sector. However, there are substantial knowledge gaps about using wood in buildings that are decisive in depriving the wood structural use and that have fostered the disparity of its advances and incentives regarding concrete and steel technologies.

This work aims not only to fill these knowledge gaps, promoting greater acceptance and expansion of the use of wood, but also to promote a sustainable alternative solution to conventional materials, namely concrete and steel, as a tool for meeting the national carbon neutrality targets and for strengthening the local bioeconomy through the use of native forest resources. By using wood, a renewable, carbon sink material with excellent thermal properties in association with the prefabrication process and its benefits, this research proposes the development of a construction system for up to 5-storey buildings based on prefabricated wooden panels for successful application in the Portuguese context.

In this work, the constructive system is designed, evaluated and optimized in structural, functional and logistical terms. Strategies for designing wooden structures are discussed, as well as the needs and requirements inherent in the Portuguese context, to be considered in the design of the construction system. Then, the design rules for the panels are defined and detailed according to each component layer and its properties. The panels are then evaluated for the coefficient of thermal transmission (and moisture protection, for the facade and roof panels) using the Ubakus software, for the noise reduction index to aerial and percussion sounds using the INSUL software and resistance and reaction to fire. Through a case study developed in partnership with the company PORTILAME - Engenharia e Madeira, Lda., the structural behavior of the components of the panels for a 4-storey building is evaluated using RFEM and Calculatis software.

KEYWORDS

Carbon neutrality; Prefabrication; Sustainability; Wooden buildings.

ÍNDICE

1.	Por que construir edifícios em madeira?	1
1.1.	Objeto, âmbito e justificação.....	1
1.2.	Objetivos.....	14
1.3.	Estrutura do documento.....	15
1.4.	Disseminação dos resultados	16
2.	Estado da Arte	17
2.1.	Enquadramento histórico do uso da madeira na construção.....	17
2.2.	A madeira como material de construção moderno para edifícios em altura.....	20
2.2.1.	Contexto mundial.....	22
2.2.2.	Contexto nacional	25
2.3.	Requisitos de construção que influenciam edifícios em madeira.....	31
2.3.1.	Durabilidade.....	31
2.3.2.	Acústica e vibrações	33
2.3.3.	Segurança ao fogo.....	34
2.3.4.	Estabilidade.....	36
2.4.	Pré-fabricação e construção modular	37
2.4.1.	Produtos derivados da madeira.....	39
2.5.	Tipos de construção em madeira.....	53
3.	Metodologia de conceção do sistema construtivo.....	59
3.1.	Restrições de conceção.....	59
3.2.	Estratégias prescritivas de conceção do sistema construtivo.....	62
3.2.1.	Paredes.....	62
3.2.1.1.	Paredes externas	62
3.2.1.1.1.	Estrutura	62
3.2.1.1.2.	Fechos exterior e interior.....	65
3.2.1.1.3.	Membrana respirável	66

3.2.1.1.4.	Isolamento térmico	67
3.2.1.1.5.	Barreira para-vapor	68
3.2.1.1.6.	Aberturas.....	70
3.2.1.2.	Paredes internas.....	72
3.2.1.3.	Revestimentos	74
3.2.1.3.1.	Revestimentos internos	74
3.2.1.3.2.	Revestimentos externos.....	75
3.2.2.	Pisos.....	79
3.2.2.1.	Piso do rés do chão	79
3.2.2.2.	Pisos intermediários.....	82
3.2.3.	Cobertura	83
3.2.4.	Varanda.....	86
3.3.	Instalações e equipamentos prediais	86
3.4.	Conectores.....	89
3.5.	Desempenho funcional.....	90
3.5.1.	Desempenho térmico.....	90
3.5.1.1.	Objetivos e estratégias para conceção do projeto térmico	90
3.5.1.2.	Objetivos e estratégias para controle de humidade	93
3.5.1.3.	Metodologia de previsão do desempenho térmico e controle de humidade	94
3.5.2.	Desempenho acústico	98
3.5.2.1.	Objetivos e estratégias para conceção do projeto acústico	98
3.5.2.2.	Metodologia de previsão do desempenho acústico.....	101
3.6.	Segurança ao fogo	103
3.6.1.	Objetivos e estratégias para conceção do projeto de segurança ao fogo.....	103
3.6.2.	Metodologia de previsão do desempenho ao fogo.....	105
3.7.	Desempenho mecânico.....	106
3.7.1.	Objetivos e estratégias para conceção do projeto estrutural	107
3.7.2.	Metodologia de previsão do desempenho mecânico	107
4.	O sistema construtivo, resultados e discussões	111

4.1.	Definição do conceito	111
4.2.	Premissas de projeto.....	112
4.3.	Soluções estruturais.....	113
4.4.	Elementos construtivos.....	119
4.4.1.	Paredes externas (Par_Ext_TF)	119
4.4.2.	Paredes internas estruturais (Par_Int_Est_TF)	123
4.4.3.	Paredes internas não-estruturais (Par_Int_Nest_TF).....	125
4.4.4.	Paredes internas duplas (Par_Int_Dupla_TF)	127
4.4.5.	Paredes de núcleo – Caixa de escadas e elevadores (Par_Nuc_CLT e Par_Nuc_CLT_TF)	128
4.4.6.	Piso do rés do chão (Pav_RC).....	130
4.4.7.	Pisos intermediários (Pav_Int_CLT).....	133
4.4.8.	Cobertura (Cob_CLT e Cob_TAH)	136
4.4.9.	Varanda (Var_CLT)	141
4.5.	Junção entre elementos	142
4.6.	Análise funcional	148
4.6.1.	Análise térmica.....	148
4.6.2.	Análise acústica.....	159
4.7.	Análise de segurança ao fogo	165
5.	Caso de estudo.....	168
5.1.	Descrição do edifício	168
5.2.	Aplicação do sistema construtivo e considerações gerais	168
5.3.	Modelação do edifício.....	170
5.3.1.	Definições estruturais	170
5.3.2.	Materiais e seções	174
5.3.3.	Cargas aplicadas	175
5.3.4.	Verificações	180
6.	Conclusões.....	191
6.1.	Síntese de resultados	191
6.2.	Estudos futuros	195

Referências Bibliográficas	197
Anexo 1 – Análise térmica.....	209
Anexo 2 – Análise acústica.....	253
Anexo 3 – Edifício do caso de estudo.....	263
Anexo 4 – Análise térmica do edifício do caso de estudo.....	271
Anexo 5 – Materiais e seções da modelação do edifício.....	273
Anexo 6 – Cálculo dos carregamentos aplicados à modelação do edifício.....	277
Anexo 7 – Dimensionamento dos componentes estruturais dos painéis.....	278

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – <i>HoHo</i> , em Viena	2
Figura 1.2 – <i>Limnologen</i> , em Växjö	4
Figura 1.3 – <i>Forté</i> , em Melbourne	6
Figura 1.4 – (a) <i>Treet</i> , em Bergen; (b) <i>Mjøstårnet</i> , em Brumunddal	7
Figura 1.5 – Faixas de idade dos participantes do inquérito na categoria “Público”	8
Figura 1.6 – Vantagens associadas aos edifícios em madeira apontadas pelos participantes da categoria “Público”	9
Figura 1.7 – Receios associados aos edifícios em madeira apontados pelos participantes da categoria “Público”	9
Figura 1.8 – Áreas de atuação no âmbito da construção em madeira dos participantes do inquérito na categoria “Indústria”	10
Figura 1.9 – Vantagens associadas à construção em madeira apontadas pelos participantes da categoria “Indústria” com experiência no sector.....	11
Figura 1.10 – Obstáculos associados à construção em madeira apontados pelos participantes da categoria “Indústria” com experiência no sector.....	11
Figura 1.11 – Vantagens associadas à construção em madeira apontadas pelos participantes da categoria “Indústria” sem experiência no sector.....	12
Figura 1.12 – Receios associados à construção em madeira apontados pelos participantes da categoria “Indústria” sem experiência no sector.....	12
Figura 1.13 – Obstáculos associados à construção em madeira apontados pelos participantes da categoria “Indústria” sem experiência no sector.....	12
Figura 2.1 – <i>Stadthaus</i> , em Londres.....	21
Figura 2.2 – (a) <i>e3</i> , em Berlim; (b) <i>Brock Commons Tallwood House</i> , em Vancouver	24
Figura 2.3 – Ritmo de implantação das estruturas de madeira em Portugal.....	27
Figura 2.4 – Aspetos da resistência ao fogo	35
Figura 2.5 – Cronograma da invenção dos produtos derivados da madeira.....	40
Figura 2.6 – Contraplacado	43
Figura 2.7 – Aglomerado de partículas.....	44
Figura 2.8 – Painel de fibras.....	45

Figura 2.9 – MDF	46
Figura 2.10 – OSB	47
Figura 2.11 – Aglomerado de cimento	48
Figura 2.12 – CLT	49
Figura 2.13 – Glulam	50
Figura 2.14 – LVL.....	51
Figura 2.15 – PSL	51
Figura 2.16 – LSL	52
Figura 2.17 – Scrimber	52
Figura 2.18 – Vigas em I	53
Figura 2.19 – Exemplos de construções em madeira. (a) Sistema viga-pilar; (b) Sistema em painéis massivos; (c) Sistema em <i>timber-frame</i> ; (d) Sistema em <i>timber-frame</i> em associação ao sistema de painéis massivos	53
Figura 2.20 – Tipos de modularidades para os sistemas construtivos em madeira	54
Figura 2.21 – Construção em plataforma.....	56
Figura 2.22 – Construção em balão.....	56
Figura 2.23 – Principais estratégias estruturais empregadas em edifícios mistos.....	57
Figura 3.1 – Dimensões do camião lona padrão para transporte dos elementos em painéis pré-fabricados	61
Figura 3.2 – Estrutura em <i>timber-frame</i>	63
Figura 3.3 – (a) Ligação entre os banzos e os montantes; (b) Banzo superior alocado em obra sobrepondo-se às juntas de ligação dos painéis pré-fabricados	64
Figura 3.4 – <i>Timber-frame</i> com elementos de travamento.....	64
Figura 3.5 – Fecho do <i>timber-frame</i>	65
Figura 3.6 – (a) Sobras mínimas para a sobreposição de membranas ou nas extremidades dos painéis; (b) Membrana contornando a caixilharia das aberturas de fachada.....	67
Figura 3.7 – Camada de isolamento no interior do <i>timber-frame</i>	67
Figura 3.8 – (a) Camada de serviço pelo interior; (b) Camada de serviço preenchida com material de isolamento	68
Figura 3.9 – Barreira para-vapor no interior do <i>timber-frame</i>	69
Figura 3.10 – Exemplo de sobreposição entre a barreira para-vapor e as barreiras de humidade no rés do chão.....	70

Figura 3.11 – (a) Lintel de paredes não estruturais; (b) Lintel de paredes estruturais.....	71
Figura 3.12 – Exemplos de disposições dos montantes adjacentes a depender da tamanho da abertura e da magnitude da carga suportada pelo lintel	71
Figura 3.13 – Junta entre a caixilharia e o <i>timber-frame</i> preenchida com material isolante e vedante.	72
Figura 3.14 – <i>Timber-frame</i> com placas de fecho à base de madeira em apenas uma das faces. (a) Parede interna; (b) Parede externa.....	73
Figura 3.15 – Encontro entre paredes com montantes/travamentos adicionais	75
Figura 3.16 – Variedade de padrões do revestimento em madeira. (a) Verticais; (b) Verticais ou diagonais; (c) Horizontais	76
Figura 3.17 – Vão de ventilação com drenagem incorporada. (a) Sobre vãos de aberturas; (b) No rés do chão.....	76
Figura 3.18 – Ripado para suporte do revestimento. (a) Horizontal; (b) Vertical.....	77
Figura 3.19 – Dimensões mínimas para as tábuas de revestimento externo. (a) Tábuas T&G com chanfro; (b) Tábuas quadradas sobrepostas	78
Figura 3.20 – Distanciamento mínimo entre o revestimento externo e o nível do terreno.....	78
Figura 3.21 – Piso do rés do chão. (a) Estrutura suspensa com camada de ventilação; (b) Estrutura apoiada sobre o solo	80
Figura 3.22 – Fixação das placas às ripas.....	81
Figura 3.23 – Exemplo de cobertura fria	84
Figura 3.24 – Exemplo de cobertura sanduíche	85
Figura 3.25 – Exemplo de cobertura invertida	85
Figura 3.26 – Exemplo de instalações na camada de serviço	87
Figura 3.27 – Exemplos de montantes e travamentos adicionais para suporte das instalações no interior do <i>timber-frame</i>	87
Figura 3.28 – Variedade de conectores metálicos empregues na construção em madeira. (a) Parafuso autoperfurante rosca parcial para madeira cabeça larga; (b) Parafuso autoperfurante rosca parcial para madeira cabeça de embeber; (c) Parafuso autoperfurante rosca-total para madeira; (d) Parafuso autorroscante para betão; (e) Pregos anilhados; (f) Angular de tração (<i>hold-down angle plate</i>); (g) Angular de corte (<i>shear angle plate</i>); (h) Chapas perfuradas	89
Figura 3.29 – Soluções para junção entre elementos de parede e piso.....	89
Figura 4.1 – <i>Timber-frame</i> com montantes, banzos, elementos de travamento e OSB para fecho em ambas as faces	114

Figura 4.2 – Disposição de montantes para aberturas cujas extremidades laterais coincidem com a padronagem dos montantes	115
Figura 4.3 – Disposição dos montantes para aberturas cujas extremidades laterais não coincidem com a padronagem dos montantes	115
Figura 4.4 – Disposição de montantes para aberturas de tamanho superior	115
Figura 4.5 – Disposição de montantes para aberturas de largura igual ou inferior ao vão entre eles.	116
Figura 4.6 – CLT apoiado diretamente sobre a parede em <i>timber-frame</i>	117
Figura 4.7 – CLT apoiado sobre vigas de pavimento que descarregam sobre a parede em <i>timber-frame</i>	117
Figura 4.8 – Disposição de montantes para aberturas cujas extremidades laterais coincidem com a padronagem dos montantes quando há viga de coroamento	118
Figura 4.9 – Disposição de montantes para aberturas cujas extremidades laterais não coincidem com a padronagem dos montantes quando há viga de coroamento	118
Figura 4.10 – Disposição de montantes para aberturas de tamanho superior quando há viga de coroamento.....	118
Figura 4.11 – Par_Ext_TF	119
Figura 4.11 – Par_Ext_TF (Continuação)	120
Figura 4.12 – Exemplo da omissão das tábuas mais extremas para posterior aplicação em obra.....	120
Figura 4.13 – Localização das fitas em material resiliente para dessolidarização dos elementos rígidos dos painéis Par_Ext_TF, em vermelho	122
Figura 4.14 – Par_Int_Est_TF	124
Figura 4.15 – Localização das fitas em material resiliente para dessolidarização dos elementos rígidos dos painéis Par_Int_Est_TF, em vermelho	124
Figura 4.16 – Par_Int_Nest_TF	126
Figura 4.17 – Par_Int_Dupla_TF	127
Figura 4.18 – Par_Nuc_CLT.....	128
Figura 4.18 – Par_Nuc_CLT (Continuação).....	129
Figura 4.19 – Par_Nuc_CLT_TF	129
Figura 4.20 – Pav_RC	131
Figura 4.21 – Pav_RC com acabamento cerâmico.....	131
Figura 4.22 – Pav_Int_CLT.....	133
Figura 4.22 – Pav_Int_CLT (Continuação)	134

Figura 4.23 – Desligamento entre a estrutura do soalho flutuante e a laje de suporte em CLT. (a) em fitas; (b) em membranas	135
Figura 4.24 – Pav_Int_CLT sem teto falso acústico. Exemplo com membrana acústica para dessolidarização dos elementos rígidos.....	136
Figura 4.25 – Cob_CLT	137
Figura 4.26 – Cob_TAH.....	137
Figura 4.27 – Var_CLT	141
Figura 4.28 – Junções de paredes adjacentes em <i>timber-frame</i> em (a) “L”, (b) “T” e (c) “cruz”. Exemplo: Par_Int_Est_TF	142
Figura 4.29 – Elementos de travamento adicionais para junções em (a) “T” e (b) “cruz” de paredes adjacentes em <i>timber-frame</i> . Exemplo: Par_Int_Est_TF.....	142
Figura 4.30 – Junções em “T” para paredes duplas. Exemplo: (a) Par_Int_Dupla_TF e (b) Par_Int_Est_TF	143
Figura 4.31 – (a) Junção a 180° entre duas paredes em <i>timber-frame</i> . Exemplo: Par_Int_Est_TF; (b) Junção entre duas parede em CLT. Exemplo: Par_Nuc_CLT; (c) Junção entre uma parede em CLT e uma parede em <i>timber-frame</i> . Exemplos: Par_Nuc_CLT e Par_Int_Est_TF; (d) Junção entre duas paredes mistas. Exemplo: Par_Nuc_CLT_TF.....	143
Figura 4.32 – Detalhe do encontro entre revestimentos de paredes adjacentes. Exemplo: Par_Ext_TF	144
Figura 4.33 – Junção entre paredes em <i>timber-frame</i> e piso em CLT. (a) apoiado diretamente sobre as paredes e (b) apoiado sobre as vigas de coroamento. Exemplo: Par_Ext_TF e Pav_Int_CLT	145
Figura 4.34 – (a) Junção entre as vigas da Cob_TAH e as vigas de coroamento; (b) Parede não estrutural apoiada diretamente sobre o CLT do piso intermediário. Exemplo: Par_Int_Nest_TF e Pav_Int_CLT	145
Figura 4.35 – Continuidade das membranas entre (a) Parede externa (Par_Ext_TF) e cobertura (Cob_CLT) e (b) Parede externa (Par_Ext_TF) e varanda (Var_CLT).....	146
Figura 4.36 – Ligação entre pisos intermediários (Pav_Int_CLT) e paredes em CLT (a) Par_Nuc_CLT; (b) Par_Nuc_CLT_TF).....	146
Figura 4.37 – Detalhe da separação rígida entre os componentes de acabamento dos elementos construtivos. Exemplo: Par_Int_Est_TF e Pav_Int_CLT.....	147
Figura 4.38 – Encontro das paredes com o piso do rés do chão (Pav_RC). Exemplos: (a) Par_Ext_TF e (b) Par_Int_Est_TF	148

Figura 4.39 – Atenuação da amplitude térmica produzida pela Par_Ext_TF (em azul) com relação à temperatura exterior (em vermelho)	153
Figura 4.40 – Atenuação térmica através das camadas da Par_Ext_TF para seis horários distintos do dia: três diurnos (7h, 11h, 15h; em castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; em vermelho)	153
Figura 4.41 – Perfil de temperatura no interior da Par_Ext_TF para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3	154
Figura 4.42 – Perfil de humidade no interior da Par_Ext_TF para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3	154
Figura 4.43 – Diagramas de difusão no plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno da Par_Ext_TF. (a) Inverno; (b) Verão	155
Figura 4.44 – Atenuação da amplitude térmica produzida pela (a) Cob_CLT e pela (b) Cob_TAH (em azul) com relação à temperatura exterior (em vermelho)	156
Figura 4.45 – Atenuação térmica através das camadas da (a) Cob_CLT e da (b) Cob_TAH para seis horários distintos do dia: três diurnos (7h, 11h, 15h; em castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; em vermelho)	156
Figura 4.46 – Perfil de temperatura no interior da (a) Cob_CLT e da (b) Cob_TAH para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3	157
Figura 4.47 – Perfil de humidade no interior da (a) Cob_CLT e da (b) Cob_TAH para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3	157
Figura 4.47 – Perfil de humidade no interior da (a) Cob_CLT e da (b) Cob_TAH para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3 (Continuação)	158
Figura 4.48 – Diagramas de difusão no plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno da Cob_CLT. (a) Inverno; (b) Verão	159
Figura 4.49 – Diagramas de difusão no plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno da Cob_TAH. (a) Inverno; (b) Verão	159
Figura 4.50 – Exemplo de curva do índice de redução sonora a sons aéreos previsto (em verde) e da curva de referência (em azul) – Par_Ext_TF. Gráfico dos restantes elementos construtivos no Anexo 2	161
Figura 4.51 – Exemplo de curva do isolamento sonoro a sons de percussão previsto (em verde) e da curva de referência (em azul) – Pav_Int_CLT. Gráfico dos restantes elementos construtivos no Anexo 2	164
Figura 5.1 – Modelo tridimensional do edifício em estudo	171

Figura 5.2 – Alçados. (a) Oeste; (b) Sul.....	172
Figura 5.3 – Paredes dos pisos 3 e 4. (a) Norte; (b) Leste.....	172
Figura 5.4 – Prumadas das fachadas do edifício para uma largura de placa OSB de fecho dos painéis (a) Norte; (b) Oeste.....	172
Figura 5.5 – Núcleo do edifício: Caixa de escadas. (a) 3D; (b) Localização em planta nos pisos 1, 2 e 3; (c) Localização em planta no piso 4.....	173
Figura 5.6 – Parede de núcleo suportando as vigas de cobertura. (a) 3D; (b) Planta da cobertura....	173
Figura 5.7 – Orientação dos painéis CLT de piso. (a) Pavimento completo; (b) Orientação dos painéis da zona frontal do edifício; (c)) Orientação dos painéis da zona posterior do edifício.....	174
Figura 5.8 – Esquema estrutural para apoio dos painéis CLT de piso.....	174
Figura 5.9 – Identificação das variadas seções de viga Glulam GL24h.....	175
Figura 5.10 – Orientação das ações do vento para as duas situações de projeto. (a) Vento em y; (b) Vento em x.....	177
Figura 5.11 – Localização das zonas A, B e C nas paredes paralelas ao vento. (a) Vento em y; (b) Vento em x.....	179
Figura 5.12 – Localização das paredes de barlavento (em azul), sotavento (em verde) e zonas A (em vermelho) e B (em laranja) nas paredes do Piso 3. (a) Vento em y; (b) Vento em x.....	179
Figura 5.13 – Resumo da aplicação das variadas cargas permanentes, sobrecargas e cargas no modelo do edifício. (a) Permanentes; (b) Sobrecargas; (c) Vento em y; (d) Vento em x.....	180
Figura 5.14 – Sistema estrutural para verificação dos painéis CLT de piso.....	181
Figura 5.15 – Diagrama de momentos fletores e respetivas tensões normais para os painéis de piso em CLT.....	181
Figura 5.16 – Diagrama de esforço transversal e tensões de corte deslizante para os painéis de piso em CLT.....	182
Figura 5.17 – Camada de sacrifício para as vigas de seção 150 x 200 mm ²	183
Figura 5.18 – Sistema estrutural para verificação dos painéis CLT de parede do núcleo (Exemplo Parede 3).....	184
Figura 5.19 – Painéis CLT de parede do núcleo. (a) Seção aplicada ao sistema estrutural verificado; (b) Camada de sacrifício para os painéis CLT com 5 lamelas e 100 mm de espessura.....	184
Figura 5.20 – (a) Localização da prumada do edifício com as maiores solicitações de esforços; (b) Prumada equivalente.....	185

Figura 5.21 – Identificação dos montantes de seção simples (1) e dupla (2) mais solicitados da estrutura	185
Figura 5.22 – Sistemas para verificação dos montantes do Piso 0. (a) Montante simples 1; (b) Montante duplo 2	186
Figura 5.23 – Comprimento efetivo dos montantes devido aos travamentos laterais em y.....	186
Figura 5.24 – Alteração do espaçamento entre montantes no Piso 2 na prumada equivalente	188
Figura 5.25 – Sistemas para verificação do montante simples 1 para espaçamentos de cerca de (a) 400 mm; (b) 600 mm	188
Figura 5.26 – Sistemas para verificação do montante duplo 2 para espaçamentos de cerca de (a) 400 mm; (b) 600 mm	189
Figura 5.27 – Identificação dos montantes duplos espaçados de cerca de 900 mm nos Pisos 2 e 3	189
Figura 5.28 – Sistema para verificação dos montantes duplos espaçados em cerca de 900 mm dos Pisos 2 e 3.....	190
Figura A3.1 – Alçado Norte.....	263
Figura A3.2 – Alçado Poente.....	263
Figura A3.3 – Planta do Piso 0.....	264
Figura A3.4 – Planta do Piso 1.....	265
Figura A3.5 – Planta do Piso 2.....	266
Figura A3.6 – Planta do Piso 3.....	267
Figura A3.7 – Planta de Cobertura.....	268
Figura A3.8 – Corte Transversal.....	269
Figura A3.9 – Corte Longitudinal.....	270
Figura A4.1 – Envolventes do edifício. (a) Piso 0; (b) Piso 1; (c) Piso 2; (d) Piso 3; (e) Corte transversal.....	272

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Condições climáticas em conformidade com a norma DIN 4108-3.....	96
Tabela 3.2 – Fator de carga parcial para os carregamentos permanentes e variáveis.....	109
Tabela 3.3 – Valores representativos de cada ação	109
Tabela 3.4 – Valores de k_{mod} para os elementos estruturais analisados	109
Tabela 3.5 – Verificações desenvolvidas para o estado limite último	110
Tabela 3.6 – Verificações desenvolvidas para o estado limite de serviço	110
Tabela 4.1 – Propriedades do revestimento externo considerado para a Par_Ext_TF	120
Tabela 4.2 – Propriedades da membrana respirável considerada para a Par_Ext_TF.....	121
Tabela 4.3 – Propriedades da lã de rocha considerada para a Par_Ext_TF	121
Tabela 4.4 – Propriedades da barreira para-vapor considerada para a Par_Ext_TF	122
Tabela 4.5 – Propriedades do gesso cartonado de revestimento interno considerado para a Par_Ext_TF	123
Tabela 4.6 – Propriedades do gesso cartonado de revestimento interno considerado para as paredes internas.....	125
Tabela 4.7 – Propriedades do XPS considerado para a Par_Nuc_CLT e Par_Nuc_CLT_TF	130
Tabela 4.8 – Propriedades do CLT considerado quanto ao comportamento ao fogo	130
Tabela 4.9 – Propriedades do XPS considerado para o Pav_RC	132
Tabela 4.10 – Propriedades da membrana impermeável considerado para o Pav_RC	132
Tabela 4.11 – Propriedades do XPS considerado para a Cob_CLT	138
Tabela 4.12 – Propriedades da barreira para-vapor considerada para a Cob_CLT.....	138
Tabela 4.13 – Propriedades da membrana respirável considerada para a Cob_CLT	139
Tabela 4.14 – Propriedades da membrana impermeável considerada para a Cob_CLT	139
Tabela 4.15 – Propriedades do revestimento considerado para a Cob_CLT	139
Tabela 4.16 – Propriedades do material isolante dos painéis sanduíche considerados para a Cob_TAH	140
Tabela 4.17 – Verificação do coeficiente de transmissão térmica dos diversos elementos construtivos para a zona climática I3	149
Tabela 4.18 – Verificação do coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos com desempenho insuficiente para a zona climática I3, nas zonas climáticas I1 e I2	150

Tabela 4.19 – Resultados obtidos para os parâmetros térmicos da Cob_CLT e Cob_TAH.....	155
Tabela 4.20 – Resultados obtidos para os parâmetros de humidade da Cob_CLT e Cob_TAH	158
Tabela 4.21 – Verificação do índice de redução sonora para sons aéreos dos diversos elementos construtivos segundo o RRAE.....	160
Tabela 4.22 – Verificação do isolamento sonoro a sons de percussão dos diversos elementos construtivos segundo o RRAE.....	161
Tabela 5.1 – Configurações aplicadas ao caso de estudo	169
Tabela 5.2 – Espaçamento entre montantes para os diversos pisos do edifício	171
Tabela 5.3 – Materiais e seções aplicados aos diferentes componentes estruturais do edifício	175
Tabela 5.4 – Cargas permanentes	176
Tabela 5.5 – Densidades consideradas para os elementos de madeira.....	176
Tabela 5.6 – Sobrecargas.....	177
Tabela 5.7 – Coeficientes de pressão c_{pe} e c_{pi}	178
Tabela 5.8 – Forças de vento F_w	178
Tabela 5.9 – Limites impostos às flechas dos painéis CLT de piso	181
Tabela 5.10 – Análise quanto à flecha final para os painéis de piso em CLT	181
Tabela 5.11 – Análise quanto à flexão para os painéis de piso em CLT.....	181
Tabela 5.12 – Análise quanto ao corte para os painéis de piso em CLT.....	182
Tabela 5.13 – Resumo dos aproveitamentos obtidos segundo as verificações realizadas para os painéis de piso em CLT	182
Tabela 5.14 – Verificações determinantes para a variedade de vigas da estrutura.....	183
Tabela 5.15 – Carregamentos impostos às paredes do núcleo	183
Tabela 5.16 – Análise quanto à encurvadura para o painel CLT da parede de núcleo 3	184
Tabela 5.17 – Resumo dos esforços axiais máximos nos montantes 1 e 2 para os carregamentos impostos	186
Tabela 5.18 – Combinação de ações mais gravosa para a análise do efeito de encurvadura nos montantes 1 e 2.....	187
Tabela 5.19 – Análise quanto à encurvadura para o montante 1	187
Tabela 5.20 – Análise quanto à encurvadura para o montante 2	187
Tabela 5.21 – Carregamentos normais impostos a cada piso no modelo da prumada equivalente ...	188
Tabela 6.1 – Resumo do desempenho funcional (coeficiente de transmissão térmica e isolamento a sons aéreos e de percussão) dos painéis pré-fabricados em madeira.....	193

Tabela 6.1 – Resumo do desempenho funcional (coeficiente de transmissão térmica e isolamento a sons aéreos e de percussão) dos painéis pré-fabricados em madeira (Continuação)	194
Tabela 6.2 – Resumo dos aproveitamentos obtidos para as respetivas verificações determinantes dos elementos estruturais dos painéis, segundo as considerações feitas para o caso de estudo	194
Tabela A4.1 – Dados para a localidade de referência.....	271

LISTA DE ACRÓNIMOS

A	Área dos elementos que separam o interior do ENU
AQS	Águas quentes sanitárias
A_{ref}	Área de referência da construção
A_u	Área dos elementos que separam o exterior do ENU
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BIM	Building information model
BPO	Building performance outcome
B_{ztu}	Coefficiente de redução de perdas
$c_o(z)$	Coefficiente de orografia
CAD	Computer-aided design
CAE	Computer-aided engineering
CAM	Computer-aided manufacturing
c_{dir}	Coefficiente de direção
$c_e(z)$	Coefficiente de exposição
c_{fr}	Coefficiente de atrito
CLT	Cross laminated timber
CNC	Computer numeric control
c_{pe}	Coefficiente de pressão para a pressão exterior e
c_{pi}	Coefficiente de pressão para a pressão interior i
$c_s c_{sd}$	Coefficiente estrutural
c_{season}	Coefficiente de sazão
d	Comprimento
$D_{2m,nT,w}, D_{nT,w}$	Isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado de projeto
E	Espessura
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado limite último
ENU	Espaço não útil
EPDM	Borracha etileno-propileno-dieno
EPS	Poliestireno expandido

E_{ren}	Energias de fontes renováveis
ETICS	Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior
EU	Espaço útil
EWP	Engineered wood products
$f_{c,0,d}$	Resistência à compressão de projeto na direção das fibras
F_{fr}	Forças de atrito
$f_{m,k}$	Resistência à flexão característica
$f_{m,y,d}$	Resistência à flexão no eixo principal y
$f_{m,z,d}$	Resistência à flexão de projeto no eixo principal z
$f_{r,d}$	Resistência ao corte de projeto
$f_{r,k}$	Resistência ao corte característica
F_{we}	Forças exteriores
F_{wi}	Forças interiores
GD	Graus dia
GD_{ref}	Graus dia de referência
GEE	Gases com efeito de estufa
g	Fator solar de inverno
Glulam	Glued laminated lumber
g_T	Fator solar global
$g_{Tm\acute{a}x}$	Fator solar global máximo
h	Altura
HDPE	Polietileno de alta densidade
H_{enu}	Coefficiente de transmissão térmica global da envolvente interior
η_{ϖ}	Fator de utilização dos ganhos térmicos
IS	Isocianato
k_1	Coefficiente de turbulência
$k_{c,y}$	Fator de instabilidade no eixo y
$k_{c,z}$	Fator de instabilidade no eixo z
k_{def}	Fator de deformação
k_m	Fator considerando a redistribuição de tensões de flexão em uma seção transversal
k_{mod}	Fator de modificação
L	Comprimento

$L'_{nT,w}$	Nível sonoro de percussão padronizado de projeto
$L_{Ar,nT}$	Nível de avaliação padronizado de projeto
LDPE	Polietileno de baixa densidade
L_n	Índice de isolamento sonoro a sons de percussão
$L_{n,w}$	Índice de isolamento sonoro a sons de percussão
LSL	Laminated strand lumber
LVL	(Laminated venner lumber
M	Duração da estação de aquecimento
M_c	Quantidade de água de condensação
MDF	Medium density fiberboard
M_{ev}	Máxima massa de evaporação
$M_{ev,Tauperiode}$	Potencial de evaporação no período de orvalho
M_r	Reserva de secagem
M_{ref}	Duração da estação de aquecimento de referência
MUF	Melamina-ureia-formaldeído
$M_{y,d}$	Momento de projeto no eixo principal y
$N_{c,d}$	Força axial de projeto
N_{ic}	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento
N_{tc}	Necessidades globais nominais de energia primária
N_{vc}	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento
OSB	Oriented strand board
PA	Poliamida
p_e	Pressão de vapor no exterior
PE	Polietileno
PF	Fenol-formaldeído
p_i	Pressão de vapor no interior
PP	Polipropileno
$p_{s,pc1}$	Pressão de vapor de saturação na área de condensação
PSL	Parallel strand lumber
PUR	Poliuretano
q_b	Pressão dinâmica de referência
$Q_{e,v}$	Ganhos térmicos brutos

$Q_{gu,i}$	Ganhos térmicos úteis
$Q_{mt,i}$	Ganhos térmicos internos
q_k	Sobrecarga
$q_p(z)$	Pressão dinâmica de pico à altura z
$Q_{sol,i}$	Ganhos térmicos solares
$Q_{tr,i}$	Perda de calor por transmissão
$Q_{ve,i}$	Perda de calor por ventilação
R	Resistência térmica
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RRAE	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
R_{se}	Resistência térmica da superfície exterior
R_{si}	Resistência térmica da superfície interior
R_w	Índice de redução sonora
SCE	Sistema de Certificação Energética
$S_d, S_{d,ev}, S_{d,c1}$	Transmissão de vapor de água total até o plano com menor potencial de evaporação
$S_{d,e}$	Transmissão do vapor de água total do elemento
T&G	Tongue and Groove – Encaixe macho-fêmea
t_c	Duração do período de condensação (90 dias)
t_{ev}	Duração da estação de secagem (90 dias)
TL	Perda de transmissão
U	Coefficiente de transmissão térmica
UF	Uréia-formaldeído
$U_{m\acute{a}x}$	Coefficiente de transmissão térmica máximo
U_{ref}	Coefficiente de transmissão térmica de referência
v_b	Valor de referência da velocidade do vento
$v_{b,0}$	Valor básico da velocidade de referência do vento
V_d	Força de corte de projeto
w_e	Pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores
w_{fin}	Deformação final
w_i	Pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores
w_{inst}	Deformação instantânea

$W_{net,fin}$	Deformação final, depois de deduzida a eventual contraflecha
XPS	Poliestireno extrudido
z	Cota real do edifício
Z.C.	Zona climática
z_{ref}	Cota de referência
α	Fator de correção
γ_G	Fator de carga parcial para os carregamentos permanentes
γ_Q	Fator de carga parcial para os carregamentos variáveis
δ_0	Coefficiente de difusão do vapor de água no ar estático
$\theta_{ext,i}$	Temperatura exterior média do mês mais frio
$\theta_{ext,i,ref}$	Temperatura exterior média do mês mais frio de referência
λ	Condutibilidade térmica
μ	Fator de resistência à difusão do vapor de água
ρ	Massa volúmica do ar
$\sigma_{c,d}$	Tensão de compressão de projeto
$\sigma_{m,y,d}$	Tensão de flexão de projeto no eixo principal y
$\sigma_{m,z,d}$	Tensão de flexão de projeto no eixo principal z
$\tau_{r,d}$	Tensão de corte de projeto
Ψ_0, Ψ_1, Ψ_2	Valores representativos das ações

CAPÍTULO 1

POR QUE CONSTRUIR EDIFÍCIOS EM MADEIRA?

Este capítulo introdutório expõe o interesse da pesquisa e seu escopo e, a partir disso, define os objetivos do presente trabalho. Além disso, para a melhor compreensão acerca da interação entre os capítulos, é apresentada uma visão geral do conteúdo deste documento.

1.1. Objeto, âmbito e justificação

O alarmante cenário climático mundial, que se agravou celeremente nas últimas décadas, revelou a urgência na reversão dos padrões de consumo praticados pelos diversos setores económicos, exigindo a fixação de metas coletivas de mitigação em termos de clima e energia cada vez mais ambiciosas.

Como estratégia de crescimento para uma economia moderna, competitiva, eficiente no aproveitamento de recursos e, conseqüentemente, coesa ao desenvolvimento sustentável, uma das prioridades enunciadas pela União Europeia é o alcance da neutralidade carbónica até 2050.

Na sequência e, em linha com os objetivos estabelecidos no Acordo de Paris, Portugal definiu sua estratégia de desenvolvimento a longo prazo, que determina a redução de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) entre 85% e 90% até 2050 e a compensação das restantes emissões através da capacidade de sequestro de carbono pelas florestas e outros usos do solo (Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019, 2019). Ainda em 2030, espera-se que a redução das emissões atinja valores entre 45% e 55% com relação ao praticado em 2005 (Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020, 2020).

Neste contexto, a revisão dos modelos tradicionais replicados pelo sector da construção tem carácter prioritário quando confrontados os dados relativos ao seu impacto no panorama europeu: 40% de toda a demanda de energia, 36% das emissões de GEE, 40% do consumo de matéria-prima e 33% dos resíduos gerados (Jeffrey, 2019). A produção e o processamento de materiais para o sector detêm a parcela mais significativa do consumo de energia e emissões de GEE (D'Amico *et al.*, 2021), sendo o cimento e o aço responsáveis por 4 a 7% (Shanks *et al.*, 2019) e 5% (Davis *et al.*, 2018), respetivamente, das emissões globais de CO₂/ano.

A madeira, então, ressurge como material de construção promissor em alternativa ao betão e ao aço,

com o benefício da sua contribuição inata para a redução das emissões mediante sua capacidade de armazenamento de carbono – cerca de $0,9 \text{ t CO}_2/\text{m}^3$ material – e menor energia incorporada. O Complexo *HoHo* (Figura 1.1), em Viena, consagrado como um dos edifícios com estrutura híbrida de madeira mais altos do mundo, traduz o benefício do uso da madeira em detrimento dos materiais convencionais: os 3600 m^3 de vigas (glulam) e painéis (CLT) em madeira proporcionaram uma economia de 2800 toneladas de CO_2 quando comparados à uma estrutura equivalente em betão ou aço. O exemplo do *London's Fairmule House* ilustra não somente a economia na emissão de carbono – cerca de 1000 t – como confronta este valor à quantidade de CO_2 que seria liberado para a atmosfera caso betão ou aço fossem usados em vez da madeira – cerca de 720 t (Tackle Climate Change, 2008). Resultados semelhantes foram obtidos em Helsínquia, onde comparou-se quatro edifícios semelhantes, dois em madeira e dois em betão, e concluiu-se que a produção dos materiais destinados às estruturas em madeira apresentou uma pegada de carbono 74% inferior. Já nos Países Baixos, projetou-se um alívio de 10% na emissão de CO_2 a partir da expansão do setor de construção com 10 mil casas construídas em estrutura de madeira, medida que poderia atingir até 42% em um cenário de máximo uso da madeira (estrutura, cobertura, vedações, revestimentos, esquadrias etc.) (Jeffrey, 2019).



Figura 1.1 – *HoHo*, em Viena
(SIGA, 2022)

Adicionalmente, as fases de processamento e transporte da madeira emitem, normalmente, menos carbono que o armazenado pelo material, fortalecendo a economia de carbono através da produção local. Este benefício pode ser amplamente explorado no contexto europeu, dado que mais de 90% de toda a madeira usada na Europa é proveniente de florestas europeias (Jeffrey, 2019).

A fase de operação dos edifícios, responsável por 45% a 80% da sua emissão de carbono (Chen *et al.*, 2020a), a depender do padrão energético com que os edifícios são construídos, beneficia-se segundo a

elevada capacidade isolante da madeira: 10 vezes superior ao betão, 400 ao aço e 1700 ao alumínio. Uma placa de madeira de 2,5 cm tem melhor resistência térmica do que uma parede de tijolo de 11,5 cm (Jeffree, 2019). Assim, a construção em madeira, que lidera em termos de eficiência energética segundo Kuzman e Sandberg (2016), contribui para a economia de energia ao longo da vida útil, indo de encontro à Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios (Diretiva 2010/31/UE), que determina a obrigatoriedade dos edifícios novos, construídos a partir de 2021, terem necessidades quase nulas de energia.

Ademais, em seu fim de vida, a madeira, considerada por Ramage *et al.* (2016) mais como um recurso do que como um resíduo, favorece o reaproveitamento, seja para gerar novos produtos, seja para gerar energia proveniente de biomassa (Hossain e Poon, 2018). A integração de materiais e componentes reutilizáveis e recicláveis na construção é uma das ferramentas para o gerenciamento eficaz de resíduos, e pode produzir uma economia de mais de 60% da energia inicial incorporada aos edifícios (Chen *et al.*, 2001). Por meio da redução, reutilização, recuperação e reciclagem dos produtos, materiais e recursos, alargando o ciclo de vida dos mesmos, contribui-se para o conceito de economia circular, permitindo, para além da melhor gestão dos recursos, desenvolver novos produtos e serviços economicamente mais viáveis e ecologicamente mais eficientes. O atual enquadramento político nacional para a economia circular é o Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal, aprovado através da Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017, de 23 de novembro, e cujo objetivo consiste em definir uma estratégia nacional para a economia circular assente na produção e eliminação de resíduos e nos conceitos de reutilização, reparação e renovação de materiais e energia (Grupo Economia Circular e Ambiente, 2020).

Apesar da desconfiança quanto à resistência ao fogo, a carbonização lenta à taxa previsível da madeira torna-a mais fácil de analisar e prolongadamente resistente que alguns dos materiais convencionais (Kolaitis *et al.*, 2014). O conhecimento atual aprimorado em projetos de incêndio de estruturas de madeira, em associação às medidas técnicas de proteção, garante, ainda, o aumento da resistência ao fogo inerente ao material (Östman *et al.*, 2017).

O crescimento populacional, aliado à tendência de urbanização que levará mais de 2/3 da população mundial a viver em áreas urbanas até 2050 (United Nations, 2017), requer a instalação de formas urbanas cada vez mais densas, usualmente convertidas em edifícios em altura. De acordo com o Comitê de Mudanças Climáticas do Reino Unido (Reducing UK Emissions: Progress Report to Parliament, 2018), até 2060 serão adicionados 230 bilhões de metros quadrados de novas construções, 2 bilhões de metros quadrados por ano entre 2019 e 2025 (Arup, 2019), contribuindo para a liberação de cerca de 415 Gt

CO₂ na atmosfera nos próximos 40 anos (Abergel *et al.*, 2017). Assim, a expansão populacional e urbana transforma as cidades em oportunidades para o desenvolvimento sustentável (Sustainable urbanization strategy, 2016), evidenciando o potencial do sector das madeiras na oferta de soluções de neutralidade carbónica (EU Forest-Based Industries 2050, 2019).

Paralelamente, o volume florestal europeu que, apoiado no seu amplo histórico de atendimento às necessidades de uma população em expansão, assumiu papel estratégico para a bioeconomia (Vision 2040 of the European forest-based sector, 2019), mantém-se em crescimento sobretudo no Sudoeste continental. O stock total em crescimento soma 34900 milhões de metros cúbicos, dos quais 84% estão localizados em florestas disponíveis para o fornecimento de madeira. Há, em média, 169 m³ de stock crescente por hectare, o que supera em 40 m³/ha o valor aferido 30 anos atrás (State of Europe's Forests, 2020). Segundo Ramage *et al.* (2016), uma forma didática de ilustrar a quantidade de madeira disponível nas reservas europeias é supor que toda a população europeia (750 milhões), dividida em grupos de 3 pessoas, viva em apartamentos como os do edifício sueco *Limnologen* (Figura 1.2), em Växjö.



Figura 1.2 – *Limnologen*, em Växjö
(Swedish Wood, s.d.)

Nesse caso, aproximadamente 40-50 milhões de hectares de floresta seriam necessários para renová-los a cada 50 anos, o que representaria cerca de 25-30% das florestas europeias, geridas, colhidas e utilizadas de maneira análoga ao praticado atualmente. Entre 2010 e 2020, o sequestro médio anual de carbono em biomassa florestal atingiu 155 milhões de toneladas na Europa e, apenas na UE-28, o sequestro corresponde a cerca de 10% das emissões brutas de GEE (State of Europe's Forests, 2020). No total, o volume de madeira em uso e em processamento na Europa armazena, atualmente, 38,2 milhões de toneladas equivalentes de CO₂, uma contribuição fundamental para a reversão da tendência

de aquecimento global (Jeffrey, 2019). O exemplo do setor florestal português é reiterado pelas práticas de longo prazo sob os princípios da economia circular e do uso em cascata, contemplando a eficiência dos recursos e a reutilização de subprodutos e resíduos. A *Portuguese National Strategy for Forests* (NSF) assume a maximização do valor económico total da floresta como seu objetivo principal, e está organizada nos seguintes objetivos estratégicos: minimização dos riscos de incêndio e agentes bióticos; especialização do território; aumento da produtividade por meio do manejo florestal sustentável; internacionalização e aumento do valor dos produtos; aumento da eficiência em geral e melhoraria da competitividade do setor (Portugal Market Report, 2020).

Construir edifícios em altura com madeira nos padrões atuais é um esforço pioneiro viabilizado pelas inovações na indústria da madeira, tanto a nível de produto, quanto a nível de processo. A introdução dos *Engineered Wood Products* (EWP), como a madeira lamelada colada (glulam), a madeira laminada colada (LVL) e a madeira lamelada colada cruzada (CLT), otimizou as propriedades estruturais da madeira e superou muitas de suas limitações (Riggio *et al.*, 2019), reinventando e impulsionando a indústria com produtos de elevada estabilidade, rigidez e propriedades mecânicas competitivas relativamente às do betão e do aço (Santi *et al.*, 2016).

Por outro lado, o desenvolvimento da tecnologia CAD/CAM combinada à utilização de equipamentos CNC e à atuação integrada das diversas especialidades que compõem o processo em metodologia BIM, elevou o grau de precisão e de qualidade dos produtos em madeira que, produzidos em ambiente fabril controlado, reduzem ao mínimo a atividade em estaleiro e, conseqüentemente, os tempos de obra, os custos de estaleiro, ruído, poluição, resíduos, riscos de acidentes, necessidade de equipamentos de construção tradicionais e deterioração do material por exposição à humidade (Evison *et al.*, 2018; Carvalho *et al.*, 2020; Smith *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2020b; Gasparri e Aitchison, 2019). Um exemplo é o edifício *Forté* (Figura 1.3), localizado em Melbourne e inaugurado em 2013. À época, o primeiro edifício em CLT da Austrália, foi considerado o maior complexo de apartamentos em madeira do mundo, com 10 pisos, e resultou num tempo de construção 30% inferior ao estimado para a construção de uma estrutura semelhante a partir de materiais convencionais (Kremer e Symmons, 2016). Segundo APA (2019), numa análise recente de caso de estudo, a opção por painéis de madeira pré-fabricados em detrimento de materiais convencionais pode resultar numa economia de tempos de montagem ainda mais substancial, superando os 50%.



Figura 1.3 – *Forté*, em Melbourne
(Architecture & Design, s.d.)

A madeira, um dos materiais de construção mais antigos e o dominante na construção de edifícios até o século XX, teve o seu uso limitado devido à percepção pública e a regulamentos restritivos introduzidos com o propósito de segurança contra incêndios, contribuindo para a consolidação da indústria do betão no mercado europeu (Kuzman e Sandberg, 2016). Apesar da desconfiança quanto ao desempenho do material, sequela dos anos de privação de seu uso estrutural e da resistência a alterações por dependência aos padrões estabelecidos, a difusão da construção em altura em madeira em países da Europa deu-se, essencialmente, pelas revisões das regulamentações, por incentivos extrarregulamentares de órgãos colaborativos do setor público-privado em promoção ao uso da madeira e pela cooperação entre as indústrias de construção e florestais e institutos de pesquisa, visando aumentar o grau de refinamento dos produtos ou, até mesmo, resgatar a predileção pelo uso da madeira, tornando-a o principal material de construção deste século (Wood Construction, 2006).

Esta abordagem mostrou-se bem-sucedida em diversos países da Europa, como Suécia, Áustria, França, Alemanha, entre outros, onde a construção dos primeiros edifícios experimentais de vários pisos demonstrou as múltiplas possibilidades da madeira e suas tecnologias, reestabelecendo a confiança no material que é retratada pelo crescente interesse em projetos desse cunho, seja motivado pelo valor ecológico, pelas qualidades térmicas, pela eficiente relação peso-resistência do material ou mesmo por seu apelo estético (Shmuely-Kagami e Matsumura, 2008). Alguns dos exemplares mais altos da Europa ratificam a capacidade e a potencialidade do material, mesmo para estruturas complexas e imponentes, como o bloco de apartamentos *Treet* (Figura 1.4a) de 14 pisos, em Bergen, o edifício *Mjøstårnet* (Figura 1.4b) de 18 pisos, em Brumunddal, e o já citado empreendimento residencial-comercial híbrido de madeira-betão *HoHo* (Figura 1.1) de 24 pisos, em Viena (Jeffrey, 2019).



Figura 1.4 – (a) *TreeT*, em Bergen; (b) *Mjøstårnet*, em Brumunddal
(Züblin Timber, 2022; Engenho & Arte, s.d.)

Outros países, contudo, ainda vivem a hesitação quanto à segurança e a durabilidade da madeira na construção em altura, pelo que são poucos e conservadores os projetos executados ou em andamento (Hamburg *et al.*, 2018). Este é o caso de Portugal, que apesar de apresentar um rico histórico de utilização da madeira em pavimentos e coberturas, não acompanhou plenamente a transição do material para desempenhos de alta performance.

Essa defasagem é refletida na compreensão coletiva acerca do material e pode ser observada quando comparadas entrevistas e questionários propostos ao público e profissionais do sector de construção em contextos geográficos e temporais distintos. O relatório CEI Bois (Indufor, 2004) sobre as perceções europeias da madeira, realizado em 2004, apontou que, apesar de os consumidores e profissionais do sector perceberem a madeira como um material natural, renovável e com excelentes propriedades térmicas, não a consideravam um material resistente, durável, moderno e à prova de fogo. Ainda, apontava as indústrias europeias de madeira como fragmentadas, uma potencial ameaça à sua competitividade e desenvolvimento. Já na pesquisa de Rametsteiner *et al.* (2007), os consumidores indicaram a crença da necessidade de manutenção excessiva na prevenção da degradação da madeira. O mesmo comportamento foi replicado em estudos feitos na Austrália entre os anos de 2011 e 2016 (Kremer e Symmons, 2016; Parry-Husbands e Parker, 2014; Survey of international tall wood Buildings, 2014; Lehmann, 2012; McGregor *et al.*, 2011; Bayne e Taylor, 2006), onde o primeiro edifício moderno em madeira foi construído apenas em 2012 (McGavin *et al.*, 2020). Tanto os profissionais do sector quanto os consumidores apontam a madeira como sendo menos resistente que tijolos, aço e betão e menos durável por vulnerabilidade ao fogo, ao ataque de térmitas e suscetibilidade à degradação, preocupações que não são associadas ao uso do betão e do aço. A partilha de opinião entre profissionais

do sector e os consumidores quanto à desconfiança e rejeição ao uso da madeira indica a falta de treinamento e conhecimento da tipologia por parte dos diversos atores da construção, como engenheiros e arquitetos. Segundo Roos *et al.* (2010), os arquitetos reconhecem o valor ambiental e estético da madeira, mas julgam-no dependente da cultura local. Já os engenheiros apreciam sua relação resistência-peso e os novos produtos em madeira, mas não se distanciam das inseguranças quanto a segurança ao fogo, transmissão do som, implicações devido à variação de humidade e escassez de mão-de-obra especializada, preferindo os materiais mais conhecidos e explorados. Ainda, identifica-se que autoridades e empreiteiros enxergam as estruturas de madeira como sinónimo de riscos comerciais mais elevados. Os consumidores, apesar de associarem o material a práticas de construção ambientalmente favoráveis e considerarem este como um fator importante na toma de decisão para compra de produtos e contratação de serviços, indicaram não ter conhecimento acerca da contribuição da madeira para a redução das emissões de GEE através do armazenamento de carbono. Em seu estudo voltado para a aceitação do LVL, McGregor *et al.* (2011) destacam que, embora os consumidores reconhecessem o benefício sustentável da escolha deste produto, que apresenta pegada de carbono inferior à do aço, esse facto não teve grande impacto na seleção do material. Kremer e Symmons (2016) finalizaram ressaltando a contribuição que o histórico europeu de sucesso na construção de edifícios em altura em madeira é uma vitrine de ensinamentos para mercados como a Austrália e Nova Zelândia.

Apesar de inserido no contexto europeu, Portugal apresenta, ainda hoje, respostas semelhantes às obtidas em 2004, no relatório da CEI Bois (Indufor, 2004). Num questionário proposto no âmbito desta dissertação, buscando identificar, segundo a percepção do público e de especialistas, as vantagens e entraves associados ao uso da madeira em edifícios em altura no contexto nacional Português, obtiveram-se os resultados expostos a seguir.

O estudo reuniu 45 respondentes enquadrados na categoria “Público”, maioritariamente pertencentes à comunidade académica da Universidade do Minho, residentes nos Concelhos do Porto e de Braga e com idades entre os 18 e os 45 anos (Figura 1.5).

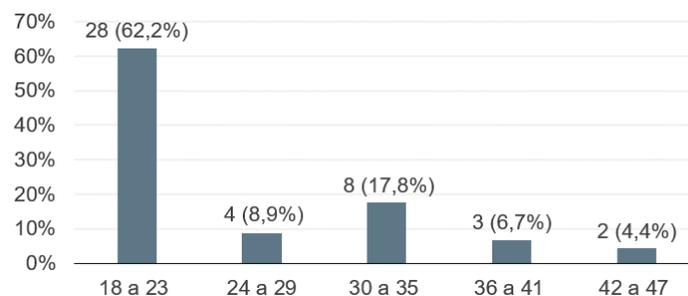


Figura 1.5 – Faixas de idade dos participantes do inquérito na categoria “Público”

Dos 45 participantes, apenas 3 já haviam vivido ou comprado uma casa com estrutura de madeira e pouco mais da metade (51,1%) afirmou que viveria ou compraria atualmente um apartamento em um edifício em altura com estrutura de madeira. Ainda, quando questionados acerca da segurança estrutural de um edifício com estrutura de madeira, nenhum dos participantes alegou considerar a estrutura em madeira mais segura que uma semelhante em betão ou aço: 66,7% afirmaram ser menos segura e 33,3% afirmaram ser tão segura quanto as demais.

Para os participantes, as principais vantagens desta tipologia estão relacionadas com a prática sustentável, com a estética do material, com a simplicidade/agilidade de construção e com as propriedades térmicas da madeira que conferem conforto ao ambiente. Fatores como a qualidade e durabilidade e a segurança da estrutura foram os menos apontados pelos participantes. A Figura 1.6 a seguir apresenta a frequência de respostas para cada aspeto sugerido.

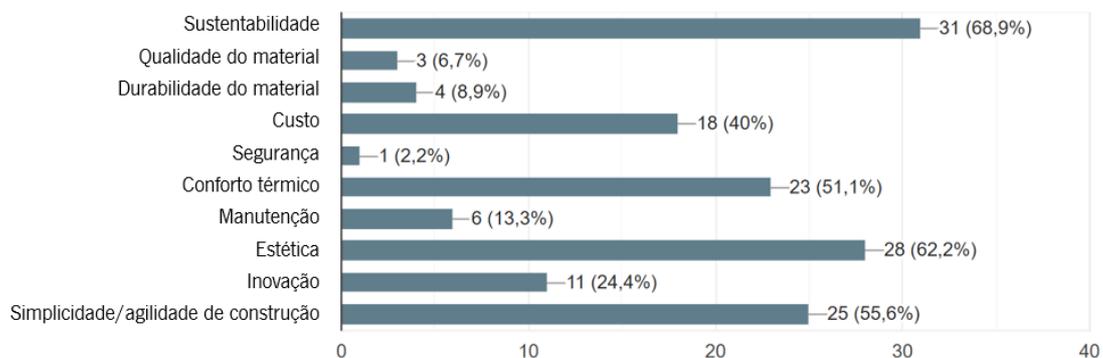


Figura 1.6 – Vantagens associadas aos edifícios em madeira apontadas pelos participantes da categoria “Público”

Em contrapartida, tratando-se dos receios dos participantes em viver ou comprar um apartamento num edifício com estrutura de madeira, questões como a segurança estrutural e o desempenho ao fogo lideraram com a indicação de 80% dos participantes. Em seguida, foram apontadas preocupações quanto à durabilidade do material, seja por exposição à humidade ou ataque de agentes biológicos, e ao nível de manutenção requerido pelo sistema. A Figura 1.7 a seguir apresenta a frequência de respostas para cada aspeto sugerido.

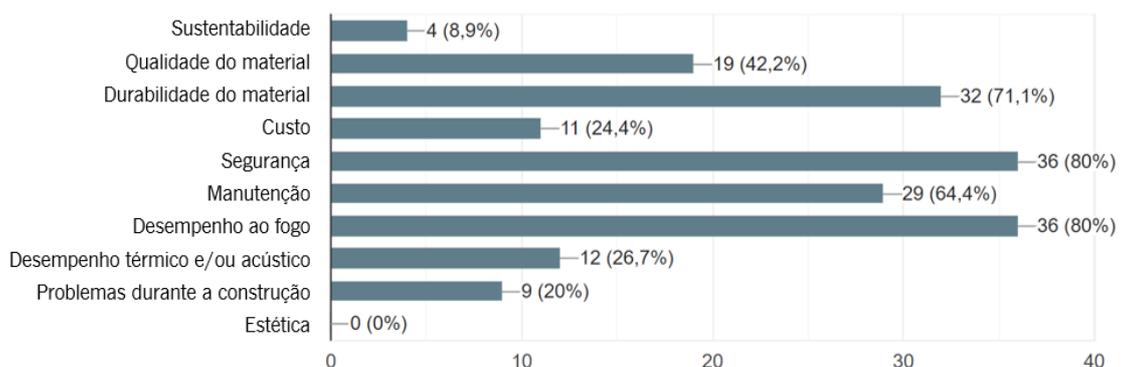


Figura 1.7 – Receios associados aos edifícios em madeira apontados pelos participantes da categoria "Público"

Em resposta livre, os participantes puderam expressar sua percepção sobre o mercado português e a escassez de projetos desse tipo no contexto nacional. Para além das razões já citadas, foram apontados: a carência de conhecimento técnico específico; a necessidade de leis e regulamentos que assegurem a segurança estrutural desse tipo de projeto; a dependência aos métodos e materiais de construção convencionais, nomeadamente o betão, que, devido à tradição e ao conhecimento difundido da técnica construtiva, é considerado confiável e tem custo inferior; os preços elevados da madeira propriamente; o atraso de Portugal diante das inovações construtivas aceites no cenário europeu, que implica na limitação da compreensão por parte da sociedade acerca da tipologia; e a recência da tipologia, que, pelos motivos anteriores, gera ainda pouca demanda e, portanto, não motiva o mercado.

Além da categoria “Público”, o estudo reuniu ainda 9 profissionais do sector da construção, entre Engenheiros Cívicos e Arquitetos, enquadrados na categoria “Indústria”, que atuam em diversas regiões do país e têm entre 31 e 69 anos. Destes, 5 alegaram ter recebido alguma formação na área das estruturas de madeira (50% no 1º ciclo e 33,3% no 2º ciclo de estudos) e 4 trabalham em empresas que aplicam a madeira para fins estruturais em seus projetos, seja em coberturas, escadas, estruturas reticuladas, em painéis autoportantes ou porticadas (Figura 1.8), contudo, na sua experiência, não realizaram ou tomaram conhecimento de nenhum projeto interno em estrutura de madeira que ultrapassasse os 2 pavimentos.

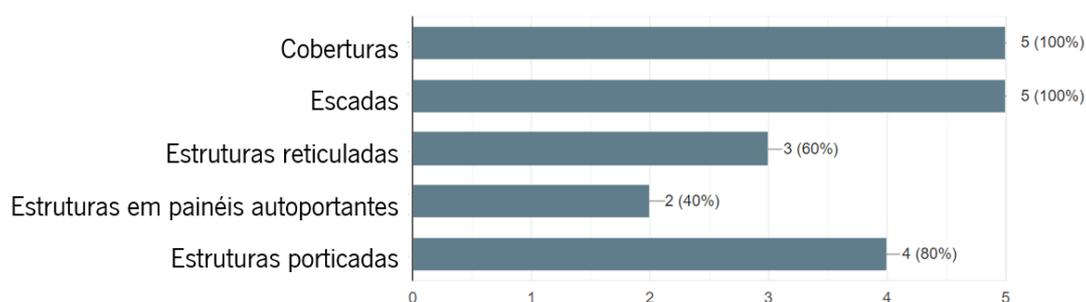


Figura 1.8 – Áreas de atuação no âmbito da construção em madeira dos participantes do inquérito na categoria “Indústria”

Para estes participantes com experiência na construção em madeira, as principais vantagens associadas à escolha da madeira como material estrutural incluem a agilidade de construção, a leveza do material, seu valor estético, seu desempenho térmico e a sustentabilidade associada à madeira (Figura 1.9). Em contrapartida, como principais obstáculos, indicaram a aceitação do público (quebra de paradigmas), a falta de conhecimento técnico específico por parte dos profissionais do sector, o elevado custo do material e a tendência do mercado (Figura 1.10).

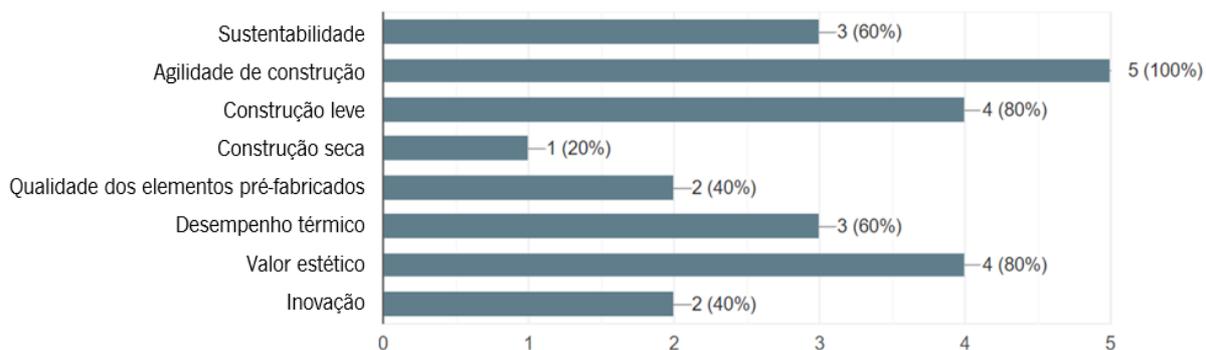


Figura 1.9 – Vantagens associadas à construção em madeira apontadas pelos participantes da categoria “Indústria” com experiência no sector

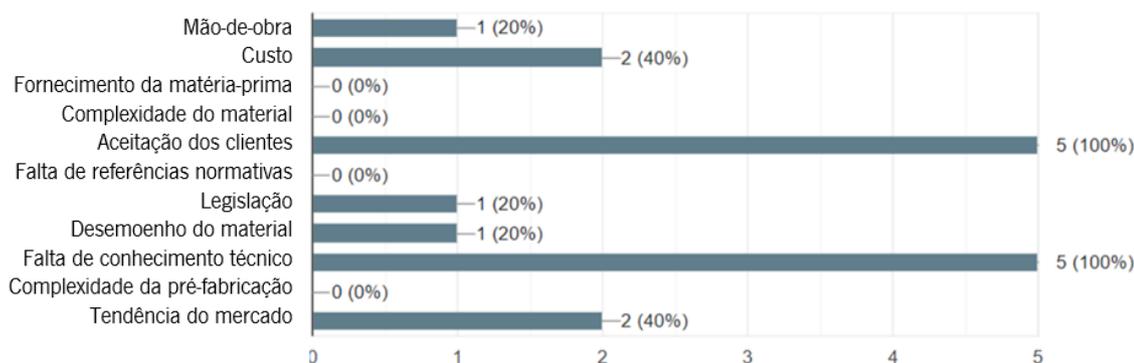


Figura 1.10 – Obstáculos associados à construção em madeira apontados pelos participantes da categoria “Indústria” com experiência no sector

Aqueles que indicaram não trabalhar numa empresa especializada em construção em madeira afirmaram unanimemente que, atualmente, apoiariam e executariam um projeto em estrutura de madeira sem hesitação. Destes 4 participantes, apenas 1 relatou já ter recebido uma proposta para execução de projeto em madeira, contudo, na altura, a proposta foi recusada por falta de conhecimento técnico específico. Estes profissionais apontaram as mesmas principais vantagens referidas pelos participantes especialistas em construção em madeira, porém enfatizaram o benefício sustentável e minimizaram a importância do valor estético do material, apesar de todos afirmarem que, na circunstância de execução de um projeto em madeira, intentaríamos mantê-la aparente, valendo-se de sua estética (Figura 1.11). Em contrapartida, quando questionados sobre seus principais receios, as respostas divergiram daquelas fornecidas pelo grupo de especialistas (Figura 1.12). Para os profissionais do sector da construção que não atuam na área das madeiras, o material traz receios como a disponibilidade de mão-de-obra qualificada, o custo superior às técnicas construtivas convencionais em betão e aço, a durabilidade frente à ação da humidade e de insetos e a complexidade na implementação de um novo sistema, cujo domínio técnico é inferior, na cadeia de processos habitual e bem-estabelecida das empresas. Ainda, apontam como principais obstáculos na efetivação da construção em altura em

madeira no contexto nacional a escassez de mão-de-obra, conhecimento técnico e referências normativas específicas à tipologia, a preocupação quanto à cadeia de fornecimento da matéria-prima e a resistência por parte dos clientes (Figura 1.13). Relativamente ao último fator, 75% dos participantes medem o nível de aceitação de seus clientes à tipologia entre médio e baixo, mas afirmam unanimemente que um edifício com estrutura de matéria seria um empreendimento vendável e bem-sucedido.

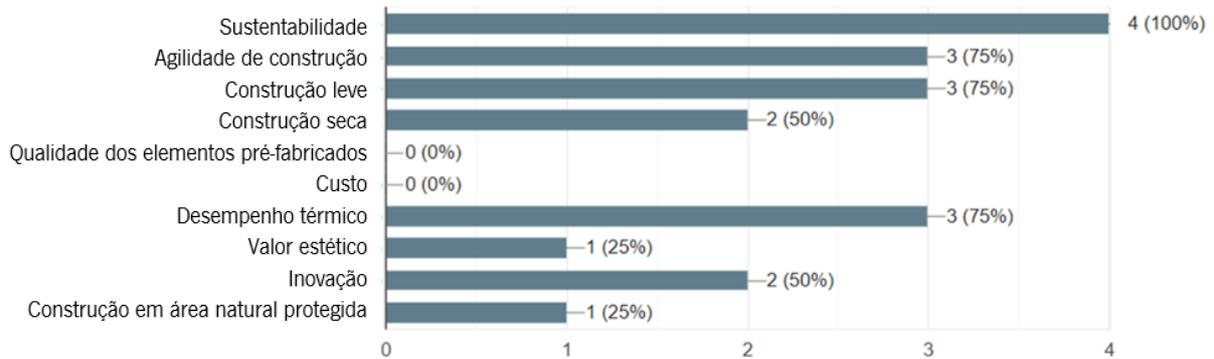


Figura 1.11 – Vantagens associadas à construção em madeira apontadas pelos participantes da categoria “Indústria” sem experiência no sector

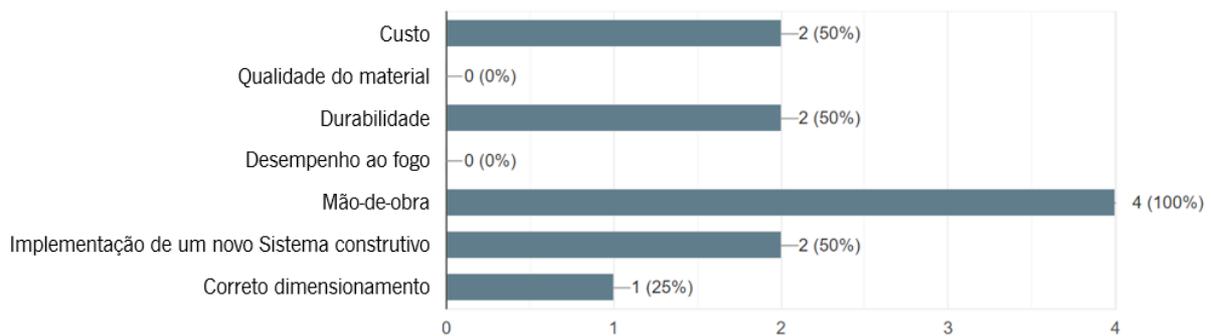


Figura 1.12 – Receios associados à construção em madeira apontados pelos participantes da categoria “Indústria” sem experiência no sector

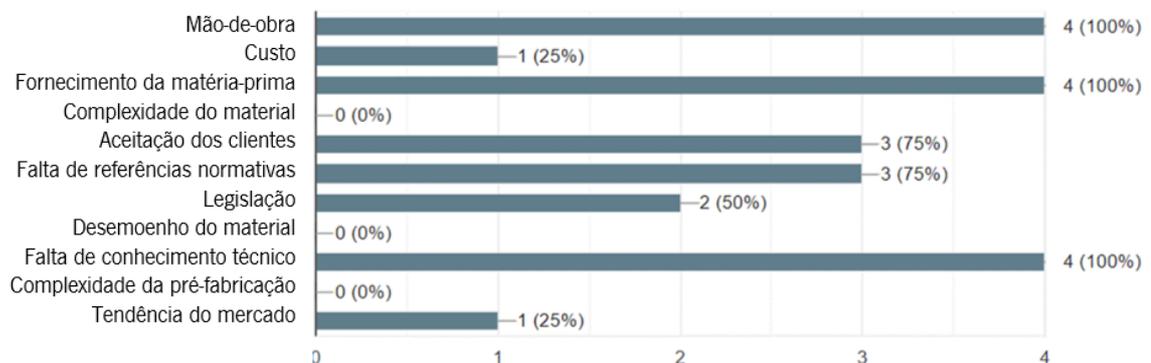


Figura 1.13 – Obstáculos associados à construção em madeira apontados pelos participantes da categoria “Indústria” sem experiência no sector

Em resposta livre, os participantes enquadrados na indústria também expressaram sua percepção sobre o mercado e a escassez de projetos desse tipo no cenário português. Para além das razões já citadas,

foram apontados: o medo e o paradigma do material motivado pela consolidação dos padrões convencionais; a falta de matéria-prima no país; a falta de projetistas qualificados que ignoram, por exemplo, novas técnicas de prevenção e combate ao fogo, alimentando a desconfiança no material neste quesito; e a falta de conhecimento e experiência do mercado, induzidas pela doutrina no betão armado. Os participantes, contudo, mostraram-se otimistas quanto ao recobramento das habilidades para a construção em madeira, fomentado pela onda de reabilitações no património edificado nacional.

É concebível que as percepções dos consumidores no que se refere ao comportamento ao fogo, humidade e agentes biológicos sejam uma consequência de motivações instintivas baseadas na experiência (Kremer e Symmons, 2016). Contudo, campanhas de promoção ao uso da madeira implementadas, por exemplo, no Reino Unido e na Áustria, demonstraram que as percepções acerca do material podem ser alteradas, tanto entre os consumidores, quanto entre os profissionais da construção (Indufor, 2004). A compreensão dos mercados e o conhecimento sobre as percepções negativas associadas ao uso da tipologia são componentes fundamentais para a sua progressão, possibilitando o desenvolvimento e proposição de soluções aptas a mitigar os equívocos do senso comum e possibilitar a consolidação da tipologia como um método de construção alternativo (Kremer e Symmons, 2016). A aceitação social torna-se vital para a implementação bem-sucedida de qualquer inovação tecnológica, principalmente daquelas que não são atrativamente competitivas em termos de custo, como é o caso das estruturas em madeira comparativamente ao betão e ao aço.

Para além do desafio da aceitação social, Portugal ainda exhibe um mercado retraído para a construção em madeira, assente na carência de regulamentações específicas e na escassez de técnicos especializados no sector, pelo que são raros e recentes os esforços em ofertar ensino específico à engenharia civil e arquitetos no âmbito das estruturas em madeira (Hamburg *et al.*, 2018). Além disso, apenas uma fração dos recursos de madeira nativa é usada, importando-se madeiras de resinosas do Centro e Norte europeus para a construção desta tipologia, o que representa uma importante oportunidade desperdiçada de ganhos económicos, sociais e ambientais (Arano *et al.*, 2018).

Ainda, as lacunas de conhecimento são os principais agentes na privação ao uso da madeira estrutural (Kuzman e Sandberg, 2016) e, devido ao carácter recente das técnicas de construção em madeira, particularmente para edifícios em altura, esta tipologia ainda não foi amplamente estudada (Kuzmanovska *et al.*, 2018). A difusão dos edifícios de madeira em altura em países de clima mais rigoroso promoveram a construção do conhecimento e a proposição de soluções adequadas para este cenário em específico, o que não se aplica propriamente à realidade portuguesa. Impõe-se, portanto, a necessidade de desenvolver conhecimento de maneira a compatibilizar essa tipologia ao contexto

português, atentando para variáveis como: o clima temperado favorável à deterioração biológica; a amplitude de temperaturas; os regulamentos urbanos destinados à construção nova; as exigências normativas nacionais para cumprimento dos requisitos funcionais (térmicos e acústicos) e de segurança ao fogo; a diversidade da floresta portuguesa disponível para fornecimento e as espécies e produtos ofertados pelo sector madeireiro; os materiais de construção mais difundidos em termos de qualidade e custo e cuja aplicação e manutenção são amplamente dominadas pelos técnicos e usuários; as tecnologias de pré-fabricação de que o sector de construção em madeira dispõe; os regulamentos de tráfego e condições limitantes de transporte de materiais e as preferências arquitetónicas e estéticas. Isso possibilita a proposição de um sistema construtivo adequado, fiável, eficiente e durável para o contexto português, que se aproprie dos benefícios do material em sua totalidade.

1.2. Objetivos

Com o intuito de promover uma solução alternativa aos materiais convencionais em favorecimento à estratégia de neutralidade carbónica até 2050 e, assim, à limitação dos avanços do aquecimento global fixados no Acordo de Paris, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de um sistema construtivo em painéis pré-fabricados com estrutura de madeira indicado para a construção de edifícios de até 5 pisos, com características concebidas e validadas para a aplicação bem-sucedida no contexto português, considerando seus padrões e necessidades. Assim, pretende-se promover um recurso que contribua diretamente para o alcance das metas de redução de emissões de gases com efeito de estufa em Portugal, nomeadamente os de carbono, além de preencher as lacunas do conhecimento, determinantes na privação ao uso da madeira estrutural, diminuindo a disparidade de avanços e incentivos relativamente às tecnologias em betão e aço. Espera-se, para além da proposição de uma solução com elevado potencial de aplicação e impacto sustentável nas cidades portuguesas, promover o enriquecimento científico na temática do uso da madeira em edifícios coletivos.

Logo, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Pesquisa qualitativa para contextualização do tema, de modo a conhecer seu estágio de desenvolvimento e as previsões para sua implementação no cenário mundial;
- Identificação das soluções de projeto e práticas construtivas aplicadas à construção em madeira, esperando-se aprofundar a compreensão sobre o comportamento, limitações e potencialidades do material para aplicação em edifícios em altura;
- Identificação e análise da regulamentação aplicável, espécies e produtos, tecnologias de pré-fabricação do sector e condições de transporte. A investigação destes parâmetros, associada ao

entendimento da física das construções em madeira, viabilizará a definição das metas e limites arquitetónicos, funcionais e logísticos e conceberá os detalhes técnicos dos painéis adequados aos padrões e necessidades do contexto português.

- Definição das regras de conceção do projeto de edifícios em utilização do sistema construtivo a ser desenvolvido;
- Conceção teórica dos painéis de parede estruturais e não-estruturais, de fachada e internas, pavimentos, cobertura e núcleo para elevadores e escadas;
- Verificação do comportamento funcional do sistema em cumprimento aos requisitos normativos através da previsão do coeficiente de transmissão térmica e da proteção contra humidade dos painéis, para a análise térmica, e previsão do isolamento a sons aéreos e de percussão, para a análise acústica;
- Verificação do comportamento dos painéis quanto à segurança ao fogo em cumprimento aos requisitos normativos;
- Verificação do comportamento mecânico do sistema construtivo através da sua aplicação prática à um projeto real de edifício em madeira, cedido pela empresa PORTILAME - Engenharia e Madeira, Lda.

1.3. Estrutura do documento

Este documento divide-se em 6 capítulos, os quais:

- Capítulo 1 – “Por que construir edifícios em madeira?”: a presente seção, que contém a introdução ao tema, os objetivos esperados para este trabalho, a organização do documento e a disseminação dos resultados;
- Capítulo 2 – “Estado da arte”: contém o estado atual de conhecimento acerca da construção em madeira e dos edifícios em altura em madeira no contexto mundial e nacional;
- Capítulo 3 – “Metodologia de conceção do sistema construtivo”: contém as boas-práticas sugeridas pela literatura para o projeto de estruturas em madeira, bem como as metodologias empregues para verificação funcional e estrutural dos painéis desenvolvidos;
- Capítulo 4 – “Apresentação dos resultados e discussões do sistema construtivo”: contém a pormenorização dos painéis desenvolvidos e suas verificações em termos funcionais e de segurança ao fogo;
- Capítulo 5 – “Caso de estudo”: contém a verificação do sistema construtivo em termos estruturais quanto aplicado à um edifício existente de 4 pisos;

- Capítulo 6 – “Conclusões”: contém a síntese dos resultados obtidos e os possíveis estudos futuros identificados de acordo com as limitações e interesses da pesquisa.

1.4. Disseminação dos resultados

TENÓRIO, M. C. U.; BRANCO, J. M.; SILVA, S. M. - Prefabricated wooden based system for collective buildings in the Portuguese context. In CONSTRUCTION, ENERGY, ENVIRONMENT & SUSTAINABILITY, Coimbra, Portugal, 2021. Coimbra: Itecons - Institute for Research and Technological Development in Construction, Energy, Environment and Sustainability, 2021.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

Este capítulo destina-se à apresentação do conhecimento relevante para o entendimento e desenvolvimento adequados dos restantes capítulos. São abordados temas como o uso histórico e moderno da madeira estrutural nas construções, principalmente em altura, os tipos e requisitos de construção de edifícios em madeira e aspetos relativos à pré-fabricação e construção modular.

2.1. Enquadramento histórico do uso da madeira na construção

A madeira tem acompanhado a evolução da humanidade desde seus primórdios, assumindo o papel de matéria-prima principal para a execução de quaisquer que fossem os objetos de interesse à época: móveis, esculturas, caixões e máscaras mortuárias em 2500 a.C. pelos antigos egípcios; sofás e camas elaborados em 700 a.C. pelo império grego; canoas, cabos de armas e ferramentas ou instrumentos musicais pelos bretões celtas; e até mesmo instrumentos musicais na época medieval, período em que a diversidade na utilização da madeira aumentou consideravelmente (Dinwoodie, 2004).

A predileção histórica e o crescente domínio do material pelo homem através do tempo e das civilizações justificam-se por sua disponibilidade, versatilidade e trabalhabilidade. Por ser naturalmente resistente e relativamente leve, tornou-se um dos materiais de construção mais antigos e tradicionais do mundo, tendo as primeiras evidências de utilização para este fim datadas do período da China Neolítica, época em que a espécie pré-humana Homem de Pequim construiu “residências de ninhos” a partir de galhos de árvores, palha e grossas escoras de madeira envolvidas em uma camada de terra compactada, que atuava como barreira antifogo. Apesar de muito rudimentar, essa prática sugere que o uso estrutural da madeira, bem como sua proteção ao fogo, tenha surgido entre 300 mil e um milhão de anos atrás, antes mesmo da espécie humana (Smith e Frangi, 2014).

Mais tarde, na Idade da Pedra, a sedentarização do homem e a conseqüente busca por abrigos permanentes motivaram o interesse nas potencialidades da madeira para fins habitacionais, promovendo o abandono das cavernas e a consolidação de habitações em estruturas de madeira elementares que, segundo a necessidade de se cobrir espaços mais amplos, melhorar o aproveitamento das áreas e viabilizar a abertura de janelas, evoluíram para estruturas cada vez mais elaboradas. Nesse período, as habilidades de carpintaria foram aprimoradas com a criação de sistemas reticulados de suporte de

cargas em elementos de madeira conectados por juntas de encaixe (mecha e respiga), que, posteriormente, serviram como base para a arquitetura tradicional chinesa (Fux *et al.*, 2002).

A China, inclusive, detém um dos exemplares mais prestigiosos que traduzem a capacidade e a importância histórica da madeira na elevação de estruturas: o pagode Sakyamuni que, construído em 1056, foi o edifício mais alto do mundo por diversos séculos (67,13 m de altura) e superou com integridade inúmeros terremotos (Lam e He, 2008). No Japão destaca-se o pagode de 5 pisos (32,25 m de altura) do templo budista *Horyuji*, o edifício de madeira mais antigo do mundo totalmente preservado, cujos pilares de cipreste japonês foram derrubados em 594 d.C. e a construção finalizada em 607 d.C., tem mais de 1400 anos e surpreende por sua durabilidade (Smith e Frangi, 2014).

Já na Europa, a abundância de florestas coníferas, a Norte e Este principalmente (como Escandinávia, Finlândia, Polônia e Alemanha), impulsionou a consolidação da madeira como material básico para a construção desde as primeiras civilizações. Em localidades em que a produção de madeira era inferior, sua utilização foi priorizada para elementos estruturais como lajes, escadas e coberturas, revestimentos de piso e mobiliário.

As cidades lacustres pré-históricas da Suíça exibem a versatilidade no emprego da madeira para a construção de estruturas, desde estacarias à plataformas de acesso às habitações. Ainda no século VIII a.C., existiu em Biscupin, na Polônia, uma povoação constituída por casas de troncos roliços dispostos na horizontal, um dos parques arqueológicos mais relevantes da Europa atualmente, após sua redescoberta em 1933 (Lucejko *et al.*, 2020). Na Noruega, estima-se que as casas de madeira sejam construídas desde o século IV d.C. e que, na Escandinávia, tornou-se frequente a utilização de casas com estruturas de troncos dispostos tanto na horizontal como na vertical após 1000 d.C. (Lourenço e Branco, 2012). No final da Idade Média já era possível construir edifícios em madeira de até 6 pisos, com resistências semelhantes àqueles construídos em alvenaria de pedra ou tijolo, a partir da triangulação na união das peças, formando diagonais ou cruzeiros de Santo André. Neste período, difundiu-se a técnica de construção de paredes a partir do preenchimento dos vãos entre elementos de madeira com areia e argila sobre uma trama de ripas e tecido presos à estrutura de madeira pelo interior e exterior. Em Portugal, esse sistema foi naturalmente adotado (denominado por “taipas” ou “gaiolas”) e muito utilizado na construção e reforço de estruturas após o terremoto de 1755, mas o material de preenchimento foi logo substituído por alvenaria de tijolo devido à divergência no comportamento dinâmico entre a ele e a madeira estrutural das paredes (Lourenço e Branco, 2012). Neste período, o uso da madeira estrutural na Europa atinge seu ápice.

O desempenho da madeira de construção quando sujeita a fogos mostrou-se, desde os primórdios do

uso do material, como uma das principais preocupações associadas, implicando em regulamentos prescritivos de construção que datam desde o Império Romano (Smith e Snow, 2008). Motivadas por grandes catástrofes modernas como o Grande Incêndio de Londres, em 1666, e o incêndio de Boston, em 1872, diversas restrições de construção concebidas entre os séculos XVII e XIX perduram até os dias de hoje (Smith e Frangi, 2014).

Paralelamente, no final do século XIX, são registrados os primeiros usos do betão, que se multiplicaram rapidamente no princípio do século XX com a compreensão do funcionamento e possibilidades do betão armado. Apoiadas em cálculos cada vez mais precisos e no conhecimento aprofundado das propriedades dos materiais, a difusão das tecnologias em aço e betão armado, especialmente em estruturas de médio e grande porte, transmitiam segurança e, assim, desbancaram o uso generalizado das estruturas em madeira, decretando o fim de sua hegemonia (Lattke e Lehmann, 2007).

Não obstante, em lugares como EUA e Canadá, que seguiram a tradição de seus colonizadores e, em seguida desenvolveram uma metodologia construtiva própria (*balloon frame*), o Japão, cujas casas em madeira fazem parte da cultura local, e os países nórdicos, que beneficiam da abundância de florestas, a madeira nunca perdeu a notoriedade adquirida séculos atrás, ocupando ainda o lugar de destaque na construção habitacional.

Nas últimas décadas, contudo, o sector da construção em madeira tem vivido seu renascimento global através da evolução no entendimento das suas características e comportamento enquanto material de construção e desenvolvimento de novas técnicas, sejam elas para secagem artificial controlada, tratamentos de preservação ou redução das limitações relacionadas à anisotropia e heterogeneidade do material. O invento de colas mais potentes permitiu recorrer à técnica de laminação para elaboração de peças de alto desempenho estrutural, de comportamento mais previsível e de tamanho e formato desvinculados aos da árvore original, favorecendo a produção com madeira de reflorestação. Assim, o desenvolvimento de uma nova gama de produtos em madeira, como a madeira lamelada colada (glulam), a madeira microlaminada colada (LVL) e a madeira lamelada cruzada colada (CLT), instigou um interesse renovado nas tecnologias de madeira particularmente voltadas para a nova geração de edifícios em altura (Kuzmanovska, 2018).

Os arquitetos suíços Burkhalter & Sumi e Peter Zumthor, os alemães Frei Otto, Thomas Herzog e Otto Steidle, o norueguês Sverre Fehn, bem como alguns dos arquitetos japoneses contemporâneos Tadao Ando, Katsuhiko Ishii e Shigeru Ban foram os precursores da redescoberta da madeira como um material de construção contemporâneo ao combinar uma abordagem vernacular e regional à uma aplicação inovadora do material (Lattke e Lehmann, 2007).

A experiência de construtores e arquitetos nas últimas décadas preparou o caminho para abordagens inovadoras na construção, bem como em atividades de pesquisa com o uso da madeira estrutural (Lattke e Lehmann, 2007).

2.2. A madeira como material de construção moderno para edifícios em altura

A utilização da madeira em edifícios em altura é um assunto que na última década chamou a atenção de pesquisadores, profissionais do sector da construção e governos de todo o mundo. O perfil sustentável do material foi um trampolim fundamental para este crescente interesse que, associado às suas propriedades úteis para fins estruturais, como bom comportamento à flexão e relação peso-resistência favorável, revelou a adequabilidade da madeira para estruturas de múltiplos pavimentos no contexto atual.

Ainda quando Piot *et al.* (2011) e Qu *et al.* (2012) observaram na altura uma notável ausência do uso de madeira estrutural em edifícios de múltiplos pavimentos em todo o mundo, pelo que a maioria das estruturas em madeira concentrava-se no setor residencial compreendendo edifícios de um andar ou de pequena elevação, Green (2011) acreditava que ali se iniciava um momento único da história em que a madeira transitaria entre o material que conhecemos há milhares de anos para o material que saberemos ser pelos próximos mil. Ainda, afirmava que uma construção em madeira com 30 pisos pode ser económica, segura contra incêndios e terremotos e apresentar pegada de carbono inferior às estruturas convencionais de aço e betão.

Com o objetivo de responder à pergunta “Por que dever-se-ia acreditar que é possível construir edifícios altos modernos de madeira?”, Smith e Frangi (2008) desenvolveram um estudo focado nas especificidades de edifícios em altura com estrutura de madeira para identificar os principais requisitos e problemas de engenharia estrutural aos quais devem responder. Ao analisar edifícios entre 10 e 20 pisos, concluíram que a madeira e os produtos à base de madeira satisfazem às funções estruturais de resistência exigidas assim como o betão e o aço e têm potencial para superar o conservadorismo dos códigos de construção acerca da segurança contra incêndios, garantindo com integridade o tempo necessário para evacuação e combate ao fogo. Ainda, afirmam que a vasta experiência com edifícios de baixa elevação em madeira deve ser considerada em prol da confiança na tipologia multipavimentos, mas pontua que esta requer sistemas pré-fabricados que garantam a seleção adequada dos detalhes de construção para melhores respostas mecânicas e a oferta da funcionalidade esperada (conforto do ocupante e manutenção estrutural).

A introdução de diversos materiais, conectores e sistemas inovadores contribuiu para colocar essa ideia

em prática. No nível de material, a introdução de produtos de madeira que podem ser usados em pisos ou paredes, como madeira microlaminada colada (LVL) e madeira lamelada cruzada colada (CLT) (vide Seção 2.4.2), mudou a indústria significativamente (Brandner *et al.*, 2016). Diversos estudos também forneceram orientação para projetar sistemas em CLT de resistência à cargas laterais (Ceccotti *et al.*, 2013; Gavric *et al.*, 2015; Pei *et al.*, 2016; Shahnewaz *et al.*, 2017). No nível do conector, os parafusos autorroscantes (STS) e as ligações coladas (Dietsch e Brandner, 2015; Hossain *et al.*, 2016; Hossain *et al.*, 2018) fornecem métodos alternativos que vão além das limitações dos ligadores tradicionais do tipo cavilha. No nível do sistema, novas soluções híbridas atraem atenção devido à sua vantagem na resolução de problemas de projeto (Tsfamariam *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2016; Dias *et al.*, 2016; Ganey *et al.*, 2017; Loss *et al.*, 2018).

Assim, nos últimos anos, a tipologia dos edifícios multipisos em madeira ganhou impulso nos países europeus: a construção dos primeiros edifícios demonstrativos foi concluída e vê-se que a confiança na tipologia é crescente. Desde projetos pioneiros como a torre residencial *Limnologen* (Figura 1.2), concluída em 2008 na cidade sueca de Växjö, bem como a *Stadthaus* (Figura 2.1), em Londres (2009), o primeiro edifício residencial de nove pisos no mundo feito exclusivamente de madeira, a quantidade, qualidade e importância dos projetos, bem como o crescente interesse de diferentes grupos e clientes mostram esta tendência.



Figura 2.1 – *Stadthaus*, em Londres
(Archello, 2022)

Apesar do nível de aceitação e uso estrutural da madeira para edifícios em altura variar significativamente entre os países europeus, o saldo é positivo em termos de avanços no que diz respeito ao desempenho, métodos e custos de construção, em busca de torná-la uma prática comum para edifícios europeus de médio porte (Kuzman e Sandberg, 2016).

2.2.1. Contexto mundial

Os grandes incêndios históricos desempenharam um papel fundamental na estagnação dos elementos estruturais de madeira aplicados a edifícios em altura. A evidência é dada por inúmeras barreiras regulatórias que até hoje podem ser encontradas em códigos de construção em todo o mundo. No contexto europeu, apesar dos requisitos regulatórios (segurança contra incêndio, acústica e vibração, estabilidade, projeto sísmico e durabilidade) não distinguirem materiais, suas limitações aos materiais combustíveis tornam a madeira não competitiva (Silva, 2020), pelo que a maioria dos edifícios em madeira em países europeus eram limitados a um ou dois pisos. Além disso, a ausência de um padrão entre os regulamentos dos países europeus funcionou como uma barreira para o desenvolvimento e uso estrutural de produtos de madeira e à base de madeira (Östman e Källsner, 2011). Um exemplo dessa realidade é a madeira lamelada cruzada colada (CLT), apresentada em detalhes na Seção 2.4.1 deste documento, que não é contemplada no Eurocódigo 5 (EN 1995 (CEN, 2004)) ou em qualquer outro regulamento, sendo utilizada a ETA do respetivo produtor.

A evidência da influência das divergências e restrições dos regulamentos nacionais de construção motivou o esforço pela padronização da regulamentação entre os membros da comunidade. Assim, no final da década de 1980, uma diretiva de produtos de construção da Comissão Europeia estipulou requisitos de base funcional para o uso de produtos na construção civil com o objetivo de remover barreiras técnicas ao comércio de produtos de construção entre os estados membros da União Europeia (Council Directive 89/106/EEC, 1988). Isso significa que qualquer material, madeira, concreto ou aço, que atenda aos requisitos funcionais conforme especificado nos regulamentos de construção nacionais, pode ser usado para a construção de edifícios multifamiliares (Kuzman e Sandberg, 2016).

Além dos códigos de construção e as autoridades governamentais recuarem das proibições gerais quanto à madeira enquanto material de construção, os regulamentos de construção prescritivos foram substituídos por requisitos de *Building Performance Outcome* (BPO) em diversos países, como Austrália, Canadá, Nova Zelândia, e Suíça. Nessa modalidade, viabiliza-se a consideração das circunstâncias específicas de cada caso para o cumprimento do desempenho ao fogo requerido, reconhecendo-se que as abordagens anteriores que impunham critérios gerais e alheios às especificidades dos projetos não eram as ideais. Incorporam-se, portanto, princípios, objetivos e quantitativos relacionados ao desempenho e limitações técnicas que independem dos materiais de construção empregados, permitindo, por exemplo, o uso da madeira em edifícios em altura sem qualquer limitação no número de pisos, desde que se possa demonstrar que os objetivos de desempenho serão atendidos pelas soluções de projeto. Esta metodologia mostrou-se, até agora, como a mais eficaz na superação de

códigos e práticas desatualizados e excessivamente restritivos relacionados à madeira (Smith e Frangi, 2014) e teve um papel importante na promoção da competitividade e inovação no sector, permitindo à madeira retomar o seu papel estrutural na construção (Silva, 2020).

Além da normalização dos regulamentos nacionais, incentivos governamentais também tiveram uma grande contribuição na consolidação da construção em altura em madeira nos países europeus que se destacam neste quesito. Seja para incentivar a redução das emissões de gases com efeito de estufa ou para fomentar a indústria madeireira, a economia nacional, o emprego e a exportação dos países com reserva de florestas, os governos encorajaram o uso da madeira em edifícios através de políticas ambientais baseadas na promoção da madeira como material de construção em vez do aço e betão, que exigem que esta seja considerada sempre que possível na elaboração de projetos pelos arquitetos e engenheiros (Jonsson, 2009; Xia *et al.*, 2014; Kremer e Symmons, 2015). Por exemplo, aprovou-se uma lei na França que exige o uso de madeira para a construção de novos edifícios, com exceção dos casos em que sejam fornecidas evidências de incompatibilidade, normalmente no que diz respeito à segurança, saúde ou ao desempenho do edifício (*Décret* n°8 2010-273, 2010). Na Colúmbia Britânica do Canadá, o *Wood First Act* (2009) visa facilitar a cultura da madeira exigindo que este seja o primeiro material considerado nas fases iniciais de todos os projetos de edifícios novos financiados pela província. No Japão, a lei *Wood First* destaca a preferência pela madeira no desenvolvimento de prédios públicos (Forestry Innovation Investment, 2012). Os programas *Nationella träbyggnadsstrategin* e *Trästad*, na Suécia, visavam a promoção da construção de edifícios de madeira em altura e foram responsáveis pelo rápido aumento do interesse na tipologia no país (Mahapatra *et al.*, 2012) e, em determinadas localidades, metas estratégicas foram definidas para que a construção de edifícios verticais em madeira alcançasse 50% até 2020 (Toppinen *et al.*, 2018). Na Finlândia, o Ministério do Emprego e da Economia liderou o *National Wood Construction Programme* de 2011 a 2015, que não somente identificava projetos para a construção em madeira em larga escala, mas também investia no conhecimento acerca da construção ecológica de alta qualidade e eficiente em termos energéticos, na implantação de novos modelos de operação competitivos para a etapa de construção dos edifícios em madeira e na melhoria do treinamento em construção em madeira, aumentando a eficiência em atividades de projeto, pesquisa e desenvolvimento (Sutinen, 2013).

Atualmente, mecanismos de formação educacional e profissional relacionados às aplicações modernas da madeira na construção não estão em um nível comparável ao que existe em relação a materiais como estruturais aço e betão, mas iniciativas significativas estão em andamento na Áustria, Canadá, China, França, Alemanha, Itália, Nova Zelândia, Suécia, Suíça, Reino Unido e outros (Smith e Frangi, 2014). Na

Suécia, por exemplo, diversas universidades que estiveram envolvidas no desenvolvimento de projetos realizados em madeira iniciaram programas de pesquisa e educação sobre o assunto e duas cátedras em construção de madeira foram estabelecidas com financiamento do governo e da indústria. Da mesma forma, um programa de educação interdisciplinar ofereceu curso de doutorado em construção de madeira, administrado em conjunto por três universidades, e cursos gratuitos de meio período sobre construção de madeira foram oferecidos com o apoio financeiro do setor da construção em madeira. O mesmo ocorreu na Alemanha, onde são ofertados cursos e programas de bacharelado, mestrado e especialização em estruturas de madeira (Mahapatra e Gustavsson, 2009).

A crescente difusão da construção em madeira de múltiplos pavimentos é, portanto, um resultado da cooperação entre as indústrias de construção e florestais e institutos de pesquisa e governos. Para além disso, destaca-se também a contribuição do marketing positivo ao uso da madeira produzido pelos programas de incentivo e pelos projetos de demonstração em pesquisa colaborativa, bem como o crescente interesse dos clientes por edificações modernas no que diz respeito à sustentabilidade (Shmuely-Kagami e Matsumura, 2008; Mahapatra e Gustavsson, 2008).

Esta abordagem foi bem-sucedida e demonstrada por exemplos como: o edifício *e3* (Figura 2.2a) com sete pisos, em Berlim (2008); o *Stadthaus* (Figura 2.1) com nove pisos, em Londres (2009); o edifício de apartamentos *Forté* (Figura 1.3) em CLT com 10 pisos, em Melbourne (2012); *Treet* (Figura 1.4), a estrutura treliçada em glulam da Artec, na qual salas modulares pré-fabricadas com estrutura de madeira foram instaladas, que alcançou 14 pisos, em Bergen (2015); a moradia estudantil *Brock Commons Tallwood House* (Figura 2.2b) em glulam com 63 m de altura distribuídos em 18 pisos, em Vancouver (2017); e o empreendimento residencial-comercial híbrido *HoHo* (Figura 1.1) de madeira e betão de 24 pisos e 84 metros, em Viena (2020), o edifício de madeira mais alto do mundo.



Figura 2.2 – (a) *e3*, em Berlim; (b) *Brock Commons Tallwood House*, em Vancouver (Karmatrendz, 2009; The University of British Columbia, s.d.)

Fica claro que países onde o uso da madeira é tradicionalmente difundido, como Suécia, Canadá, Estados Unidos e Japão, aderem às novas tecnologias para construção em altura mais rapidamente, devido à sua experiência, confiança e disponibilidade do material e organização consolidada desse mercado. Na Suécia, país com 69% do território ocupado por florestas, com cerca de 90% das moradias unifamiliares construídas em madeira ainda em 1980 e onde não eram permitidas construções de madeira acima de dois andares até 1994, a participação de mercado do uso de madeira em edifícios em altura aumentou de 1% em 2000 para 15% em 2012 (Mahapatra *et al.*, 2012). Na Finlândia, esse aumento foi de 1% em 2010 para 10% até 2015 (Franzini, 2018; Toppinen *et al.*, 2018). No Canadá, após a permissão para a construção de edifícios em madeira de 5 a 6 andares na Columbia Britânica, mais de 250 edifícios foram concluídos na província (CMHC, 2016).

Localidades como Reino Unido, Alemanha e Holanda, embora tenham necessitado trabalhar especialmente a confiança quanto à segurança ao fogo e durabilidade do material, apresentaram crescimento no uso generalizado da madeira, mesmo que para edificações de baixa elevação. No Reino Unido, o projeto *TF2000* abriu novos mercados para a construção em *timber-frame* de até 7 pisos (Grantham, 2004) e aumentou a proporção do mercado de *timber-frame* de 8% em 1998 para 25% em 2008 (Wahl *et al.*, 2008; Mahapatra e Gustavsson, 2009). Na Alemanha em 2014, 16,2% dos edifícios novos foram executados em madeira (Steele, 2015). O uso da madeira para edifícios de vários andares foi permitido no país em 2002 e, desde então, sua proporção é de cerca de 2% no mercado de edifícios multipisos (Mahapatra *et al.*, 2012).

2.2.2. Contexto nacional

O sucesso da construção com madeira estrutural verificado em toda a Europa durante a Idade Média também foi substancialmente notado em Portugal, tendo como acontecimento de destaque o período Pombalino, quando, após o terremoto de 1755, a Baixa da cidade de Lisboa foi reconstruída com o intuito de suportar novos eventos sísmicos (Lourenço e Branco, 2012).

Em sequência, a madeira estrutural começou a perder espaço de maneira faseada, inicialmente com a vulgarização do tijolo industrial, que viabilizava técnica e financeiramente a construção de paredes esbeltas sem o recurso a madeira, ainda no século XIX e, posteriormente, com o surgimento do betão armado no início do século XX, que se apresentou como solução ideal para substituição dos vigamentos de madeira dos pavimentos, principalmente em áreas molhadas (Marques, 2011). O betão, então, impulsionado pela acomodação da indústria do cimento em Portugal (fábrica de cimento Tejo, em 1894)

e pela aprovação do primeiro regulamento no domínio do betão armado (Instruções Regulamentares para o Emprego do Betão Armado), assume a primazia na construção civil.

Paralelamente, motivado pelo desenvolvimento industrial, deu-se o êxodo massivo do interior para as grandes cidades, o que culminou no aumento repentino nas necessidades de alojamento e, conseqüentemente, em uma grave deficiência na resposta à alta demanda. Promoveu-se, então, a construção de habitações sociais a partir de estruturas pré-fabricadas em madeira, tomando partido da rapidez e baixo custo da tipologia, que, por conseguinte, foi associada à precariedade e temporariedade, limitando-se a servir às carências habitacionais. Este estigma perdura até os dias de hoje, quer pela opinião pública, quer pelos próprios técnicos do sector, principalmente no que tange a durabilidade e resistência ao fogo do material, destinando-o apenas a funções estéticas, decorativas ou estruturas temporárias em estaleiro (Negrão, 2011).

Entretanto, uma alteração nesta mentalidade começou a ser sinalizada com a construção do *Altice Arena* no âmbito da *Expo98*, quando nota-se o aumento da competitividade das construções em madeira com a industrialização das empresas do sector madeireiro e o surgimento da indústria da pré-fabricação de estruturas, motivados pelo impacto mediático do projeto, pelo surgimentos dos Eurocódigos e normas conexas e pelo significativo aumento do rendimento nacional nas décadas de 80 e 90, o que criou condições à sofisticação do mercado da construção. A madeira, nomeadamente a partir dos laminados colados com seu aspeto moderno associado à capacidade para vencer grandes vãos, reconquistou notoriedade, distinguindo-se em alguns nichos específicos da construção, como pavilhões desportivos, centros comerciais, pontes, passadiços pedonais, entre outros, sobretudo devido ao incentivo do Estado e das Administrações Locais (Negrão, 2011). Nos anos subsequentes à *Expo98*, nota-se um aumento impressionante no ritmo de implantação das estruturas de madeira em Portugal (Figura 2.3), mas, apesar disso, estima-se que a construção em Portugal ainda utilize a madeira em apenas 5% de sua atividade, enquanto os países nórdicos destinam cerca de 80 a 85% de sua construção à estrutura de madeira (Branco, 2013).

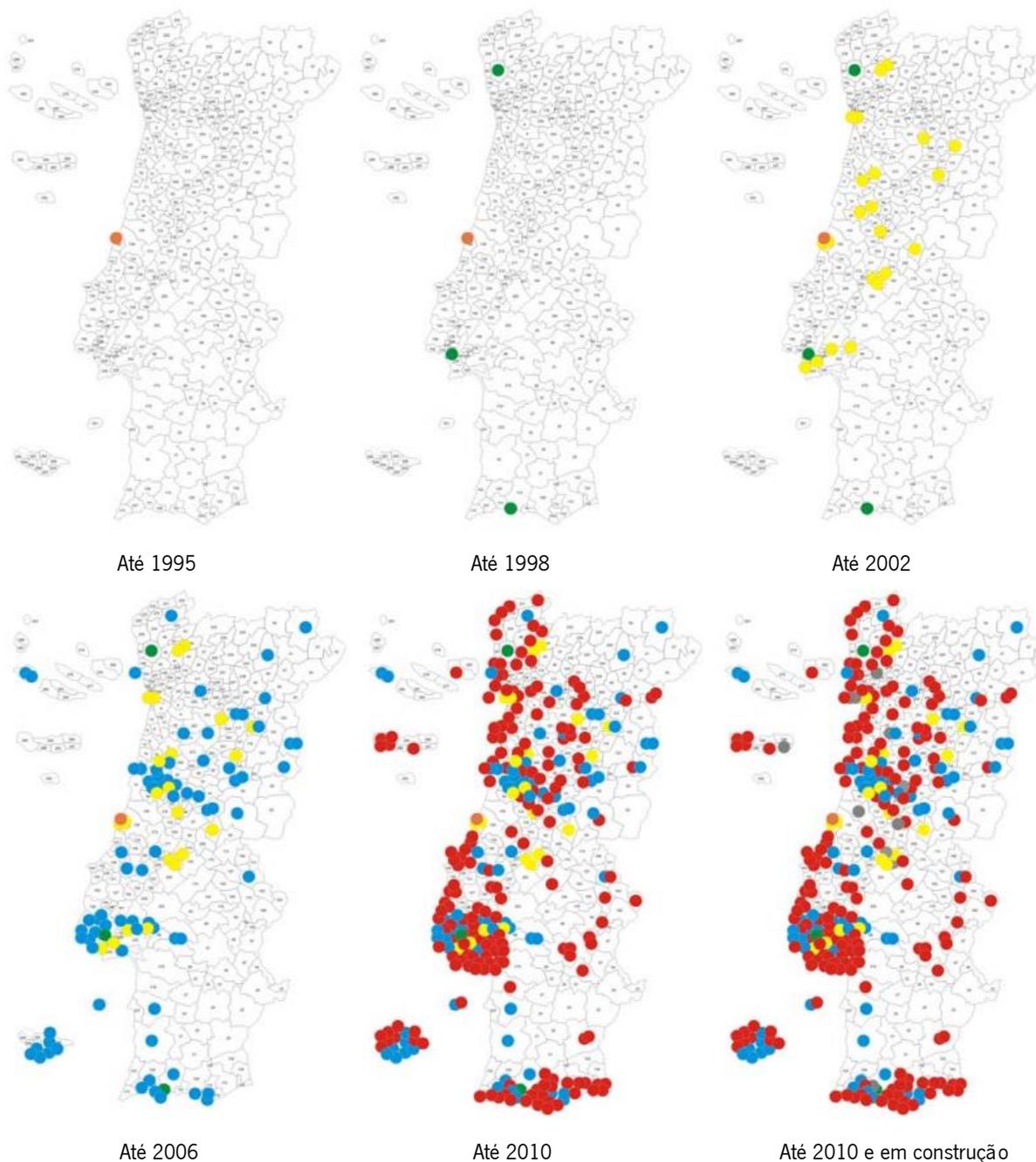


Figura 2.3 – Ritmo de implantação das estruturas de madeira em Portugal
Adaptado de Negrão (2011)

De um modo geral, Portugal, ao contrário de muitos países europeus, ainda não se encontra totalmente sensibilizado para o uso da madeira como parte integral da construção de edifícios (Branco, 2013). A nível nacional, o material é muito associado à pequena escala e, quando em maiores proporções, relaciona-se frequentemente a estruturas institucionais. Mesmo para a construção de habitações, a estrutura em madeira assume um carácter meramente excepcional, comumente executada a partir da pré-fabricação. O modelo de construção em *kits* e sistemas fechados baseado em um catálogo finito de

soluções, disponibilizados por empresas de fabrico e instalação ou só construção, estabelece-se como o preferencial (Morgado, 2011).

Para além do descrédito e desprestígio sofrido pela madeira, diversas outras condicionantes locais podem, a princípio, justificar a defasagem na penetração da construção em madeira no contexto nacional em contraposição ao cenário europeu, tais como: as altas temperaturas na estação quente, que aumentam a propensão ao ataque biológico; a baixa mobilidade das famílias associada à preferência pelos processos convencionais de construção com soluções de durabilidade presumivelmente superior; a carência de técnicos especializados como consequência da formação insuficiente ministrada nas universidades nacionais no que diz respeito às estruturas de madeira; e a ausência de regulamentação específica, uma vez que as regras voltadas aos edifícios em madeira são compiladas no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)), não havendo, por exemplo, requisitos nacionais específicos de segurança contra incêndios, eficiência energética e uso sustentável de materiais (Hamburg *et al.*, 2018).

A escassez de madeira de qualidade face à disponibilidade abundante de outros materiais também é fator determinante. A madeira portuguesa apresenta características de resistência mecânica inferiores às madeiras nórdicas, por exemplo, onde o crescimento lento devido ao clima e as particularidades do solo favorecem suas propriedades. Isso justifica a disparidade no incentivo ao uso e na qualidade da gestão/exploração da floresta entre estes países (Marques, 2011). Negrão (2011) e Hamburg *et al.* (2018) elencam ainda algumas outras dificuldades enfrentadas por Portugal no âmbito da indústria madeireira: sua dimensão reduzida e a baixa capacidade tecnológica; a gravidade, extensão e dispersão dos incêndios florestais, por vezes resultantes da ausência de uma política satisfatória de ordenamento e gestão florestal; a carência de uma estratégia florestal difundida com o intuito de produzir árvores com características adequadas à função estrutural; a baixa rentabilidade da floresta nacional e o alto risco, que desencorajam o investimento privado (85% da floresta portuguesa distribuída em pequenas parcelas entre proprietários privados); e o abate desregrado de árvores.

Portugal, que não tem a tradição na construção de estruturas de madeira ou laminados colados, importa o material para a maioria das construções de elevado custo ou dimensões, ainda escassas no panorama local. Assim, o mercado pequeno e sem produção nacional perdura nessa configuração tímida, resultando na inexperiência das empresas do sector, que se limitam às atividades de angariação inicial das obras e elaboração do projeto, com alguma inexpressiva prática na montagem e assistência técnica pós-venda. Pelo facto das empresas nacionais do sector fatalmente se resumirem à prestação de serviços, as estruturas de grande escala e custo acabam, portanto, por serem produzidas por empresas conceituadas cujas fábricas localizam-se em Espanha, França, Europa Central ou Escandinávia, como é

o caso do *Velódromo Nacional* e do *Pavilhão Atlântico*, este último, inclusive, cuja madeira foi processada na Suécia e transformada na França antes de vir para Portugal, teve o valor ecológico associado ao uso da madeira questionado devido às longas distâncias de transporte decorrentes de sua importação (Hamburg *et al.*, 2018).

Contudo, no estudo desenvolvido por Morgado (2011), que caracterizou o mercado da construção em madeira em Portugal através da análise da informação disponível aos clientes, concluiu-se que apesar da oferta de sistemas construtivos diversos para a habitação, a maior parte deles tem origem na Europa Central, do Norte ou Leste, não sendo totalmente adequados à realidade nacional. Ademais, notou-se a carência de provas cabais respaldadas em fontes creíveis que elucidem os benefícios e a segurança da construção em madeira, principalmente em termos de estabilidade, segurança ao fogo e durabilidade, desmistificando crenças ultrapassadas que limitam a decisão do cliente.

De forma ainda bastante pontual, assiste-se a apostas criativas por parte de algumas empresas que avançam com sistemas inovadores, investindo no design dos produtos e disponibilizando-se para conceber soluções personalizadas. Vai-se, portanto, afastando o estigma da associação entre as habitações em madeira e os modelos tradicionalistas estrangeiros de difícil enquadramento no contexto nacional (Morgado, 2011). À medida em que as exigências quanto ao sistema aumentam e a competitividade entre as empresas do setor intensifica, motiva-se a ampliação do conhecimento, a modernização do mercado e, conseqüentemente, a aceitação do público (Branco, 2013).

Morgado *et al.* (2012) desenvolveram um estudo de caracterização da oferta de casas de madeira em Portugal que pode fornecer um panorama da indústria nacional e as suas potencialidades para a construção em altura. O setor conta maioritariamente com microempresas devido à própria natureza do produto, cujo fabrico e construção em Portugal tem caráter artesanal. As mais antigas e maiores, que beneficiam-se da valorizada experiência no setor, são responsáveis pela maior quota da produção. Apesar das microempresas serem maioria no mercado das casas de madeira, o que poderia indicar maior vocação para as etapas de comercialização e construção, a atividade de fabrico não é negligenciada: 63% das empresas dedicam-se à ela, podendo ainda desenvolver atividades complementares. Este fato permite supor a capacidade do setor para a evolução no sentido da sua consolidação, uma vez que não se limita às atividades de construção e serviços. Das empresas avaliadas, 76% afirmaram que desenvolvem produtos ou marcas na própria empresa. Num mercado sem tradição na construção em madeira e pouco favorável à inovação, reconhece-se o mérito associado à essa dinâmica de empreendedorismo, que desafia a desconfiança da generalidade dos consumidores. Embora a penetração das casas de madeira em Portugal no panorama da construção seja residual, o estudo

salienta que as exportações assumem um papel relevante: um quarto da produção nacional de casas de madeira destina-se a exportação. Embora a relação com empresas estrangeiras seja notória (44% das empresas indica que os sistemas são desenvolvidos por parceiros internacionais), é promissor que 56% das empresas adote sistemas construtivos próprios. No entanto, muitos desses sistemas nacionais apresentam anomalias e fragilidades, principalmente no que tange o desempenho térmico e acústico (Morgado, 2011). A utilização de madeiras de origem nacional nas estruturas das casas de madeira por parte de 36% das empresas é também surpreendente na medida em que é sabido que a floresta nacional não está vocacionada para a produção de madeira estrutural. Esse valor pode crescer ainda mais quando consideradas as novas tecnologias de pré-fabricação e os conceitos de modularidade, que viabilizam o aproveitamento bem-sucedido de madeiras de menor qualidade para funções estruturais (Machado, 2011). Apesar de convictas quanto ao perfil inovador dos produtos que ofertam e de manifestarem intenção em melhorá-los continuamente, 40% das empresas demonstraram insegurança quanto à sua aptidão para entrarem no mercado da habitação coletiva.

Apesar de existirem em Portugal as condições para que a madeira possa ser considerada uma alternativa, ainda não se evoluiu em termos de adesão por parte dos consumidores. Do ponto de vista do mercado, o grande desafio das empresas de madeira consiste, por um lado, em reforçar os argumentos a favor da construção em altura em madeira e, por outro, em dissipar as dúvidas associadas a um sistema que, no contexto nacional, não tem as provas dadas pela tradição (Morgado, 2011).

Para que a construção em madeira em Portugal não seja apenas uma opção de nichos específicos e se torne uma real alternativa para os arquitetos, projetistas e engenheiros aquando da decisão do material a usar nas estruturas de edifícios correntes, os seguintes fatores essenciais são identificados: i) ampliar a base de conhecimento e promover a formação de profissionais; ii) reforçar a divulgação da tipologia em geral e de resultados específicos advindos das experiências dos projetos executados; iii) buscar por mudanças institucionais; iv) incentivar o envolvimento das empresas construtoras nessa tipologia; v) promover o desenvolvimento de procedimentos industriais e das normas relativas às estruturas de madeira; vi) criar um grupo de defesa à construção em madeira a partir dos intervenientes interessados; vii) proporcionar intercâmbio de experiências e conhecimentos entre diferentes atores a nível europeu; viii) acionar a competitividade por meio da aplicação impostos sobre energia e carbono; e ix) inspirar-se no padrão europeu para edifícios de madeira com base na pré-fabricação (Mahapatra e Gustavsson, 2008; Branco, 2013).

2.3. Requisitos de construção que influenciam edifícios em madeira

A madeira, uma estrutura biológica produzida durante o crescimento das árvores, tem o objetivo de suportar o seu peso, resistir à ação do vento e transportar água e nutrientes aos elementos. A partir de sua função resistente, a madeira apresenta maior resistência nas direções mais solicitadas, nomeadamente na direção das forças gravíticas, que coincide com a direção das fibras que a constituem (Dinwoodie, 2000).

A relação elevada entre a tensão resistente na direção das fibras e o seu peso volúmico é uma característica atrativa da madeira enquanto material estrutural para as construções. O edifício *UBC Brock Commons* (Figura 2.2b), localizado em Vancouver, com estrutura mista em madeira e betão, por exemplo, tem 7648 toneladas a menos que o seu equivalente completamente em betão. Esse fato alivia os esforços na fundação e, conseqüentemente, permite fundações menos robustas e caras, além de reduzir a carga sísmica do edifício, caso esteja localizado em uma zona sujeita a tremores (Fast *et al.*, 2016). Além disso, é um material abundante, fácil de trabalhar e com excelentes propriedades de isolamento térmico (Santi *et al.*, 2016).

No entanto, este material possui algumas características por vezes desfavoráveis à construção, como: heterogeneidade e anisotropia, combustibilidade, vulnerável a agentes externos, variabilidade conforme as variações de humidade do meio, limitação nas dimensões segundo as árvores de origem e a presença de defeitos (Smith e Frangi, 2014).

A partir disso, quatro requisitos de construção que influenciam edifícios de madeira segundo as características próprias ao material são identificados: segurança contra incêndio, acústica e vibrações, estabilização e durabilidade.

2.3.1. Durabilidade

Uma questão fundamental para a competitividade da madeira estrutural é a possibilidade de controlar os custos de durabilidade, manutenção e ciclo de vida de construções e componentes. Nesse sentido, o projeto de durabilidade mostra-se tão importante quanto qualquer outra matéria da conceção de um edifício, como o projeto estrutural ou de segurança ao fogo.

Os problemas de durabilidade em edifícios são evitáveis por meio de práticas adequadas de projeto, construção e manutenção que, tradicionalmente, consolidam-se segundo a experiência e adesão à elas por parte do sector da construção e, posteriormente, traduzem-se em regras prescritivas implícitas. Isso implica que o desempenho esperado não possa ser especificado em termos quantitativos e nem otimizado sem que qualquer mudança esteja sujeita a riscos (Östman e Källsner, 2011).

Os elementos de construção em madeira em edifícios podem ter uma vida útil indefinida se forem devidamente protegidos contra riscos à durabilidade. As ameaças primárias são decomposição biótica ou danos causados por insetos às peças de madeira e corrosão das peças de metal. A natureza exata das ameaças pode variar entre e dentro das regiões geográficas, em função do clima e das intervenções humanas nos ecossistemas (Smith e Frangi, 2014). Nos países de clima temperado, como no Sul europeu, a degradação biológica por fungos e insetos é um dos principais agentes para a deterioração prematura das estruturas. De maneira a garantir a vida útil desejada para os elementos de construção, faz-se necessária a manutenção do teor de água da madeira abaixo dos níveis críticos (~ 20%) (Verbist *et al.*, 2019). Nesse contexto, são consideradas todas as variações de dimensões, formas, juntas, fechos e tratamentos, incluindo revestimentos, que podem influenciar a durabilidade da construção em madeira. A durabilidade no projeto é, portanto, em grande parte, uma questão de moldar a construção e os detalhes de modo que uma proteção eficiente contra a água seja alcançada. Alternativamente, ou como uma característica de projeto benéfica adicional, busca-se um projeto que permita uma secagem eficiente de componentes de madeira que foram umedecidos acima dos níveis críticos de umidade. Em uma perspectiva inversa, é de extrema importância evitar soluções de design que possam causar períodos prolongados de aumento do teor de umidade da madeira (Östman e Källsner, 2011).

Em termos estruturais, convém que a lógica de suporte dos edifícios projetados permita que os componentes não-estruturais e estruturais não-críticos sejam reparáveis ou substituíveis. Nesses casos, pondera-se os custos de reparo e substituição de acordo com o risco de durabilidade esperado, otimizando os custos do ciclo de vida. No entanto, os elementos estruturais críticos (aqueles cuja falha pode levar à perda de vidas, bloqueio de fuga de emergência e rotas de acesso ou perda de equipamento crítico, como geradores elétricos de emergência) não devem deteriorar-se, de modo que durem em plenas capacidades funcionais até que o edifício seja desativado. O requisito de desempenho aplicável neste caso é a integridade do sistema estrutural primário ao longo de toda vida útil (Smith e Frangi, 2014).

As estratégias de projeto para controle da intrusão de água líquida em edifícios de madeira são guiadas pela regra 4D: distância (protege a madeira da absorção capilar), deflexão (evita que a água atinja a madeira), drenagem (direciona a água que acidentalmente contorna a barreira primária) e secagem (oportunidade para que a intrusão de água causada por condensação, vazamentos ou erros de execução seja contornada) (Beebe e Kam-Biron, 2016; Hazleden e Morris, 1999). Embora essas medidas sejam puramente defensivas, quando associadas ao uso de espécies de madeira naturalmente duráveis, eventuais tratamentos químicos e revestimentos especiais, mostram-se eficazes no aumento da

resistência global do sistema (Riggio, 2019). TRADA (2008) defende que, apesar dos tratamentos preservativos funcionarem como uma garantia por vezes exigida para componentes de madeira inacessíveis ou difíceis de substituir, os edifícios projetados e construídos adequadamente não são dependentes destes para terem sua durabilidade assegurada.

De maneira a prover a pormenorização necessária à garantia da estanqueidade, processos precisos de pré-fabricação beneficiados pelas condições ideais de fábrica e tecnologias digitais para elementos em dimensões transportáveis são preferíveis e mostram-se promissores na oferta de edifícios cada vez mais duráveis (Lattke e Lehmann, 2007).

2.3.2. Acústica e vibrações

A acústica é uma característica de desempenho importante para a construção com madeira e um pré-requisito para a aceitação de edifícios em madeira pela indústria da construção, proprietários e consumidores.

O comportamento acústico das edificações em madeira, quer para sons aéreos ou sons de percussão, difere daquele observado em construções pesadas, como as em betão. Isso porque o peso da construção é um parâmetro decisivo para o seu desempenho acústico, especialmente para a faixa de frequência mais baixa (em geral, 20 – 200 Hz). Logo, as construções em madeira são frequentemente associadas a um mau isolamento acústico, sofrendo vibrações e perturbações importantes especialmente nas frequências mais baixas (Östman e Källsner, 2011).

O problema relacionado às baixas frequências influenciou países com tradição na construção de estruturas leves em madeira (os cinco países nórdicos e a Lituânia) a impor requisitos mínimos regulamentares também para as bandas de frequência até 50 Hz, o que não é praticado no restante da Europa, onde se considera apenas a faixa entre 100 Hz e 3150 Hz (Östman e Källsner, 2011).

Nesse contexto, os modelos de previsão tornam-se ferramentas indispensáveis na conceção de estruturas em madeira, apesar dos existentes serem mais adequados para a previsão do isolamento acústico de estruturas pesadas e homogêneas.

Ao prever o desempenho acústico de um edifício, são consideradas propriedades estatísticas que se baseiam na suposição de um campo difuso. No entanto, a condição de campo difuso geralmente não é atendida nas frequências mais baixas, tanto para som em espaços fechados quanto para as vibrações em estruturas, e o amortecimento interno elevado comum aos elementos leves também torna a condição de campo difuso raramente satisfeita. Assim, o campo não difuso dos elementos nas frequências mais baixas causa grande incerteza quanto ao isolamento acústico previsto para o todo do edifício (Forssén *et*

al., 2008).

A alternativa de usar um edifício de teste é prática comum, embora seja um processo caro e que, por isso, coloque a madeira em desvantagem quanto aos demais materiais. Importa referir que os resultados obtidos através das medições são maioritariamente exclusivos àquelas condições específicas, pelo que podem não ser úteis para aplicação em projetos não semelhantes. Além disso, as medições de campo também estão sujeitas à incertezas maiores em frequências mais baixas. As grandes variações, quer nas medições *in situ* ou em laboratório, denotam uma imprevisibilidade do comportamento acústico e implicam em superqualificar os elementos construtivos de modo a garantir o desempenho desejado quanto aos sons aéreos e aos sons de percussão para o conforto dos ocupantes (Forssén *et al.*, 2008).

2.3.3. Segurança ao fogo

Materiais de construção combustíveis, como a madeira, queimam superficialmente, libertam energia e, assim, contribuem para a propagação do fogo e o desenvolvimento de fumo durante os incêndios em edifícios. Em grande parte por causa dessas características, os códigos de construção têm historicamente limitado prescritivamente o uso de madeira como material de construção, em particular, na restrição ao número de andares e alturas máximas das superestruturas de construções de madeira (Smith e Frangi, 2014). A segurança contra incêndios é amplamente considerada como um dos obstáculos mais significativos para o aumento do uso de madeira na construção, uma vez que a sensação de segurança é um critério importante para a escolha de materiais para edifícios (Östman e Källsner, 2011).

No entanto, a previsibilidade em termos da queima dos elementos de madeira quando associada ao dimensionamento adequado garante o bom desempenho dos edifícios durante incêndios. Códigos modernos baseados no desempenho reconhecem isso, tornando possível justificar racionalmente a aptidão dos edifícios em madeira quanto à segurança ao fogo, seja através de elementos de madeira robustos projetados para queimarem apenas nas superfícies, seja encapsulados os materiais combustíveis com camadas não combustíveis (Smith e Frangi, 2014), geralmente compostas por uma combinação do material de revestimento interno e o material de isolamento (TRADA, 2008). Ainda, os conhecimentos modernos na temática do projeto contra incêndios em estruturas de madeira combinados com medidas técnicas, nomeadamente sistemas de aspersão e detecção de fumos, e serviços de combate a incêndios bem equipados, permitem a utilização segura da madeira num vasto campo de aplicações. Como resultado, muitos países começaram a rever os seus regulamentos de incêndio, permitindo um maior uso de madeira (Östman e Källsner, 2011).

Assim, as estruturas devem ser projetadas e construídas de modo que, em caso de incêndio: a

capacidade de suporte de carga seja mantida por um período específico de tempo; a geração e propagação de fogo e fumo sejam limitados; a propagação do fogo às estruturas vizinhas seja limitada; os ocupantes possam deixar o prédio ou ser resgatados por outros meios; a segurança das equipes de resgate seja levada em consideração. Para isso, devem apresentar reação ao fogo e resistência ao fogo adequadas. A reação ao fogo é a resposta inicial de um material quando exposto ao fogo e o principal grupo de elementos que deve responder a esse quesito são as superfícies internas e externas de edifícios. No âmbito da reação ao fogo, o sistema europeu contém as principais classes A a F e, em seguida, as subclasses s1-s3 para a produção de fumo e d0-d2 para a queima de gotículas. Quanto à resistência ao fogo, os requisitos de desempenho abordam a capacidade de suporte de carga (R), a integridade (E) e o isolamento (I) (vide Figura 2.4) e os elementos de construção devem resistir à exposição ao fogo por um período de tempo suficiente especificado (Östman e Källsner, 2011).

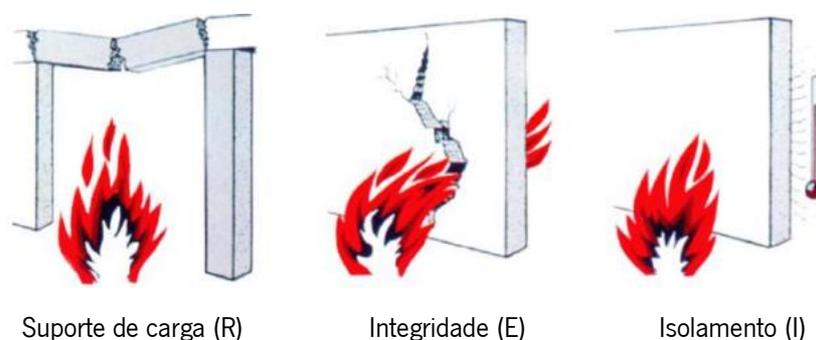


Figura 2.4 – Aspectos da resistência ao fogo (Östman e Källsner, 2011)

O projeto contra incêndio deve prezar pela segurança dos ocupantes do edifício, de edifícios vizinhos e bombeiros, pela limitação das perdas financeiras associadas ao edifício e seu conteúdo e pela proteção do meio ambiente contra os efeitos do incêndio, como gases nocivos e poluição das águas subterrâneas. Assim, a maneira mais eficiente de controlar os efeitos do incêndio e atingir os objetivos do projeto é estabelecer uma estratégia abrangente com uma combinação adequada de medidas que atendam aos objetivos de segurança. As possíveis medidas são: o conceito estrutural, em que os edifícios são divididos em compartimentos com pisos e paredes resistentes ao fogo que limitam a propagação para além do foco do incêndio (os pisos são geralmente os principais elementos de separação de incêndio em edifícios multipisos); conceito de vigilância, em que sistemas de detecção automática de incêndio podem identifica-los e alertar brigadas de incêndio próximas, permitindo a adoção de medidas de proteção contra incêndio menos rigorosas; e o conceito de extinção, um sistema capaz de extinguir incêndios em um estágio inicial ou manter sua intensidade baixa, até que a brigada contra incêndio chegue. Em algumas jurisdições, a aplicação do terceiro conceito permite a redução expressiva das estratégias de proteção passivas (Smith e Frangi, 2014).

2.3.4. Estabilidade

Assim como outros materiais estruturais, a madeira tem características específicas que devem ser consideradas para maximizar as capacidades de resistência e rigidez dos elementos estruturais. A principal delas é a dependência direcional de suas propriedades mecânicas, sendo mais rígidas e resistentes quando carregadas paralelamente às fibras em tensão, compressão ou flexão, do que quando carregadas em direção transversal. Por isso, deve-se ter atenção para evitar detalhes de construção que criem altas tensões transversais às fibras ou em corte (Smith e Frangi, 2014).

Nesse sentido, a manipulação das espécies de madeira, a formação e qualidade das lamelas para os produtos em madeira e seus arranjos de estratificação permitem a criação de uma ampla gama de combinações de propriedades estruturais. Assim, as capacidades do elemento podem ser combinadas com precisão para as demandas de força sobre ele (Smith e Frangi, 2014).

Deve-se ter em conta, ainda, a influência que a magnitude do edifício tem nos esforços solicitantes e, conseqüentemente, na definição da estrutura mais adequada para cada caso. No entanto, a consideração das alturas das superestruturas dos edifícios por si só não é um indicador direto de seu comportamento, uma vez que as características arquitetônicas, como forma e esbeltez, ditam as possibilidades de arranjo estrutural. A partir da proporção geométrica, forma estrutural e altura, é finalmente possível estabelecer algumas generalizações acerca da complexidade do projeto e da construção: superestruturas em madeira de baixa elevação devem satisfazer essencialmente às demandas de resistência associadas às forças de gravidade e, para pisos em estrutura leve, problemas relacionados às vibrações em uso podem ditar o tamanho máximo dos painéis estruturais; superestruturas de média elevação e moderadamente delgadas devem fornecer resistência adequada contra os efeitos combinados da gravidade e das cargas laterais; e as superestruturas de alta elevação e delgadas, têm essencialmente a necessidade de controlar os movimentos laterais associados ao vento e às cargas sísmicas (Smith e Frangi, 2014).

Apesar de reconhecidos pelo bom comportamento quando sob cargas laterais sísmicas devido ao seu baixo peso próprio e boas propriedades dinâmicas de amortecimento, os edifícios em madeira podem ser sensíveis às cargas de vento pelos mesmos motivos, pelo que requerem ancoragem precisa em relação às forças de elevação vertical. Resistir às forças de corte totais e aos momentos de flexão aplicados à base também pode ser uma preocupação (Östman e Källsner, 2011).

No sistema convencional de estabilização para edifícios de madeira, as paredes, pisos e cobertura formam diafragmas que resistem às cargas laterais as quais a estrutura está sujeita segundo a sua elevada rigidez no plano e resistência à encurvadura. Para edifícios multipisos, as propriedades de rigidez

aumentam em importância e os requisitos de deflexões estáticas e resposta à vibração podem ser determinantes para as dimensões das estruturas (Östman e Källsner, 2011). Segundo Smith e Frangi (2014), também é provável que o controle de deslocamentos para os edifícios delgados totalmente em madeira, a depender de sua altura, seja impossível sob restrições econômicas normais. Assim, a opção mais viável seria a construção híbrida, que combina subestruturas de madeira com outros tipos de subestruturas.

A robustez do sistema estrutural é um dos pontos principais dos edifícios em madeira e pode ser definida como a capacidade de sobreviver a circunstâncias imprevistas sem danos indevidos ou perda de função e fornece uma medida de segurança estrutural além das regras tradicionais de projeto normalizadas. Assim, deve-se atentar para a seleção adequada do sistema estrutural geral, de modo que este seja suficiente para conter a propagação de danos ao nível sistêmico e não ultrapassar os limites do dano aceitável. Nesses sistemas, as ligações e outros detalhes de construção trabalham de modo a não sujeitar as madeiras a forças que desenvolvem respostas menos confiáveis (Smith e Frangi, 2014).

2.4. Pré-fabricação e construção modular

A elevação de edifícios em altura em madeira é atualmente possível e desejável devido às vantagens que a construção em madeira oferece principalmente quando associada ao processo de pré-fabricação.

A pré-fabricação consiste na produção de unidades de construção num ambiente fabril controlado, com posterior transporte e instalação dessas unidades em obra para a montagem completa do edifício (Mapston e Westbrook, 2010), etapas que são favorecidas pelo baixo peso da madeira em comparação aos demais materiais estruturais (Gasparri e Aitchison, 2019). Nessa filosofia de produção moderna, faz-se necessária uma estratégia holística que inclui a modelação 3D do edifício, sistemas técnicos bem definidos para resolução das complexidades ainda em fábrica, uso de tecnologia de comunicação da informação, elevado planejamento e controle de processos e um relacionamento mais forte entre as partes interessadas (Lessing *et al.*, 2005). A pré-fabricação impacta, ainda, no processo de projeto que, para além das discussões acerca do desempenho dos materiais e otimização da estrutura, deve contemplar soluções em termos de eficiência do processo de construção e gestão da segurança no local (Gasparri e Aitchison, 2019).

O setor da construção, no que diz respeito à sustentabilidade econômica, vem apresentando ineficiência generalizada e imprevisibilidade de produtos e processos devido aos métodos construtivos tradicionalmente empregues (Abanda *et al.*, 2017). Isso é consequência do alto grau de complexidade das atividades e fases, competências e atores envolvidos, resultando em frequentes aumentos de custos

e atrasos. Calcula-se que, em média, o tempo inicialmente estimado para um projeto se estende em 20%, implicando na superação dos custos em até 80% (McKinsey Global Institute, 2016). No que diz respeito à sustentabilidade social, o setor apresenta as maiores taxas de acidentes de trabalho e também os maiores custos associados a eles (Schwatka *et al.*, 2012).

Nesse contexto, a pré-fabricação tem provado ter diversos benefícios para o processo de construção. A técnica, por dar-se em ambiente fabril e permitir controles de qualidade rígidos sobre os componentes pré-fabricados, favorece a previsibilidade do processo e o aumento da qualidade e precisão dos produtos. Um processo de fábrica bem gerido e esforços bem coordenados no estaleiro também resultam em melhorias no cronograma e na produtividade (Woetzel *et al.*, 2017; Aitchison *et al.*, 2018) e, conseqüentemente, na redução dos prazos e custos gerais do projeto (Bonev *et al.*, 2015; Ni e Popovski, 2015). Lehmann e Hamilton (2011) estimaram um prazo de três a quatro meses para edifícios de até nove pisos em madeira. Segundo (Richard, 2005), há evidências de que os custos de construção sejam reduzidos a 85% desde que a planta de pré-fabricação esteja operando em plena capacidade. Esse é um benefício econômico para os construtores, que arcam com custos de estaleiro inferiores, e para os investidores, que beneficiam-se da comercialização rápida do imóvel e da garantia da entrega pontual (Kuzman e Sandberg, 2016). A redução das atividades em estaleiro também contribuem para reduzir as interferências das condições externas e exposição dos componentes à intempéries, prezando por sua integridade e durabilidade; a mão-de-obra em estaleiro; o tráfego de construção; o impacto do ruído e as perturbações à comunidade local; a ocorrência de acidentes, promovendo uma obra controlada e segura; a necessidade de equipamentos de construção tradicionais; os processos húmidos; os resíduos, uma vez que elimina-se os fatores locais, como pedidos em excesso, execução deficiente e mau acondicionamento dos materiais; as juntas, lacunas e penetrações, apoiando a criação de um ambiente interno confortável; entre outros (Yates *et al.*, 2008; Lehmann, 2012; Kremer e Symmons, 2015; Ji *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2020; Gallo *et al.*, 2021).

O método de construção pré-fabricado herda conceitos que integram os aspetos ambientais no processo de desenvolvimento do produto e, portanto, tem potencial para reduzir o impacto ambiental negativo ao longo das fases do seu ciclo de vida (Rossi *et al.*, 2016). Por meio do projeto de modulação e de produção seca (*Lean Construction*), uma grande variedade de metas de sustentabilidade podem ser atingidas (Halstenberg *et al.*, 2015). Promovendo a atualização, adaptação e modificação dos componentes para uma vida útil estendida e influenciando na desmontagem dos componentes, a pré-fabricação resulta na redução da carga ambiental da indústria. Okodi-lyah (2012) propôs que a construção pré-fabricada poderia economizar cerca de 44% de energia na fase de construção e melhorar o desempenho em mais

de 7% na fase de uso.

O surgimento de sistemas totalmente pré-fabricados levou a linhas de fabricação que consistem em numerosos processos sequenciais, onde cada estação é responsável por uma função específica que contribuirá para a qualidade geral e produtividade da linha de montagem. Tradicionalmente, esses processos são concluídos por meios convencionais, no entanto, nos últimos anos um número cada vez maior desses processos está sendo automatizado para processar os materiais com eficiência e precisão (Orlowski, 2020).

Existe um grande potencial de mercado para a utilização da madeira nos diversos tipos de edifícios utilizando uma combinação de projeto digital e processamento CNC (*Computer Numeric Control*). O projeto e a produção digital usando CAE (*Computer-Aided Engineering*), CAD (*Computer-Aided Design*) e CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) permitiram que a construção em madeira avançasse em novas proporções. Ligações inovadoras, materiais modernos à base de madeira e corte CNC de última geração oferecem possibilidades inovadoras e moldam a madeira em formas arrojadas (Kuzman e Sandberg, 2016)

Nesse contexto, a metodologia BIM (*Building Information Model*) tem papel de destaque, uma vez que, para além de fornecer um modelo digital com informação parametrizada do edifício, promove a integração e compatibilização entre as diferentes matérias contidas no projeto e fornece uma plataforma de comunicação eficiente para o compartilhamento de informações entre os diversos intervenientes (Liao *et al.*, 2021). Ainda, Sacks *et al.* (2009) estudaram a correspondência entre as funcionalidades BIM e os princípios da construção seca e descobriram que estes têm fortes interações positivas. No momento, as ferramentas habilitadas para a metodologia BIM amadureceram amplamente para estruturas de aço e betão, mas ainda não são satisfatórias para modelar estruturas de madeira (Nawari, 2012).

A pré-fabricação representa uma oportunidade única para as tecnologias de madeira liderarem a mudança do setor de construção de alto consumo, alto desperdício e trabalho intensivo em direção a uma abordagem mais industrializada e sustentável (Gan *et al.*, 2018; Gasparri e Aitchison, 2019). No entanto, embora haja avanços constantes em termos de materiais, tecnologias de pré-fabricação e métodos de montagem, o projeto, bem como os procedimentos de instalação de serviços de construção em edifícios de madeira de vários andares, estão muito aquém dos avanços tecnológicos observados para os demais materiais de construção (Koppelhuber e Magg, 2020).

2.4.1. Produtos derivados da madeira

Como material de construção, a madeira apresenta algumas deficiências, tais como o elevado grau de

variabilidade e de anisotropia, tanto em relação à resistência quanto aos movimentos provocados pelas variações de umidade, a instabilidade dimensional segundo a variação de umidade e a disponibilidade em larguras e comprimentos limitados (Dinwoodie, 2000).

Visando contornar estas deficiências e mobilizar plenamente as capacidades dos novos métodos de fabricação para uma utilização mais eficaz das características únicas da madeira, durante o século XX foram desenvolvidos diversos produtos derivados do material, quer em forma de placas ou de vigas, os chamados *Engineered Wood Products* (EWP).

Segundo o *Forestry Innovation Investment* (2014), os EWP são produtos de madeira de valor agregado feitos a partir da colagem de lamelas, lâminas, fios ou fibras de madeira, geralmente com cola. Este processo de fabricação gera produtos de alto desempenho e dimensionalmente estáveis para projetos de construção de diferentes magnitudes e foi beneficiado pelo desenvolvimento e o aprimoramento de tecnologias adesivas, ligações mecânicas e tecnologias de classificação e fabricação (Canadian Wood Council, 2006). A Figura 2.5 apresenta a evolução cronológica das tecnologias em madeira segundo Borgström (2016).

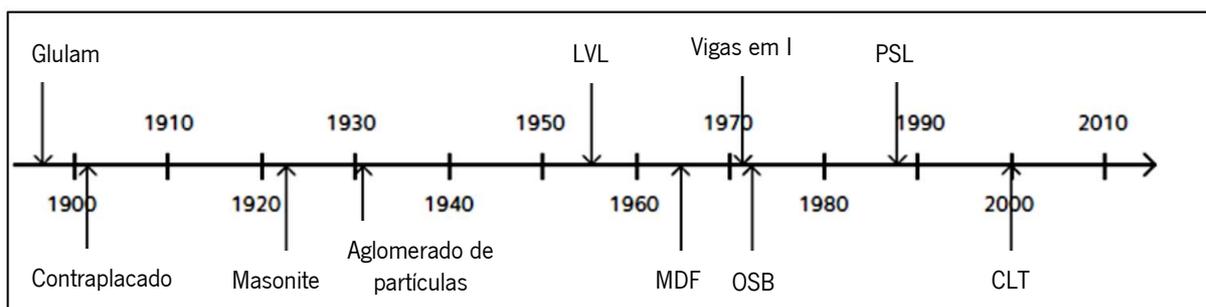


Figura 2.5 – Cronograma da invenção dos produtos derivados da madeira
Adaptado de Borgström (2016)

Efetivamente, o desenvolvimento destes produtos permitiu o alargamento da aplicação da madeira pelo setor da construção, que buscava por soluções de pequena espessura para grandes áreas, como as placas em sua variedade, e por alternativas à madeira maciça que ultrapassassem suas limitações e proovessem capacidade mecânica para superar grandes vãos e resistir a grandes carregamentos em diferentes geometrias, como a madeira lamelada colada e o LVL.

Produzidos a partir de processos industriais controlados, estes produtos não somente apresentam elevado controle de qualidade como viabilizam e ratificam o processo de pré-fabricação dos edifícios em madeira.

A seguir, são apresentados os principais EWP e suas principais características identificadas na literatura (Dinwoodie, 2000; TRADA, 2008; Smith e Frangi, 2014).

I. Placas

O aumento da procura mundial por compósitos derivados de madeira e a consciência do papel da floresta no ecossistema global impulsionou o uso de madeira reciclada e madeira de diferentes fontes/espécies na formulação dos compósitos de madeira. O setor de produção de placas derivadas da madeira é, então, reconhecido como a área de crescimento mais rápido dentro da indústria madeireira desde o final dos anos 1970 (Dinwoodie, 2000).

Para as placas, o princípio de redução das referidas deficiências da madeira dá-se reduzindo-a a pequenas unidades e, posteriormente, reconstituindo-a na forma de grandes planos. As placas, então, assumem maior estabilidade dimensional e um nível inferior de anisotropia, que variam de acordo com o tamanho e orientação das partículas de madeira usadas e do método aglomerante a que são submetidas. Disponíveis em tamanhos grandes e diversos, a redução da variabilidade das placas em comparação com a madeira deve-se ao reposicionamento de componentes variáveis e é tanto maior quanto menor forem as placas (Dinwoodie, 2000).

Geralmente, as placas compreendem tiras de madeira de resinosas que, unidas, produzem painéis de até 600 mm de espessura. As dimensões das placas normalmente variam entre 1,25 e 4,8 m de largura e entre 8 m e 24 m de comprimento (Dinwoodie, 2000).

As características de desempenho necessárias às placas para as diversas aplicações são definidas pela norma europeia harmonizada EN 13986 (CEN, 2004). Ela define também os métodos de teste que conferem a conformidade do produto segundo a adequação ao propósito para um uso final pretendido específico, permitindo seu uso em aplicações de construção. Algumas características de desempenho são testadas pelo fabricante e mantidas no processo de controle de qualidade da produção, para outras podem ser utilizados valores padrão, a depender da propriedade ou do uso ao que o painel se destina (TRADA, 2008).

A seguir, são descritos os principais produtos em placas derivadas da madeira disponíveis no mercado atualmente.

a) Contraplacado

O contraplacado (Figura 2.6) é o mais antigo dentre os produtos laminados de madeira e assumiu, por longos anos, a reputação de material laminado estrutural para a construção desde aeronaves e barcos, até malhas de vigas e vigas de caixa oca.

Plano ou moldado, o contraplacado é formado a partir da colagem sob pressão de folhas de madeira sobrepostas, com espessuras entre 2 e 4 mm obtidas por desenrolamento ou corte dos troncos, de

modo que a direção das fibras de cada camada seja perpendicular às adjacentes, e frequentemente contém um número ímpar de camadas, equilibrando o sistema em torno da lâmina central. Alguns contraplacados, no entanto, contém um número par de camadas, tendo as duas camadas centrais a mesma orientação das fibras, garantindo o equilíbrio em cada lado da linha de cola central. À medida em que o número de camadas aumenta, o grau de anisotropia, tanto em termos de resistência, quanto em termos de deslocamentos, é reduzido em uma proporção 40:1 para a madeira maciça. Utilizando-se três camadas de espessuras iguais, o grau de anisotropia é reduzido em 5:1 e, para nove camadas, 1,5:1. Dado que o custo do contraplacado aumenta conforme seu número de camadas, considera-se que uma placa com três camadas é um equilíbrio satisfatório entre isotropia e custo.

Normalmente, são utilizadas tanto madeiras de resinosas quanto de folhosas (ou mesmo uma combinação das duas) dentro de uma faixa de densidade de 400–700 kg/m³ e colas de resina de uréia-formaldeído (UF), para contraplacados de uso interno, e resinas de fenol-formaldeído (PF), para contraplacados de uso externo, destinando-se as madeiras mais duráveis ou tratadas, os adesivos mais resistentes à humidade e os revestimentos de superfície para o contraplacado “marítimo”. As propriedades mecânicas e físicas do contraplacado dependem diretamente da espécie de madeira selecionada e do tipo de cola, além do número, espessura e orientação das camadas, mas, em geral, apresenta alta tenacidade, resistência à rachaduras (reflexo da inexistência de linhas de clivagem ao longo das fibras, favorecendo a ligação de elementos por meio de pregos ou parafusos) e alta rigidez específica, superior, por exemplo, à chapas de aço carbono. O processo de laminação e alternância de camadas confere homogeneidade, estabilidade e resistência à flexão superior à madeira maciça, uma vez que ultrapassa a influência dos fatores intrínsecos, como nós e defeitos. Contudo, os efeitos das variáveis extrínsecas, como teor de umidade e temperatura mantêm-se muito semelhantes aos da madeira de origem e, assim como a madeira, seu comportamento mecânico depende do tipo de esforço a que está submetido e da duração da carga. A possibilidade de utilização de aparas e outros desperdícios da madeira e reciclagem dos contraplacados conferem, ainda, um benefício ecológico ao produto.

Os compensados tendem a se enquadrar em três grupos distintos a depender do uso a que se destinam: uso geral, decorativo ou estrutural. Este último grupo de contraplacados é regulado pela normativa europeia EN 636 (CEN, 2012), que os diferencia segundo sua utilização em condições secas, húmidas ou exteriores. Seus valores característicos são definidos pelas EN 789 (CEN, 2004) e EN 1058 (CEN, 2009) e a duração do fator de carga (k_{mod}) e fator de fluência (k_{def}) estão incluídos no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)).



Figura 2.6 – Contraplacado
(New Nordic Timber, 2022)

b) Aglomerado de partículas

A indústria de aglomerado (Figura 2.7), originada para o aproveitamento de resíduos de madeira, data de meados da década de 1940, mas foi apenas no final da década de 1970 que, impulsionada pelo maior rigor na produção e capacidade em produzir placas com desempenho previsível e reproduzível, frequentemente feitas sob medida para um uso específico, ela prosperou a ponto de sua demanda exceder o suprimento de madeira residual disponível.

No fabrico de aglomerado, a madeira, geralmente de resinosas, é cortada por facas rotativas para produção de partículas, posteriormente secas e pulverizadas com cola. As partículas, então, são sopradas em placas planas de modo que as finas repousem nas superfícies e as grossas atinjam o centro. Em seguida, as placas são cortadas e prensadas em processo termomecânico, resultando em painéis com densidade entre 450 a 750 kg/m³, e teor de cola médio de 7 a 8% (9 a 11% nas camadas externas e 5 a 7% na camada central), a depender de sua classificação de uso final.

Assim como o contraplacado, o desempenho do aglomerado depende essencialmente do tipo de cola usada, geralmente resinas sintéticas. Na Europa, a mais utilizada é de ureia-formaldeído (UF) que, devido à sua sensibilidade à humidade, implica no desaconselhamento de utilização do aglomerado em áreas com risco de molhagem ou sujeitas à longos períodos de alternância de humidade. Em placas que apresentam alguma resistência à humidade, utiliza-se frequentemente a melamina-ureia-formaldeído (MUF), ou ainda fenol-formaldeído (PF) ou adesivos de isocianato (IS).

Assim como a madeira, o painel aglomerado é um material viscoelástico, entretanto, apresenta taxas de fluência consideravelmente maiores, que pode ser contornado aumentando-se a quantidade ou modificando-se sua composição química da cola. Bastante versátil e com comportamento equilibrado, é utilizado em diversas vertentes da construção civil, requerendo, porém, alguns cuidados: as ligações com parafusos devem afastar-se dos extremos dos painéis e o elemento metálico não deve ser aplicado

diretamente em circunstâncias de carga elevada; ligações feitas com cola exigem que os cantos sejam forrados com ripas de madeira maciça; e, em caso de revestimento com pintura, deve-se pintar ambas as faces, evitando, assim, empenamentos decorridos de secagens diferenciais.

A EN 312 (CEN, 2010) estabelece os requisitos para seis tipos de painéis aglomerados, dos quais quatro enquadram-se como aptos para suporte de cargas: o P4 e P6, para uso em condições secas, e o P5 e P7, para uso em condições húmidas. O P2 e P3, para uso não-estrutural, destinam-se ao uso geral em condições secas e mobília, respetivamente. Os valores característicos para projeto são definidos pela EN 12369-1 (CEN, 2001) e a duração do fator de carga (k_{mod}) e fator de fluência (k_{def}) estão incluídos no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)).



Figura 2.7 – Aglomerado de partículas
(Banema, s.d.)

c) Painel de fibras

O painel de fibras (Figura 2.8) é recorrentemente usado para isolamento e forros de portas, fecho traseiro de mobiliário e, em alguns países, como material de revestimento e cobertura.

Neste processo, que difere de forma mais significativa dos expostos anteriormente, a madeira é reduzida à lascas que são posteriormente vaporizadas sob alta pressão para amolecer a lignina da madeira, que apresenta comportamento termoplástico. Em seguida, o material é separado em feixes ou fibras individuais, misturado em água, alocado em uma esteira sobre tela de arame e cortado. A prensagem em processo termomecânico resulta em uma placa com uma superfície lisa e a outra com tela de arame e é responsável por determinar a densidade do painel: inferior a 400 kg/m^3 (aglomerado de fibras de baixa densidade), entre 400 e 900 kg/m^3 (aglomerado de fibras de média densidade) ou superior a 900 kg/m^3 (aglomerado de fibras de madeira dura).

Assim como os demais produtos em madeira, o painel de fibras é sensível à humidade, contudo, um alto grau de repelência à água pode ser obtido através da imersão em óleo quente de painéis com elevada densidade (aglomerado de fibras de madeira dura), derivando-se o painel temperado.

A normativa europeia para os três grupos de painéis com densidades distintas é a EN 622 (CEN, 2003), sendo HB.HLA2 e MBH.LA2 exemplos de painéis de suporte estrutural específicos para condições húmidas e secas, respetivamente. Os valores característicos para projeto são definidos pela EN 12369 (CEN, 2001) e a duração do fator de carga (k_{mod}) e fator de fluência (k_{def}) estão incluídos no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)).



Figura 2.8 – Painel de fibras
(New Nordic Timber, 2022)

d) MDF (*Medium Density Fiberboard*)

Começou-se a notar um aumento distinto na produção de aglomerados de fibras de média densidade (Figura 2.9), MDF, entre as décadas de 1980 e 1990 devido ao seu bom comportamento perante a humidade ou fogo, baixa densidade e elevada trabalhabilidade, o que levou à sua ampla aplicação em pavimentos resistentes à humidade ou mobiliário, principalmente em se tratando de peças curvas.

Similar à produção do painel aglomerado, a produção do painel MDF conta com a secagem, pulverização com cola e formação de uma manta com os feixes de fibras, que, em seguida, são prensados em processo termomecânico resultando em uma placa com duas faces lisas.

Assim como o painel aglomerado de partículas, diversos tipos de adesivo podem ser empregados: resina de ureia-formaldeído (UF) para uso em condições secas e resina de ureia-formaldeído (MUF) fortificada com melamina (MUF), resinas de fenol-formaldeído (PF) ou isocianato (IS) para uso em condições húmidas.

A normativa europeia para o MDF é a EN 622-5 (CEN, 2009), que aborda classes estruturais e não-estruturais para uso tanto em condições secas quanto húmidas, sendo a placa MDF.HLS (estrutural para uso em condições húmidas) restrita a períodos de carregamento curtos, conforme define o Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)). Os valores característicos para projeto são definidos pela EN 12369 (CEN, 2001) e a duração do fator de carga (k_{mod}) e fator de fluência (k_{def}) estão incluídos no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)).



Figura 2.9 – MDF
(CNC Creations, 2020)

e) OSB (*Oriented Strand Board*)

Assim como o MDF, o aglomerado de partículas longas e orientadas (Figura 2.10), OSB, foi um fenômeno de popularização, sendo amplamente utilizado em pisos flutuantes, fechados para construção de estrutura de madeira, decks de telhados planos, revestimento de pisos e parede graças à facilidade de envernizamento e adoção de outras texturas e, até mesmo, como estabilizador térmico em habitações. A fama de “substituto mais barato para o contraplacado” atribuída ao OSB colaborou diretamente para sua difusão, contudo, vale ressaltar que sua resistência e rigidez são consideravelmente inferiores que as do contraplacado estrutural de alta qualidade, embora apenas marginalmente inferiores aos contraplacados de madeira de resinosas.

O OSB é confeccionado a partir de lascas de até 75 mm de comprimento e largura máxima de metade de seu comprimento pulverizadas com cola a uma taxa correspondente a cerca de 2 a 3% da massa seca das lascas. Essa concentração de resina, muito inferior àquela praticada no fabrico de painéis de aglomerado de partículas, é viável devido à remoção de poeira e finos das lascas antes da aplicação da resina, que podem ser: resina de fenol-formaldeído (PF), resina de ureia-formaldeído (MUF) ou isocianato (IS) fortificada com melamina. Com a mistura de lascas e cola, formam-se três camadas: as fibras das camadas externas são orientadas ao longo do comprimento da placa, enquanto que as fibras da camada interna são orientadas aleatoriamente, que são posteriormente comprimidas em processo termomecânico. Dessa maneira, a orientação das fibras é responsável pela distribuição da resistência, rigidez e capacidade de envergadura das placas, que são aproximadamente duas vezes mais fortes no comprimento do que na largura.

Este produto é indicado tanto para fins estruturais quanto não-estruturais devido aos valores de módulo de elasticidade e resistência à flexão que apresenta, garantindo boa estabilidade, resistência e fácil utilização à preços acessíveis. Sua resistência e bom comportamento à humidade tornam-no versátil,

permitindo seu uso em pavimentos independente da agressividade do meio e em estruturas pesadas de suporte à coberturas.

Com um acabamento rústico, o OSB é disponível em diversas dimensões e espessuras, sendo as mais comuns 1200 x 2400 mm² e 6 a 25 mm, respetivamente.

Na Europa, o OSB é regulado segundo a EN 300 (CEN, 2019), que estabelece requisitos para quatro classes do produto, três das quais para funções estruturais, cobrindo a aplicação em condições secas e húmidas. Os valores característicos para projeto são definidos pela EN 12369 (CEN, 2001) e a duração do fator de carga (k_{mod}) e fator de fluência (k_{def}) estão incluídos no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)).



Figura 2.10 – OSB
(New Nordic Timber, 2022)

f) Aglomerado de cimento

O aglomerado de cimento (Figura 2.11) é um produto de uso final especial, fabricado em quantidades comparativamente pequenas.

Composto por 70 a 75% em massa de cimento hidráulico e 25 a 30% de partículas semelhantes às usadas em painéis aglomerados, as placas de aglomerado de cimento têm densidade de cerca de 1000 a 1200 kg/m³, aproximadamente o dobro do contraplacado e cerca de 1,75 vezes a densidade do painel aglomerado padrão. Esse fato, inevitavelmente, impõe restrições ao seu uso em estruturas leves, mas, devido ao alto teor de cimento, é dimensionalmente mais estável, tem bom comportamento ao fogo, é altamente durável (pH elevado) e apresenta baixa transmissibilidade de sons aéreos (densidade elevada). Apesar do aglomerado de cimento poder ser produzido a partir de cimento Portland ou cimentos de magnésio, sua normativa europeia reguladora, EN 634 (CEN, 1995), cobre apenas placas aglomeradas de cimento Portland. Os valores característicos para projeto não estão disponíveis, mas podem ser derivados usando as EN 789 (CEN, 2004) e EN 1058 (CEN, 2009). A duração do fator de carga (k_{mod}) e

fator de fluência (k_{def}) também não estão disponíveis e devem ser determinados de acordo com EN 1156 (CEN, 2013).



Figura 2.11 – Aglomerado de cimento
(Topeca, s.d.)

II. Madeira laminada ou lamelada

Os produtos laminados ou lamelados consistem no corte da madeira em lâminas ou lamelas, que diferem segundo sua espessura, seguido de sua colagem em camadas sobrepostas. Este processo tem três atrativos principais (Dinwoodie, 2000):

- Os defeitos na peça original de madeira, como nós, rachaduras, madeira de reação ou veios inclinados, são redistribuídos aleatoriamente por todo o membro composto, tornando-o mais uniforme quando comparado à peça original de madeira, em que os defeitos costumam resultar em aumento de tensão quando sob carregamento. Conseqüentemente, a resistência e a rigidez do produto laminado são geralmente maiores do que as da madeira da qual foi feito;
- A capacidade de criar vigas curvas ou formas complexas;
- A capacidade de usar pedaços de madeira mais curtos unidos pelas suas extremidades.

A seguir, são descritos os principais produtos em madeira lamelada e laminada disponíveis no mercado atualmente.

a) CLT (*Cross Laminated Timber*)

O interesse pela madeira lamelada cruzada colada têm-se demonstrado forte e crescente nas últimas décadas, principalmente como elemento base para a superestrutura de edifícios de média elevação.

O CLT (Figura 2.12) é um desses produtos e é fabricado a partir de três a sete camadas sobrepostas de madeira de resinosas para aplicação estrutural (desde que em número ímpar de camadas, de modo a criar um eixo de simetria ao longo da camada central), com espessuras variando entre cerca de 17 e 38 mm, unidas longitudinalmente por *finger-joints*. As camadas são dispostas ortogonalmente umas às

outras de modo que o conjunto seja reforçado em ambas direções, permitindo-o atingir capacidades de resistência e rigidez mais elevadas, quer no plano, quer fora dele. Uma das principais inovações associadas ao CLT assenta na produção de elementos em painel, ao invés dos comuns elementos lineares (glulam), podendo servir como elementos de parede e laje. Os painéis, que podem ter formas planas ou curvas, apresentam densidade tipicamente em torno de 500 a 600 kg/m³.

Embora as lamelas possam ser unidas por fixadores mecânicos, a união por adesivos de melamina ureia-formaldeído (MUF) ou poliuretano (PUR) em linha de cola de cerca de 0,5 mm de espessura curada em vácuo ou prensas mecânicas resulta em um melhor comportamento de rigidez no plano e fora do plano. Entretanto, não é recomendado o uso destes produtos adesivados em ambientes úmidos, pelo que devem ser aplicados apenas em condições de classe de serviço 1 ou 2. Apesar disso, o CLT é considerado um material dimensionalmente estável, uma vez que o cruzamento das lamelas restringe os movimentos higroscópicos da madeira quando sujeita a variações do teor de água (menos de 1% na direção das fibras e 2% na direção perpendicular às fibras (Augustin, 2008).

As características mecânicas do CLT não obedecem, ainda, a uma standardização, mas há uma Aprovação Técnica Europeia (ETA-06/0138, 2017) específica para o produto, que consiste em uma apreciação técnica favorável da aptidão ao seu uso estabelecida com base nas exigências essenciais das obras de construção onde este seja incorporado.



Figura 2.12 – CLT
(New Nordic Timber, 2022)

b) Glulam (*Glued Laminated Lumber*)

A madeira lamelada colada (Figura 2.13), glulam, é o mais antigo dos produtos derivados da madeira e pode ser frequentemente encontrado na forma de grandes vigas curvas ou de seções variáveis em edifícios públicos e pavilhões desportivos.

No fabrico, lamelas de madeira com cerca de 19 a 50 mm de espessura têm suas faces revestidas com adesivo, que podem ser de resina de ureia-formaldeído (UF) para uso em condições secas e resina de

resorcinol-formaldeído (RF) para uso em condições húmidas, e são dispostas de modo que as fibras das lamelas fiquem paralelas entre si e ao eixo longitudinal da peça. As lamelas têm, normalmente, 1,5 a 5 m de comprimento, sendo ligadas por juntas dentadas aleatoriamente dispostas ao longo do eixo da peça, viabilizando a produção de peças em comprimentos quaisquer. O conjunto é prensado até que o adesivo de secagem a frio endureça totalmente, devendo-se ter em atenção o teor de água ideal das lamelas, de modo a evitar descolagens e fendas de secagem.

Normalmente, o esforço que condiciona o dimensionamento do glulam é o de flexão, cujos valores máximos são alcançados nas extremidades das seções. Para ultrapassar este limitante, podem ser usadas lamelas de resistências distintas, priorizando as de melhor qualidade para as posições extremas, resultando no glulam combinado. A combinação criteriosa de lamelas para obtenção da resistência desejada possibilita a utilização de madeiras mais fracas ou imperfeitas no centro da peça e, conseqüentemente, beneficia o melhor aproveitamento da matéria-prima.

O glulam é regulado segundo a EN 386 (CEN, 2001) e os valores característicos para projeto são prescritos pela EN 1194 (CEN, 1999), que define as propriedades características de resistência e rigidez com base na classe de resistência da madeira laminada de origem para quatro graus de resistência de cada tipo de cola. A duração do fator de carga (k_{mod}) e fator de fluência (k_{def}) estão incluídos no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)).



Figura 2.13 – Glulam
(New Nordic Timber, 2022)

c) LVL (*Laminated Vanner Lumber*)

A madeira microlaminada colada (Figura 2.14), LVL, é um dos três produtos conhecidos como madeira estrutural projetada: LVL, PSL e LSL.

O LVL é produzido a partir de lâminas com cerca de 3 mm de espessura, obtidas a partir do descascamento rotativo de troncos de madeira de resinosas aquecidos em água por 24 horas, e que, após secas, são revestidas com um adesivo em resina de fenol-formaldeído (PF) e unidas sob pressão

para produzir placas de até cerca de 20 m de comprimento, largura igual ao tapete de fabrico (cerca de 2 m) e espessuras entre 0,06 e 0,24 m (Ruske, 2004). Em seguida, as placas são cortadas em seções de tamanho estrutural.

Normalmente, as lâminas são dispostas de modo que suas fibras sejam paralelas entre si e à direção longitudinal do painel, conferindo propriedades anisotrópicas semelhantes à madeira maciça serrada. Contudo, certas classes de LVL orientam algumas de suas lâminas perpendicularmente, incrementando a resistência da placa nessa direção. Sua alta confiabilidade e baixa variabilidade conferem grande resistência à tração, compressão, flexão, corte, além de elevado módulo de elasticidade.

O LVL é regulamentado pela EN 14279 (CEN, 2004), que estabelece três tipos de LVL a depender da classe de ligação entre lâminas: para uso em condições secas, húmidas ou externas.



Figura 2.14 – LVL
(New Nordic Timber, 2022)

d) PSL (*Parallel Strand Lumber*)

O PSL (Figura 2.15) é fabricado a partir dos mesmos elementos que o LVL, diferenciando-se, apenas, do local de extração de suas lâminas: o PSL aproveita as folhas exteriores dos troncos, que são desprezadas para o fabrico de LVL devido à irregularidade de suas dimensões.

Utiliza-se originalmente abeto ou pinho e o processo de cura do adesivo se dá por meio de micro-ondas.



Figura 2.15 – PSL
(New Nordic Timber, 2022)

e) LSL (*Laminated Strand Lumber*)

O LSL (Figura 2.16) é fabricado a partir dos mesmos elementos que o LVL, laminados originalmente de troncos de Aspen e revestidos com resina de isocianato (IS). No LSL, as lâminas são alinhadas paralelamente umas às outras e pressionadas por injeção de vapor, de maneira a atingir-se a espessura requerida para a seção estrutural.



Figura 2.16 – LSL
(New Nordic Timber, 2022)

f) Scrimber

Para o fabrico deste produto, de origem australiana, o bambu é esmagado por rolos de aço até que se converta em uma rede fibrosa, que posteriormente é seca, revestida com resina de fenol-formaldeído (PF) e prensado em folhas grossas que, após cortadas, formam ripas (Figura 2.17).



Figura 2.17 – Scrimber
(Timber Structures 3.0 AG, s.d.)

g) Vigas em I

Usadas frequentemente em vigamentos de pisos para superar grandes vãos, as vigas em I (Figura 2.18) são fabricadas a partir de banzos em madeira maciça ou LVL e alma em OSB, contraplacado ou painel de fibras de alta densidade (aglomerado de fibras de madeira dura), que absorvem esforços de flexão e corte, respetivamente.

A capacidade de superar grandes vãos é possível devido à sua geometria, que concentra a madeira nas regiões ultraperiféricas da seção, onde são denotados os esforços máximos. Em decorrência disso, são económicas, leves e facilmente manipuláveis. Ademais, apresentam maior estabilidade dimensional, resistência e rigidez que seções de madeira maciça de dimensões comparáveis, porém são frágeis ao corte e instáveis à encurvadura, aconselhando-se o uso de contraventamentos que impeçam a deformação lateral.



Figura 2.18 – Vigas em I
(MetsäWood, 2022)

2.5. Tipos de construção em madeira

São três os métodos construtivos em madeira, que podem ser usados isoladamente ou em associação uns aos outros (Figura 2.19):



Figura 2.19 – Exemplos de construções em madeira. (a) Sistema viga-pilar; (b) Sistema em painéis massivos; (c) Sistema em *timber-frame*; (d) Sistema em *timber-frame* em associação ao sistema de painéis massivos
(Getty Images, s.d.)

- Sistema viga-pilar, que forma um conjunto rígido e autoportante de pórticos independente dos revestimentos;
- Sistema em painéis massivos, como o CLT, utilizados em paredes, pisos, coberturas, divisórias e núcleos para uma estrutura homogênea;
- Sistema *timber-frame*, composto por um esqueleto de montantes e travessas cujo contraventamento é feito a partir de placas estruturais delgadas derivadas da madeira, como LVL, OSB ou MDF.

O sistema viga-pilar é aquele que oferece maior flexibilidade arquitetônica, uma vez que os componentes de enchimento dos elementos construtivos do sistema não desempenham função estrutural e tem potencial para vencer grandes vãos. Já os sistemas em painéis massivos e em *timber-frame*, nos quais todo o alinhamento das paredes contribui para a resistência aos esforços, implicam em áreas mais compartimentadas e inflexíveis conforme o arranjo estrutural projetado.

Os conceitos modulares e o grau de pré-fabricação podem variar para cada sistema. Em termos de geometria, os componentes podem ser tipificados como lineares ou planos, ambos caracterizados principalmente em duas dimensões, ou volumétricos, com uma terceira dimensão significativa (Figura 2.20) (Carvalho *et al.*, 2020).

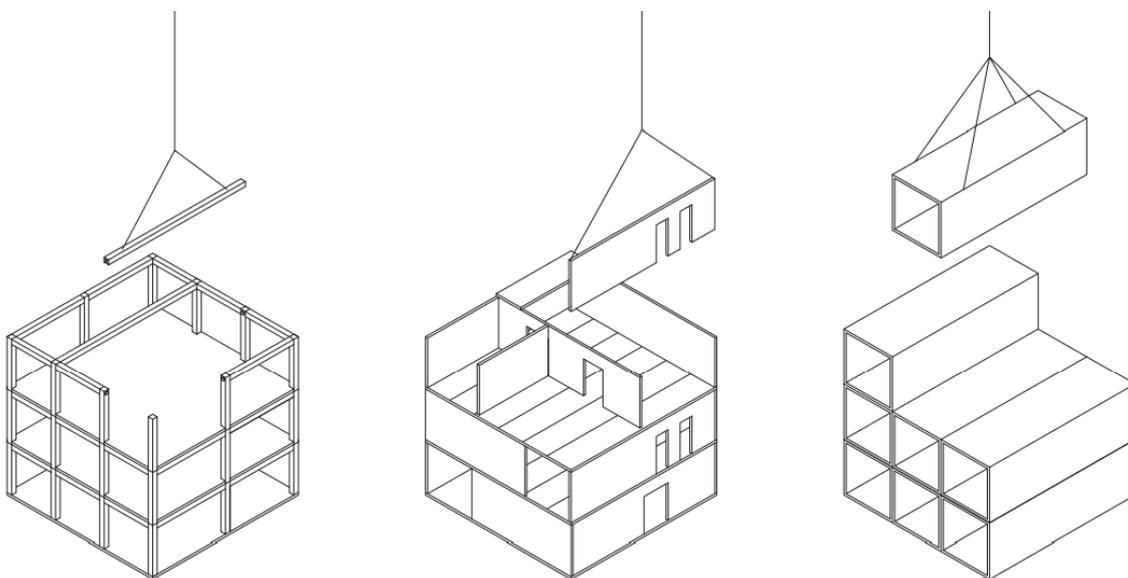


Figura 2.20 – Tipos de modularidades para os sistemas construtivos em madeira
Adaptado de Carvalho *et al.* (2020)

Os componentes mais simples, na forma de elementos lineares de vigas ou pilares, podem ser elaborados em madeira ou madeira laminada e sair da fábrica com juntas pré-furadas, rabos de andorinha, cavilhas ou conectores metálicos (Carvalho *et al.*, 2020).

Os componentes planos, que formam paredes, pavimentos ou coberturas, sejam eles em *timber-frame* ou painéis massivos, são normalmente personalizados para atender às especificações e requisitos aos quais submetem-se e podem ser elaborados em níveis de pré-fabricação variados: podem já contar com as camadas funcionais e de acabamento; com cortes e orifícios feitos para a passagem de tubos e fiação, ou mesmo as infraestruturas já instaladas; entalhes para a junção de elementos e conectores estruturais; portas e janelas; entre outros (Carvalho *et al.*, 2020).

Finalmente, os componentes volumétricos corresponde às unidades 3D, ou seja, grandes unidades estruturais semi-independentes formadas pelos elementos lineares ou planos anteriormente expostos que podem formar cômodos individuais ou um conjunto deles, Neste caso, o grau de pré-fabricação varia em função da complexidade do sistema de montagem, desde uma estrutura bruta até uma totalmente estanque e equipada com infraestruturas e mobiliário (Carvalho *et al.*, 2020). São eficazes e adequados para unidades repetitivas, por exemplo, hotéis, tornando-se economicamente viáveis apenas sob esta condição. Não são comuns para habitações devido à desejada variabilidade arquitetônica, requerendo um grande número de unidades repetidas para que o elevado custo inicial seja absorvido. Os módulos de casa de banho, entretanto, favorecem o uso generalizado na indústria da construção em estruturas de madeira a partir de sua fácil padronização (TRADA, 2008).

O transporte dos componentes pode ser um dos principais direcionadores para o seu dimensionamento e sistematização, diretamente relacionado ao transporte de cargas admissível nas rodovias. O trabalho poupado em estaleiro é quase inversamente proporcional ao planeamento e logística envolvidos (Carvalho *et al.*, 2020).

O sistema de construção para edifícios em madeira mais difundido é em painéis. Os painéis podem ser de tamanhos variados: em unidades com dimensões inferiores ao comprimento total da parede, que não requerem mecanização pesada, ou de parede inteira, que requerem mecanização pesada para transporte e montagem (Švajlenka e Kozlovská, 2020). Os edifícios em utilização de sistemas de painéis podem ser erguidos segundo duas modalidades: plataforma ou balão.

Na modalidade de plataforma (Figura 2.21), cada andar do edifício é emoldurado por painéis que vão do chão ao teto e a laje, repousada sobre as paredes, torna-se a plataforma de ereção do andar seguinte.

Na modalidade de balão (Figura 2.22), os painéis de parede externas vão do nível do chão de um andar ao nível do chão do andar superior e os elementos de pisos intermediários têm suas bordas presas lateralmente ao interior dos painéis de parede. Predominantemente usado para o sistema em *timber-frame*, este método permite que o isolamento e a camada de controle de vapor sejam contínuos ao longo da face da parede externa.

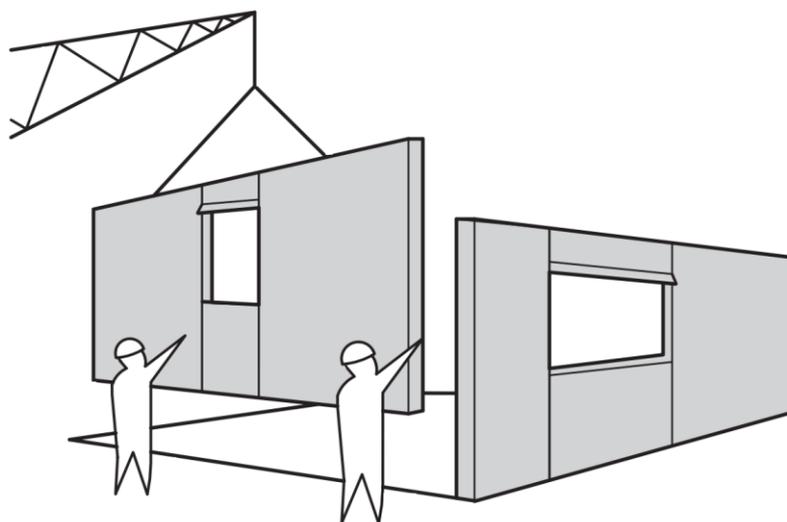


Figura 2.21 – Construção em plataforma
Adaptado de TRADA (2008)

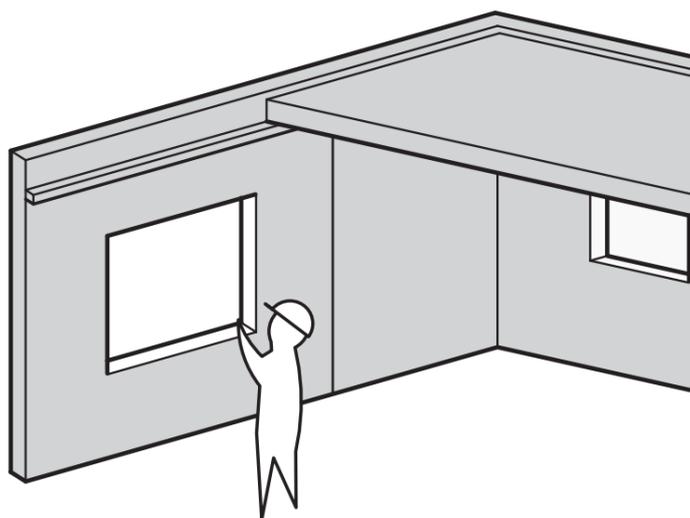


Figura 2.22 – Construção em balão
Adaptado de TRADA (2008)

Com a nova tendência à construção de edifícios em madeira cada vez mais altos, diversos estudos e projetos recorrem ao uso da madeira em associação aos materiais de construção convencionais, de modo a aproveitar as potencialidades estruturais específicas a cada material. Em um artigo publicado pela *American Society of Civil Engineers* (ASCE), Foster *et al.* (2016) analisaram exemplos modernos de edifícios em altura para identificar principais estratégias estruturais empregadas em edifícios mistos. Os resultados são apresentados na Figura 2.23.

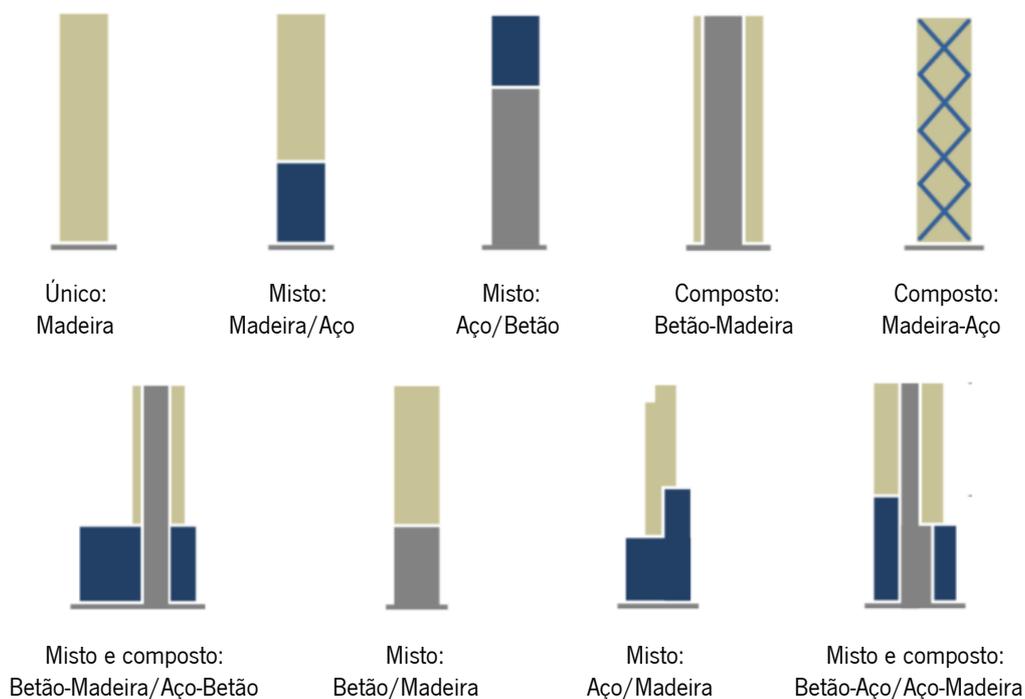


Figura 2.23 – Principais estratégias estruturais empregadas em edifícios mistos
Adaptado de Foster *et al.* (2016)

Na Europa, a estrutura em painéis CLT foi a mais difundida no início da era de edifícios em altura em madeira por mostrar-se muito eficiente financeiramente em certos contextos e geografias para a construção de edifícios de até cerca de 10 andares (Kuilen *et al.*, 2011). Apesar da positiva realidade europeia, nos Estados Unidos, Canadá e Austrália a disponibilidade limitada de CLT nos mercados nacionais foi vista como uma barreira importante. O CLT para fins estruturais demorou a ser produzido comercialmente nesses países, implicando na necessidade de importação e, conseqüentemente, em custos extras de transporte e na resistência ao seu uso (Mallo e Espinoza, 2014). No entanto, graças à crescente experiência na área e aos novos avanços em termos de design estrutural, os limites foram alargados (Green e Karsch, 2012).

A fim de determinar as tendências emergentes ao longo do tempo, Kuzmanovska *et al.* (2018) analisaram 46 projetos de edifícios em madeira, com datas de fim de construção variando entre 2009 e 2020. Os edifícios foram agrupados em quatro categorias: G1 (2009 – 2013), G2 (2014 – 2016), G3 (2017 – 2018) e G4 (finalizados até 2020). O G1 é estabelecido pelo período entre o surgimento do primeiro edifício alto de madeira em 2009 e o lançamento dos primeiros Manuais CLT dos EUA e Canadá, quando foram projetados os edifícios pioneiros que ajudaram a estabelecer um contexto global para estruturas de madeira e técnicas de construção. O G2 e o G3 foram definidos pelas ondas de projetos sucessores que beneficiaram-se dos aprendizados de seus predecessores, como em 2017 houve um aumento no número de projetos concluídos, dedicou-se um grupo (G3) para este período específico. E o G4 contém

os projetos incompletos na altura da pesquisa desenvolvida.

Concluiu-se que a altura média de edifícios em madeira está aumentando ao longo das gerações e que sua tipologia de uso tem-se afastado daquela puramente habitacional, tendendo aos usos mistos (instalações comerciais nos pisos inferiores).

Desde 2009, houve uma mudança clara na estratégia estrutural dominante dos edifícios em madeira. Embora os sistemas de laje e parede de suporte em CLT sejam mais comuns no G1, o G4 apresenta, principalmente, estruturas de vigas e postes, muitas vezes combinadas com lajes em CLT. Como as tipologias habitacional e mista são as mais comuns em todas os quatro grupos, essa mudança na estratégia estrutural pode ser justamente atribuída aos desafios em aumentar a altura dos edifícios, em vez das implicações espaciais dos usos a que se destinam.

A execução de um núcleo em betão aumentou ao longo das gerações, o que sugere um movimento em direção aos sistemas híbridos à medida que a tecnologia evolui. Esse fato pode ser motivado pela tendência crescente ao uso de estratégias viga-poste (que requerem um núcleo com massa elevada) ou pelo aumento na altura da construção. Ainda, observou-se a tendência à execução da estrutura do rés do chão em paredes maciças de betão, o que não foi correlacionando com o desejo por alturas maiores ou pela tipologia da superestrutura em madeira.

Em termos estéticos, observou-se a frequência na utilização de tetos de madeira (nem sempre em CLT expostos, às vezes em ripas ou placas de madeira, potencialmente devido aos códigos locais de proteção ao fogo). Isso pode representar a crescente aceitação do material.

O estudo também identifica o declínio na utilização das paredes externas para suporte de cargas. Com o aumento da altura dos edifícios, sistemas altamente industrializados para as fachadas são requeridos, resultando em desempenhos elevados quanto à instalação e segurança.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DE CONCEÇÃO DO SISTEMA CONSTRUTIVO

Este capítulo destina-se ao estudo das condições e premissas cabíveis à conceção do sistema em painéis pré-fabricados de madeira para construção de edifícios multifamiliares em altura em Portugal.

Para o efeito, são identificadas as restrições impostas aos projetos baseados em painéis pré-fabricados em madeira em função das condições de fabricação, transporte e construção no cenário nacional Português.

Adicionalmente, são detalhadas as estratégias de conceção de estruturas em madeira, destacando-se os critérios, exigências e boas-práticas de projeto que contribuem para a durabilidade e salvaguarda do bom desempenho das estruturas durante a sua vida útil.

Por último, são descritos os requisitos para os projetos térmico, acústico, de segurança ao fogo e estrutural, bem como os métodos adequados para previsão do desempenho dos painéis pré-fabricados de madeira nos referidos quesitos.

3.1. Restrições de conceção

A conceção de um sistema construtivo baseado em painéis pré-fabricados de madeira submete-se às restrições estabelecidas segundo os regulamentos normativos vigentes, bem como as condições de produção, transporte e construção.

Estas limitações impõem-se, sobretudo, devido à unidade básica estrutural definida em painéis, que, a depender das dimensões da obra de aplicação, podem extrapolar as delimitações das condições normais. Faz-se necessário, portanto, a devida atenção aos limites expostos adiante aquando da elaboração dos projetos em uso do sistema em painéis pré-fabricados de madeira, evitando-se, assim, constrangimentos associados à recusa de projeto, incapacidade de transporte ou aplicação em obra e retrabalho.

i. Restrições normativas

As estruturas de madeira em Portugal devem satisfazer ao Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)), que descreve os requisitos para sua segurança, manutenção e durabilidade e baseia-se no conceito de estado limite aplicado através do método de fator parcial.

Em conformidade com os princípios de segurança e operacionalidade das estruturas, o Eurocódigo 5

(EN 1995-1-1 (CEN, 2004)) aplica-se ao projeto de edifícios e obras de engenharia civil em madeira (madeira maciça, serrada, aplainada ou rolada, madeira lamelada colada ou produtos estruturais derivados da madeira como, por exemplo, LVL) ou painéis à base de madeira unidos com adesivos ou ligações mecânica.

O Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)) engloba aspetos relativos à resistência mecânica e estabilidade, segurança ao fogo, aptidão ao uso/segurança na utilização e durabilidade das estruturas de madeira, isentando-se dos aspetos construtivos, resistência aos sismos e isolamento térmico e acústico. Entretanto, há um vasto conjunto de normas europeias que abordam a utilização da madeira enquanto material de construção e complementam-no. Cita-se, por exemplo, a EN 338 (CEN, 2016), que elenca as propriedades mecânicas das classes de resistência para a madeira maciça e as diversas normas específicas a cada um dos produtos derivados da madeira, referidas no item 2.4.1 deste documento.

O Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)) deve ser aplicado em associação ao Eurocódigo 0 (EN 1990 (CEN, 2002)), a base do projeto que indica os requisitos para a segurança estrutural, e o Eurocódigo 1 (EN 1991 (CEN, 2002)), respetivo às ações aplicadas nas estruturas.

Para o desempenho térmico e acústico dos painéis destinados à construção de edifícios multifamiliares, impõe-se as restrições e requisitos descritos no REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 07 de dezembro) e no RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (Decreto-Lei n.º 129/2002, de 11 de maio), respetivamente. Quando aos requisitos de projeto de segurança ao fogo, estes são definidos pelos Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro, e Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro.

Ainda, importa referir que não há restrições nacionais limitantes ao número máximo de pisos de edifícios em madeira.

ii. Restrições de produção

As condições da fase de produção dos painéis, nomeadamente os recursos humanos e tecnológicos disponíveis, impõem restrições no que diz respeito à agilidade da produção e à dimensões dos painéis. Em Portugal, as empresas que dispõem de equipamentos CNC limitam-se a mecanizar elementos de dimensões iguais ou inferiores àquela comportada pelo seu equipamento, geralmente equivalentes à 1,25 metros de largura e 13,5 metros de comprimento.

Para além da limitação imposta aos elementos mecanizados, há ainda produtos derivados da madeira que podem compor os painéis e que, entretanto, apresentam dimensões standard de comercialização.

Estas dimensões devem ser consideradas na fase de pormenorização dos painéis individuais e definição de juntas, de forma a promover dimensões múltiplas que requeiram o mínimo de cortes e, por conseguinte, desperdícios.

iii. Restrições de transporte

As restrições impostas pelas condições de transporte referem-se tanto às legislações vigentes para circulação segura no tráfego nacional como à tipologia do veículo disponível para o transporte.

Segundo o Decreto-Lei n.º 132/2017, de 11 de outubro, do Planeamento e das Infraestruturas, que fixa as dimensões e pesos máximos autorizados para os veículos em deslocação, e desconsiderando a utilização de transportes especiais, os painéis devem apresentar os seguintes valores máximos (Figura 3.1):

- Comprimento: 13,60 metros;
- Largura: 2,45 – 2,48 metros;
- Altura: 2,50 – 3,00 metros;
- Peso da carga: 24 – 25,5 toneladas.

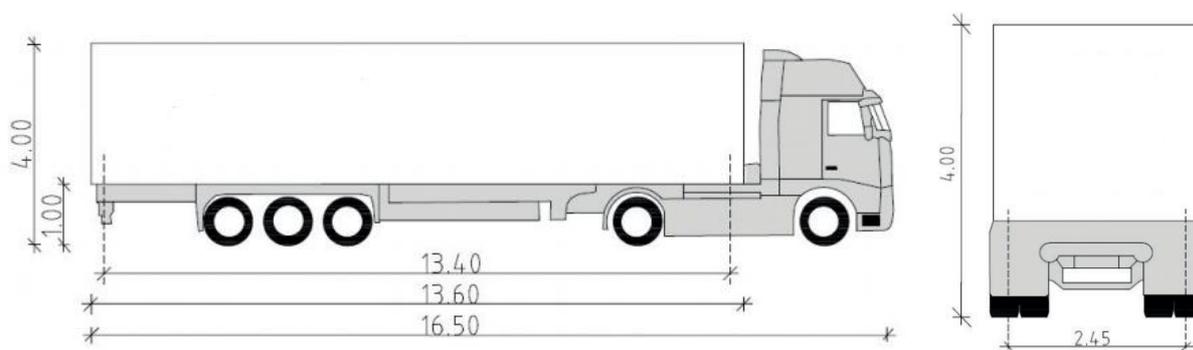


Figura 3.1 – Dimensões do camião lona padrão para transporte dos elementos em painéis pré-fabricados
Adaptado de Binderholz (s.d.)

iv. Restrições de construção

Em Portugal, não há regulamentos normativos que abriguem aspetos construtivos de edifícios em madeira.

Assim, as limitações construtivas definem-se segundo as condições de contorno da obra, a referir:

- A localização do estaleiro e o respetivo Regulamento Municipal de Urbanização e Edificação;
- A área útil e de manobra do estaleiro e seus acessos;
- Os meios de descarga em obra;
- A capacidade/amplitude permitida dos equipamentos disponíveis, como, por exemplo, guas.

3.2. Estratégias prescritivas de concepção do sistema construtivo

Aquando da concepção de um sistema construtivo, o estudo e aplicação de estratégias consolidadas têm papel decisivo na garantia do seu adequado desempenho, principalmente quando se trata de estruturas em madeira. Tais estratégias têm potencial de assegurar, por exemplo, a durabilidade da construção, um dos temas de maior desconfiança no que concerne o uso da madeira.

A seguir, são extensivamente detalhadas as estratégias e boas-práticas de concepção específicas à construção em madeira identificadas na literatura, especialmente em TRADA (2008), para cada um dos elementos construtivos desenvolvidos em painéis pré-fabricados no âmbito deste trabalho.

Para tanto, a depender do elemento construtivo, são definidas suas camadas indispensáveis com as respectivas funções de projeto e pormenorizações de aplicação, ou tratados os pontos sensíveis do desempenho de cada um destes elementos quando em fase de utilização.

3.2.1. Paredes

3.2.1.1. Paredes externas

As paredes externas, sejam de fachada, sejam divisórias entre edifícios distintos, têm função estrutural e protetiva, sendo responsáveis pela transmissão dos esforços verticais e laterais à fundação e pela formação de um invólucro contra os efeitos inerentes às condições de temperatura, humidade e vento do ambiente externo.

Isso requer características notáveis que assegurem a durabilidade prospectada e o elevado desempenho durante a vida útil do edifício, condicionados pela estanqueidade ao ar e água e ao nível de isolamento do elemento.

A seguir, são elencados os componentes imprescindíveis às paredes externas que, desde que projetados e executados conforme as prescrições, desempenham as funções necessárias para promover a aptidão do conjunto.

3.2.1.1.1. Estrutura

A estrutura das paredes externas em *timber-frame* é composta por uma malha de elementos esbeltos de madeira posicionados verticalmente (montantes) e horizontalmente (banzos) (Figura 3.2).

Os montantes, responsáveis pelo suporte do carregamento vertical imposto à parede, também contribuem para resistir às cargas laterais (flexão) e fornecem estrutura para a afixação das placas de fecho e revestimento das paredes. Estes elementos geralmente têm seção cuja base varia entre 30 mm e 45 mm e a altura entre 140 mm e 170 mm, contudo, devido à recente busca pela eficiência energética,

é comum o aumento da altura dos montantes para 200 mm ou 220 mm, de maneira a aumentar a espessura da camada de isolamento incorporado. Para seções superiores, o uso da madeira maciça é improvável, pelo que são considerados os produtos estruturais à base de madeira. Nestes casos, sistemas em montantes compostos formados pela associação de elementos sólidos de menores dimensões podem ser mais económicos.

Estes montantes são usualmente dispostos a uma distância entre si de 400 a 600 mm, a depender da capacidade de carga exigida à parede. Em edifícios em altura, devido ao aumento das cargas, pode-se, alternativamente ao aumento da seção transversal, reduzir a distância entre montantes ou usá-los em sequências de múltiplos montantes justapostos nos pisos inferiores mais solicitados. As implicações destas medidas no desempenho térmico da parede devem, entretanto, ser apuradas.

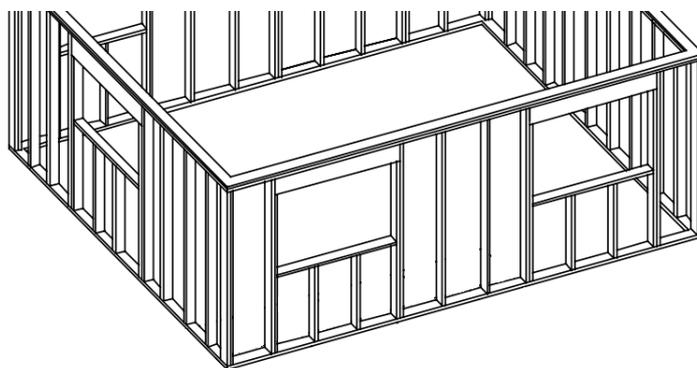


Figura 3.2 – Estrutura em *timber-frame*
Adaptado de TRADA (2008)

Os banzos inferiores e superiores, que unem a estrutura da parede e fornecem as fixações necessárias para as placas de fecho e revestimento, geralmente apresentam a mesma seção que os montantes e são ligados a eles a partir de dois pregos em cada encontro (Figura 3.3a).

É possível a utilização de um único banzo superior, contudo, esta opção é frágil à flexão e ao corte face a cargas concentradas verticais, principalmente aquelas desalinhas aos eixos dos montantes. A utilização de dois banzos superiores pode contornar este problema conferindo rigidez e possibilitando, em determinados cenários de cargas leves, a aplicação de cargas concentradas no vão entre montantes. Entretanto, é indispensável o desenvolvimento de cálculos que determinem a capacidade dos banzos combinados em transmitir os esforços aos montantes adjacentes ou a necessidade de montantes adicionais para suporte das cargas verticais provenientes de vigas transversais.

Mesmo para soluções estruturais que dispensem a utilização de vigas de pavimento, a adoção do segundo banzo superior tem benefícios expressivos. Com a função de unir toda a estrutura, ele é alocado em obra sobrepondo-se às juntas de ligação dos painéis pré-fabricados e, por conseguinte, alivia a concentração de tensões nestas zonas (Figura 3.3b).

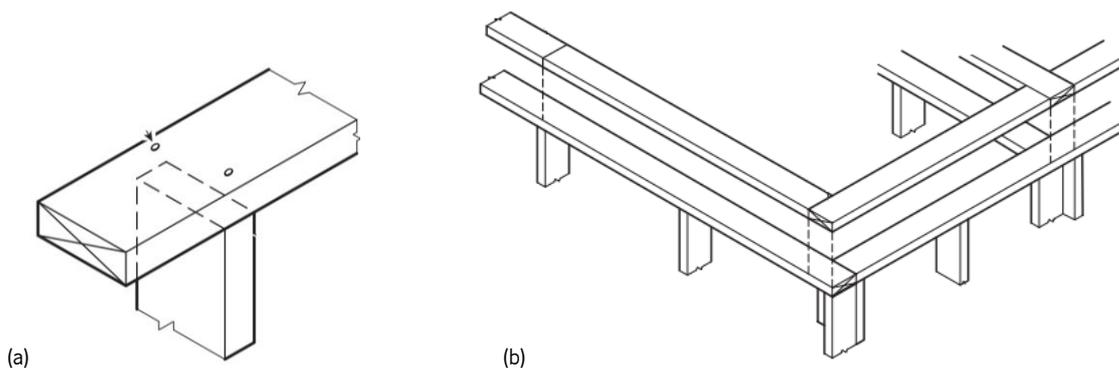


Figura 3.3 – (a) Ligação entre os banzos e os montantes; (b) Banzo superior alocado em obra sobrepondo-se às juntas de ligação dos painéis pré-fabricados

Adaptado de TRADA (2008)

Além dos banzos, a estrutura das paredes externas pode contar com outro elemento horizontal: os elementos de travamento (Figura 3.4). Estes elementos de seção igual aos montantes e banzos utilizados, apesar do inconveniente de interromperem a continuidade das eventuais camadas para isolamento térmico e acústico no interior da cavidade da parede, o que ocasiona pontes térmicas e aumenta o tempo necessário para alocação do isolamento ao redor deles, limitam as deformações laterais dos montantes quando sob cargas acentuadas e podem fornecer suporte às paredes internas em um encontro tipo “T” com as paredes externas. Além disso, podem funcionar como pontos de afiação de acessórios, como tomadas, quando estes ocorrem distantes dos montantes e de placas de fecho e revestimento das paredes. Portanto, apesar de ser comumente alocado na altura média dos montantes em um eixo contínuo por toda dimensão longitudinal da parede, convém distribuir os elementos de travamento alternadamente em dois alinhamentos de alturas distintas, de maneira a calhar com as dimensões das placas de fecho e revestimento fornecidas para produção dos painéis pré-fabricados.

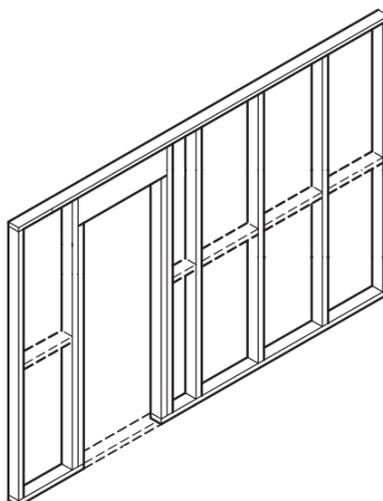


Figura 3.4 – *Timber-frame* com elementos de travamento

Adaptado de TRADA (2008)

3.2.1.1.2. Fechos exterior e interior

O fecho dos painéis é responsável por fornecer a rigidez necessária ao suporte das cargas laterais segundo sua resistência ao corte no plano (Figura 3.5).

Em termos de proteção, o fecho exterior, especialmente, contribui para a vedação contra a penetração do ar na estrutura e atua na proteção secundária contra humidade caso os revestimentos externos sejam aplicados em tempos desfasados. Além disso, ambos fornecem uma base sólida para fixação de membranas e acessórios, como calhas e tomadas, envolvem e suportam o material de isolamento e reduzem o risco de danos ou distorção dos painéis antes da sua afixação, principalmente nas etapas que requerem manuseio, como transporte e instalação. Apesar disso, é comum que os painéis pré-fabricados saiam de fábrica apenas com o fecho exterior instalado, mantendo, assim, o interior dos painéis acessível em obra para serviços como a passagem e afixação de tubagens e aperto de conectores.

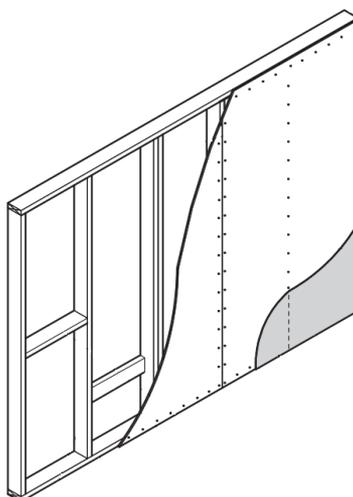


Figura 3.5 – Fecho do *timber-frame*
Adaptado de TRADA (2008)

O material de escolha do fecho das paredes externas, que, a depender, pode contribuir para o isolamento térmico do edifício, comumente resume-se às placas OSB (entre 8 e 11 mm de espessura), contraplacado (~ 9,5 cm de espessura), aglomerado de fibras de média densidade (tipos MBH.HLS1 ou MBH.HLS2) e aglomerado de partículas impregnado (tipo SB.HLS, com ~ 12 cm de espessura). Outros produtos derivados da madeira, entretanto, também são utilizados, como aglomerado de fibras de madeira dura temperado (tipos HB.HLA2 ou HB.HLA1) e painéis de partículas aglomeradas com cimento. Em edifícios em altura, devido à maior incidência e velocidade dos ventos, podem ser requeridas espessuras superiores para os elementos de fecho.

A escolha do material deve basear-se em critérios de desempenho como a rigidez no plano, resistência ao vapor significativamente inferior que a resistência combinada do fecho interno e barreira para-vapor

(um fator de 1 a 5 é considerado aceitável), durabilidade, resistência a danos por impacto no transporte e instalação, resistência a danos por molhagem e penetração da chuva durante a instalação dos painéis, tamanhos de folha adequados e facilidade ao corte e fixação.

O aglomerado de partículas impregnado, apesar de apresentar baixa resistência ao impacto e rigidez no plano comparativamente com o OSB e contraplacado, tem melhor desempenho térmico e é geralmente mais permeável ao vapor (TRADA, 2008). Contudo, devem ser tomados cuidados para garantir a conformidade com os regulamentos de segurança ao fogo e, quando pulverizado com betume também nas superfícies, a resistência ao vapor aumenta significativamente. Já o aglomerado de fibras de madeira dura temperado e o aglomerado de fibras de média densidade, que também apresentam permeabilidade ao vapor inferior quando comparado com o OSB e contraplacado, garantem boa resistência impacto e rigidez no plano.

As placas OSB, contraplacado, aglomerado de fibras de média densidade e aglomerado de fibras de madeira dura são normalmente fixadas à estrutura por pregos de aproximadamente 50 mm resistentes à corrosão dispostos a cada 150 mm nos montantes que coincidem com suas extremidades e a cada 300 mm nos montantes intermediários. Já as placas de aglomerado de partículas impregnado requerem espaçamento de cerca de 75 mm no perímetro e de 150 mm no centro. Apesar de estes serem valores frequentemente praticados, não dispensam a determinação por cálculo ou ensaio.

3.2.1.1.3. Membrana respirável

A membrana respirável tem a função de proteger o edifício das intempéries, principalmente quando o revestimento exterior é alocado após a instalação dos painéis em obra, e oferece uma segunda camada protetora contra chuvas que possam penetrar no revestimento exterior durante a vida útil do edifício. Contribui ainda para a vedação ao ar e, conseqüentemente, para a redução das perdas de calor através da ventilação descontrolada. Para tanto, é necessário que combinem um alto grau de resistência à água e humidade e baixa resistência ao vapor ($< 0,6$ MNs/g). Painéis como o aglomerado de partículas impregnado e alguns painéis aglomerados de fibras de média densidade não necessitam de membranas respiráveis, exceto em zonas de alta exposição.

Quando afixada aos painéis ainda em fábrica com as sobras necessárias para cobrir as juntas pelo encontro de painéis, a membrana respirável proporciona uma proteção importante durante o transporte, armazenamento e instalação dos painéis. As sobras horizontais devem ter, no mínimo, 100 mm, enquanto as verticais, 150 mm (Figura 3.6a). No nível do frechal, devem ter 25 mm e, no nível das vergas das aberturas, devem se estender contornando a caixilharia (Figura 3.6b).

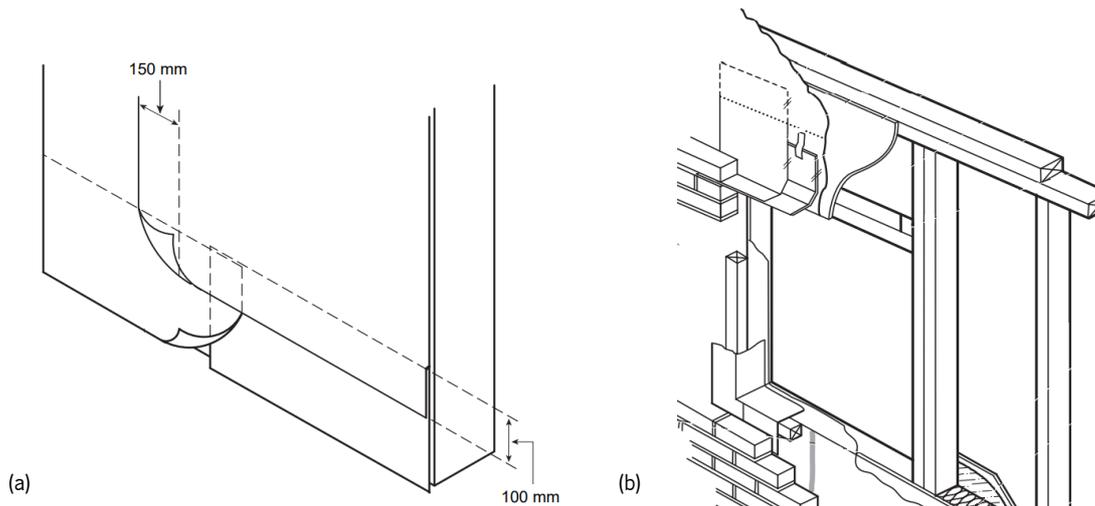


Figura 3.6 – (a) Sobras mínimas para a sobreposição de membranas ou nas extremidades dos painéis; (b) Membrana contornando a caixilharia das aberturas de fachada
Adaptado de TRADA (2008)

A fixação das membranas respiráveis é feita com grampos de aço inoxidável espaçados de 150 mm em todo o perímetro dos painéis, das aberturas e ao longo das juntas entre membranas, ou de acordo com as especificações do fabricante. Uma fita de reforço é comumente aplicada, aumentando a fixação e identificando a posição dos montantes, facilitando a posterior alocação de ripas para suporte do revestimento exterior.

3.2.1.1.4. Isolamento térmico

Em paredes convencionais de estrutura de madeira, a espessura máxima da camada de isolamento é controlada pelas dimensões dos montantes (Figura 3.7).

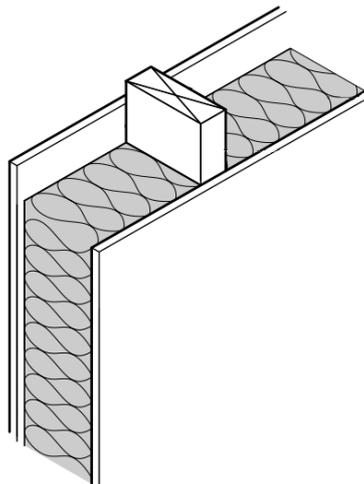
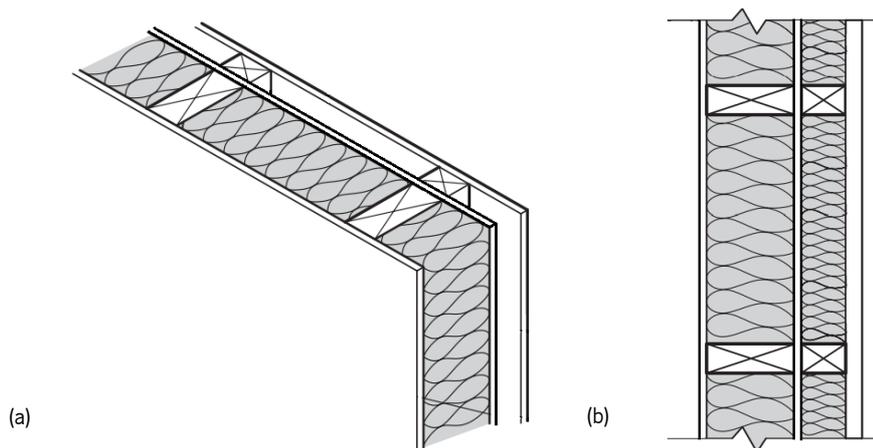


Figura 3.7 – Camada de isolamento no interior do *timber-frame*
Adaptado de TRADA (2008)

Quando se pretende aumentar o isolamento para além dessa dimensão (altura do montante), aumenta-se a altura da seção transversal dos montantes ou recorre-se à colocação de camadas extras, quer pelo

interior, quer pelo exterior. Uma solução é a utilização de camadas de serviço pelo interior (camada de revestimento afastada da camada de fecho da estrutura da parede) (Figura 3.8) que, para além de sua função original de abrigar os sistemas prediais (fiações e tubagens), pode ser preenchida com material isolante, aumentando, assim, o nível de isolamento do conjunto e criando uma camada de isolamento contínua, ultrapassando as eventuais pontes térmicas ocasionadas pelas interrupções na camada de isolamento da cavidade da parede devido aos montantes e elementos de travamento (a proporção de isolamento dentro da camada de controle de vapor em relação ao exterior deve ser de, no mínimo, 1:4).



Adaptado de TRADA (2008)

De modo a reduzir as pontes térmicas, deve-se atentar para o devido preenchimento de todos os vazios no interior da cavidade da parede, especialmente quando se tratam de soluções de isolamento em painéis rígidos, que requerem cortes.

Apesar da grande variedade de soluções em isolamento, as lãs minerais, de vidro ou rocha, na forma de mantas semirrígidas e ajustadas por fricção são as principais eleitas para o preenchimento da cavidade da parede ou para a camada contínua pelo interior. Já para o exterior, utiliza-se frequentemente o poliestireno extrudido (XPS) ou expandido (EPS) na configuração do sistema ETICS.

Embora o isolamento seja incorporado para fins de conforto térmico, principalmente para reduzir as perdas de calor, quando feito de materiais absorventes, contribui para o isolamento aos sons de condução aérea e para a resistência ao fogo das camadas externas.

3.2.1.1.5. Barreira para-vapor

As temperaturas superficiais abaixo do ponto de orvalho implicam em condensações e, a longo prazo, no surgimento de mofo nos revestimentos internos e humidade prejudicial na estrutura, que causa variações dimensionais (deformações e aparecimento/desenvolvimento de fendas) e é fator condicionante para a ativação do processo de degradação biológica da madeira (fungos, bolores e

insetos).

Para evitar estes efeitos, a barreira para-vapor é fixada entre a superfície do fecho interno e o lado aquecido do isolamento térmico (Figura 3.9) para controlar a quantidade de vapor de água que passa através da placa de fecho devido aos diferentes níveis de pressão de vapor interna e externa. Em geral, as condensações poderão ser evitadas quando as resistências ao vapor dos materiais no lado aquecido do isolamento forem, pelo menos, cinco vezes maiores do que as do lado frio.

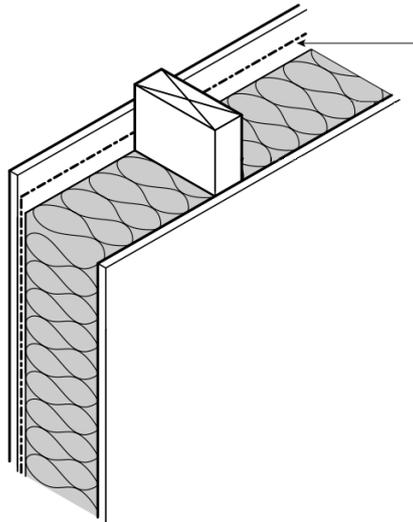


Figura 3.9 – Barreira para-vapor no interior do *timber-frame*
Adaptado de TRADA (2008)

Ela pode ser uma membrana única, como folha de polietileno de 125 microns, ou combinada com o revestimento interno da parede, como placa de gesso com controle de vapor (filme de poliéster metalizado colado na face posterior da placa). Ainda, quando da utilização de painéis aglomerados de fibras de baixa densidade impregnados, alguns painéis aglomerados de fibras de média densidade e gesso cartonado resistente à humidade que sejam inerentemente resistentes às intempéries e humidade, pode ser possível a desobrigação do uso da barreira para-vapor, embora fitas/vedações aprovadas e com pormenorização eficaz sejam necessárias.

Em membrana única, as barreiras para-vapor devem sobrepor-se em, aproximadamente, 100 mm, e as juntas devem ocorrer, idealmente, sobre os montantes, banzos e elementos de travamento para facilitar a fixação. Caso isso não seja possível, as juntas devem ser coladas ou seladas. Nas paredes externas, devem ser cuidadosamente cortadas e embutidas às caixilharias das portas e janelas e, ainda, recomenda-se que sobreponham as barreiras de humidade do rés do chão, que contornem vigas ou painéis de pavimento de modo a formarem uma camada contínua entre pisos e sejam dobradas e estendidas na cobertura em 100 mm (Figura 3.10). Onde paredes internas confinam com paredes externas e obstruem a continuidade da barreira para-vapor, uma camada de 500 mm de largura pode

ser instalada entre elas. Especial atenção deve ser dada aos eventuais orifícios para passagem de fiações e tubagens, contudo, esse inconveniente pode ser evitado, novamente, com a adoção da camada de serviço, dispensando furos no fecho interno da estrutura da parede e, conseqüentemente, na barreira para-vapor.

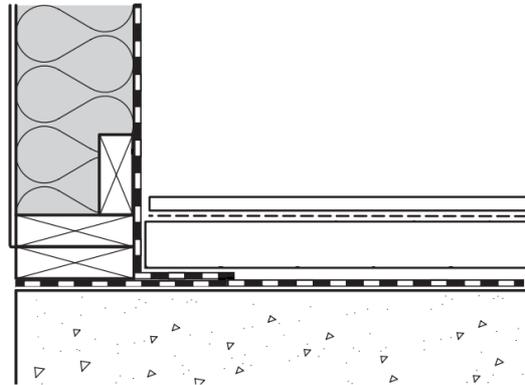


Figura 3.10 – Exemplo de sobreposição entre a barreira para-vapor e as barreiras de umidade no rés do chão
Adaptado de TRADA (2008)

Quando instalada propriamente, a barreira para-vapor das fachadas contribui para a estanqueidade do edifício, reduzindo as perdas de calor por ventilação descontrolada.

3.2.1.1.6. Aberturas

O projeto arquitetônico, bem como o tamanho e uso dos compartimentos determinam e limitam a localização das aberturas que, frequentemente, ocorrem de forma desfasada à estrutura em montantes da parede, solicitando um enquadramento adicional. De modo a evitar cortes e possíveis desperdícios, o ideal seria que fossem selecionadas larguras de abertura múltiplas do espaçamento entre montantes e das dimensões padrão das placas de revestimento dos painéis de parede, mas isso nem sempre é prático. Ainda que montantes adicionais sejam necessários para enquadrar as aberturas, deve-se manter os montantes das posições originais da grade estrutural, fornecendo a fixação regular para revestimentos e outros acessórios.

As aberturas em paredes estruturais requerem a inclusão de um lintel abaixo do(s) banzo(s) superior(es) das paredes formado por tábuas justapostas ou vigas a transmitir a carga suportada sobre a abertura para os montantes adjacentes (Figura 3.11).

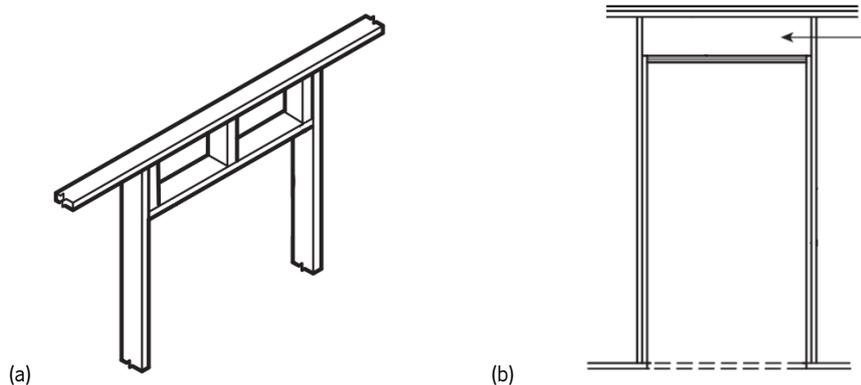


Figura 3.11 – (a) Lintel de paredes não estruturais; (b) Lintel de paredes estruturais
Adaptado de TRADA (2008)

O número de montantes necessários varia segundo o tamanho da abertura e a magnitude da carga que está sendo suportada pelo lintel. Os lintéis, por sua vez, têm suas características determinadas pela carga a ser suportada (uniformemente distribuída e/ou concentrada), a dimensão do vão, a disponibilidade de tamanhos e a classe de resistência da madeira e o limite de flecha imposto, particularmente sobre grandes aberturas de vão, que deve ser respeitado de forma a não interferir na operação de portas e janelas (Figura 3.12).

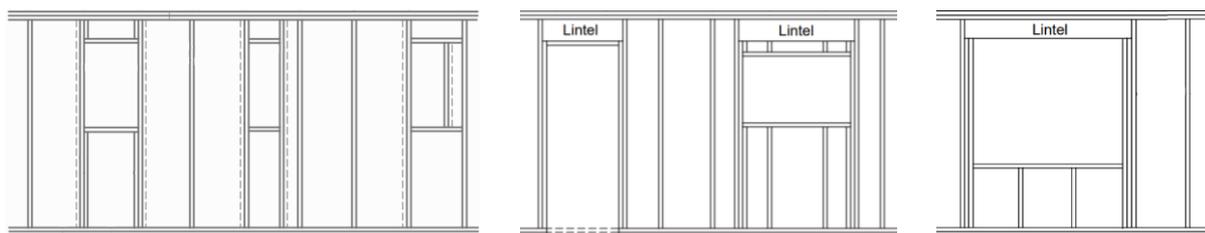


Figura 3.12 – Exemplos de disposições dos montantes adjacentes a depender da tamanho da abertura e da magnitude da carga suportada pelo lintel
Adaptado de TRADA (2008)

A necessária pormenorização da ligação da caixilharia aos painéis favorece a sua colocação numa fase inicial após a instalação dos painéis, permitindo que a estrutura seja segura e estanque às intempéries o mais cedo possível, ou, ainda melhor, que sejam incluídas aos painéis ainda em fábrica. A segunda opção permite que os painéis de parede sejam fabricados precisamente ao redor dos componentes das portas e janelas, favorecendo a execução de juntas consistentes entre o painel e a caixilharia. Essas juntas, com espessura aproximada de 10 mm, pode conter material isolante ou vedante contra intempéries, evitando pontes térmicas e escoamento de ar (Figura 3.13).

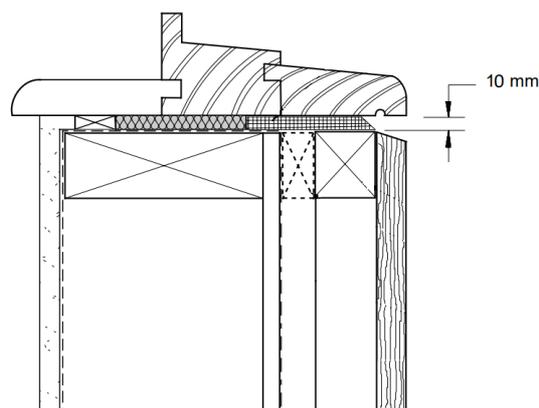


Figura 3.13 – Junta entre a caixilharia e o *timber-frame* preenchida com material isolante e vedante
Adaptado de TRADA (2008)

3.2.1.2. Paredes internas

As paredes internas podem ter função estrutural, quer para suportar as cargas verticais advindas dos pavimentos superiores, quer para promover o contraventamento do edifício às cargas laterais, ou podem simplesmente ter a função de separação de ambientes distintos.

Ainda, podem dividir-se conforme sua localização nos edifícios e as características das zonas que separam: duas habitações distintas, habitações e áreas comuns, duas áreas comuns ou compartimentos de uma mesma habitação, o que determina os requisitos térmicos, acústicos e de resistência ao fogo a que devem resignar-se.

A estrutura das paredes internas é constituída de forma similar às paredes externas, com montantes espaçados, geralmente, entre 400 e 600 mm, e banzos que podem ser simples ou duplos. As paredes internas, principalmente aquelas que não desempenham função de suporte de carga, podem utilizar montantes de largura mais esbelta que das paredes externas, sendo comuns seções de 40 x 90 mm² para toda variedade de paredes internas, de modo a facilitar a fabricação a partir da padronização.

As paredes internas não-estruturais também podem dispensar o uso de elementos de travamento entre os montantes, apesar do potencial destes em fornecerem fixação às placas de fecho ou mesmo de revestimento. Neste último caso, as placas de revestimento, geralmente em gesso cartonado, fazem o fecho da estrutura das paredes, isentando o uso de placas à base de madeira uma vez que não é necessário assegurar-lhes elevada resistência ao corte no plano. Por vezes, mesmo em paredes internas estruturais, apenas uma das faces tem a placa à base de madeira sob a camada de revestimento, desde que esta única seja suficiente para garantir a resistência ao corte necessária (Figura 3.14). Nestes casos, ou quando a parede interna é entregue à obra com apenas um dos seus dois painéis de fecho afixados, a ligação da parede às estruturas de piso inferior e superior torna-se mais fácil, dado o possível acesso ao interior da estrutura da parede. Contudo, quando as paredes são fornecidas fechadas em ambas as

faces, faz-se necessário a aplicação inclinada dos conectores ou mesmo cantoneiras, posteriormente ocultados pelo revestimento de parede, teto falso e rodapé.

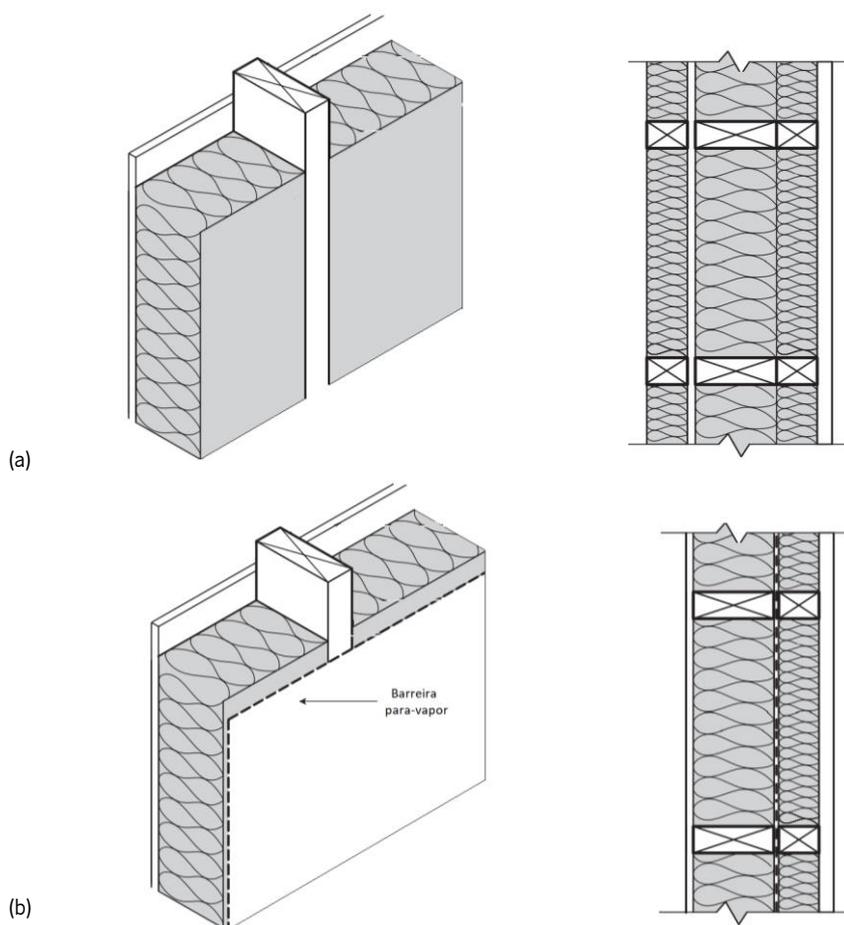


Figura 3.14 – *Timber-frame* com placas de fecho à base de madeira em apenas uma das faces. (a) Parede interna; (b) Parede externa
Adaptado de TRADA (2008)

Todavia, importa referir que paredes internas que dispensam total ou parcialmente a aplicação de placas de fecho à base de madeira acabam por ter a massa do conjunto reduzida, levando à redução da capacidade de isolamento acústico pela baixa absorção das ondas sonoras pelo material, mostrando-se crucial a análise do equilíbrio entre simplicidade e funcionalidade antes de adotar-se a desobrigação ao uso dessas placas.

Para alguns tipos de paredes internas, pode convir o uso de panos duplos, seja para fins estruturais, como é o caso das paredes internas que confinam o núcleo do edifício (geralmente caixa de escadas e de elevadores), responsável por conferir rigidez lateral à estrutura, seja para fins acústicos, como é o caso das paredes divisórias entre habitações distintas.

Como o desempenho acústico de determinadas paredes internas é um tema sensível, principalmente quando se tratam de estruturas leves em madeira, os painéis de parede devem ser elaborados à partir das estratégias para a conceção de elementos acusticamente conformes descritas na Seção 3.5.2.1.

3.2.1.3. Revestimentos

3.2.1.3.1. Revestimentos internos

O revestimento interno das paredes pode executar três funções: fornecer acabamento ou um substrato para admitir a superfície decorativa na face interna das paredes externas e para ambas as faces das paredes internas, contribuir para a resistência ao corte de paredes estruturais externas e internas, principalmente em edifícios em altura, e conferir resistência ao fogo, provendo os períodos necessários de resistência e cumprindo com as exigências de propagação superficial de chamas (reação ao fogo).

Os revestimentos internos das paredes são, geralmente, fixados em obra, principalmente quando há uma camada de serviço anteriormente à eles. Em determinadas situações, porém, podem ser afixados aos painéis ainda em fábrica, em uma ou ambas as faces das paredes e, nesse caso, implicarão no manuseio cuidadoso para evitar quedas e distorções que afetam as fixações e na utilização de proteções contra intempéries durante o transporte, armazenamento e instalação.

O material mais comumente usado para o revestimento interno das paredes é o gesso cartonado, mas placas à base de madeira, como MDF, OSB, aglomerado de fibras de média densidade, contraplacado, aglomerado de partículas e aglomerado de cimento, também podem ser usadas, desde que garantam o bom desempenho quanto à propagação das chamas na superfície. Revestimentos de superfície ou tratamentos de impregnação podem ser aplicados para melhorar o desempenho nesse quesito.

Quando da utilização das placas de gesso, deve-se respeitar as orientações do fabricante quanto ao tipo, comprimento e espaçamento (que costuma variar entre 150 e 300 mm) da fixação das placas à estrutura de suporte, de modo a evitar quebras das placas pelos conectores especialmente na fixação das arestas e vértices e o extravasamento do material isolante pelos furos de fixação. O encontro entre placas bem como os furos para as fixações devem ser devidamente selados a partir de fitas especiais ou camadas de gesso pastoso, entretanto, a última opção não é recomendada, pois introduz um processo molhado em um tipo de construção seca e é mais propenso ao aparecimento de fissuras.

Quando placas à base de madeira são utilizadas, deve-se atentar para o condicionamento à um teor de água apropriado para o equilíbrio em serviço, e utiliza-se parafusos (geralmente com pré-furos) ou pregos (geralmente com comprimento 2,5 vezes maior que a espessura da placa) para a fixação. Esta estimativa, entretanto, não dispensa a consulta às orientações específicas do fabricante.

Independente do material de revestimento, as placas devem ter suas bordas apoiadas pelos montantes ou barras auxiliares, a menos que as orientações do fabricante contrariem esta recomendação. Para isso, no encontro entre paredes ou entre paredes e teto, montantes adicionais devem ser alocados adequadamente formando geometrias em “L” ou em “T” em associação aos montantes originais da

grade estrutural, fornecendo fácil acesso para o preenchimento do espaço vazio da junção com o mesmo material isolante da cavidade da parede/teto (Figura 3.15). Ainda, ao invés de montantes adicionais, podem ser acrescentados elementos de travamento horizontais entre montantes que forneçam a ligação entre paredes que se encontram a meio vão entre eles.

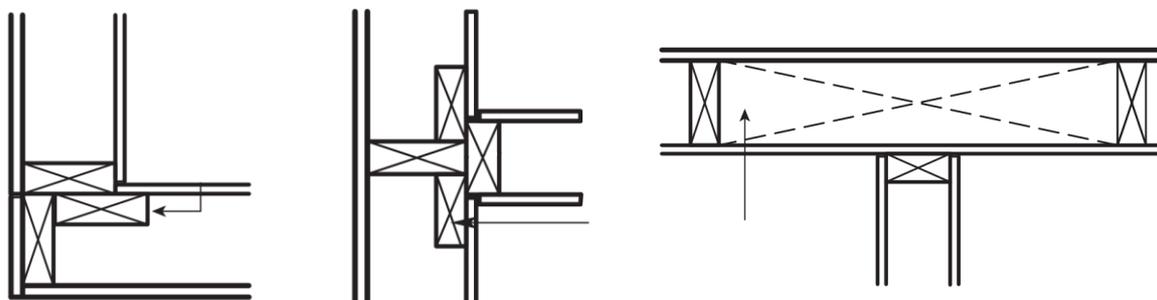


Figura 3.15 – Encontro entre paredes com montantes/travamentos adicionais
Adaptado de TRADA (2008)

Para revestimentos de placa simples, todas as juntas entre placas devem ocorrer sobre um montante ou barra de apoio adicionais e, caso o revestimento seja duplo, as juntas entre placas devem escalonar-se entre camadas, com as juntas mais exteriores apoiadas sobre o alinhamento dos montantes. Em encontros de canto, o cuidado em evitar juntas alinhadas é o mesmo, pelo que é comum que o revestimento de teto seja sempre apertado pelo revestimento de parede, formando cantos igualmente escalonados.

3.2.1.3.2. Revestimentos externos

O revestimento externo das paredes de fachada tem como principais funções a promoção de resistência às intempéries e da aparência externa desejada.

Para a proteção do edifício e dos edifícios adjacentes, recomenda-se o cuidado na escolha do material de revestimento externo para além de suas características de resistência ao clima, mas também em termos da propagação das chamas (reação ao fogo) e na determinação da proporção de áreas desprotegidas (aberturas e presença de materiais combustíveis).

Há uma enorme diversidade de materiais e tipologias de revestimento de fachada que podem ser aplicados, desde técnicas aplicadas *in situ*, como o sistema ETICS e revestimentos cerâmicos, até persianas e painéis pré-fabricados em vidro, metal, fibrocimento e outras variações de materiais compósitos.

A variedade de padrões e texturas do revestimento em madeira (Figura 3.16), no entanto, tornam-no atrativo esteticamente, com tábuas de diferentes larguras e perfis que podem ser dispostas vertical, horizontal ou diagonalmente com juntas justapostas ou abertas, além de fazer sentido para edifícios cujo material construtivo elementar é a madeira.

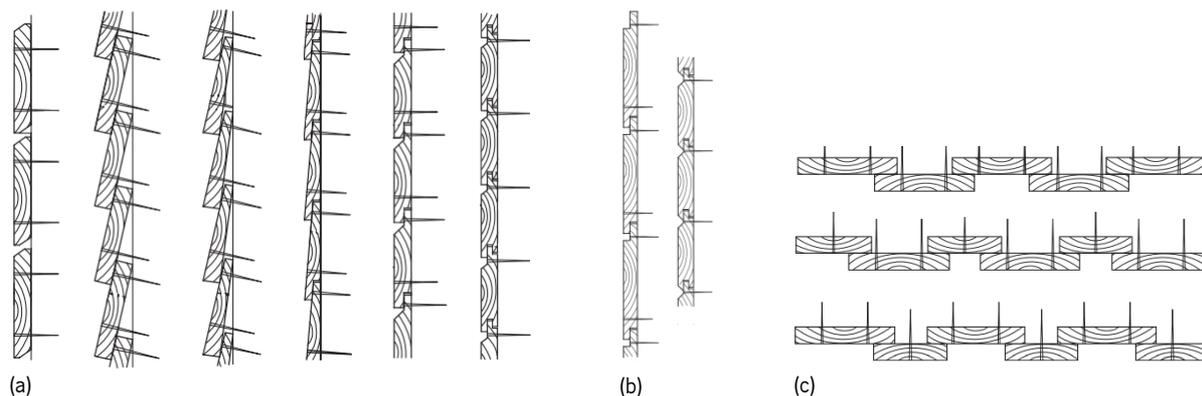


Figura 3.16 – Variedade de padrões do revestimento em madeira. (a) Verticais; (b) Verticais ou diagonais; (c) Horizontais
Adaptado de TRADA (2008)

Revestimentos em madeira devem ser projetados partindo-se do pressuposto que serão sempre sujeitos à penetração de água da chuva e exposição à incidência solar de forma cíclica. Deve, portanto, haver um vão para ventilação entre o revestimento (normalmente apoiado em ripas) e o *timber-frame* com drenagem incorporada que, para evitar a infestação por insetos, devem ter suas aberturas protegidas por tela (Figura 3.17). A cavidade em associação aos rufos, membrana respirável e barreira para-vapor proveem uma proteção secundária dispersando a humidade para o exterior da estrutura.

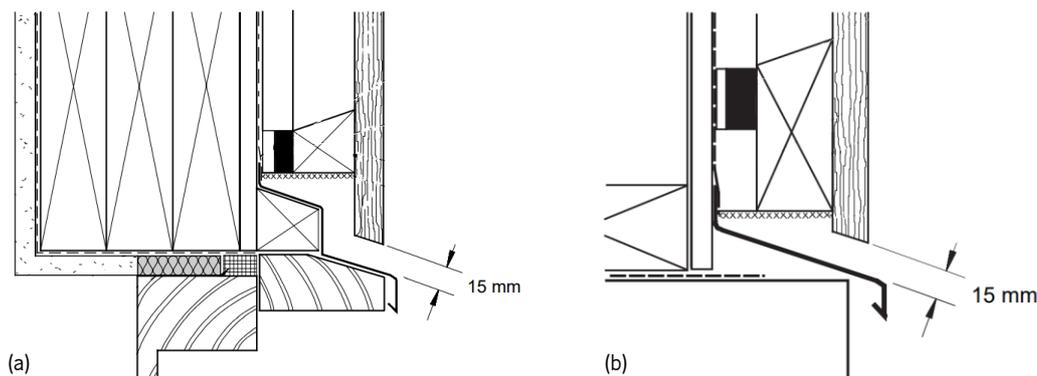


Figura 3.17 – Vão de ventilação com drenagem incorporada. (a) Sobre vãos de aberturas; (b) No rés do chão
Adaptado de TRADA (2008)

Esta cavidade, contudo, é um ponto fraco na proteção ao fogo do edifício, uma vez que é uma via rápida de propagação do fogo para outros pavimentos. Assim, os regulamentos de construção incluem requisitos para barreiras de cavidade, restringindo a propagação de fumo ou chamas, principalmente se o fecho externo da parede em *timber-frame* contém material combustível. Elas podem ser rígidas, flexíveis ou uma combinação de ambas. Ripas de madeira tratada com tamanho mínimo de 40 mm x dimensão da cavidade são uma opção.

A escolha das espécies é fator determinante na qualidade e durabilidade dos revestimentos, bem como os aspetos de proteção da madeira ao clima e fogo. Além disso, os métodos de fixação devem acomodar os movimentos resultantes das mudanças sazonais (períodos de molhagem e secagem).

As ripas são geralmente feitas de madeira de resinosas tratada e fixados aos montantes da estrutura *timber-frame* sobre a membrana respirável (Figura 3.18). As extremidades cortadas de sarrafos tratados também devem receber tratamento adequado para manter a proteção. Caso as ripas sejam dispostas na vertical (para suporte de revestimento horizontal), devem coincidir com os montantes da estrutura e sua espessura deve ser de, no mínimo, 19 mm para ventilação e drenagem da cavidade. Já as ripas dispostas na horizontal (para suporte de revestimento vertical) devem ser espaçadas em, no máximo, 600 mm com espessura a depender dos requisitos de fixação e borda superior chanfrada em ângulo de 15° para evitar o acúmulo de água, como mostra a Figura 3.17. A posição horizontal do ripado pode requerer sub-ripado vertical (seção quadrada) sob eles, proporcionando a devida ventilação e drenagem da cavidade.

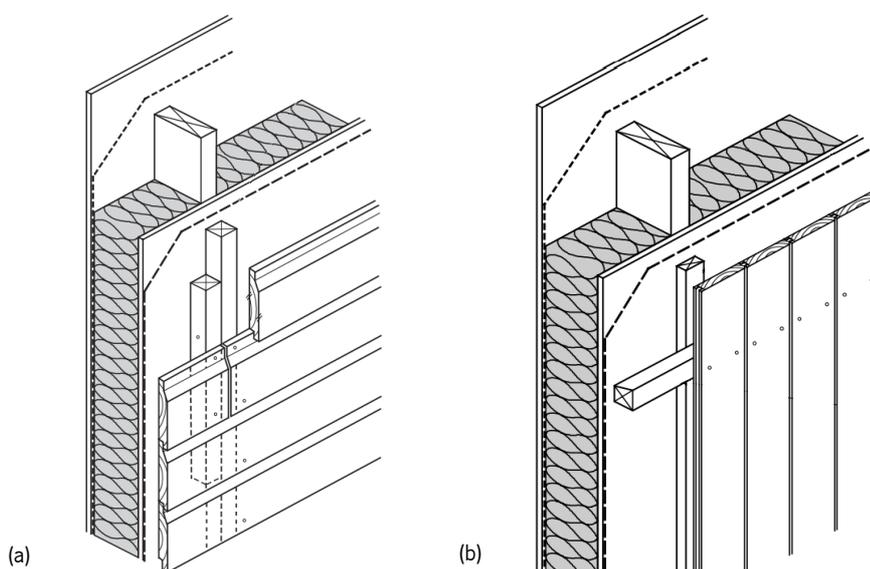


Figura 3.18 – Ripado para suporte do revestimento. (a) Horizontal; (b) Vertical
Adaptado de TRADA (2008)

As tábuas do revestimento podem ser feitas a partir de madeira de resinosas ou folhosas que, a depender da espécie, da exclusão do borne e da qualidade desejada, podem dispensar o tratamento e o acabamento protetor, desde que apresentem, no mínimo, classe de durabilidade natural 3 de acordo com a EN 350 (CEN, 2016). Contudo, para além do tratamento da madeira, a pormenorização do revestimento ainda detém significativa responsabilidade para a manutenção da durabilidade e funcionalidade do sistema.

Recomenda-se, portanto, que as tábuas de revestimento apresentem largura máxima de 150 mm, de modo a evitar problemas de movimentação ou distorção, embora placas com encaixe macho-fêmea (T&G) requeiram maior restrição para o bom acoplamento, limitando-se preferencialmente aos 125 mm. As tábuas T&G não devem ter espessura inferior a 22 mm, valor que pode ser reduzido para 19 mm

condicionado à existência de um chanfro abaixo da zona de encaixe. Já as tábuas de seção quadrada podem ter, no mínimo, 16 mm de espessura, a depender da espécie da madeira. As tábuas T&G devem ser instaladas com 2 mm de folga no encaixe para permitir possíveis expansões (Figura 3.19a). Já as tábuas aplicadas sobrepostas ou com juntas abertas são mais tolerantes à qualquer movimento induzido pela humidade. Em todo caso, a melhor maneira de minimizar quaisquer problemas de movimento é garantir que o teor de água das tábuas quando aplicadas seja o mais próximo possível do provável teor de água "em uso".

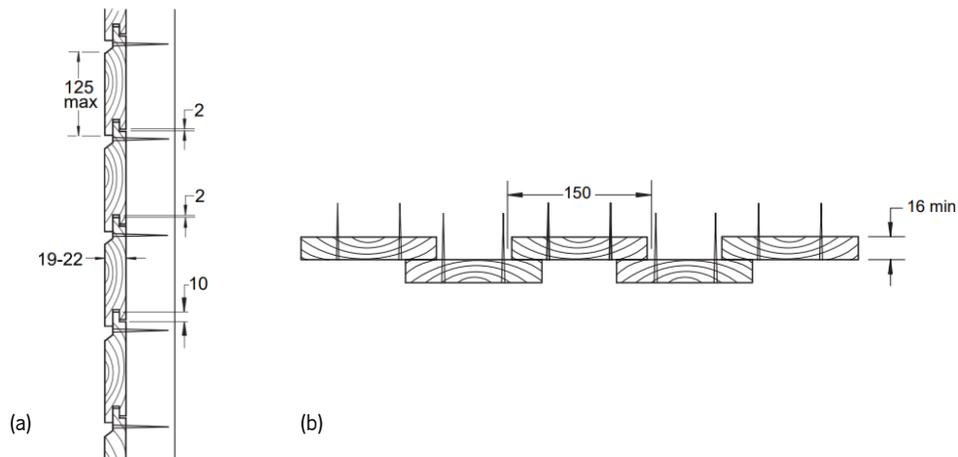


Figura 3.19 – Dimensões mínimas para as tábuas de revestimento externo. (a) Tábuas T&G com chanfro; (b) Tábuas quadradas sobrepostas
Adaptado de TRADA (2008)

É aconselhável interromper o revestimento pelo menos 200 mm acima do nível do solo ou de qualquer outra projeção horizontal, evitando o humedecimento excessivo devido a respingos na superfície (Figura 3.20). Nesses casos, a elevação da placa de fecho dos painéis precisa ser revista, uma vez que a medida típica para distanciamento da base é de 150 mm. Ainda, projetar a cobertura que, a princípio soa como uma medida efetiva de proteção contra humidade das paredes, pode ter um efeito estético indesejado, uma vez que o sombreamento pode reduzir ou impedir o desgaste natural do revestimento em comparação às áreas desprotegidas.

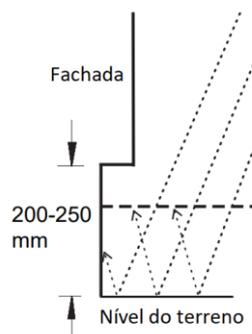


Figura 3.20 – Distanciamento mínimo entre o revestimento externo e o nível do terreno
Adaptado de TRADA (2008)

Para a fixação das tábuas, conectores de aço inoxidável são preferíveis, principalmente se a madeira for mantida sem acabamento. São geralmente usados pregos lisos ou anelados, com comprimento 2,5 e 2 vezes superior à espessura da tábua de revestimento, respectivamente. Placas com mais de 100 mm de largura requerem duas fileiras de pregos, que devem ser sempre posicionadas nos 2/4 centrais da largura da tábua e pelo menos a 15 mm da borda das tábuas, evitando atravessar as linguetas das tábuas T&G, aberturas ou as bordas das tábuas internas do sistema de sobreposição. Quando as tábuas são unidas a topo, a junção deve sempre ocorrer sobre o ripado e os pregos devem estar a pelo menos 20 mm das extremidades das tábuas, o que pode exigir ripas de fixação mais largas ou adicionais.

O encontro com aberturas de janelas também é uma zona sensível que requer pormenorização cuidadosa para garantir a durabilidade, estanqueidade e um acabamento satisfatório. Convém, portanto, que as dimensões e disposições das tábuas relacionem-se com as dimensões das aberturas e o espaçamento entre elas. As caixilharias das aberturas devem vedar-se às barreiras de cavidade de proteção ao fogo que as emolduram e que, por sua vez, são fixadas à estrutura da parede, evitando, assim, problemas de movimento diferencial tensionando a junta vedada e garantindo a proteção da vedação contra intempéries e incidência direta de raios solares. A drenagem e ventilação do vão acima da barreira da cavidade superior podem ser feitas através de pequenas aberturas no revestimento.

O nível entre pavimentos também requer atenção aos movimentos diferenciais e às possíveis transições entre revestimento de tipologias diferentes. Em pisos mais altos, convém que a cavidade seja mais alargada de forma a conter os movimentos diferenciais e de vento do revestimento externo. Quanto às juntas horizontais, elas podem ocorrer de duas formas: o revestimento superior (mais esbelto e leve) fixado ao painel de parede é rebatido ou alargado sobre o revestimento mais espesso abaixo, ou os painéis da parede superior são projetados para frente para permitir que os revestimentos fiquem no mesmo plano ou além do revestimento de nível inferior. Caso a transição de materiais também ocorra através de juntas verticais, elas devem garantir a flexibilidade aos movimentos e limitar a penetração da água entre os dois revestimentos distintos.

3.2.2. Pisos

3.2.2.1. Piso do rés do chão

O peso relativamente leve da estrutura de madeira e sua resistência à distorção quando submetida a assentamentos diferenciais tornam-na especialmente adequada para terrenos de fundação com baixa compactação através de laje térrea, sapatas ou estacas de betão. Isso implica, contudo, na obrigação de um projeto adequado e execução bem-sucedida que garantam a qualidade e durabilidade da ligação

entre a fundação em betão e a superestrutura em madeira.

O piso do rés do chão pode prever uma zona de ventilação sob a estrutura, ou apresentar uma estrutura diretamente apoiada no solo (estrutura da laje), a depender do uso a que o edifício se destina, nível de compactação do solo de fundação, requisitos térmicos e viabilidade técnica (Figura 3.21).

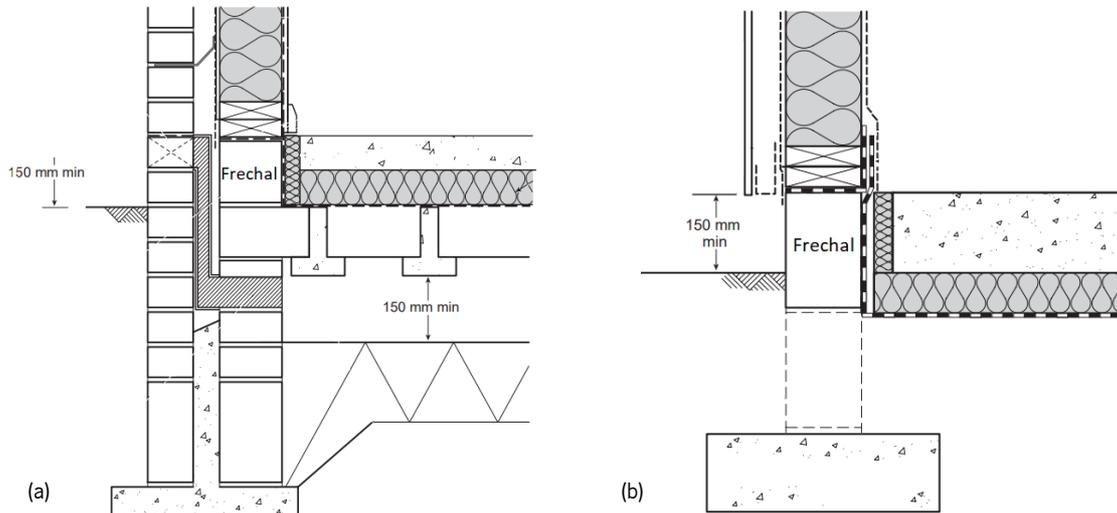


Figura 3.21 – Piso do rés do chão. (a) Estrutura suspensa com camada de ventilação; (b) Estrutura apoiada sobre o solo
Adaptado de TRADA (2008)

Neste estudo, considera-se a execução de lajes térreas em betão armado. Sobre elas, apoia-se uma camada de isolamento rígido contínua, que deve ser suficientemente densa para suportar uma plataforma de betão ou soalho.

Os soalhos são executados através de uma estrutura em ripas de madeira sobreposta por placas à base de madeira, como OSB, contraplacado ou aglomerado de cimento. Esta opção, por realizar-se segundo uma construção seca, favorece a agilidade da obra, uma vez que não requer tempos de cura, e evita a introdução de um processo húmido e suas consequências, como a molhagem de elementos de madeira seguida por problemas de fissuração resultantes da secagem.

O material isolante apoiado sobre a estrutura da laje reduz a perda geral de calor do edifício e contribui para a redução das pontes térmicas nos limites do piso. Com a colocação da camada de isolamento entre a plataforma do piso e a laje, sem meios de ventilação, há o risco de condensações na superfície superior da laje. De forma a evitar este inconveniente, recomenda-se a colocação de uma barreira para-vapor (polietileno calibre 500 – 0,12 mm) sobre a camada de isolamento, evitando, assim, que o vapor/humidade do edifício penetre no isolamento. Esta medida, entretanto, pode ser dispensada caso sejam aplicados materiais isolantes com alta resistência ao vapor. Neste caso, a barreira para-vapor pode ser alocada abaixo do isolamento e, em qualquer um dos casos, deve ter suas folhas sobrepostas em 150 mm e as bordas viradas para cima no encontro com as paredes.

Na concepção do piso do rés do chão, devido à sua proximidade com o solo, deve-se adotar medidas práticas que evitem a humidade ascensional que, conseqüentemente, promovem a degradação. Sendo assim, recomenda-se que o nível do terreno circundante ao edifício esteja, pelo menos, 150 mm abaixo da madeira estrutural de cota mais baixa (acessos viáveis para usuários com deficiência, como rampas, precisam ser considerados) ou ainda que a saída da drenagem do terreno esteja acima do nível mais baixo do terreno adjacente. Ademais, é importante considerar a utilização de membranas impermeáveis sobre a estrutura da laje que mantenham a camada de isolamento e os elementos em madeira protegidos da humidade.

Apesar de não serem supostos entrarem em contato com a humidade, os elementos em madeira da plataforma devem apresentar alguma resistência à humidade. As placas devem ser afixadas às ripas com espaçamentos máximos de 150 mm nas bordas (resguardando 8 mm desde as superfícies laterais) e de 300 mm ao longo dos suportes intermediários (Figura 3.22).

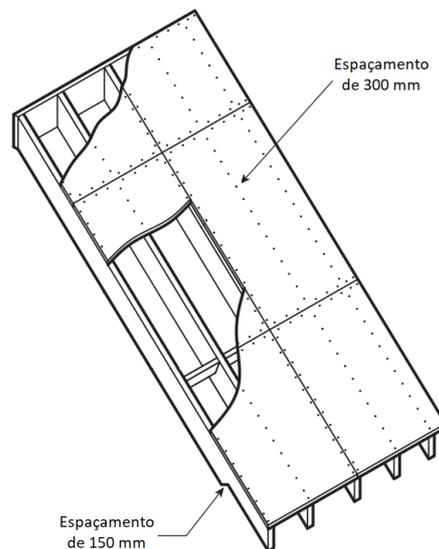


Figura 3.22 – Fixação das placas às ripas
Adaptado de TRADA (2008)

Na integração entre a fundação em betão e a superestrutura em madeira, geralmente utiliza-se um elemento em madeira tratada em autoclave (classe de risco 4): o frechal. Ele fornece uma base nivelada e precisamente posicionada para fixação da superestrutura, nomeadamente as paredes estruturais, protege a membrana impermeável, transmite os esforços verticais e horizontais das paredes para a fundação e eleva a cota de base das paredes, proporcionando maior proteção à humidade. Entretanto, deve-se observar a integridade da membrana impermeável (sobreposta em 100 mm nas juntas) aquando da perfuração para fixação do frechal à fundação, tencionando minimizar o risco de penetração de umidade.

Quando os frechais são usados na base das paredes externas e internas de suporte de carga, é prática

comum estender sua utilização também às paredes internas não-estruturais, simplificando sua instalação. Entretanto, estas sempre podem ser colocadas diretamente sobre o piso do rés do chão, desde que o isolamento tenha densidade suficiente para suportar o peso próprio da parede e sejam devidamente fixadas em ambas extremidades, principalmente nas zonas de aberturas de portas, conferindo-lhes estabilidade.

A omissão dos frechais não é recomendada, contudo, caso seja feita, suas funções devem ser desempenhadas pelo(s) banzo(s) da base das paredes, que requereriam os tratamentos preventivos com as mesmas especificações que um frechal. Ainda, pode fazer-se necessário inserir um elemento adicional sobre o(s) banzo(s) para fornecer uma fixação inferior adequada para o material de revestimento da parede.

3.2.2.2. Pisos intermediários

Os pavimentos intermediários atuam como um diafragma, absorvendo os esforços laterais e transmitindo-os às paredes que os suportam. Neste estudo serão considerados os painéis CLT para a estrutura dos pisos intermediários, proporcionando uma solução esbelta e de elevado desempenho em ambas direções.

Apesar da capacidade do CLT em vencer grandes vãos a depender de sua espessura, é possível que sejam necessárias vigas de suporte para vãos de comprimento superior ou no alinhamento sob paredes estruturais submetidas às cargas superiores à capacidade do CLT. Estas vigas são normalmente de madeira lamelada colada (glulam) ou LVL. Para o caso de se usar a madeira maciça, especial atenção deve ser dispensada à variação dimensional da madeira conforme alterações de temperatura e, principalmente, de humidade, cuja magnitude e consequências são significativamente maiores, especialmente em peças robustas. Assim, recomenda-se que seja resguardado o espaço necessário para livre execução destes movimentos, de maneira a evitar deformações e tensões excessivas. Este inconveniente é essencialmente reduzido em peças de produtos derivados da madeira, que apresentam significativa estabilidade dimensional.

Os painéis de piso pré-fabricados, por apresentarem dimensões limites condicionadas pelas condições de transporte, acessibilidade e meios de descarga em obra, requerem numerosas juntas, entre si e entre os painéis de parede. Sendo assim, torna-se crucial o cuidado dimensionamento e execução das ligações entre painéis, para evitar a deformação diferencial entre painéis horizontais sujeitos a carregamentos distintos e garantir a transmissão das cargas dos painéis horizontais para os verticais. Os painéis, geralmente fabricados a partir de placas de 1250 x 2000 mm², têm seu tamanho adaptado, para além das condicionantes logísticas externas, às características arquitetónicas do edifício.

Além de fornecer suporte para paredes internas, sejam elas estruturais ou não, e transferir suas cargas para as paredes estruturais do piso inferior, os pavimentos intermediários fornecem a fixação de topo para as paredes que o suportam, conferindo estabilidade lateral e evitando posteriores fissuras no revestimento e mau funcionamento de portas, janelas e ferragens.

Por esta razão, recomenda-se a instalação dos revestimentos de piso, como soalhos flutuantes, após a instalação das estruturas de paredes internas não-estruturais, garantindo sua estabilidade através da fixação na estrutura dos pavimentos. Caso contrário, deve-se executar um suporte vertical adequado e autoportante, que preze, inclusive, pela estabilidade das aberturas de porta. Idealmente, os revestimentos internos das paredes e tetos também devem ser instalados antes dos soalhos flutuantes, proporcionando acabamentos contínuos e evitando cortes e entalhes no soalho.

Os pisos intermediários são o principal precursor dos sons de percussão no edifício e um elemento compartimentador importante para a resistência ao fogo. Por isso, sua elaboração deve considerar vivamente as estratégias de concepção em termos acústicos e de proteção ao fogo descritas nas Seções 3.5.2.1 e 3.6.1, respectivamente, de modo a cumprir com os requisitos inerentes à suas funções. Ainda, os encontros dos pavimentos com as paredes internas ou externas não devem comprometer a estanqueidade, resistência ao fogo e isolamento acústico do edifício.

3.2.3. Cobertura

Neste estudo, são consideradas soluções ligeiramente inclinadas, em painéis horizontais de CLT, ou inclinadas, com uma estrutura em vigas que determina as pendentes da cobertura.

Os princípios de projeto para a cobertura ligeiramente inclinada recaem sobre os mesmos apontados para os pisos de pavimento. Ressalta-se a importância da garantia do assentamento homogêneo dos painéis sobre as paredes de suporte, de maneira a evitar distorções do painel estrutural e das eventuais mantas sobrepostas à eles, além de movimentos diferenciais nas ligações. Os vãos podem ser limitados e geralmente requerem paredes intermediárias de suporte de cargas. Sobre a estrutura horizontal em CLT deve haver uma subestrutura para o revestimento da cobertura que garanta uma inclinação mínima de 2,5%.

A opção de cobertura inclinada não é sustentada por asnas e, por isso, necessita de paredes intermediárias ou vigas de cume que suportem as vigas pendentes. Além disso, é necessário que a estrutura do telhado confira suporte lateral às paredes, para que resistam à tendência de abertura da angulação das vigas que impõem forças horizontais às paredes periféricas de apoio.

Neste tipo de solução, cresce a utilização de painéis sanduíche, com núcleo em isolamento térmico rígido

entre placas à base de madeira (tipicamente OSB ou contraplacado) que, juntos, atuam como uma única unidade estrutural sobre o vigaamento. Para estes sistemas, recomenda-se a consulta ao fornecedor para especificações acerca das fixações, controle de condensações e cálculos estruturais.

Em ambos os casos, especial atenção deve ser dada à selagem das juntas entre painéis e a continuidade através da sobreposição de membranas advindas das paredes exteriores.

Existem três disposições básicas para a posição relativa entre a estrutura da cobertura, a camada de isolamento e a membrana impermeável consideradas prática e tecnicamente aceitáveis: cobertura fria e duas variantes da cobertura quente, conhecidas como sanduíche e invertidos.

Na modalidade fria, o isolamento é colocado imediatamente acima do revestimento do teto, logo, a temperatura da estrutura e dos vazios da cobertura é inferior à temperatura no interior do edifício, tornando-a vulnerável à condensações (Figura 3.23). Por isso, torna-se imprescindível a aplicação de uma barreira para-vapor sob o isolamento e aberturas contínuas de cerca de 30 mm devem ser executadas de maneira a permitir a ventilação desobstruída da cobertura. Convém, ainda, que haja um espaço livre de, pelo menos, 50 mm entre o topo do isolamento e o revestimento externo da cobertura. Em coberturas apoiadas por vigas, esse espaço, combinado com a espessura do isolamento, pode implicar na determinação de suas seções segundo os requisitos térmicos e não os estruturais. Apesar das claras dificuldades relativas ao controle do vapor e à garantia de ventilação, este método permite a utilização de materiais isolantes comuns e o fácil acesso para manutenção da barreira para-vapor caso se faça necessário.

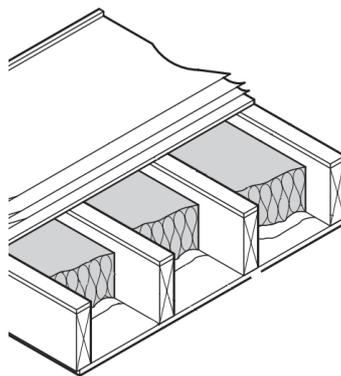


Figura 3.23 – Exemplo de cobertura fria
Adaptado de TRADA (2008)

Em uma cobertura sanduíche, a camada de isolamento é alocada sobre a estrutura, com a barreira para-vapor entre eles (Figura 3.24). Neste caso, a camada isolante garante a resistência térmica necessária para que as camadas inferiores mantenham-se aquecidas e livres de condensações. Apesar da facilidade no controle do vapor, da proteção da estrutura à temperaturas extremas e da acessibilidade da camada de impermeabilização para inspeções e reparos, alguns inconvenientes podem ser elencados: qualquer

humidade que penetre entre a camada impermeável e a barreira para-vapor acaba confinada e tem potencial de reduzir a eficiência térmica e deteriorar o material isolante; caso a cobertura seja visitável, o material isolante e a camada impermeável são sujeitos ao tráfego de pessoas e devem ter resistência suficiente para suportá-lo; e, devido à camada impermeável estar tão próxima ao isolamento, esta pode estar sujeita à variações extremas de temperatura e, conseqüentemente, movimentos térmicos relevantes.

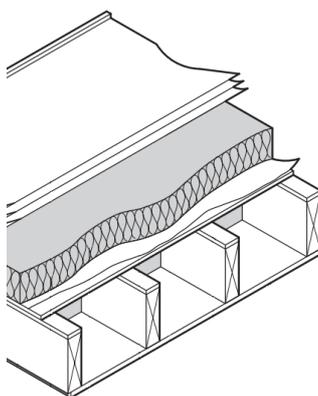


Figura 3.24 – Exemplo de cobertura sanduíche
Adaptado de TRADA (2008)

Por fim, as invertidas contêm a camada de isolamento sobre a estrutura e a camada impermeável, pelo que ambas são protegidas das variações extremas de temperatura, dispensando a aplicação de uma camada específica ao controle do vapor (Figura 3.25). Essa configuração também anula o risco de confinamento de água no material isolante, no entanto, é frequentemente associada a revestimentos de massa elevada, como argamassas, que implicam no aumento dos esforços solicitantes aplicados às paredes e restante estrutura, dificultam o acesso à camada impermeável e requerem a utilização de isolamentos de célula fechada. O facto da camada impermeável estar sob o isolamento requer maior atenção ao escoamento da água, resultando em pendentes mais acentuadas, manutenções periódicas para desobstrução de calhas, e, por vezes, no aumento da camada de isolamento para compensar a infiltração de água prejudicial à sua capacidade térmica.

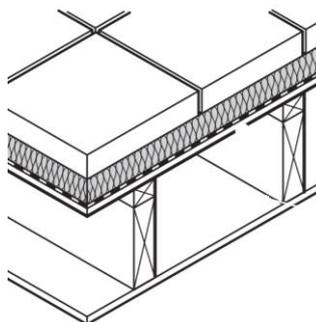


Figura 3.25 – Exemplo de cobertura invertida
Adaptado de TRADA (2008)

Em termos do material de isolamento, este é determinado em função da posição da camada e dos requisitos mecânicos que ela implica. São frequentemente utilizadas lãs minerais, poliestireno expandido e extrudido e, por vezes, painéis sanduiche que, compostos por placas de produtos de madeira, como OSB, com núcleo em isolamento térmico rígido, e em associação à uma estrutura adicional incorporada, conferem o suporte necessário aos carregamentos concentrados.

3.2.4. Varanda

A rigidez inerente e o peso leve da estrutura de madeira são fatores favoráveis a execução de elementos em balanço, desde que em conformidade com os requisitos estruturais.

Para além da análise estrutural, ressalta-se a necessidade de uma camada de isolamento térmico que se estenda suficientemente sob e sobre o patamar da varanda, de modo a evitar as condensações superficiais e as perdas através da ponte térmica formada pelo encontro entre o pavimento e a parede de fachada. As placas de CLT dos pisos intermediários, por apresentarem boa resistência térmica e espessura relevante, também contribuem para que as perdas através das pontes térmicas sejam minimizadas.

3.3. Instalações e equipamentos prediais

A instalação de serviços mecânicos, elétricos e hidráulicos na construção em estrutura de madeira pode ser executada a partir da alocação de cabos, tubos e condutas *in situ*, desde que a estrutura já esteja protegida de intempéries, ou ainda em fábrica, reduzindo, assim, as atividades em obra.

Ressalta-se que requisitos gerais relativos a aparelhos e acessórios são tratados em detalhe nas regulamentações de construção e pelas indústrias de serviços, pelo que esta seção trata apenas dos requisitos específicos associados à construção de estruturas de madeira.

A incorporação dos sistemas nos elementos de parede e piso da construção em madeira pode dar-se entre os espaços formados pela estrutura, como é o caso do *timber-frame*, ou apoiados sobre elementos massivos, como é o caso de estruturas em CLT.

Quando alocados sobre a estrutura dos elementos, nomeadamente em camadas de serviço, os cabos e tubagens são posicionados sob o revestimento interno, evitando intromissões à estrutura principal e facilitando tanto a instalação quando a manutenção pelo acesso simplificado. Nas paredes externas, esta medida também evita possíveis condensações e furos na barreira para-vapor, uma vez que a camada de serviço localiza-se em uma zona aquecida da parede.

Essa solução também pode ser adaptada para o *timber-frame*, afastando-se o painel de fecho interno

das paredes da barreira para-vapor através de ripas apoiadas sobre os montantes, ou criando-se uma nova cavidade entre o painel de fecho e o painel de revestimento (Figura 3.26). O novo vão deve ser devidamente vedado em seu perímetro para evitar correntes de ar de convecção e deve ser preenchido com uma camada de isolamento para garantir o bom desempenho acústico e, ocasionalmente, aumentando o desempenho térmico do elemento.

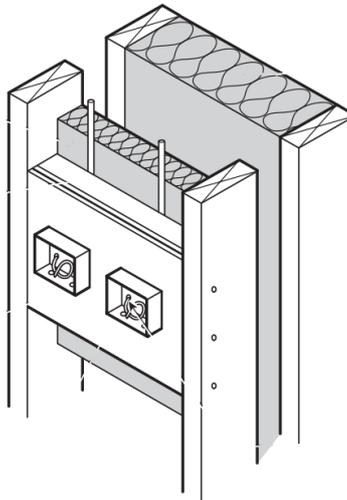


Figura 3.26 – Exemplo de instalações na camada de serviço
Adaptado de TRADA (2008)

Esta modalidade desobriga-se do rigor na execução dos cortes nas ripas, uma vez que eles têm mera função de suporte das placas de revestimento. A decisão quanto à fixação é tomada segundo a espessura e resistência necessárias para o suporte da carga imposta pelas tubagens, fiações ou mesmo seus acessórios. Logo, tubagens e fiações podem, portanto, ser afixadas diretamente à placa de fecho interna das paredes ou no alinhamento dos montantes estruturais (onde não haja montantes, elementos de travamento podem ser acrescentados entre eles para fornecer o suporte adequado) (Figura 3.27).

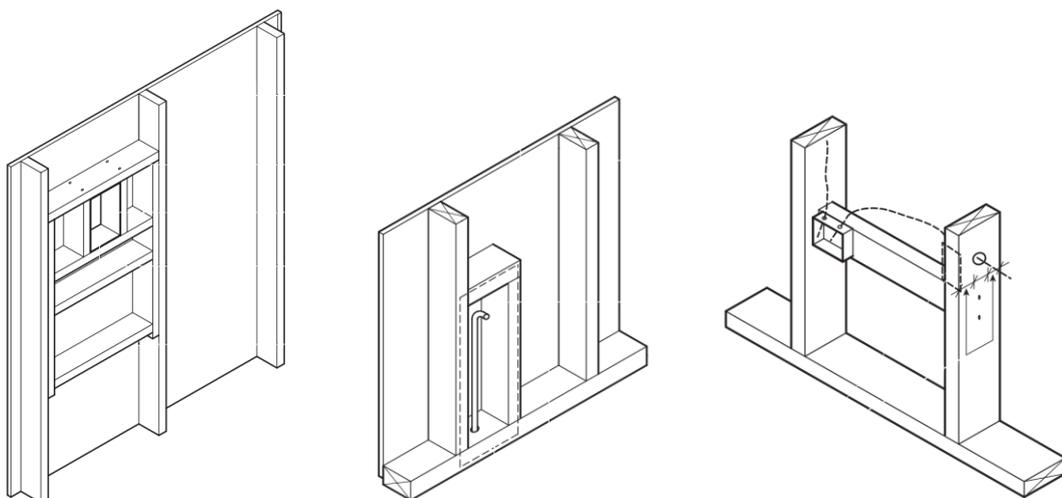


Figura 3.27 – Exemplos de montantes e travamentos adicionais para suporte das instalações no interior do *timber-frame*
Adaptado de TRADA (2008)

Já em pisos, podem ser afixadas às ripas do soalho flutuante ou aos painéis CLT. Em qualquer um dos casos, para além da fixação das próprias tubagens e fiações, deve-se atentar para a fixação dos elementos subsequentes, como placas de gesso cartonado ou mesmo futuros trabalhos de bricolagem, protegendo-os de eventuais perfurações.

O conforto acústico dos usuários também deve ser prezado, principalmente quando as tubagens atravessam compartimento habitáveis. Nesse caso, estas devem ser envoltas por todo seu comprimento em material isolante, a cavidade completamente preenchida em material isolante e a camada de revestimento suficientemente densa e espessa.

Os serviços elétricos também requerem atenção quanto ao isolamento acústico. Tomadas elétricas e interruptores colocados em ambas faces de paredes internas devem ser desfasados uns dos outros em pelo menos 1 metro para não criar uma ponte acústica em associação ao uso de material e devem ser protegidos na parte traseira por gesso cartonado ou outro material de desempenho igual ao usado na superfície da parede. Ainda, a presença de material isolante na camada de serviço aumenta o risco de superaquecimento e, conseqüentemente, de incêndio quando associada aos sistemas elétricos, implicando na adoção de conduítes plásticos para passagem da fiação.

Quanto às instalações de gás, se um duto for usado para instalar tubos de suprimento de gás, o invólucro deve ser adequadamente ventilado e protegido e suas paredes internas isoladas com lã mineral. Aparelhos à base de gás não adequados para montagem direta sob uma base de madeira devem ser tomados em conta na execução do projeto, de maneira a se prever espaços de ar (aproximadamente 75 mm) ou revestimento de material incombustível (geralmente gesso cartonado) para a base.

As especificações são diversas e extensas, contudo, evidencia-se a premissa principal: a manutenção da resistência ao fogo e isolamento acústico, seja evitando-se cortes ou tratando-os com os materiais adequados. Muitos destes inconvenientes podem ser solucionados com a incorporação de coretes à estrutura mas, neste caso, especial atenção deve ser despendida aos movimentos diferenciais, principalmente entre pavimentos e na ligação das tubagens entre pisos e paredes. Para isso, devem ser consideradas folgas entre as ramificações dos sistemas e a estrutura de madeira, tubulações flexíveis e acoplamentos de expansão.

Um dos exemplos de sistemas que mais é influenciado pelos movimentos diferenciais é a estrutura do elevador que deve, preferencialmente, ser independente do restante do edifício e apresentar tolerâncias para movimentos diferenciais principalmente no encontro com a fundação, geralmente executada em betão armado.

3.4. Conectores

Para a ligação dos painéis entre si e com outras partes do edifício, são utilizados, maioritariamente, parafusos ou conectores metálicos (Figura 3.28). Dentre os conectores metálicos disponíveis no mercado, podem-se citar cantoneiras em aço galvanizado, chapas perfuradas, sapatas metálicas e perfis extrudados em alumínio.



Figura 3.28 – Variedade de conectores metálicos empregues na construção em madeira. (a) Parafuso autoperfurante rosca parcial para madeira cabeça larga; (b) Parafuso autoperfurante rosca parcial para madeira cabeça de embeber; (c) Parafuso autoperfurante rosca total para madeira; (d) Parafuso autorroscante para betão; (e) Pregos anilhados; (f) Angular de tração (*hold-down angle plate*); (g) Angular de corte (*shear angle plate*); (h) Chapas perfuradas
Adaptado de Binderholz (s.d.)

Muitas são as especificações necessárias ao emprego de conectores para junção de elementos, como o tipo, tamanho, quantidade e angulação, que devem ser devidamente projetadas caso a caso e consultadas nos catálogos de fornecedores especializados.

Em termos da geometria da união entre elementos, o método de junção entre paredes recai, na maioria dos casos, na simples justaposição entre elas, diferente da junção entre paredes e pisos que, a depender de fatores como arquitetura, segurança ao fogo, estética e função e localização dos elementos, requer diferentes soluções, como as mostradas na Figura 3.29.

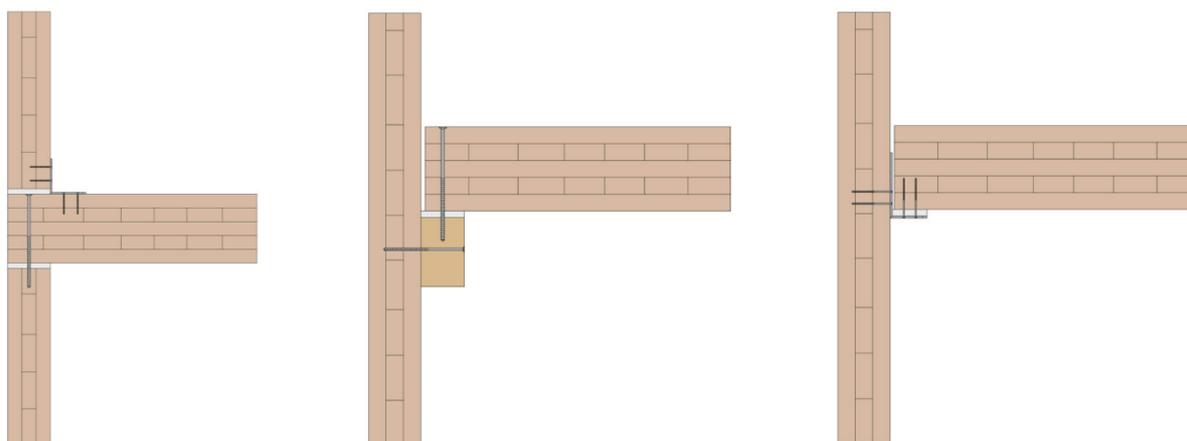


Figura 3.29 – Soluções para junção entre elementos de parede e piso
Adaptado de Binderholz (s.d.)

3.5. Desempenho funcional

Visando desenvolver um sistema que proporcione conforto térmico e acústico aos ocupantes e seja adequado às exigências regulamentares de desempenho dos edifícios em Portugal, esta seção discorre sobre as estratégias de concepção que propiciam o bom comportamento nestes quesitos e as metodologias para previsão e verificação do desempenho dos painéis desenvolvidos nesse estudo, tanto isolados quanto aplicados à um caso de estudo, em cumprimento aos requisitos estabelecidos pelos regulamentos nacionais.

As referidas análises relacionam-se e, por isso, devem ser conjugadas e abordadas iterativamente, visando alcançar o desempenho esperado em ambas disciplinas simultaneamente.

Importa referir que o presente trabalho destina-se exclusivamente aos edifícios multifamiliares, pelo que apenas os regulamentos orientados para esta modalidade serão considerados. Ainda, os objetivos da concepção do sistema, que compreendem o desenvolvimento apenas dos painéis opacos e sua adequabilidade para diversas arquiteturas, implicam no enfoque às estratégias que sejam desvinculadas das condições arquitetônicas e de localização. Por isso, para a análise térmica, serão desconsideradas as questões relacionadas aos elementos envidraçados, sistemas técnicos, inércia térmica e certificação energética. Para a análise acústica, aspetos relacionados à transmissão marginal, acústica interior, condições de ventilação natural na fachada ou mecânica entre compartimentos internos que provoquem quebras no isolamento acústico e elementos de fecho de vãos, como portas, janelas e caixas de estore, não serão abordados.

Como o desenvolvimento do sistema está desassociado de uma arquitetura definida e invariável, considerações quanto aos requisitos a serem cumpridos, aspirando, por exemplo, a observância aos mais rigorosos dispostos nos regulamentos (pior caso), podem ser necessárias.

3.5.1. Desempenho térmico

3.5.1.1. Objetivos e estratégias para concepção do projeto térmico

Quando se pretende a melhoria do desempenho térmico dos edifícios, nomeadamente em relação às condições de referência estabelecidas pelo regulamento energético português, as estratégias podem ser segmentadas em três metodologias:

- I. Diminuição das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{e}) e arrefecimento (N_{ve}) a partir das decisões de projeto relativamente às soluções construtivas e arquitetura;

- II. Adoção de sistemas técnicos de climatização e de águas quentes sanitárias (AQS) mais eficientes;
- III. Aumento do contributo de energias de fontes renováveis (E_{ren}), reduzindo, assim, as necessidades globais nominais de energia primária (N_t) dos edifícios.

Atualmente, a oferta de sistemas técnicos de elevada eficiência (por vezes superior a 1) e movidos à base de energias renováveis, com ênfase para a solar uma vez que Portugal é um dos países europeus com maior incidência de radiação solar ao ano (como coletores solares térmicos para águas quentes sanitárias e painéis fotovoltaicos para fornecimento de energia elétrica), apoia a implementação de duas das três abordagens elencadas acima, refletindo em uma melhoria drástica do desempenho térmico dos edifícios. Apesar da simplicidade e eficácia inerentes à execução das abordagens II e III, estas não devem ser desassociadas da abordagem I, pelo que a combinação das três produz resultados verdadeiramente benéficos em termos térmicos e não somente energéticos. Isso implica na necessidade de evolução dos sistemas construtivos na mesma proporção que os sistemas técnicos e alternativas renováveis. O presente trabalho, destinado ao desenvolvimento de um sistema construtivo, ocupar-se-á essencialmente da abordagem I, que objetiva a diminuição das necessidades de aquecimento e arrefecimento a partir de parâmetros que as influenciam.

As necessidades de aquecimento aumentam conforme a perda de calor por transmissão ($Q_{tr,i}$) e ventilação ($Q_{ve,i}$) e diminuem segundo os ganhos térmicos úteis ($Q_{gu,i}$), sejam eles solares ($Q_{sol,i}$) ou internos ($Q_{int,i}$) (associados ao metabolismo dos ocupantes e ao calor dissipado pelos equipamentos e dispositivos de iluminação). Dessa forma, são concebidas as seguintes estratégias para aquecimento:

- Restringir as perdas por transmissão através da aplicação de camadas de materiais isolantes nos elementos construtivos opacos obtendo um coeficiente de transmissão térmica (U) satisfatório e de vãos envidraçados com coeficiente de transmissão térmica não tão elevados (a considerar a qualidade do vidro e suas camadas, o material da caixilharia e o dispositivos de oclusão ativado e desativado). A devida atenção também deve ser dada à formação de pontes térmicas, principalmente no perímetro das caixilharias, encontros entre elementos e alinhamentos de elementos estruturais como vigas e colunas;
- Restringir as perdas por infiltração e ventilação descontrolada e restringir a ventilação no exterior do edifício através, por exemplo, da execução de caixilharias de portas e janelas com vedação eficiente, proteção dos ventos dominantes com vegetação e escolha de uma localização adequada para o edifício;
- Promover os ganhos solares utilizando sistemas solares passivos para aquecimento. Isso inclui,

por exemplo, a orientação, dimensões, fração envidraçada, desobstrução (seja por sombreamento do horizonte, por elementos horizontais ou verticais) e fator solar (g) dos vãos envidraçados. É comum maximizar os ganhos solares do edifício desativando-se os dispositivos de oclusão durante o período de exposição solar e ativando-os a noite para reduzir as perdas de calor pelos vãos envidraçados;

- Promover inércia térmica forte em zonas com amplitudes térmicas elevadas e com ganhos solares, produzindo o efeito de atraso térmico, mantendo o interior aquecido enquanto não há ganhos de energia.

Já as necessidades de arrefecimento dependem essencialmente dos ganhos térmicos brutos (Q_{ev}) minorados pelo fator de utilização dos ganhos térmicos (η_v), determinado pelas condições de transferência de calor por transmissão e ventilação. Dessa forma, são concebidas as seguintes estratégias para arrefecimento:

- Promover ventilação natural em zonas com climas de tipo tropical e equatorial ou temperado de influência marítima, quando a temperatura exterior for inferior à temperatura interior, através de grelhas autorreguláveis nas fachadas e caixilharias, caixas de estores com ventilação controlada etc. A ventilação é função da localização do edifício, rugosidade da região, coeficiente de pressão (altura do edifício, obstruções etc), pé direito, área do pavimento e número de fachadas expostas ao vento. A ventilação mecânica através de exaustores, por exemplo, também pode ser necessária;
- Restringir ganhos solares em todas as zonas com climas que necessitem de arrefecimento utilizando sistemas de sombreamento eficazes, como palas e dispositivos de oclusão sempre ativados, em associação ao fator solar (g_v) dos vãos envidraçados. O regulamento energético português estabelece valores máximos para o fator solar global ($g_{Tm\acute{a}x}$), de maneira a evitar ganhos excessivos durante o verão;
- Restringir ganhos por condução através da aplicação camadas de materiais isolantes nos elementos construtivos;
- Promover inércia térmica forte em zonas com amplitudes térmicas elevadas, reduzindo os picos de temperatura.

Todas estas medidas devem ser consideradas na elaboração dos projetos de edifícios, mas apenas algumas delas têm lugar na elaboração de um sistema construtivo desassociado de uma arquitetura definida. Sendo assim, apenas as medidas relacionadas exclusivamente à qualidade e desempenho dos

elementos opacos serão consideradas e implementadas, sendo as medidas arquitetônicas e aquelas relacionadas aos elementos envidraçados responsabilidade dos projetistas.

3.5.1.2. Objetivos e estratégias para controle de humidade

De maneira a evitar a troca de humidade no interior dos elementos construtivos, prejudiciais à durabilidade da madeira e, conseqüentemente, à vida útil do edifício e à qualidade do ambiente interior, são identificadas duas abordagens que devem ser implementadas de forma conjugada.

A primeira consiste na minimização da entrada de humidade nos elementos construtivos e seus componentes. Para isso, deve-se:

- Proporcionar o escoamento eficiente para as águas das chuvas;
- Proporcionar abrigo contra a água através de beirais e outras peças de cobertura;
- Proteger os topos das peças em madeira (extremidades dos grãos);
- Evitar juntas expostas;
- Escolher dimensões e produtos que não sofram com instabilidades dimensionais expressivas e que ainda sejam tolerantes à eventuais variações;
- Usar fixadores que impliquem em concentrações de tensão mínimas, que levam a rachaduras;
- Aplicar os conectores da maneira correta, ou seja, não muito próximo às bordas e extremidades;
- Evitar espaçamentos insuficientes entre os componentes do elemento construtivo e locais sujeitos à humidade (como a distância entre a extremidade inferior do revestimento de fachada e o nível do terreno);
- Escolher revestimentos de superfície apropriados ou mesmo a aplicação de tratamentos, dando especial atenção às zonas de grão exposto.

A segunda abordagem consiste em garantir a secagem rápida e completa do material em caso de absorção excessiva de humidade. Para isso, deve-se:

- Promover a ventilação das superfícies, inclusive a face oposta dos elementos expostos à humidade;
- Aplicar revestimentos de superfície permeáveis ao vapor de água ou tratamentos alternativos de difusão aberta;
- Limitar as áreas de contato entre os elementos de madeira individuais;
- Evitar vãos abertos e sem tratamento nas juntas.

3.5.1.3. Metodologia de previsão do desempenho térmico e controle de humidade

O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) estabelece os requisitos, parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético de edifícios de habitação, objetivando, sobretudo, a melhoria do comportamento térmico, a eficiência dos sistemas técnicos e a minimização do risco de ocorrência de condensações superficiais na envolvente. Aplica-se aos edifícios destinados à habitação nos seguintes casos: projetos e construção de edifícios novos; grandes intervenções na envolvente ou nos sistemas técnicos de edifícios existentes; e avaliação energética no âmbito do Sistema de Certificação Energética (SCE) de edifícios novos, sujeitos a grande intervenção ou existentes. Em edifícios multifamiliares, o REH deve ser aplicado em cada uma das frações constituídas ou previstas e, para o caso de edifícios mistos, o REH deve ser aplicado às frações destinadas à habitação independentemente da aplicação do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) às restantes frações.

No âmbito do REH e tratando-se dos elementos opacos do sistema construtivo desenvolvidos neste estudo, estes devem apresentar coeficientes de transmissão térmica superficiais (U) inferiores aos máximos admissíveis ($U_{m\grave{a}x}$) definidos pelo Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 07 de dezembro, em prol da qualidade térmica da envolvente. Nesta Portaria também são definidos os valores de referência (U_{ref}). O coeficiente de transmissão térmica traduz o quanto de energia se perde ou se ganha através de 1 m² de elemento para cada grau de diferença de temperatura entre o interior e o exterior (W/m².°C).

A aferição do coeficiente de transmissão térmica dos painéis propostos para os elementos opacos das envolventes dos edifícios foi realizada a partir do *software* Ubakus (Plag, 2011) aplicando o método descrito pela EN ISO 6946 (CEN, 2017). Os valores de condutibilidade térmica dos diversos materiais aplicados foram importados de suas respetivas fichas técnicas e as resistências térmicas superficiais foram retiradas da EN ISO 6946 (CEN, 2017). A partir da espessura (e) e condutibilidade térmica (λ) de cada material, o *software* determina a contribuição de resistência térmica (R) de cada camada, em m².°C/W (Equação 3.1).

$$R = e/\lambda \quad (3.1)$$

Para a obtenção da resistência total do elemento considerando o caso das envolventes em contato com o exterior, são somadas as resistências de cada camada com as resistências das superfícies interior (R_{si}) e exterior (R_{se}). Já para a obtenção da resistência total da camada considerando envolventes em contato com paredes adjacentes e espaços não úteis, são somadas as resistências de cada camada com as resistências das duas superfícies interiores (R_{si}). O *software* estipula um limite superior e inferior para a resistência térmica total e, desde que a razão entre eles seja inferior a 1,5, utiliza como resistência

térmica total a média entre eles. Fazendo o inverso destes valores de resistência total, o *software* determina o coeficiente de transmissão térmica (U) dos elementos opacos, em W/m². °C (Equação 3.2).

$$U = 1/(R_{\text{camadas}} + R_{\text{si}} + R_{\text{se}}) \text{ ou } U = 1/(R_{\text{camadas}} + R_{\text{si}} + R_{\text{si}}) \quad (3.2)$$

Assim, com a previsão do coeficiente de transmissão térmica do elemento, é possível compará-lo com o U_{ref} e garantir que seja inferior ao $U_{\text{máx}}$ definido pelo REH. Desassociado de uma arquitetura e localização exatos, convém que o sistema atenda aos requisitos mais exigentes do REH, tanto em termos de clima quanto da tipologia das envolventes.

Entretanto, quando se conhece a arquitetura e a localização exata do edifício, como é demonstrado no Caso de Estudo apresentado no Capítulo 5 deste documento, é possível determinar os requisitos cabíveis em termos de clima e tipo de envolvente a que cada um dos painéis esteja submetido, verificando-o, assim, de forma mais acurada.

Sendo assim, a partir da localização do edifício, são definidos os parâmetros climáticos pertinentes à estação de aquecimento que determinam a zona climática (I1, I2 ou I3) e, por conseguinte, a grandeza dos requisitos a serem cumpridos. Os parâmetros graus dia (GD), duração da estação de aquecimento (M) e temperatura exterior média do mês mais frio ($\theta_{\text{ext.i}}$) para a localização exata do edifício são obtidos a partir da correção dos valores de referência da localização aproximada (GD_{ref} , M_{ref} , $\theta_{\text{ext.i ref}}$ e Z_{ref}) por um fator α , ambos constantes no Despacho n.º 15793-F/2013, para o valor da cota real do edifício (z) segundo a Equação 3.3, onde X pode assumir GD, M ou $\theta_{\text{ext.i}}$:

$$X = X_{\text{ref}} + \alpha(z - z_{\text{ref}}) \quad (3.3)$$

Já a partir do projeto de arquitetura, identifica-se todos os espaços não úteis (ENU), aqueles que não se enquadram na definição de espaço interior útil do REH, e traça-se as envolventes do edifício, identificando-as como exterior (separa um espaço útil (EU) do exterior), interior (separa um EU de um ENU ou de um edifício adjacente) ou sem requisitos (separa um EU em contato com o solo ou com outra fração dentro do mesmo edifício). Quanto às envolventes interiores, existem dois tipos: com requisitos de interior ou com requisitos de exterior. O tipo de envolvente interior depende do coeficiente de redução de perdas (B_{zu}) do espaço não útil, que é um parâmetro que define se o espaço não útil tem requisitos de interior ($B_{\text{zu}} \leq 0,7$) ou de exterior ($B_{\text{zu}} > 0,7$), ou seja, indica se o espaço não útil está a uma condição (temperatura) mais próxima do ambiente interior ou exterior, e é contabilizado nos cálculos do REH para quantificação da transferência de calor por transmissão através da envolvente interior minorando o coeficiente de transmissão térmica global da envolvente interior (H_{enu}), tendo em conta a redução na diferença de temperatura entre os ambientes. O cálculo do B_{zu} de um espaço não útil é função de três parâmetros: volume do espaço não útil em m³; condição de ventilação do espaço não útil; a razão entre

a área dos elementos que separam o interior do ENU (A_i) e a área dos elementos que separam o exterior do ENU (A_e). Quando o espaço separado é um edifício adjacente o B_{zu} é considerado 0,6 e, por defeito, pode-se considerar que o B_{zu} para todos os ENU é 0,8.

Devido à elevada capacidade térmica da madeira e à esbeltez dos elementos dos variados sistemas estruturais em madeira, que garantem a ausência ou reduzida contribuição de zonas de ponte térmica plana, dispensa-se a determinação rigorosa das áreas e dos coeficientes de transmissão térmica das zonas de montantes, vigas e outras heterogeneidades, podendo ser considerado para estes elementos o coeficiente de transmissão térmica da zona corrente da envolvente.

Para os elementos da envolvente exterior, nomeadamente paredes de fachada e coberturas, que necessariamente atuam na proteção do espaço interior contra as variações e intempéries do exterior, é analisado também o comportamento quanto à capacidade térmica e proteção contra a humidade.

Em termos da proteção térmica, são analisados a capacidade de armazenamento de calor do elemento, bem como sua contribuição para a atenuação da amplitude térmica e o atraso térmico no ambiente interior em função da temperatura exterior. A partir destes parâmetros, são traçados o gráfico da temperatura superficial interior e exterior ao longo do dia e um perfil de temperatura na seção transversal do elemento onde é simulada a atenuação da temperatura para seis horários distintos do dia: três diurnos (7h, 11h, 15h) e três noturnos (19h, 23h, 3h).

Apesar da proteção térmica de um fogo ser influenciada por diversos fatores, nomeadamente a radiação solar direta através das janelas e da capacidade total de armazenamento de calor (incluindo piso, paredes internas e mobiliário), convém avaliar o potencial dos painéis contidos na envolvente exterior na contribuição para a proteção térmica do ambiente interior.

Em seguida, são simuladas condições climáticas específicas em conformidade com a norma DIN 4108-3 e que são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Condições climáticas em conformidade com a norma DIN 4108-3

	Temperatura (°C)	Humidade (%)
Interior	20	50
Exterior	-5	80

É, então, elaborado o perfil de temperatura no interior do elemento (dessa vez considerando as resistências térmicas superficiais especificadas na DIN 4108-3, por representarem o pior caso para a proteção contra humidade) e calculadas as temperaturas mínima, média e máxima nas superfícies interna e externa considerando resistências de contato térmico específicas para proteção contra umidade e perfil de temperatura, de acordo com a mesma referência normativa.

Elabora-se, também, o perfil de humidade no interior do elemento usando o método de elementos finitos 2D do Ubakus (Plag, 2011) que, em contraste com a norma DIN 4108-3, considera também camadas descontínuas de madeira e barreiras para-vapor com humidade variável. A partir da temperatura mínima da superfície interior, o *software* estipula a humidade relativa associada a ela e determina o potencial para formação de mofo.

Para a verificação quanto à condensação no interior dos elemento, é imposta uma exposição de 90 dias às referidas condições climáticas de inverno constante e, a partir delas, das prescrições da DIN 4108-3 e das propriedades materiais utilizados (transmissão do vapor de água e condutividade térmica), determina-se as condições de contorno, tanto para a estação de inverno quanto de verão: p_i – pressão de vapor no interior, em Pascal; p_e – pressão de vapor no exterior, em Pascal; p_s , p_{c1} – pressão de vapor de saturação na área de condensação, em Pascal; t_c – duração do período de condensação (90 dias), em segundos; t_{ev} – duração da estação de secagem (90 dias), em segundos; Sd_e – transmissão do vapor de água total do elemento, em metros; Sd , Sd_{ev} , Sd_{c1} – transmissão de vapor de água total até o plano com menor potencial de evaporação, em metros; e δ_0 – coeficiente de difusão do vapor de água no ar estático, em kg/(m.s.Pa).

O potencial de evaporação para a reserva de secagem no período de orvalho (inverno) no plano com o potencial de evaporação mais baixo é, em kg/m² (Equação 3.4):

$$M_{ev,Tauperiode} = t_c \times \delta_0 \times ((p_s - p_i)/Sd_{ev} + (p_s - p_e)/(Sd_e - Sd_{ev})) \quad (3.4)$$

Enquanto que a quantidade de água de condensação é, em kg/m² (Equação 3.5):

$$M_c = t_c \times \delta_0 \times ((p_i - p_{c1})/Sd_{c1} - (p_{c1} - p_e)/(Sd_e - Sd_{c1})) \quad (3.5)$$

A máxima massa de evaporação possível para a reserva de secagem no plano com o menor potencial de evaporação no inverno é, em kg/m² (Equação 3.6):

$$M_{ev} = \delta_0 \times t_{ev} \times [(p_s - p_i)/Sd + (p_s - p_e)/(Sd_e - Sd)] \quad (3.6)$$

Assim, calcula-se a reserva de secagem do elemento segundo as Equações 3.7 e 3.8 abaixo, a depender se há ou não água de condensação, e compara-se este valor ao mínimo requerido disposto na DIN 68800-2.

$$M_r = (M_{ev} + M_{ev,Tauperiode}) \times 1000 \quad (3.7)$$

$$M_r = (M_{ev} - M_c) \times 1000 \quad (3.8)$$

Caso a verificação seja positiva, o elemento analisado estará livre de condensação quando sob as condições climáticas simuladas.

3.5.2. Desempenho acústico

3.5.2.1. Objetivos e estratégias para conceção do projeto acústico

Um dos aspetos de maior relevância na qualidade acústica dos edifícios é o isolamento a sons aéreos e a sons de percussão, a assegurar pelos elementos constituintes das fachadas e de compartimentação interior.

Os principais aspetos que condicionam o isolamento sonoro garantido por um elemento construtivo corrente são:

- Ângulo de incidência da onda sonora;
- Frequência da onda sonora incidente;
- Massa superficial (kg/m^2) do elemento construtivo;
- Rigidez do elemento construtivo - módulo de Young (N/m^2);
- Coeficiente de Poisson;
- Amortecimento interno do elemento construtivo;
- Dimensões do elemento construtivo;
- Porosidade do elemento construtivo.

Para os sons aéreos, cuja emissão e propagação se processam através da vibração do ar contido no espaço emissor, o isolamento resulta da dissipação da parte da energia sonora absorvida pelo elemento construtivo. Sendo assim, a estratégia mais utilizada para aumentar a eficiência do isolamento a sons de condução aérea dos elementos de separação entre fogos e do exterior é a utilização de elementos construtivos constituídos por várias camadas separadas ou não por caixas de ar, como paredes de pano duplo e tetos falsos. No caso de existir uma caixa de ar entre elementos duplos ou triplos, o isolamento a sons aéreos será ainda influenciado por:

- Dimensão da caixa de ar;
- Presença e tipo de material de absorção sonora na caixa de ar;
- Existência e forma de ligação entre os panos dos elementos construtivos.

No caso específico dos tetos falsos, a ausência de material isolante na caixa de ar, a aplicação de suspensões rígidas à laje de teto e a aplicação de iluminação embutida, grelhas de ventilação e/ou equipamentos AVAC que quebrem a estanqueidade do elemento são os problemas mais recorrentes que resultam em tetos falsos de fraco desempenho acústico.

No encontro entre elementos, convém que estes estendam-se de modo que os elementos estruturais encontrem-se, interrompendo vãos e caixas de ar entre compartimentos adjacentes.

Como o Índice de Redução Sonora (R_w) de um elemento é tanto maior quanto maior for seu peso, há três abordagens que podem ser aplicadas a depender da massa do sistema:

- I. Aplicação de camadas “pesadas”, que se baseia no princípio expresso pela lei da massa para aumento da eficiência do isolamento de sons de condução aérea. Normalmente esse aumento da massa é materializado pela duplicação dos elementos de separação.
- II. Aplicação de camadas “leves”, cujo funcionamento assenta essencialmente na separação elástica das diferentes camadas para diminuição da transmissão sonora. Normalmente esta separação elástica é materializada pela fixação de painéis leves, do tipo gesso cartonado ou painéis de aglomerado de madeira, a estruturas de suporte independentes. Uma das formas mais simples de atingir a independência entre elementos que se apoiam é aplicar uma camada de material resiliente entre eles.
- III. Aplicação de camadas “mistas”, onde a caixa de ar é parcial ou totalmente preenchida por materiais com boa absorção sonora, como por exemplo, a lã de rocha ou a lã de vidro. Os princípios físicos que fundamentam a diminuição da transmissão sonora desta solução, além de se basearem na lei da massa e na separação elástica das diferentes camadas, baseiam-se também na capacidade de absorção sonora que os materiais porosos e fibrosos possuem para diminuir o nível sonoro dentro da caixa de ar.

Importa referir que, quando da utilização de panos leves, como nas abordagens II e III, o preenchimento parcial da caixa de ar pode provocar um efeito indesejado. A lâmina de ar sob o pano leve permite que este oscile e, devido ao efeito de coincidência, amplifique a transmissão aérea e provoque o efeito “tambor”.

O revestimento em placas de gesso cartonado também é uma estratégia comumente utilizada que contribui para o isolamento acústico a sons aéreos, sendo, por vezes, duplicado para potenciar seus benefícios.

Elementos como frestas, fissuras ou fendas contribuem para a transmissão de sons aéreos e configuram uma quebra no isolamento acústico, pelo que devem ser evitados ao máximo através da execução correta de remates e vedações. Por esse motivo, portas, janelas e caixas de estore podem ser um ponto sensível do isolamento a sons aéreos, recomendando-se o uso de selagens eficientes em todo o perímetro (calafetação de frinchas com material elastómero). Diversas outras boas práticas de aplicação específica às portas, janelas e caixas de estore podem ser elencadas, porém, como este trabalho foca-se na elaboração do sistema construtivo, estas não serão abordadas.

As aplicações de tomadas elétricas a par sem qualquer tipo de reforço acústico, de condutas de ventilação com continuidade entre compartimentos adjacentes sem atenuadores sonoros e de coretes ou roços de grande seção sem aplicação de absorvente sonoro no interior fechados por paredes de pequena espessura ou massa representam quebras no isolamento acústico e devem ser evitadas em prol da manutenção do desempenho acústico relativamente aos sons aéreos.

Os sons de percussão, cuja emissão e propagação decorrem através da vibração de elementos sólidos por ação direta da fonte, são originados por impactos que se propagam quase sem amortecimento. Para este caso, podem ser adotadas as seguintes estratégias, especialmente combinadas:

- I. Revestimento de piso resiliente e espesso ou de base flexível;
- II. Pavimento flutuante, um sistema reológico massa/mola, sendo o elemento “massa” materializado através de um soalho flutuante e o elemento “mola” através das características elásticas da camada de material resiliente colocada entre ele e o elemento estrutural de suporte. Cuidados a ter na execução de um soalho flutuante: dessolidarizar totalmente a estrutura do soalho da laje de suporte evitando a formação de pontos rígidos; subir a membrana resiliente cerca de 15 a 20 cm nas paredes e pilares para evitar pontos rígidos junto ao rodapé; preencher totalmente a cavidade entre o piso e a laje com material fonoabsorvente; no caso de divisórias leves, evitar a continuidade do piso flutuante entre compartimentos adjacentes; sobrepor a membrana e vedar entre camadas; escolher um produto resistente; em zonas de atravessamento de tubagens e/ou de aplicação de caixas de pavimento, envolver e vedar totalmente estes elementos, de forma a desliga-los do piso flutuante;
- III. Teto falso com apoios anti vibráteis que, além de melhorar o isolamento a sons de condução aérea através da duplicação do elemento construtivo (e o material absorvente incluído no espaço de ar), melhora o isolamento sonoro a sons de percussão através dos suspensores acústicos (apoio de suspensão anti vibratório);
- IV. Material resiliente no encontro entre elementos estruturais, como na base de paredes apoiadas sobre pisos, de modo a dessolidarizar os elementos da estrutura e impedir a transmissão das vibrações pela ponte rígida.

Vê-se frequentemente o desligamento das estruturas através de fitas e mantas de material resiliente cada vez mais tecnológicas, estáveis e duráveis.

Além disso, recomenda-se para os materiais de acabamento, como placas de revestimento e rodapés, a salvaguarda de vãos com, no mínimo, 3 mm entre suas bordas e os componentes dos elementos

construtivos à volta, nomeadamente no encontro entre paredes, pisos e tetos, evitando-se as transmissões marginais.

3.5.2.2. Metodologia de previsão do desempenho acústico

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) regula a vertente do conforto acústico no âmbito do regime da edificação, contribuindo para a melhoria da qualidade do ambiente acústico e para o bem-estar e saúde das populações, em articulação com o regime jurídico relativo ao ruído ambiente.

O Decreto-Lei n.º 129/2002, de 11 de maio, aprovou o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios e estabelece valores mínimos de desempenho acústico tanto para os edifícios novos como para os edifícios existentes objeto de reconstrução, ampliação ou alteração dos diversos tipos de edifício, a incluir os multifamiliares.

Os elementos construtivos de edifícios e suas frações que se destinem a usos habitacionais, como abordado neste trabalho, estão sujeitos ao cumprimento dos seguintes requisitos acústicos:

- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m,nt,w}$, entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos;
- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nt,w}$, entre compartimentos de um fogo, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar de outro fogo, como locais recetores;
- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nt,w}$, entre locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores;
- O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nt,w}$, entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores;
- No interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nt,w}$, proveniente de uma percussão normalizada sobre pavimentos dos outros fogos ou de locais de circulação comum do edifício, como locais emissores;
- No interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nt,w}$, proveniente de uma percussão normalizada sobre pavimentos de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores;
- No interior dos quartos e zonas de estar dos fogos, o nível de avaliação, $L_{A,nt}$, do ruído particular de equipamentos coletivos do edifício, tais como elevadores, grupos hidropressores, sistemas

centralizados de ventilação mecânica, automatismos de portas de garagem, postos de transformação de corrente elétrica e instalações de escoamento de águas. Este item não será abordado neste estudo.

O edifício, ou qualquer dos seus fogos, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis, quando, cumulativamente:

- O valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m,nT,w}$ ou $D_{nT,w}$, acrescido do fator I no valor de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar;
- O valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, diminuído do fator I no valor de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar;
- O valor obtido para o nível de avaliação, $L_{A,nT}$, diminuído do fator I no valor de 3 dB (A), satisfaça o limite regulamentar.

Como os critérios de desempenho acústico baseiam-se em índices dependentes da função do elemento no edifício, os painéis elaborados neste trabalho são avaliados segundo todas as suas possíveis funções, de modo a considerar as hipóteses que apresentem os critérios mais rigorosos.

A determinação do índice de redução sonora quanto aos sons aéreos e de percussão a serem comparados com os máximos e mínimos estabelecidos no RRAE foi efetuada a partir do *software* INSUL (Marshall Day, 2021), uma ferramenta para previsão do isolamento acústico em paredes, pisos, tetos e coberturas.

O *software* produz estimativas de perda de transmissão (TL) e isolamento sonoro a sons de percussão (L_n) em bandas de 1/3 de oitava e, segundo o conceito de valor ponderado (índice único) e a partir da comparação das curvas de isolamento sonoro com as curvas de referência constantes nas EN ISO 717-1 (CEN, 2013) e EN ISO 717-2 (CEN, 2020), provê o índice de redução sonora (R_w) ou índice de isolamento sonoro a sons de percussão ($L_{n,w}$).

A comparação da curva descrita pelos valores previstos para TL e L_n , por frequência, com a curva convencional de referência é realizada através da sobreposição de modo que o valor da soma dos desvios em sentido desfavorável seja o mais elevado possível, todavia sem ultrapassar o valor de 32 dB para bandas de 1/3 de oitava. Para sons aéreos, o desvio desfavorável ocorre quando o valor previsto do isolamento sonoro é inferior ao valor de referência. Para sons de percussão, o desvio desfavorável ocorre quando o valor previsto do nível de pressão sonora de percussão é superior ao valor de referência. Conseguindo este ajustamento, o valor de R_w e $L_{n,w}$ corresponde ao valor da ordenada da curva de referência para a frequência de 500 Hz.

O *software* considera painéis de espessura fina e os efeitos de tamanho finito, importantes para elementos em baixas frequências.

Como qualquer ferramenta de previsão, o *software* INSUL (Marshall Day, 2021) não é um substituto para a medição *in situ*. No entanto, comparações com os dados de teste indicam que ele prevê com segurança os valores R_w dentro de 3 dB para a maioria das construções.

3.6. Segurança ao fogo

Nesta seção serão abordadas as medidas e requisitos de isolamento e proteção ao fogo impostos pela a legislação portuguesa em vigor aos elementos construtivos em desenvolvimento para garantia da segurança dos usuários e integridade da estrutura dos edifícios.

Assim como nos aspetos térmico e acústico, fatores dependentes da arquitetura do edifício, como: as condições exteriores comuns, o desenho das fachadas e acesso a elas, a posição relativa de vãos situados na mesma prumada e a posição, largura dos vãos, distâncias a percorrer, número e inclinação e potencial efetivo das vias de evacuação; além daqueles relativos aos equipamentos e sistemas de segurança contra incêndios, como: sistemas de deteção, alerta e alarme, sinalização e iluminação de emergência e meios de controlo de fumo e de extinção de incêndio não são abordados neste estudo, pelo que apenas os elementos construtivos propostos são objeto de avaliação, excluindo portas, janelas e instalações técnicas.

3.6.1. Objetivos e estratégias para conceção do projeto de segurança ao fogo

Os esforços em busca da segurança contra o fogo objetivam a proteção da vida humana, do patrimônio e do meio ambiente. Nesse sentido, a proteção passiva, um dos métodos mais eficientes de proteção contra incêndio, deve exercer papel protagonista, pelo que a segurança dos usuários na manutenção de sua integridade física e possibilidade de fuga não deve ser reduzida à confiabilidade do auxílio exterior para a extinção do incêndio. A proteção passiva contra o fogo é maioritariamente determinada pelos elementos construtivos e materiais do edifício, embasando-se, principalmente, no correto comportamento dos elementos estruturais, das compartimentações e dos materiais de revestimento frente ao fogo.

O tipo de ocupação do edifício assume um dos primeiros e mais decisivos critérios de projeto que e determina, entre outros fatores, quais medidas de prevenção deverão ser incorporadas. As estratégias de proteção ao fogo resumem-se em três categorias:

- I. Resistência ao fogo: propriedade de um elemento construtivo de resistir à ação do fogo por

determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável. É fundamental para os elementos estruturais e elementos compartimentadores por avaliar se o sistema construtivo é capaz de resistir à um incêndio em relação à estanqueidade, estabilidade e isolamento térmico;

- II. Reação ao fogo: é a contribuição que os materiais e produtos de acabamento e revestimento (ou quaisquer elementos que estejam expostos às chamas do incêndio), e ainda os isolantes térmicos e os absorventes acústicos são capazes de dar para o desenvolvimento do incêndio, influenciando no seu crescimento e propagação, e nas ações de extinção e abandono do edifício. Relaciona-se à capacidade de sofrer e sustentar calor e produzir fumo e agrava-se nos elementos que tem posição elevada (como tetos falsos e cobertura) e orientadas na vertical (como paredes) devido à tendência do fogo em alastrar-se para cima. Uma solução simples e efetiva para os revestimentos internos consiste na aplicação de múltiplas camadas de placas de gesso cartonado com juntas escalonadas que também contribuem para a resistência à transmissão do som, como visto anteriormente. Apesar da frequente aplicação deste material, faz sentido considerar placas à base de madeira com valor estético em edifícios construídos majoritariamente nesse material mas que, a depender, podem requerer tratamentos específicos ou um suporte de gesso cartonado para atender aos requisitos;
- III. Compartimentação: é a divisão do edifício em setores de incêndio para garantir a proteção de determinadas áreas, impedir a propagação do incêndio ou fracionar a carga de incêndio, horizontal ou verticalmente. A compartimentação corta-fogo, para além da capacidade de suporte, devem garantir a estanqueidade a chamas e gases quentes e o isolamento térmico durante um determinado tempo e, para tal, é requerida a comprovação de resistência ao fogo ou o cumprimento das especificações na geometria do edifício, além do cumprimento quanto à reação ao fogo. Estes elementos devem ser contínuos, atravessando pisos ou tetos falsos e, em caso de passagem de canalizações ou condutas, estas devem ser seladas ou ter registros corta-fogo. Elementos como a fachada, cobertura, caixa de escadas e elevadores são considerados elementos compartimentadores. Ressalta-se que a barreira antifogo completa inclui não somente o painel, como também as junções aos painéis adjacentes.

Apesar de não se enquadrar nos objetivos de concepção do sistema construtivo neste documento, convém mencionar que o edifício só existe no contexto de seu entorno e implantação e, portanto, esses condicionantes também influenciam na concepção da proteção passiva contra o fogo. É função do projetista garantir condições para o acesso de socorro público, bem como empregar o correto

afastamento entre edifícios adjacentes de forma a prevenir o alastramento generalizado do fogo, seja por radiação de calor, convecção de gases quentes ou transmissão de chama.

Ainda, como mencionado anteriormente, demais medidas de proteção passiva dependentes da arquitetura interna do edifício e de proteção ativa para controlo e combate a eventuais fogos não são abordadas nesse estudo, mas devem ser devidamente avaliadas e aplicadas quando da conceção de projetos em uso do sistema construtivo proposto.

3.6.2. Metodologia de previsão do desempenho ao fogo

O Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro, engloba as disposições regulamentares de segurança contra incêndio aplicáveis a todos os edifícios, recintos e respetivas envolventes, sejam eles de utilização exclusiva ou ocupação mista, visando reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios; limitar o desenvolvimento de eventuais incêndios, circunscrevendo e minimizando os seus efeitos, nomeadamente a propagação do fumo e gases de combustão; facilitar a evacuação e o salvamento dos ocupantes em risco; e permitir a intervenção eficaz e segura dos meios de socorro. A resposta aos referidos princípios é, então, estruturada com base na definição das utilizações-tipo, das categorias de risco e dos locais de risco.

Neste trabalho, são supostos os edifícios correspondentes à utilização-tipo I, destinados à habitação multifamiliar, incluindo os espaços comuns de acessos e as áreas não residenciais reservadas ao uso exclusivo dos residentes. Os fatores de risco associados à utilização-tipo I são a altura da utilização-tipo e número de pisos abaixo do plano de referência. Como este estudo destina-se a edifícios de até 5 pisos e impõe-se as restrições abordadas no início do capítulo que limitam as dimensões dos painéis e, conseqüentemente, o gabarito das edificações, assume-se a 2ª categoria de risco, em que a altura dos edifícios da utilização-tipo I é igual ou inferior a 28 metros e o número de pisos abaixo do plano de referência destinados à utilização-tipo I é igual ou inferior a 3. Apesar dessa categoria de risco considerar o máximo de 3 pisos abaixo do plano de referência, os elementos construtivos em análise destinam-se exclusivamente ao uso em pisos acima do nível do terreno por questões de durabilidade, pelo que todas as considerações assumidas para avaliação de sua proteção ao fogo levou esta condição em consideração.

Avalia-se os locais dos edifícios para uma classificação de risco A, em que:

- O efetivo não exceda 100 pessoas;
- O efetivo de público não exceda 50 pessoas;
- Mais de 90% dos ocupantes não se encontrem limitados na mobilidade ou nas capacidades de

percepção e reação a um alarme;

- As atividades nele exercidas ou os produtos, materiais e equipamentos que contém não envolvam riscos agravados de incêndio.

Enquanto o Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro, define as classes de reação e resistência ao fogo para os produtos da construção em suas diversas aplicações, a Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro, que tem por objeto a regulamentação técnica das condições de segurança contra incêndio em edifícios e recintos, dispõe as classes de reação e de resistência ao fogo mínimas a serem cumpridas pelos elementos construtivos e seus materiais componentes, sejam eles estruturais, de compartimentação ou de revestimento.

Assim, a partir das propriedades dos materiais escolhidos para a composição dos painéis pré-fabricados em madeira (Seção 4.4) e do prescrito nos referidos diplomas legais, faz-se a comparação para avaliar a:

- Qualificação da resistência ao fogo dos elementos estruturais:
 - Resistência ao fogo de elementos estruturais;
 - Isolamento entre eventuais utilizações-tipo distintas;
 - Compartimentação geral corta-fogo;
 - Isolamento e proteção de locais de risco;
 - Isolamento e proteção de meios de circulação (vias verticais e horizontais de evacuação).
- Qualificação da reação ao fogo dos materiais de revestimento:
 - Revestimentos em vias de evacuação (horizontais e verticais);
 - Revestimentos em câmaras corta-fogo;
 - Revestimentos em locais de risco.

Para quantificar a resistência ao fogo da estrutura, o dimensionamento dos componentes de suporte de carga dos painéis nos diferentes projetos em que o sistema seja aplicado deve seguir as prescrições da EN 1995-1-2 (CEN, 2004) em associação à EN 1995-1-1 (CEN, 2004) e EN 1991-1-2 (CEN, 2002), de modo a evitar colapsos prematuros da estrutura e a propagação do fogo. Este dimensionamento, específico a cada projeto, não será abordado neste documento.

3.7. Desempenho mecânico

Nesta seção são abordados os objetivos e estratégias para conceção do projeto estrutural e a metodologia utilizada para validação do sistema construtivo em termos estruturais quando aplicado a um edifício real,

objeto de estudo do Capítulo 5. Aborda-se exclusivamente a superestrutura em madeira, sem quaisquer considerações quanto a fundação.

3.7.1. Objetivos e estratégias para concepção do projeto estrutural

As estruturas em madeira, assim como qualquer outra, devem suportar as ações impostas a elas e permanecer aptas para o uso pretendido durante toda sua vida útil, apresentar facilidade de manutenção e não ser suscetíveis a danos desproporcionais à causa original. Para tanto, a exploração da alta relação resistência-massa, da capacidade de desenvolver caminhos de carga alternativos e impedir a propagação de danos e da capacidade de absorver energia associada a forças inerciais quando perto de colapsar via mecanismos diferentes de amortecimento são os aspectos principais no projeto de estruturas em madeira.

Porque são relativamente leves, especial atenção deve ser dada à estabilidade das estruturas em madeira, para além das falhas por deformação excessiva, prezando não somente pela segurança, como também pelo conforto dos usuário.

Visando suportar uma extensão limitada de possíveis danos ou falhas sem colapsar, alcança-se a robustez desejada através da:

- Minimização os riscos aos quais a estrutura possa ser exposta;
- Escolha formas estruturais menos propensas aos riscos considerados;
- Projetar estruturas com potencial de superar danos localizados;
- Evitar tanto quanto possíveis sistemas estruturais que podem entrar em colapso sem aviso.

Garantir que os diafragmas horizontais tenham elevada rigidez no plano e resistência à encurvadura permite que as paredes funcionem de maneira estruturalmente eficiente. Ainda, manter espaçamento vertical modesto entre os diafragmas de piso em comparação às suas dimensões planas evita a necessidade de paredes excessivamente espessas, uma vez que seus comprimentos efetivos são limitados. Garantir a ligação adequada entre os elementos de piso e parede e que a estrutura comporte-se monoliticamente em termos dinâmicos minimiza o potencial de forças prejudiciais fluírem através das ligações.

3.7.2. Metodologia de previsão do desempenho mecânico

A análise do desempenho mecânico do sistema construtivo é desenvolvida para um caso de estudo, apresentado no Capítulo 5. O edifício escolhido é modelado no *software* comercial RFEM (Dlubal Software, 2021), um programa de cálculo automático comercial, geral, com módulos específicos para o

dimensionamento de estruturas de madeira e amplamente utilizado pela indústria da madeira e, em complemento, recorre-se ao *software* Calculatis (Stora Enso, 2021), uma ferramenta de verificação disponibilizada por um importante produtor de CLT Europeu e cuja análise e verificação da metodologia foi realizada na Universidade do Minho, para a verificação estrutural de componentes específicos.

Na modelação do edifício, aplicam-se ações permanentes (peso próprio e cargas permanentes), variáveis de médio prazo (sobrecargas) e instantâneas (vento). Os carregamentos permanentes, referentes ao peso próprio, são calculados a partir das espessuras, seções e densidades dos materiais componentes dos painéis. As sobrecargas consideradas são determinadas conforme as prescrições do Eurocódigo 1 - Parte 1 (EN 1991-1-1 (CEN, 2002)) e as forças de vento, segundo o Eurocódigo 1 - Parte 3 (EN 1991-1-3 (CEN, 2002)) a partir das pressões superficiais.

O valor de referência da velocidade do vento, definido em função da direção do vento e da época do ano a uma altura de 10 m acima da superfície de um terreno da categoria II, é (Equação 3.9):

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0} \quad (3.9)$$

onde $v_{b,0}$ é o valor básico da velocidade de referência do vento; c_{dir} é o coeficiente de direção; e c_{season} é o coeficiente de sazão.

A pressão dinâmica de referência é (Equação 3.10):

$$q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 \quad (3.10)$$

onde o valor recomendado para ρ é 1,25 kg/m³.

O coeficiente de exposição é (Equação 3.11):

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (3.11)$$

Assim, a pressão dinâmica de pico à altura z , $q_p(z)$, é (Equação 3.12):

$$q_p(z) = c_e(z) \times q_b \quad (3.12)$$

A pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores, w_e , e interiores, w_i , são (Equações 3.13 e 3.14):

$$w_e = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (3.13)$$

$$w_i = q_p(z_i) \times c_{pi} \quad (3.14)$$

onde c_{pe} é o coeficiente de pressão para a pressão exterior e ; e c_{pi} é o coeficiente de pressão para a pressão interior i .

A força exercida pelo vento, F_w , é então determinada pela soma vetorial das forças $F_{w,e}$, $F_{w,i}$ e F_{fr} (Equações 3.15–3.17).

$$F_{w,e} = c_s c_d \times \sum_{\text{superfícies}} w_e \times A_{ref} \quad (3.15)$$

$$F_{w,i} = \sum_{\text{superfícies}} w_i \times A_{ref} \quad (3.16)$$

$$F_{fr} = c_{fr} \times q_p(z_e) \times A_{fr} \quad (3.17)$$

onde c_{ed} é o coeficiente estrutural; c_r é o coeficiente de força relativo à construção; e A_{ref} é a área de referência da construção.

No âmbito das verificações, os elementos em madeira são atribuídos à classe de serviço 1 (teor de água não superior a 12% a uma temperatura de 20°C e humidade relativa do ar excedendo 65% apenas em algumas semanas por ano) e consideram-se apenas as ações desfavoráveis à estrutura. Assim, para as combinações de ações para o estado limite último (Equação 3.18) e estado limite de serviço (Equação 3.19), são utilizados os seguintes fatores de carga parcial (Tabela 3.2) e valores representativos de cada ação (Tabela 3.3).

$$\sum_{i>1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.18)$$

$$\sum_{i>1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.19)$$

Tabela 3.2 – Fator de carga parcial para os carregamentos permanentes e variáveis

Permanentes (γ_G)	Variáveis (γ_Q)
1,35	1,50

Tabela 3.3 – Valores representativos de cada ação

Carregamento	Valores representativos de cada ação		
	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Permanentes	1,0	1,0	1,0
Sobrecarga	0,7	0,5	0,3
Vento	0,6	0,2	0,0

Para os elementos estruturais analisados, consideram-se os valores para o coeficiente de modificação, k_{mod} , expostos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores de k_{mod} para os elementos estruturais analisados

Elemento	Valores para Madeira maciça/Glulam/Laminada		
	Permanente	Médio prazo	Instantânea
k_{mod}	0,6	0,8	0,9

Através das verificações no Calculatis (Stora Enso, 2021), é possível analisar os componentes estruturais quanto ao seu comportamento no estado limite último quando sob a ação do fogo a depender do nível de proteção previsto para o elemento. Sendo assim, considera-se a combinação de ações da Equação 3.20 aplicando-se γ_G , γ_Q e k_{mod} iguais a 1,0 e os valores de Ψ_2 expostos na Tabela 3.3.

$$\sum_{i>1} G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.20)$$

A verificação dos componentes estruturais dos painéis obedece ao Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)). A partir do modelo no *software* RFEM (Dlubal Software, 2021) é possível observar o comportamento global do edifício, a distribuição de cargas pela estrutura e as forças internas atuantes em cada um dos elementos. Identificando aqueles sujeitos aos maiores esforços, procede-se com sua verificação através do *software* Calculatis (Stora Enso, 2021), onde aplicam-se as verificações para o estado limite último e de serviço elencadas nas Tabelas 3.5 e 3.6 segundo as respectivas seções do Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 (CEN, 2004)).

Tabela 3.5 – Verificações desenvolvidas para o estado limite último

Verificação		Seção do Eurocódigo 5
Flexão		6.1.2, 6.1.4, 6.1.6, 6.2 (Elementos verticais) 6.1.6, 6.2.3, 6.2.4 (Elementos horizontais)
Corte	Em y; Em z; Corte deslizante	6.1.7
	Em duas direções	Equação NA.6.15-E1
Estabilidade	Encurvadura	6.3
	Bambeamento	

Tabela 3.6 – Verificações desenvolvidas para o estado limite de serviço

Verificação	Seção do Eurocódigo 5
w_{inst}	Equação NA.7.2-E2
w_{fin}	Equação NA.7.2-E1
$w_{net,fin}$	Equação NA.7.2

As verificações desenvolvidas no âmbito da resistência ao fogo são análogas às expostas na Tabela 3.5, diferindo apenas quanto à seção considerada para o elemento estrutural (seção residual após o incêndio). Neste documento, não é desenvolvida a análise das ligações entre os diversos elementos estruturais.

CAPÍTULO 4

O SISTEMA CONSTRUTIVO, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo destina-se ao desenvolvimento do sistema construtivo em painéis pré-fabricados de madeira a partir das restrições e estratégias de conceção definidas no capítulo anterior, abrangendo desde a definição do conceito e premissas de projeto determinantes para a aplicabilidade do sistema, até a pormenorização das camadas, materiais, junções e arremates.

O desenvolvimento do sistema dá-se em parceria com a empresa PORTILAME - Engenharia e Madeira, Lda, pelo que as decisões de projeto baseiam-se tanto em argumentos técnicos quanto comerciais.

Ademais, são aplicadas as metodologias de previsão do desempenho do sistema para determinação de suas características mecânicas, funcionais e de resistência ao fogo em cumprimento aos requisitos normativos e legais do contexto nacional.

4.1. Definição do conceito

Com o objetivo de promover uma solução alternativa aos materiais convencionais, faz-se uso da madeira, um material natural, renovável e armazenador de carbono, associado aos benefícios do processo de pré-fabricação para a conceção de um sistema construtivo que atue como ferramenta estratégica para o cumprimento das metas nacionais de neutralidade carbónica.

A partir de características concebidas e validadas para a aplicação bem sucedida no contexto português, procura-se propor um sistema que atenda aos padrões nacionais de conforto e desempenho e que, através do preenchimento das lacunas do conhecimento no que se refere ao uso da madeira estrutural em edifícios, promova a maior aceitação do público e domínio técnico por parte do sector da construção.

Com base nos objetivos de conceção, são estabelecidas as premissas do sistema:

- Utilização da madeira como material estrutural exclusivo, com exceção da fundação e eventuais ligações metálicas associadas aos elementos de madeira;
- Definição da unidade básica estrutural em painéis, seja para paredes, pisos ou cobertura;
- Adequação para estruturas de edifícios multifamiliares até 5 pisos, quer para construção nova, quer para reabilitação;
- Cumprimento aos requisitos e condições estruturais, funcionais e de logística impostas pelos regulamentos nacionais, prezando pela segurança, durabilidade, conforto e aplicabilidade;

- Maximização da pré-fabricação do sistema construtivo;
- Utilização de materiais complementares em consonância com os padrões de consumo e de acessibilidade técnica-financeira nacionais, de modo a facilitar a replicação e aceitação do sistema;
- Priorização para utilização de espécies de madeira nacional, origem local, para o fortalecimento da bioeconomia local por meio do uso de recursos florestais locais;
- Elevado potencial de adequação a projetos variados a partir da versatilidade arquitetônica (dimensões e espessuras) e possibilidade de conjugação de diferentes soluções estéticas;
- Processos de produção, montagem e instalação simples, rápidos e precisos;
- Favorecimento ao desenvolvimento de edifícios de alta eficiência energética, promovendo cidades cada vez mais sustentáveis.

4.2. Premissas de projeto

O desenvolvimento e aplicação do sistema construtivo, para além da definição do conceito que estipula sua essência e propósitos, sujeita-se a predefinições que tipificam e especificam os painéis e conferem as condições ideais de projeto para a adequação e o devido cumprimento dos objetivos estruturais e funcionais do sistema.

As premissas de projeto compreendem desde a definição da tipologia estrutural dos painéis para cada um dos elementos construtivos até regras para projeto dos edifícios de aplicação do sistema.

Logo, determina-se que:

- Os painéis de paredes resistentes às cargas verticais sejam elaborados em estrutura leve de *timber-frame*, com exceção aos painéis de parede do núcleo que confinam eventuais caixas de escadas e elevadores que, devido à função de núcleo central, podem ser materializados por CLT;
- Os painéis de piso, de maneira a produzir diafragmas resistentes na estrutura, devem ser elaborados com elementos de CLT;
- Os painéis em *timber-frame* devem ter, a princípio, as seguintes dimensões máximas, segundo as restrições de transporte (sujeitas a alterações caso as restrições estruturais ou respeitantes às condições de contorno da obra sejam mais rigorosas):
 - Comprimento: 13,60 metros;
 - Largura: 2,45 – 2,48 metros;
 - Altura: 2,50 – 3,00 metros;
 - Peso da carga: 24 – 25,5 toneladas.

- Os painéis em CLT devem ter, a princípio, as seguintes dimensões máximas, segundo as restrições de produção impostas pelo equipamento CNC (sujeitas a alterações caso as restrições estruturais ou respeitantes às condições de contorno da obra sejam mais rigorosas):
 - Comprimento: 13,50 metros;
 - Largura: 1,25 metros.
- A fundação deve ser executada em betão armado;
- Os projetos devem contar com um núcleo resistente para deslocamentos verticais (escadas e elevadores) sempre localizado numa zona central do edifício;
- Convém que as áreas molhadas do edifício que requerem abastecimento e recolha hídrica, nomeadamente casas de banho e cozinhas, estejam dispostas no mesmo alinhamento vertical do edifício, favorecendo a adoção de coretes e reduzindo a necessidade de passagem de tubagens por entre elementos de áreas secas.

4.3. Soluções estruturais

As paredes em *timber-frame* (Figura 4.1) são as responsáveis pelo suporte e transferência dos esforços aos elementos de piso e fundação.

São formadas por montantes de pinho (*Pinus pinaster*), de seção 40 x 140 mm² e espaçados de 300 a 600 mm que devem ser propriamente definidos segundo os cálculos de dimensionamento estrutural para cada painel ou pavimento do edifício a depender das cargas incidentes sobre eles.

Os banzos, de mesma espécie e seção dos montantes, são dispostos duplicados na base dos painéis, de maneira a fornecer uma área de ancoragem suficiente para afixação dos painéis de parede aos elementos de piso e das placas de fecho e revestimento à malha estrutural dos painéis, e também no topo dos painéis. Os banzos inferiores e superiores extremos são instalados em obra, respetivamente, para promover precisão na implantação das paredes em cada piso, minimizando desvios de alinhamento e prumo, e para atuar como elemento de união para as diversas paredes do pavimento, favorecendo a união e transferência de esforços através das juntas desfasadas às juntas entre painéis.

São adotados elementos de travamento de mesma espécie e seção dos banzos e montantes, dispostos em níveis alternados entre vãos, contribuindo, assim, para a limitação dos movimentos laterais dos montantes e para a resistência lateral da estrutura, bem como para o provisionamento de suporte horizontal para as placas de fecho. Podem ser aplicados, ainda, montantes e elementos de travamento para afixação de acessórios e redes, como caixas de tomada, artefatos cerâmicos para casa de banho e tubagens, sem que desempenhem qualquer função estrutural.

Para garantir a resistência no plano aquando da incidência de cargas laterais, os painéis são fechados em ambas faces com placas OSB com 15 mm de espessura, para classe de serviço 2 para painéis de fachadas e confinantes de áreas molhadas e classe de serviço 1 para paredes internas estruturais confinantes de áreas secas, fornecidas nas dimensões 2500 x 1250 mm. Em larga escala, as placas devem ser afixadas à estrutura *timber-frame* ainda em fábrica, com exceção a casos específicos em que a ligação do painel à estrutura de piso ou às paredes adjacentes seja impossibilitada com o painel completamente fechado. Nesta ocasião, este painel pode ter uma de suas faces fechada em obra, promovendo acesso ao interior para execução de fixações. Ressalta-se, porém, a obrigação ao aumento dos cuidados no transporte e manuseio para carga, descarga e aplicação dos painéis, evitando distorções excessivas e inaceitáveis.

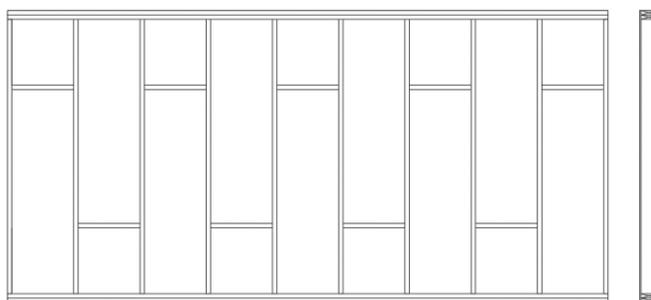


Figura 4.1 – *Timber-frame* com montantes, banzos, elementos de travamento e OSB para fecho em ambas as faces

A malha estrutural das paredes pode ser alterada, contudo, na ocasião de aberturas, quando montantes adicionais são necessários em suas extremidades tanto para conferir rigidez aos painéis, como para suportar as cargas provenientes dos lintéis. A quantidade de montantes adicionais dependerá do tamanho da abertura e de sua localidade relativamente à padronagem de distribuição dos montantes.

Para janelas de tamanho padrão que são mais largas que os vãos entre montantes e cujas extremidades laterais condizem com os montantes da malha estrutural, basta que sejam adicionados um montante para suporte da verga, localizada logo abaixo dos banzos superiores, e outro para suporte do peitoril em justaposição aos montantes existentes de cada um dos lados. Os suportes do peitoril também operam como um meio para afixação das placas de fecho inferiores à janela e elementos com essa mesma função também são necessários no nível dos lintéis quando a janela não é suficientemente alta para facear a superfície inferior da verga (Figura 4.2).

Caso as aberturas não coincidam com a padronagem dos montantes, um montante adicional deve ser inserido para além dos montantes de suporte da verga e peitoril. A mesma metodologia se aplica para aberturas de portas (Figura 4.3).

Os elementos de travamento não foram inseridas nas Figuras 4.2–4.5 e 4.8–4.10 apresentadas para

ilustração da paginação de contorno de aberturas de modo a facilitar a visualização e identificação dos componentes de interesse.

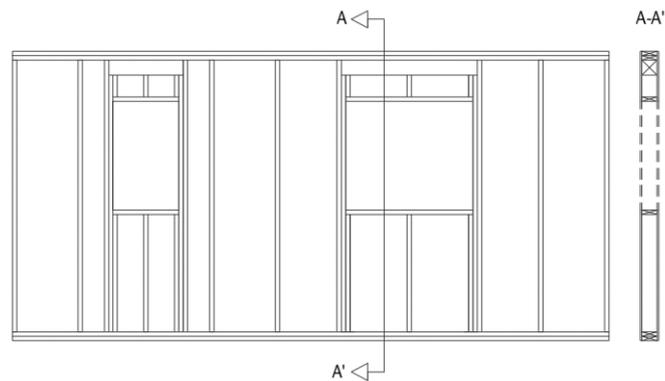


Figura 4.2 – Disposição de montantes para aberturas cujas extremidades laterais coincidem com a padronagem dos montantes

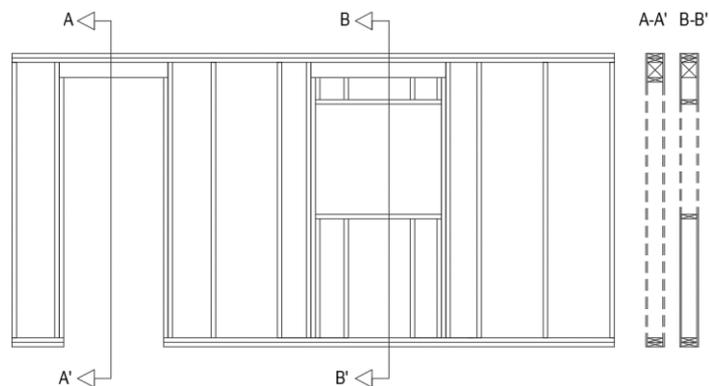


Figura 4.3 – Disposição dos montantes para aberturas cujas extremidades laterais não coincidem com a padronagem dos montantes

Aberturas de tamanho superior que implicam em cargas significativamente maiores sobre os lintéis podem necessitar de mais montantes suportando-as. Nesse caso, os montantes de peitoril podem ser alongados até a verga para suportá-la (e o peitoril conectado lateralmente aos montantes) ou, caso esta medida não seja suficiente, mais montantes são adicionados. O mesmo ocorre caso as cargas dos lintéis sejam muito intensas em decorrência, por exemplo, do desalinhamento vertical das aberturas da estrutura (Figura 4.4).

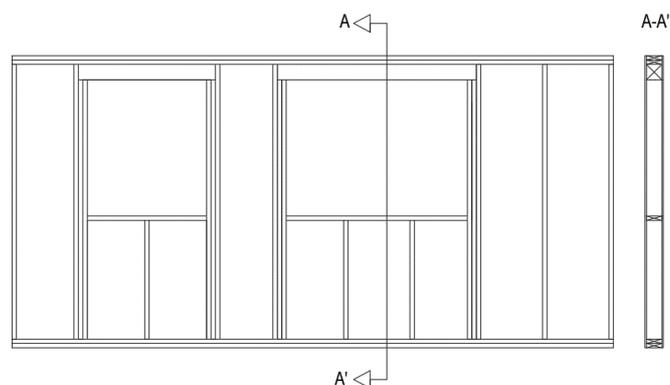


Figura 4.4 – Disposição de montantes para aberturas de tamanho superior

O oposto ocorre para as aberturas de largura igual ou inferior ao vão entre montantes. Neste caso, basta que haja um montante em cada lado da abertura, em que fixam-se lateralmente o peitoril e o elemento de topo da abertura, e pode-se dispensar o uso de vergas (Figura 4.5).

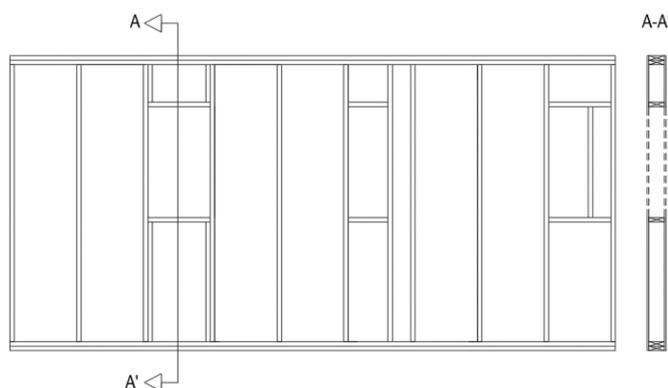


Figura 4.5 – Disposição de montantes para aberturas de largura igual ou inferior ao vão entre eles

Ressalta-se que a padronagem estabelecida para o contorno de aberturas não descarta a necessidade de cálculos precisos que determinem a solução mais adequada em termos de quantidade de montantes para suporte das cargas incidentes. As vergas devem ser igualmente dimensionadas e elaboradas em madeira maciça ou lamelada de pinho ou abeto (*Picea abies*) com a seção apropriada contendo largura não superior à 140 mm, referente à largura do *timber-frame*.

Os painéis de piso, que suportam as cargas permanentes e de serviço sobre eles e atuam como diafragmas no suporte e transmissão das cargas laterais incidentes no edifício, são elaborados em estrutura de CLT em pinho ou abeto de espessura entre 60 a 280 mm em 3, 5 ou 7 lamelas (intervalo em que são normalmente comercializados – dados dos painéis CLT BBS 125, da Binderholz), a depender das cargas suportadas e do vão a ser vencido, que repousam diretamente sobre as paredes estruturais em *timber-frame* (Figura 4.6).

Entretanto, conforme o comprimento dos vãos, pode ser necessária a adição de vigas de pavimento que sustentem o CLT, conferindo rigidez ao conjunto e limitando as deflexões ao meio do vão. Neste caso, optou-se por não repousar as vigas diretamente sobre a estrutura em *timber-frame*, o que requereria reforços justapostos aos montantes ou mesmo alocação de montantes adicionais a meio vão. Assim, como solução para o encontro entre pisos suportados por vigas e paredes, adotou-se uma viga de coroamento sobre os banzos superiores, sobre a qual, por sua vez, repousam os painéis CLT e ligam-se às vigas transversais de pavimento lateralmente (face-topo), transferindo os esforços de piso à parede (Figura 4.7).

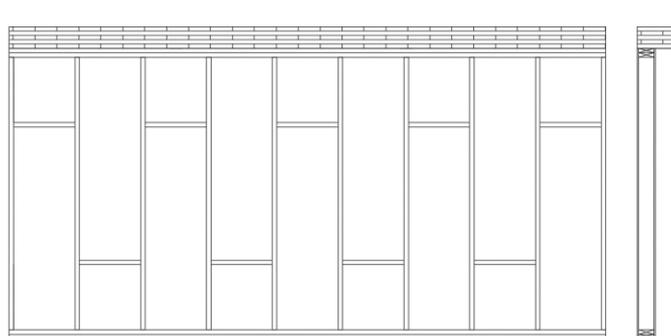


Figura 4.6 – CLT apoiado diretamente sobre a parede em *timber-frame*

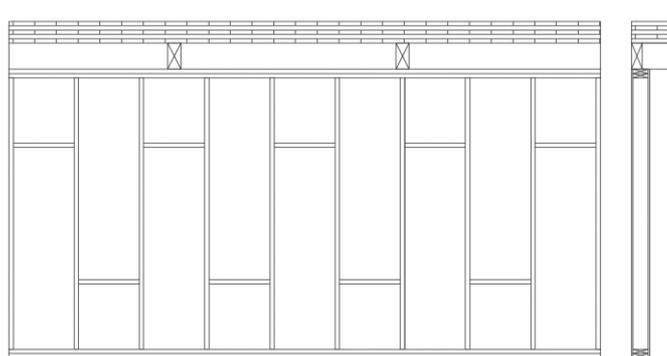


Figura 4.7 – CLT apoiado sobre vigas de pavimento que descarregam sobre a parede em *timber-frame*

As vigas de pavimento e de coroamento podem ser maciças ou de madeira lamelada colada de pinho ou abeto conforme a seção necessária para o devido suporte do pavimento e, assim como os painéis CLT, têm suas dimensões definidas pela dimensionamento estrutural de cada projeto em específico. As vigas de coroamento devem ser alocadas apenas em obra, contribuindo, assim com o banzo superior extremo para reforçar a união entre painéis de parede consecutivos, fazendo-os comportar-se como um elemento único. Já as vigas de pavimento podem ser alocadas em obra ou acopladas aos painéis CLT ainda em fábrica, oferecendo maior agilidade de montagem e, conseqüentemente, de promoção da proteção contra intempéries da estrutura subjacente quando em obra.

Quando da utilização das vigas de coroamento, estas podem desempenhar o papel das vergas das aberturas mesmo sobre os banzos superiores. Sendo assim, dispensa-se a adição dos montantes para suporte de vergas, pelo que um montante de cada lado travado lateralmente pelos elementos de travamento é suficiente para conferir rigidez ao painel no contorno das aberturas. Mantém-se, contudo, os montantes de suporte do peitoril e seus semelhantes ao nível do lintel para fornecer superfície de fixação aos painéis de fecho (Figuras 4.8 e 4.9). Esta configuração pode não ser suficiente para aberturas excessivamente grandes, pelo que mantém-se a obrigação de adicionar, pelo menos, um montante em cada extremidade lateral (Figura 4.10).

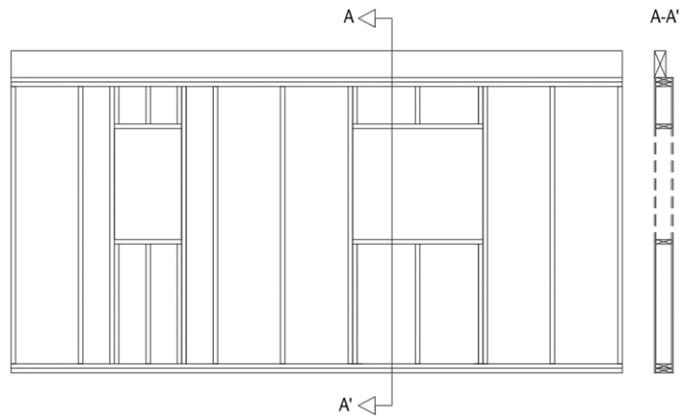


Figura 4.8 – Disposição de montantes para aberturas cujas extremidades laterais coincidem com a padronagem dos montantes quando há viga de coroamento

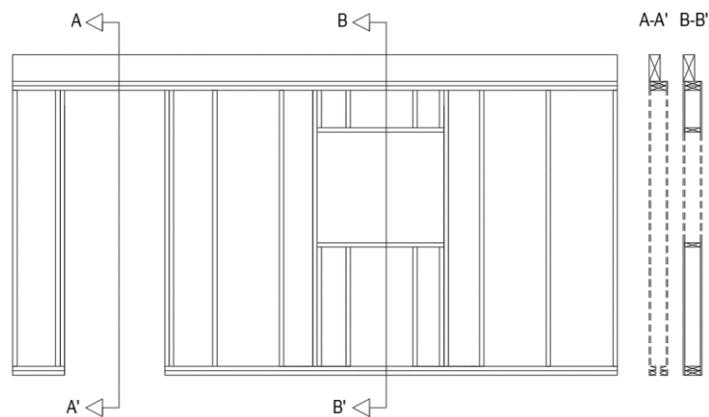


Figura 4.9 – Disposição de montantes para aberturas cujas extremidades laterais não coincidem com a padronagem dos montantes quando há viga de coroamento

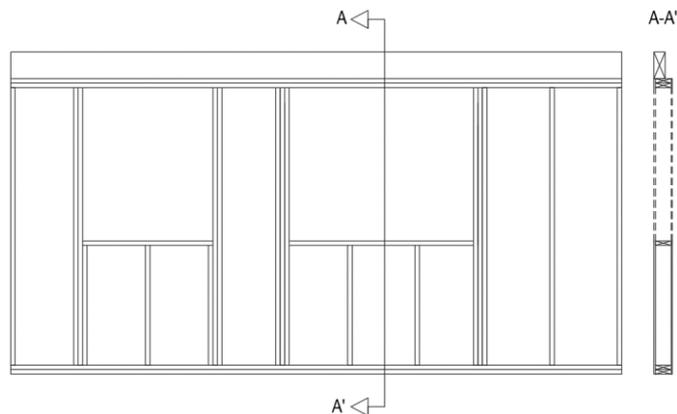


Figura 4.10 – Disposição de montantes para aberturas de tamanho superior quando há viga de coroamento

Assim como os elementos de piso, os painéis de parede do núcleo para caixa de escadas e elevadores resistem ao corte ocasionado pelas cargas laterais provenientes de ventos e sismos e, por isso, convém que sejam elaborados em uma ou duas camadas combinadas de painéis CLT, medida que, juntamente com as especificações dos painéis, como número de lamelas e espessura, deve ser determinada pelo dimensionamento estrutural.

Como as dimensões acuradas da seção das vigas e espessura do CLT são precisados quando do dimensionamento estrutural de cada projeto, as dimensões apresentadas nas imagens desta e das seções subsequentes para apresentação do sistema construtivo são arbitrárias e têm efeito meramente ilustrativo. Ainda, a pormenorização das ligações entre painéis de parede, piso e combinados será abordada em detalhes posteriormente, na Seção 4.5 deste documento.

4.4. Elementos construtivos

Nesta seção serão pormenorizados os painéis elaborados segundo as estratégias de conceção apresentados no Capítulo 3 para cada um dos elementos construtivos, a conter as camadas funcionais e estéticas, seus respetivos materiais e espessuras.

A determinação dos materiais empregues ao sistema baseou-se na qualidade, nas propriedades específicas ao bom desempenho de suas funções, na adequação ao tipo de sistema construtivo e nos padrões de consumo verificados em Portugal, que elucidam seu nível de aceitação do público, disponibilidade de mercado, acessibilidade de custos e o domínio de aplicação e manutenção por parte dos técnicos do sector, e asseguram a completa aptidão do sistema construtivo desenvolvido. Importa referir que todas as indicações de produtos e fornecedores são sugestões que podem ser substituídas por materiais equivalentes em propriedades e comportamento.

4.4.1. Paredes externas (Par_Ext_TF)

As paredes externas constituem-se da estrutura descrita na Seção 4.3 em associação às camadas que conferem a funcionalidade do elemento em termos térmicos, acústicos, de proteção contra o fogo e intempéries (Figura 4.11).

1. Gesso cartonado (15 mm)
2. Gesso cartonado (15 mm)
3. Lã de rocha (50 mm)
4. OSB (15 mm)
5. Barreira para-vapor
6. Lã de rocha (140 mm)
7. OSB (15 mm)
8. Membrana respirável
9. Sub-ripado (15 mm)
10. Ripado (30 mm)
11. Abeto (19 mm)

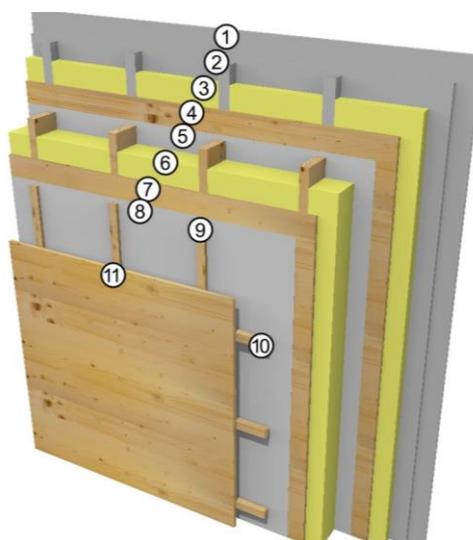


Figura 4.11 – Par_Ext_TF

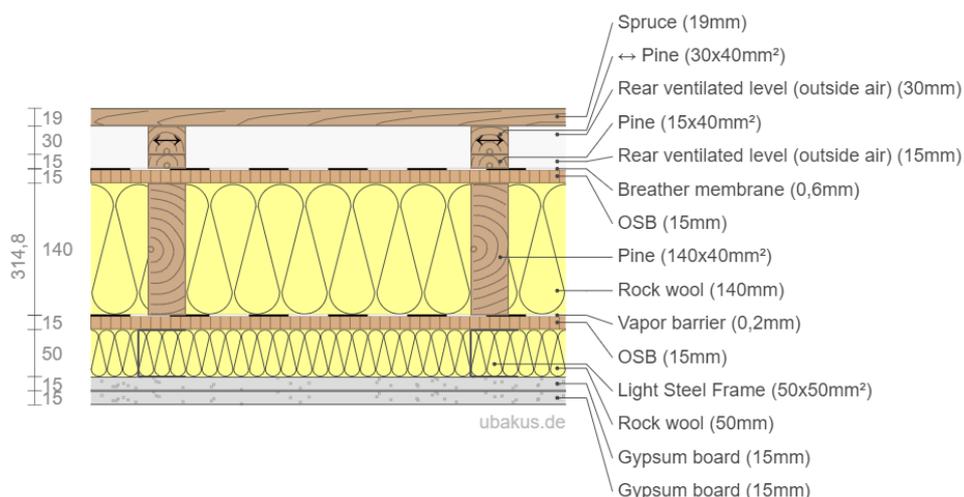


Figura 4.11 – Par_Ext_TF (Continuação)

O revestimento externo é feito em tábuas de madeira termo tratada, do sistema *Lunawood Exterior Claddings (UTV LunaThermo-D)*, com peças em abeto de encaixe macho-fêmea com pescoço chanfrado e propriedades conforme o descrito na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades do revestimento externo considerado para a Par_Ext_TF

Espessura (mm)	19
Teor de água (%)	6 ± 2
Classe de tratamento	D2
Classe de durabilidade	2
Classe de reação ao fogo	D-s1 d0

O revestimento deve ser afixado aos painéis ainda em fábrica com as tábuas orientadas longitudinalmente, ou seja, formando um padrão vertical de fachada, de modo a favorecer o encaixe entre painéis adjacentes. Para isso, as tábuas mais extremas são omitidas do processo de pré-fabricação, sendo afixadas apenas em obra para o devido acabamento após a selagem das juntas (Figura 4.12).

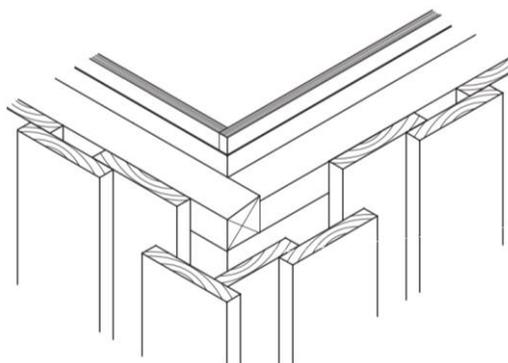


Figura 4.12 – Exemplo da omissão das tábuas mais extremas para posterior aplicação em obra
Adaptado de TRADA (2008)

As tábuas de revestimento são afixadas sobre ripado horizontal de pinho tratado em autoclave com seção

40 x 30 mm² e face superior chanfrada em ângulo de 15° para evitar o acúmulo de água (Elemento 10 da Figura 4.11). Por sua vez, o ripado horizontal é suportado pelo ripado vertical, com peças de mesma natureza, tratamento e seção 40 x 15 mm² (Elemento 9 da Figura 4.11).

Em seguida, apoiada sobre a placa de fecho exterior em OSB, há a membrana respirável *Traspir Evo 90*, da Rothoblaas, em filme em mistura especial e armadura em poliéster (PL) com as propriedades expostas na Tabela 4.2. A selagem entre folhas de membrana respirável é feita com fitas *Easy Band* (em polietileno (PE) com colante acrílico, rede de reforço e camada de separação) ou *Double Band* (em rede de reforço em polietileno (PE) e colante acrílico), da Rothoblaas.

Tabela 4.2 – Propriedades da membrana respirável considerada para a Par_Ext_TF

Gramagem (g/m ²)	90
Espessura (mm)	0,3
Densidade (kg/m ³)	300
Fator de resistência à difusão do vapor de água - μ	~ 67
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	0,02
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,3
Calor específico (J/kg.K)	1800
Classe de reação ao fogo	B-s1 d0

É aplicada uma junta de vedação em espuma de polietileno em fita selante ponte de prego tipo *Nail Band* (borracha butílica com suporte em polietileno (PE) e camada de separação), *Nail Plaster* (filme de suporte e perfil em espuma de polietileno (PE) de células fechadas com colante acrílico) ou *Gemini* (espuma de polietileno (PE) de células fechadas com camada dupla de colante acrílico e camada de separação), da Rothoblaas, sobre a membrana respirável nos pontos de afixação do ripado vertical e da própria membrana aos montantes da estrutura *timber-frame*.

A cavidade da estrutura da parede é completamente preenchida com lã de rocha em painéis compactos tipo *Comfort*, da Volcalis, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 4.3. A escolha do material deve não somente por suas propriedades térmicas, acústicas e de resistência ao fogo, como também pelo custo e simplicidade de instalação dos painéis rígidos.

Tabela 4.3 – Propriedades da lã de rocha considerada para a Par_Ext_TF

Dimensões (mm ²)	1350 x 600
Espessuras conjugadas (mm)	50 + 90
Resistências térmicas para cada espessura (m ² .K/W)	1,35 e 2,40
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,037
Classe de absorção sonora	A
Classe de reação ao fogo	A1

Entre a camada de isolamento e a placa de fecho interno em OSB, há a barreira para-vapor *Barrier Alu 150 (Baralu15028B)*, da Rothoblaas, em filme funcional em polietileno (PE) e rede de reforço com revestimento em alumínio com as propriedades apresentadas na Tabela 4.4. A selagem entre as folhas da barreira para-vapor também é feita com fitas *Easy Band* ou *Double Band*, da Rothoblaas.

Tabela 4.4 – Propriedades da barreira para-vapor considerada para a Par_Ext_TF

Gramagem (g/m ²)	130
Espessura (mm)	0,2
Densidade (kg/m ³)	~ 650
Fator de resistência à difusão do vapor de água - μ	~ 750000
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	150
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,4
Calor específico (J/kg.K)	1800
Classe de reação ao fogo	B-s1 d0

Ainda, onde apoiam-se as placas OSB sobre os montantes estruturais, é considerada a aplicação de material resiliente em forma de fita selante ponto prego monoadesiva tipo *Gips Band*, da Rothoblaas, composta por filme de suporte e perfil em espuma de polietileno (PE) de células fechadas com colante acrílico para dessolidarizar rigidamente os elementos e impedir a transmissão das vibrações por meio do material estrutural (Figura 4.13). As fitas têm espessura de 3 mm e largura de 50 mm, o suficiente para que haja uma sobra segura para cada um dos lados do encontro com os montantes para garantia da completa dessolidarização. Sobre elas, arruelas dessolidarizantes para os elementos ligadores entre o OSB e os montantes devem ser consideradas para que estes não representem uma ponte rígida para transmissão das vibrações.

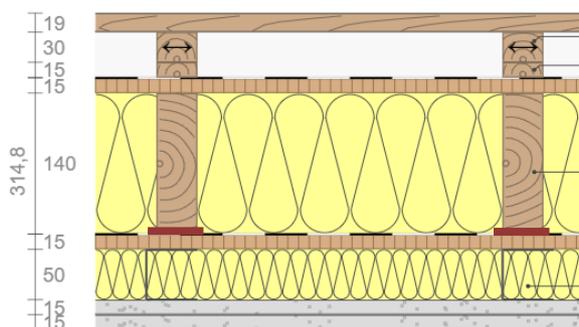


Figura 4.13 – Localização das fitas em material resiliente para dessolidarização dos elementos rígidos dos painéis Par_Ext_TF, em vermelho

Do exterior para o interior, espera-se que todas as camadas até as placas de fecho interno em OSB dos painéis sejam completamente montadas em fábrica – detalhes sobre o processo e sequência de montagem em fábrica dos painéis podem ser consultados em Tenório *et al.* (2021).

Em seguida à instalação dos painéis em obra, segue-se com a alocação da camada de revestimento interno. Preconizou-se uma camada de serviço com, no mínimo, 50 mm de espessura para passagem de tubagens e fiações para instalações de redes suportada por perfis laminados Pladur em forma de “C”, com ondulações que permitem a dissipação das vibrações ocasionadas pelas ondas sonoras incidentes sobre o revestimento interno. Esta é a solução base considerada neste estudo, contudo, também é possível executar a camada de serviço com montantes em madeira. Nesse caso, os montantes poderiam ser fixados à estrutura principal dos painéis de parede ainda em fábrica, restando apenas a o fechamento em gesso cartonado para ser feito em obra.

Esta cavidade deve ser totalmente preenchida com lã de rocha, dessa vez com painéis compactos tipo *Alpha*, da Volcalis, com as mesmas propriedades apresentadas na Tabela 4.3 e espessura compatível com a cavidade (50 mm) para envolver e vedar totalmente as tubagens e preencher a cavidade de maneira a evitar o efeito de “tambor” a partir do material fonoabsorvente de apoio ao revestimento. Caso não haja redes distribuídas nestas paredes, o revestimento pode ser afixado diretamente sobre as placas OSB, todavia, esta camada apresenta benefícios, contribuindo para a absorção das ondas sonoras e promovendo a continuidade do isolamento térmico, minimizando possíveis pontes térmicas originárias das junções entre painéis e da interrupção do isolamento nos alinhamentos de montantes e elementos de travamento estruturais.

O revestimento interno afixado nos montantes metálicos é em placa de gesso cartonado *Pladur* com as propriedades apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Propriedades do gesso cartonado de revestimento interno considerado para a Par_Ext_TF

Espessuras conjugadas (mm)	15 + 15
Massa superficial (kg/m ²)	27
Classe de resistência ao fogo	EI-60

As paredes externas de divisão entre edifícios diferem apenas no revestimento externo, que é dispensado quando a distância para a parede paralela do edifício adjacente é mínima.

4.4.2. Paredes internas estruturais (Par_Int_Est_TF)

As paredes internas estruturais assemelham-se às paredes de fachada desde a placa de fecho externo em OSB até a camada de revestimento interno, apresentando os mesmos materiais, disposições e espessuras. No entanto, as camadas de serviço e revestimento são rebatidas para a outra face da parede, criando-se um elemento simétrico (Figura 4.14).

1. Gesso cartonado (13 mm)
2. Gesso cartonado (13 mm)
3. Lã de rocha (50 mm)
4. OSB (15 mm)
5. Lã de rocha (140 mm)
6. OSB (15 mm)
7. Lã de rocha (50 mm)
8. Gesso cartonado (13 mm)
9. Gesso cartonado (13 mm)

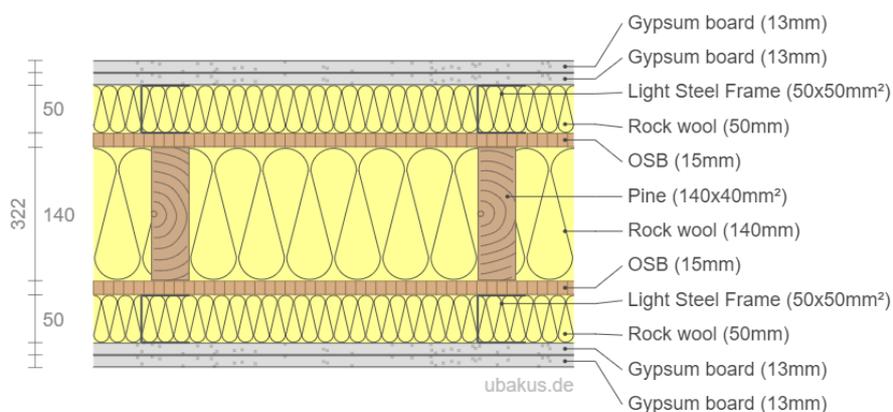
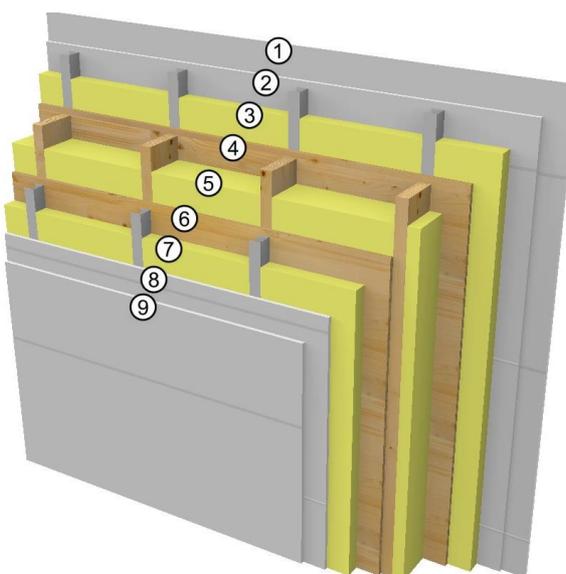


Figura 4.14 – Par_Int_Est_TF

Isso requer, ainda, que as fitas de material resiliente no encontro entre os painéis OSB e os montantes também sejam replicadas na outra face, impedindo qualquer ligação rígida entre os montantes e ambas camadas apoiadas sobre eles (Figura 4.15).

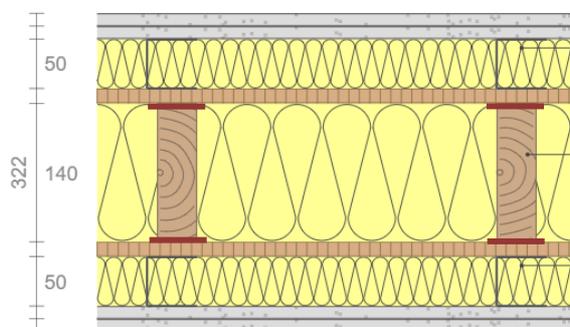


Figura 4.15 – Localização das fitas em material resiliente para dessolidarização dos elementos rígidos dos painéis Par_Int_Est_TF, em vermelho

No caso das paredes internas em que se tem revestimento em gesso cartonado em ambas superfícies, adota-se placas com espessura de 13 mm e as propriedades apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Propriedades do gesso cartonado de revestimento interno considerado para as paredes internas

Espessuras conjugadas (mm)	13 + 13
Massa superficial (kg/m ²)	44
Classe de resistência ao fogo	EI-60

Optou-se por este critério para promover a máxima padronização entre elementos, simplificando e aligeirando o processo de pré-fabricação, além de proporcionar apoios de comportamentos congêneres para as estruturas de piso.

Como na maioria dos casos de edifícios multifamiliares as paredes internas não se submetem a requisitos térmicos a depender do coeficiente de redução de perdas (B_{zu}) dos espaços não úteis do edifício confinados por elas, a lã de rocha, um material fonoabsorvente, tem função essencialmente acústica para garantia do conforto e cumprimento aos, por vezes, elevados requisitos acústicos impostos às paredes internas.

As camadas de serviço totalmente preenchidas com material absorvente contribuem para o desempenho acústico, conforme exposto no item 4.4.1, e a coexistência de uma em cada face da parede dá-se pelo princípio de que as redes de alimentação de um compartimento devem, preferencialmente, estar contidas nele e não sob a superfície voltada para o cômodo adjacente, evitando interferências nos compartimentos adjacentes e a necessidade de furos através da estrutura e camada de isolamento para transposição das redes, que podem fragilizar o comportamento acústico do elemento através de frestas e pontes acústicas.

Assim como nas paredes externas, caso não haja a necessidade de passagem de redes por entre as paredes internas estruturais, estas podem isentar-se das camadas de serviço, desde que o cumprimento aos requisitos acústicos impostos sejam mantidos.

4.4.3. Paredes internas não-estruturais (Par_Int_Nest_TF)

As paredes internas não-estruturais têm a mesma configuração das paredes internas estruturais, diferindo apenas da seção dos montantes utilizados para sua estrutura em *timber-frame*, com dimensões de 40 x 90 mm² (Figura 4.16).

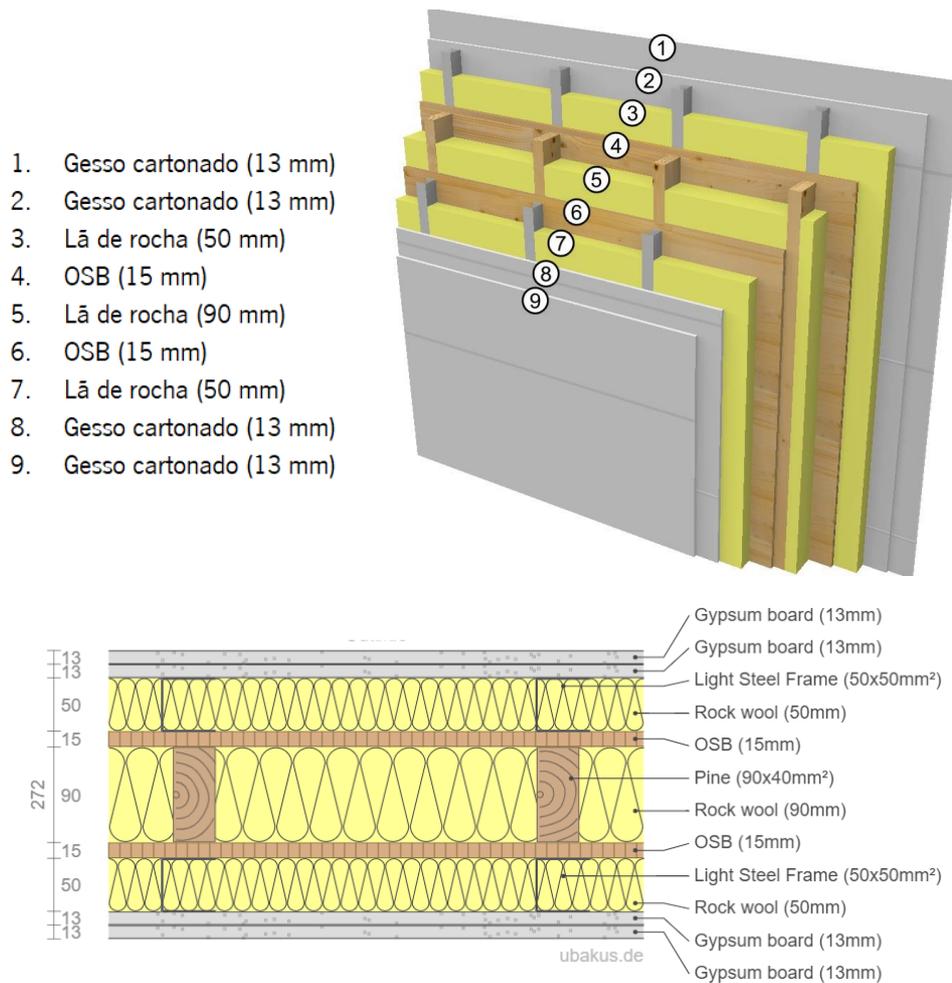


Figura 4.16 – Par_Int_Nest_TF

Assim como as demais paredes, quando da inexistência de tubagens em seu interior, pode-se dispensar o uso de uma ou das duas camadas de serviço, contudo, como esta modalidade de parede é ainda mais esbelta, esta medida impacta substancialmente o desempenho acústico do elemento, pelo que deve-se atentar para o nível de isolamento acústico promovido por essas variações (vide Seção 4.6.2) para que seja aplicada a configuração de parede ideal para os requisitos impostos conforme os ambientes que elas separam.

Apesar de não apresentarem função estrutural, nomeadamente às cargas laterais, os fechos em OSB das paredes internas foram mantidos pois conferem superfície de fixação para as eventuais tubagens e massa ao elemento, melhorando sua performance acústica. Ainda, quando não são empregues camadas de serviço, a fixação das placas de revestimento diretamente sobre o OSB torna-se muito mais descomplicada do que quando sobre os montantes em madeira.

Uma solução alternativa que pode ser considerada a depender da tipologia do projeto, das condições da construção e da preferência do cliente, é a utilização de paredes internas não estruturais formuladas a partir de sistemas completos disponíveis em *kits*, por exemplo, *Pladur*, com montantes metálicos em

“C” ou em “U” que dispensam os montantes de madeira e fecho apenas em placas de gesso cartonado, dispensando as placas OSB. Esta modalidade não descarta a necessidade do preenchimento da cavidade e envolvimento de eventuais tubagens em material isolante (lã de rocha) e o devido cumprimento dos requisitos acústicos inerentes ao uso a que se destina.

4.4.4. Paredes internas duplas (Par_Int_Dupla_TF)

As paredes internas entre habitações são decisivas na garantia do conforto e privacidade dos usuários, por isso, é comum que sejam elaboradas em panos duplos com uma cavidade de ar de separação entre eles para reforço do isolamento a sons aéreos (Figura 4.17).

1. Gesso cartonado (13 mm)
2. Gesso cartonado (13 mm)
3. Lã de rocha (50 mm)
4. Membrana acústica
5. OSB (15 mm)
6. Lã de rocha (140 mm)
7. OSB (15 mm)
8. Ar (30 mm)
9. OSB (15 mm)
10. Lã de rocha (140 mm)
11. OSB (15 mm)
12. Membrana acústica
13. Lã de rocha (50 mm)
14. Gesso cartonado (13 mm)
15. Gesso cartonado (13 mm)

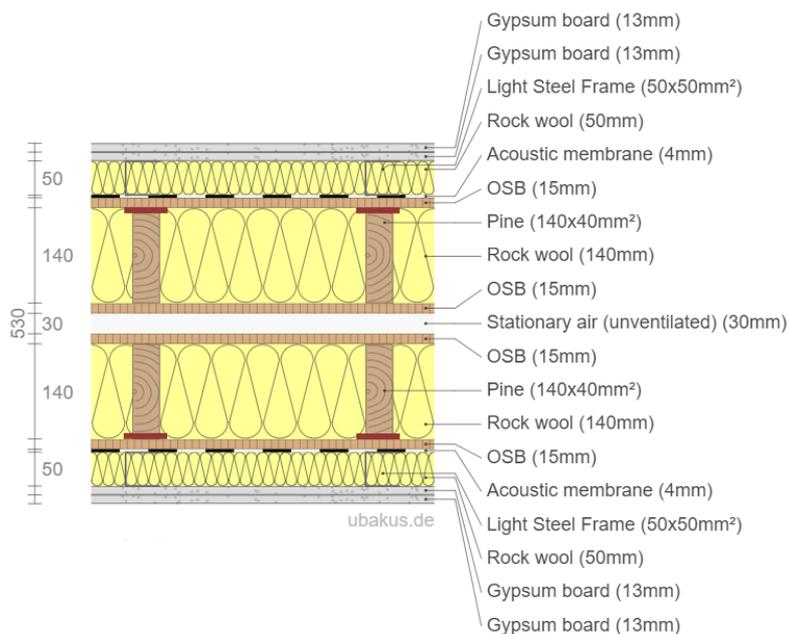
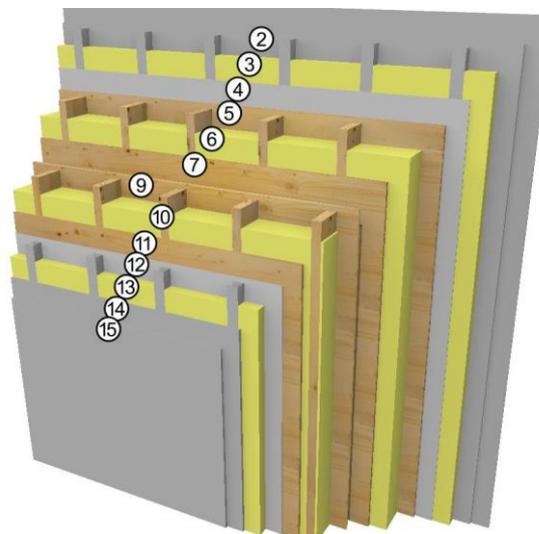


Figura 4.17 – Par_Int_Dupla_TF

Portanto, sejam elas estruturais ou não, as paredes desenvolvidas para separação de habitações distintas apresentam a configuração básica das paredes internas estruturais em termos de materiais, dimensões e disposições, porém duplicada, com uma caixa de ar de 30 mm entre elas confinada pelas placas de fecho em OSB sem qualquer elemento rígido de ligação entre elas.

A única alteração, contudo, refere-se ao acréscimo de uma membrana acústica contínua sobre os painéis OSB nas superfícies voltadas para o interior dos cômodos. Aplica-se, portanto, a *Danosa M.A.D. 4*, uma membrana betuminosa com cargas minerais e revestida por um filme de polietileno de alta densidade, que atua como material anti ressonante e beneficia o isolamento acústico a sons aéreos, ou a *Silent Wall*, da Rothoblaas, uma folha betuminosa insonorizante, impermeável à água e ao ar para o isolamento acústico das estruturas de madeira. Ambas têm 4 mm de espessura.

4.4.5. Paredes de núcleo – Caixa de escadas e elevadores (Par_Nuc_CLT e Par_Nuc_CLT_TF)

Foram elaboradas duas soluções para as paredes de núcleo: uma com dois panos de parede em painéis CLT, para projetos que requeiram maior resistência a cargas laterais (Figura 4.18), e outra com um pano em painéis CLT e outro em estrutura *timber-frame*, promovendo maior espessura de camada de material fonoabsorvente (lã de rocha) e, conseqüentemente, melhor isolamento sonoro aos compartimentos adjacentes às áreas de circulação vertical do edifício, grandes produtores de ruídos pelo elevado fluxo de pessoas ou operação do maquinário, principalmente quando se tratam de compartimentos contidos em habitações e não em uma zona comum (Figura 4.19).

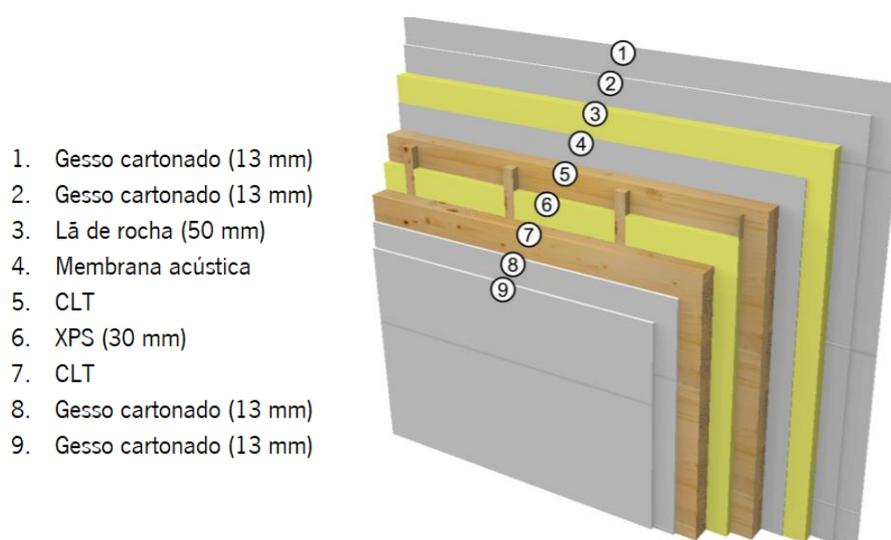


Figura 4.18 – Par_Nuc_CLT

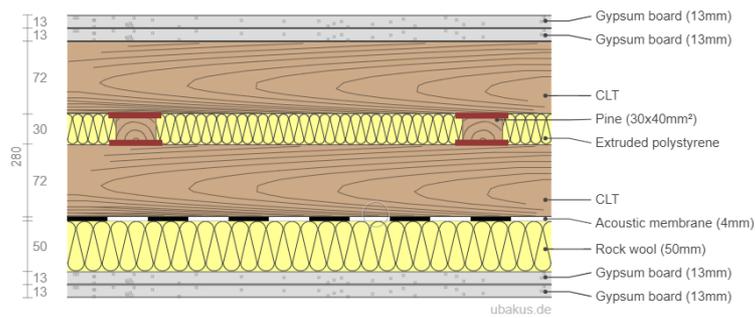


Figura 4.18 – Par_Nuc_CLT (Continuação)

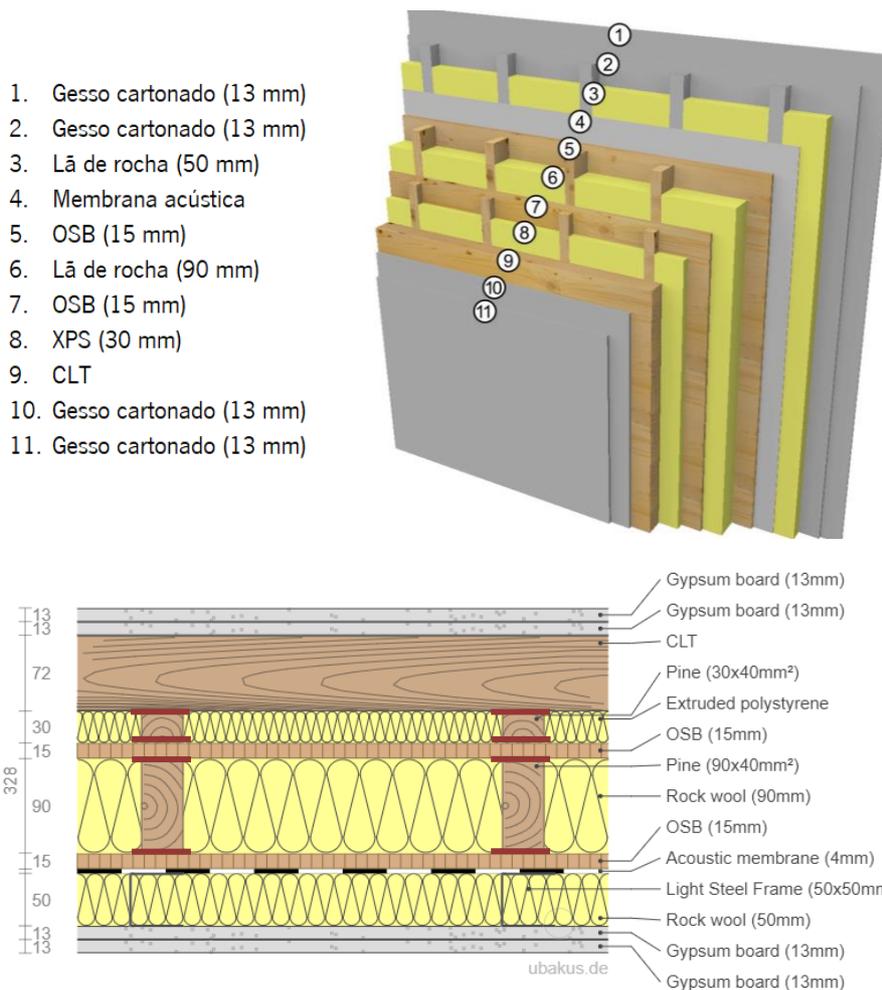


Figura 4.19 – Par_Nuc_CLT_TF

Para ambas opções, a espessura do CLT deve ser determinada de acordo com o dimensionamento estrutural do projeto, já para a opção com um dos panos em *timber-frame*, adota-se montantes de seção 40 x 90 mm².

A cavidade entre panos é preenchida com poliestireno extrudado (XPS), que confere reforço térmico ao elemento, especialmente nos casos em que a zona de circulação vertical apresentar coeficiente de redução de perdas elevado ($B_{ztu} > 0,7$), e uma superfície com rigidez suficiente para, em conjunto com

as ripas verticais em pinho de seção 40 x 30 mm², apoiar os painéis estruturais e acomodar seus movimentos de deflexão. O XPS atotado é o *Wallmate CW-A* de encaixe macho-fêmea, com as seguintes propriedades (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Propriedades do XPS considerado para a Par_Nuc_CLT e Par_Nuc_CLT_TF

Dimensões (mm ²)	2600 x 600
Espessura (mm)	30
Densidade (kg/m ³)	30
Resistência mínima à compressão (kPa)	200
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,035
Calor específico (J/kg.K)	1450

Na face do OSB voltada para o interior dos ambientes habitáveis, é apoiada a membrana acústica *Danosa M.A.D. 4*, para garantia da dessolidarização entre painéis estruturais e reforço do isolamento a sons aéreos. É também adotada a configuração já anteriormente apresentada que conjuga a camada de serviço preenchida por lã de rocha e suportada por montantes metálicos e o revestimento em placas duplas de gesso cartonado de 13 mm. A dispensa da camada de serviço deve ser estudada térmica e acusticamente principalmente quando da aplicação da solução em dois painéis de CLT, uma vez que esta é a sua única camada que contém material absorvente.

Na face voltada para a circulação vertical do edifício, pode-se revestir a superfície com painéis duplos de gesso cartonado com 13 mm cada ou manter o CLT à mostra, desde que ele apresente resistência ao fogo suficiente. Os painéis *CLT BBS 125*, da Binderholz, fornecidos em espessuras entre os 60 e 280 mm em 3, 5 ou 7 lamelas, têm o seguinte comportamento frente ao fogo (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Propriedades do CLT considerado quanto ao comportamento ao fogo

Classe de resistência ao fogo	REI 30-90
Classe de reação ao fogo	D-s2 d0
Taxa de queima quando aplicado em paredes para um período de incêndio de 90 minutos (mm/min)	0,75

4.4.6. Piso do rés do chão (Pav_RC)

O piso do rés do chão (Figuras 4.20 e 4.21) é composto pela camada de base em betão sobre a qual assenta-se uma camada de XPS de 100 mm de espessura, tipo *Floormate 500-A* ou *700-A*, da Dow, que diferem apenas quanto à resistência à compressão do produto, e devem ser definidos segundo o tipo de uso dos compartimentos térreos e consequente carga imposta ao piso do rés do chão. Com encaixe tipo meia madeira, apresentam as propriedades expostas na Tabela 4.9.

1. Pinho (27 mm)
2. Lã de rocha (30 mm)
3. Membrana impermeável
4. XPS (100 mm)
5. Betão
6. Solo

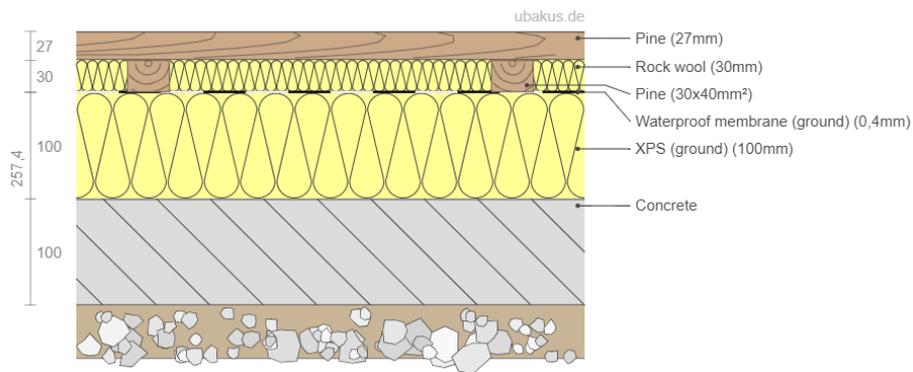
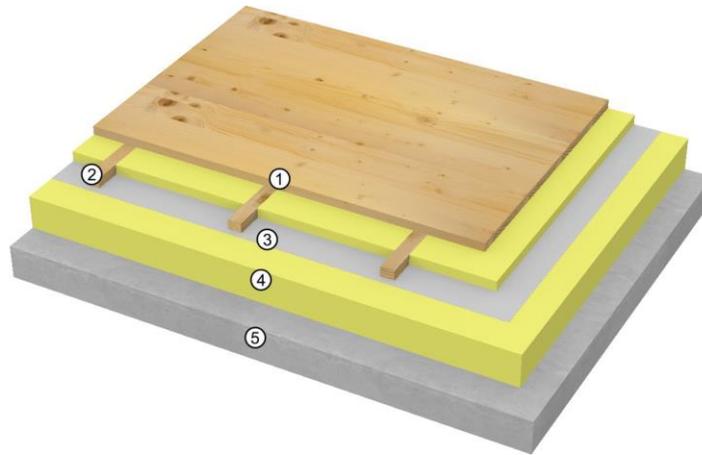


Figura 4.20 – Pav_RC

1. Cerâmica (10 mm)
2. Membrana acústica
3. Aglomerado de cimento (22 mm)
4. Lã de rocha (30 mm)
5. Membrana impermeável
6. XPS (100 mm)
7. Betão
8. Solo

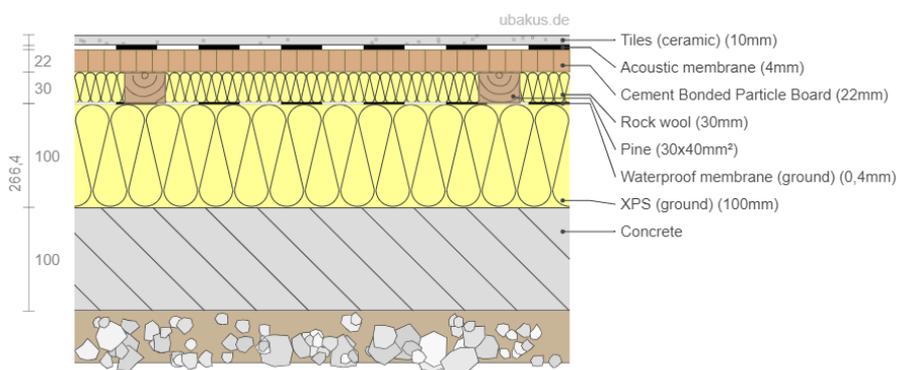
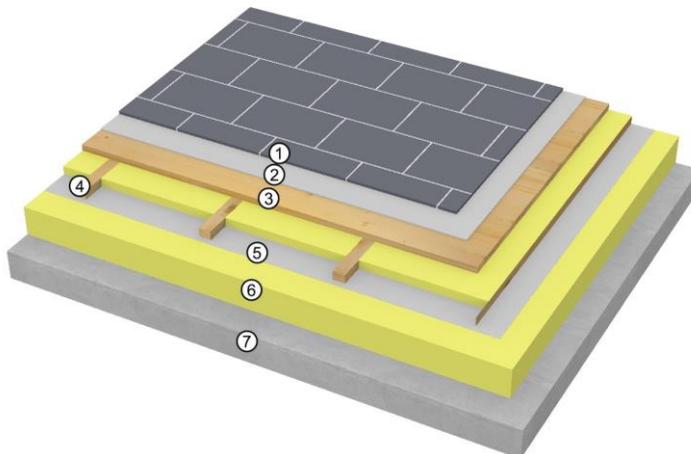


Figura 4.21 – Pav_RC com acabamento cerâmico

Tabela 4.9 – Propriedades do XPS considerado para o Pav_RC

Dimensões (mm ²)	1250 x 600
Espessuras conjugadas (mm)	50 + 50
Densidade (kg/m ³)	38 - 45
Resistência mínima à compressão (kPa)	500 - 700
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	150 - 200
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,036
Calor específico (J/kg.K)	1450
Absorção de água por imersão (% vol.)	< 0,7
Absorção de água por difusão (% vol.)	< 3,0
Absorção de água por ciclos de gelo/degelo (% vol.)	< 1,0
Capilaridade	Nula

Apesar das boas características de resistência à água e humidade do XPS, é imprescindível a execução da camada impermeável sobre ela para proteção do soalho. Considera-se a barreira *Floor Radon*, da Rothoblaas, em camada dupla de polietileno de baixa densidade (LDPE) com rede de reforço e armadura em polietileno de alta densidade (HDPE) (Tabela 4.10). A selagem entre folhas da camada impermeável é feita com fita butílica biadesiva *Supra Band*, da Rothoblaas.

Tabela 4.10 – Propriedades da membrana impermeável considerado para o Pav_RC

Gramagem (g/m ²)	350
Espessura (mm)	0,4
Densidade (kg/m ³)	~ 875
Fator de resistência à difusão do vapor de água - μ	~ 580000
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	232
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,4
Calor específico (J/kg.K)	1800

Finalmente, sobre a camada em XPS, é montado o soalho flutuante com ripas de madeira de pinho, cujas seções podem variar entre 40 x 30 mm² ou 40 x 100 mm² a depender da necessidade de passagem de tubagens por entre os vãos. Por vezes, convém unificar as seções para as dimensões de 40 x 100 mm² para não haja desníveis de piso, por exemplo, entre compartimentos secos e húmidos, desde que a dimensão do pé direito seja suficiente para tal.

Independente da espessura, a cavidade é completamente preenchida por lâ de rocha com as mesmas especificações anteriormente apresentadas e ligeiramente compactada, amortecendo as vibrações causadas por impactos no soalho, impedindo a propagação do som na cavidade pelo ar e envolvendo as tubagens para minimização de quebras de isolamento a sons aéreos.

Como revestimento, podem ser consideradas diversas opções, a depender do gosto e preferência do cliente, principalmente. Na elaboração dos elementos de piso de rés do chão e intermediários, foram consideradas três opções: revestimento em madeira maciça, laminado de madeira e revestimento cerâmico.

Considera-se para o revestimento em madeira maciça (Figura 4.20) uma espessura de 27 mm e apoio direto sobre as ripas do soalho flutuante. Já o revestimento em laminado de madeira, com espessura de 24 mm, e o revestimento cerâmico, com espessura aproximada de 15 mm (Figura 4.21), requerem uma camada contínua em painel OSB de classe de serviço 1 para as áreas secas e OSB de classe de serviço 2 ou painéis de aglomerado de cimento para as áreas molhadas. Em ambos os casos, as placas devem apresentar espessura de 22 mm e, sobre elas, são executados o substrato de alta densidade (base flexível) ou a camada de argamassa, próprios ao assentamento de cada revestimento.

Para a opção em revestimento de madeira maciça, é possível que as camadas pertencentes ao soalho flutuante, ou seja, acima do nível do XPS, sejam montadas ainda em fábrica, maximizando o processo de pré-fabricação e atingindo os objetivos do sistema. Isso requer, contudo, que as tábuas do revestimento sejam dispostas necessariamente na direção longitudinal dos painéis e que uma faixa das suas extremidades seja mantida sem as tábuas até a obra, proporcionando acesso para a execução da devida união entre painéis.

A pormenorização do encontro entre frechal e o piso de rés do chão será abordado no item 4.5 deste documento.

4.4.7. Pisos intermediários (Pav_Int_CLT)

Os pisos intermediários (Figura 4.22), conforme exposto na Seção 4.3, têm estrutura em painéis de CLT suportados ou não por vigas.

1. Gesso cartonado (15 mm)
2. Guias metálicas (50 mm)
3. Gesso cartonado (15 mm)
4. Lã de rocha (50 mm)
5. Ar (50 mm)
6. Lã de rocha (50 mm)
7. CLT
8. Lã de rocha (30 mm)
9. Pinho (27 mm)

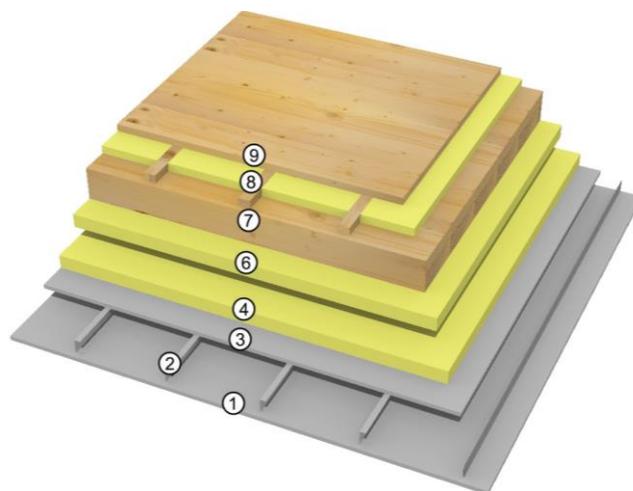


Figura 4.22 – Pav_Int_CLT

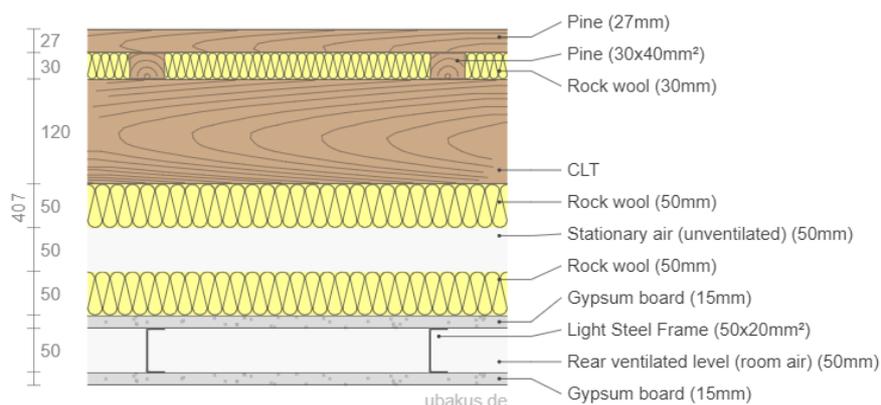


Figura 4.22 – Pav_Int_CLT (Continuação)

Sobre a superfície dos painéis CLT, é apoiada a estrutura de soalho flutuante com ripas de madeira de pinho de seção 40 x 30 mm² para áreas secas isentas de tubagens ou 40 x 100 mm² para áreas molhadas e o revestimento em madeira maciça, laminado de madeira ou peças cerâmicas, seguindo a mesma caracterização detalhada na Seção 4.4.6 para o piso do rés do chão. Diversamente ao caso do piso de rés do chão, para os pisos intermediários há a necessidade de desligamento entre a estrutura do soalho flutuante e a laje de suporte em CLT, impedindo a transferências das vibrações sonoras pelo elemento estrutural, pelo que é adotado material resiliente em fitas ou membranas sob o ripado (Figura 4.23). Para as áreas secas, onde não há a passagem de tubagens, recomenda-se o uso das tiras resilientes antivibração, tipo *Silent Underfloor*, da Rothoblaas, em EPDM expandido com cola acrílica com espessura de 4 mm, largura de 50 mm e densidade de 140 kg/m³. Já para as zonas molhadas em que não somente as ripas devem ser dessolidarizadas rigidamente da laje de suporte, como também as tubagens de redes, recomenda-se o uso das membranas acústicas tipo *Silent Wall*, *Danosa M.A.D. 4* ou *Danosa Impactodan 10*. Ainda, caso o piso intermediário separe um espaço útil inferior de um ambiente externo superior, como varandas, em que faz-se necessário o emprego de barreira para-vapor, pode-se fazer uso de uma membrana acústica que desempenhe ambas funções, como a *Silent Step Alu*, da Rothoblaas, uma membrana em mistura polimérica de alta densidade revestida com alumínio com função de barreira ao vapor ($S_d > 150$ m). Não se descarta a possibilidade do uso combinado de fitas e membranas, posicionando as fitas sob as ripas e as membranas apenas no caminho das tubagens. Essa medida é possível a partir da pormenorização rigorosa do projeto de redes, uma vez que limita a flexibilidade de alocação das mesmas, que é garantida quando da aplicação da camada contínua de membrana por toda a superfície.

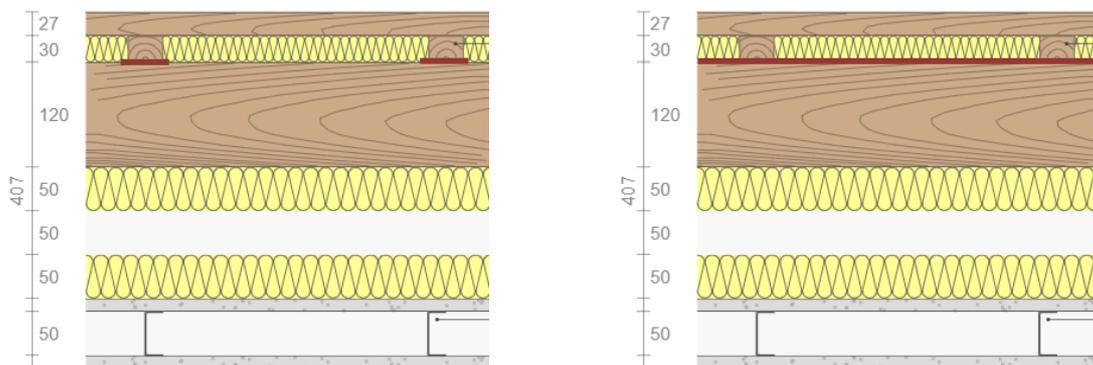


Figura 4.23 – Desligamento entre a estrutura do soalho flutuante e a laje de suporte em CLT. (a) em fitas; (b) em membranas

Sob o CLT, instala-se um teto falso acústico com 150 mm de caixa de ar com duas camadas de lã de rocha (material fonoabsorvente) de 50 mm cada em seu interior, uma apoiada na superfície inferior do CLT e a outra apoiada sobre as placas de fecho em gesso cartonado com 15 mm de espessura. A configuração estrutural do pavimento, com vigas para suporte do CLT ou não, determina a forma como as placas de gesso cartonado serão suspensas: por suspensores acústicos ligados ao CLT ou diretamente afixadas na face inferior das vigas. Na primeira opção, utiliza-se suspensores acústicos em forma de “T”, da Pladur, que, em associação à camada de gesso cartonado de 15 mm, promovem uma redução do ruído aéreo e do ruído por impacto em cerca de 10 dB, segundo o fabricante. Na segunda opção, para garantia do desempenho do teto acústico a partir da flexibilização de sua ligação ao elemento estrutural, aplica-se a fita *Xylofon*, da Rothoblaas, um perfil resiliente de alto rendimento fabricado com mistura de poliuretano com 6 mm de espessura e larguras que variam de 80 a 140 mm, cuja especificação deve ser determinada a partir da carga de compressão a que deva resistir. Esta banda também atua na dessolidarização para interrupção mecânica entre os elementos de painéis CLT e vigas e é aplicada nos diversos encontros entre elementos estruturais.

Sob o teto acústico, é executado o teto falso que resguarda um espaço de 50 mm para embutimento dos acessórios de iluminação, impedindo, assim, que o fecho hermético do teto acústico seja violado. Analogamente ao teto acústico, o teto falso é revestido por uma camada de gesso cartonado com 15 mm de espessura.

Em circunstâncias em que a dimensão do pé direito seja limitante, pode-se optar pela dispensa do teto acústico, desde que se ateste o isolamento acústico necessário entre os compartimentos. Neste caso, encosta-se uma camada de lã de rocha de 60 mm de espessura na face inferior do CLT sustentada por duas camadas de gesso cartonado de 15 mm cada para revestimento do teto (Figura 4.24).

1. Gesso cartonado (15 mm)
2. Gesso cartonado (15 mm)
3. Lã de rocha (60 mm)
4. CLT
5. Membrana acústica
6. Lã de rocha (30 mm)
7. Pinho (27 mm)

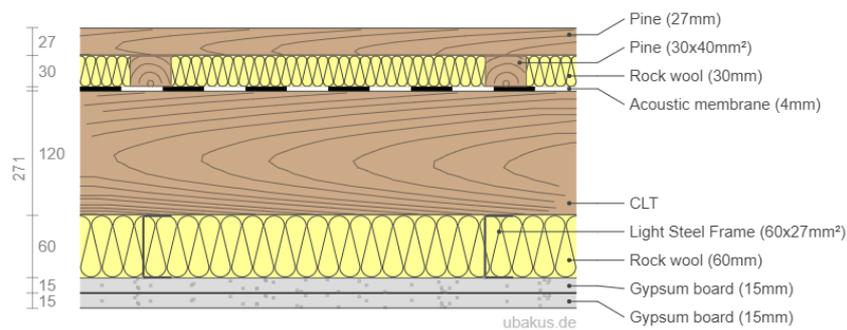
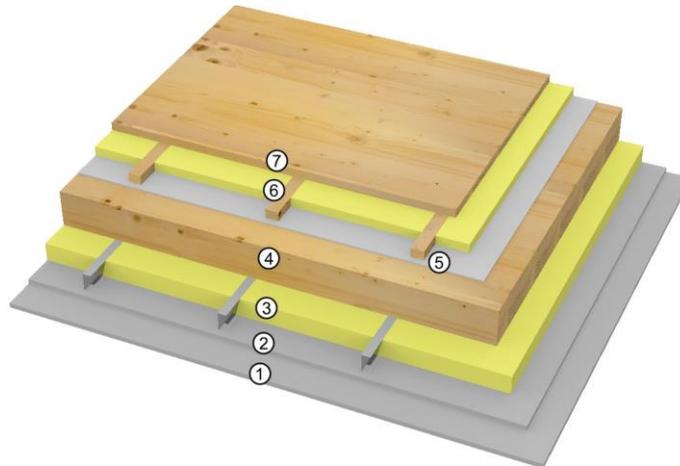


Figura 4.24 – Pav_Int_CLT sem teto falso acústico. Exemplo com membrana acústica para dessolidarização dos elementos rígidos

Os painéis de piso dependem de dois fatores para que sua completa pré-fabricação seja viabilizada: a distribuição das tubagens ainda em fábrica, prezando pela manutenção das aberturas necessárias nos bordos dos painéis para que tanto as tubagens quanto a estrutura entre painéis seja devidamente conectada em obra, e a dispensa do teto falso acústico, que requer instalação *in situ* para garantia da estanqueidade, caso contrário, apenas o núcleo dos painéis tolera a pré-fabricação.

4.4.8. Cobertura (Cob_CLT e Cob_TAH)

Para a cobertura, elaborou-se duas configurações: ligeiramente inclinada, em painéis CLT (Figura 4.25), e inclinada, com vigas suportando painéis sanduíche (Figura 4.26). A opção ligeiramente inclinada pode ser visitável ou não, pelo que isso definirá o revestimento externo da cobertura.

1. Gesso cartonado (15 mm)
2. Gesso cartonado (15 mm)
3. Lã de rocha (60 mm)
4. CLT
5. Barreira para-vapor
6. XPS (80 mm)
7. Membrana respirável
8. Ripado (30 mm)
9. Aglomerado de cimento (22 mm)
10. Base impermeável
11. Revestimento impermeável

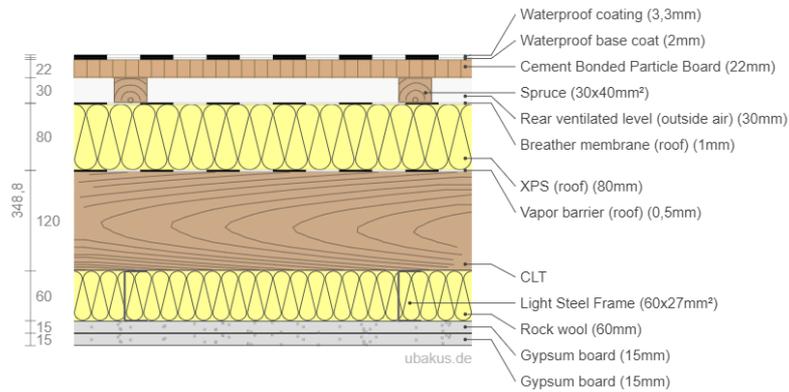
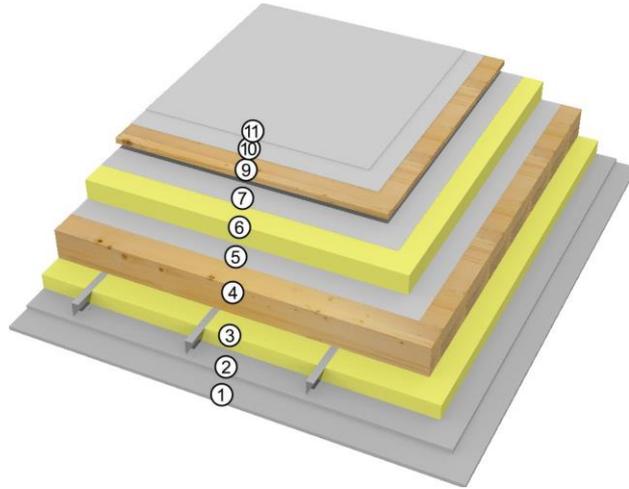


Figura 4.25 – Cob_CLT

1. Gesso cartonado (15 mm)
2. Gesso cartonado (15 mm)
3. Vigamento
4. } Pannel sanduíche
5. } Pannel sanduíche
6. } Pannel sanduíche
7. Membrana respirável
8. Ripado (30 mm)
9. Telhas cerâmicas

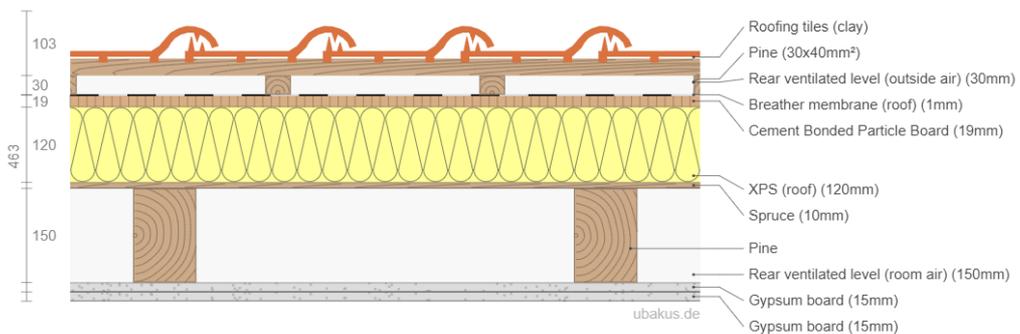
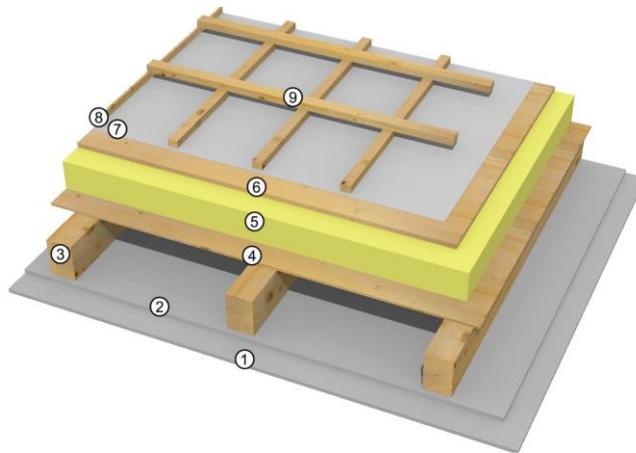


Figura 4.26 – Cob_TAH

A cobertura ligeiramente inclinada (Figura 4.25) conta com estrutura em CLT com ou sem vigas de suporte a depender do vão, assim como ocorre nos pisos intermediários, e, sob ela, posiciona-se uma camada de lã de rocha de 60 mm de espessura sustentada por duas camadas de gesso cartonado de 15 mm cada para revestimento do teto. Como a cobertura não apresenta requisitos acústicos, a opção de teto falso acústico é descartada.

Sobre o CLT, repousa a camada de 80 mm de isolamento térmico em poliestireno extrudido (XPS) tipo *Roofmate SL-A*, da Dow, cujas características são expostas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Propriedades do XPS considerado para a Cob_CLT

Dimensões (mm ²)	1250 x 600
Espessura (mm)	80
Densidade (kg/m ³)	35
Resistência mínima à compressão (kPa)	300
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	100
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,035
Calor específico (J/kg.K)	1450
Absorção de água por imersão (% vol.)	< 0,7
Absorção de água por difusão (% vol.)	< 3,0
Absorção de água por ciclos de gelo/degelo (% vol.)	< 1,0
Capilaridade	Nula

Entre a superfície superior do CLT e a camada em XPS, aloca-se a barreira para-vapor *Clima Control 160*, da Rothoblaas, em filme funcional em poliamida (PA) com proteção dupla em polipropileno (PP) e rede de reforço (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 – Propriedades da barreira para-vapor considerada para a Cob_CLT

Gramagem (g/m ²)	160
Espessura (mm)	0,5
Densidade (kg/m ³)	320
Fator de resistência à difusão do vapor de água - μ	~ 1000 - 10000
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	0,5 - 5
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,3
Calor específico (J/kg.K)	1800

Sobre o XPS, apoia-se a membrana respirável *Traspir EVO 340*, da Rothoblaas, em filme monolítico em elastômero (PE) extrudido entre duas camadas de proteção em polipropileno (PP) (Tabela 4.13). A selagem entre folhas de barreira para-vapor e entre folhas de membrana respirável é feita com fitas *Easy Band* ou *Double Band*, da Rothoblaas.

Tabela 4.13 – Propriedades da membrana respirável considerada para a Cob_CLT

Gramagem (g/m ²)	340
Espessura (mm)	1
Densidade (kg/m ³)	~ 340
Fator de resistência à difusão do vapor de água - μ	~ 200
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	0,2
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,4
Calor específico (J/kg.K)	1800

Sobre a membrana respirável apoia-se o ripado em pinho tratado com dimensões variáveis para formar as pendentes necessárias e criar uma cavidade de ventilação para a cobertura, com junta de vedação tipo *Nail Band*, *Nail Plaster* ou *Gemini*, da Rothoblaas, entre eles, impedindo rasgos e infiltrações nos pontos de fixação. Sobre o ripado, é posicionada uma camada em painéis de aglomerado de cimento com 22 mm de espessura sobre a qual executa-se, caso a cobertura seja visitável, uma camada impermeável tipo *Bytum Base 2500*, da Rothoblaas, uma membrana betuminosa autoadesiva (Tabela 4.14).

Tabela 4.14 – Propriedades da membrana impermeável considerada para a Cob_CLT

Gramagem (g/m ²)	2550
Espessura (mm)	2
Densidade (kg/m ³)	~ 1250
Fator de resistência à difusão do vapor de água - μ	~ 100000
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	200
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,17
Calor específico (J/kg.K)	170

A membrana betuminosa *Bytum Base 2500* pode ser associada à *Bytum Slate 3500*, da Rothoblaas, em betume destilado com polímeros elastoplastoméricos e revestimento em ardósia, que confere estabilidade permanente aos raios UV para configurar a camada visível da cobertura. A selagem entre ambas variedades de folhas de membrana betuminosa é feita com fitas *Easy Band*, da Rothoblaas (Tabela 4.15).

Tabela 4.15 – Propriedades do revestimento considerado para a Cob_CLT

Gramagem (g/m ²)	3500
Espessura (mm)	3,3
Densidade (kg/m ³)	~ 1000
Fator de resistência à difusão do vapor de água - μ	~ 70000
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	230
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,2
Calor específico (J/kg.K)	1500

Sobre a membrana betuminosa *Bytum Base 2500* também podem ser executadas estruturas de decks, caso esta seja a preferência estética para a camada visível, em sistema *Lunawood Decking Applications (SHP LunaThermo-D)* em abeto termo tratado com peças de 26 mm de espessura e propriedades semelhantes à *Lunawood Exterior Claddings (UTV LunaThermo-D)* usada no revestimento externo das paredes de fachada. Caso a cobertura não seja visitável, pode-se repousar sobre os painéis de aglomerado de cimento o revestimento em camarinha de zinco.

Para a opção de cobertura inclinada (Figura 4.26), as vigas de suporte formam as pendentes e, sobre elas, são apoiados os painéis sanduíche *TAH*, da Thermochip, formados, do interior para o exterior, por uma camada de tábuas de abeto de 10 mm, núcleo em poliestireno extrudido com 120 mm de espessura e aglomerado hidrófugo com 19 mm, cujas propriedades são expostas na Tabela 4.16. Estes painéis têm encaixe macho-fêmea e dispensam o uso de barreiras para-vapor, pelo que o valor estético da camada interna pode ser explorado.

Tabela 4.16 – Propriedades do material isolante dos painéis sanduíche considerados para a Cob_TAH

Dimensões (mm ²)	2400/3000 x 550
Espessura (mm)	120
Densidade (kg/m ³)	35
Fator de resistência à difusão do vapor de água - μ	100
Transmissão do vapor de água - Sd (m)	12
Condutividade térmica - λ (W/m.K)	0,035
Calor específico (J/kg.K)	1450

Sobre os painéis sanduíche é executada uma camada de membrana respirável *Traspir EVO 340* (Tabela 4.13) selada com fitas *Easy Band*, da Rothoblaas, seguida de subtelhas que permitam a ventilação da cobertura. Em sequência, são distribuídas as ripas que dão suporte às telhas cerâmicas para externo. Espessuras variadas para os painéis sanduíche podem ser adotadas, a depender dos requisitos impostos e do nível de conforto térmico desejado.

A opção em cobertura ligeiramente inclinada permite um maior grau de pré-fabricação dos painéis, que podem ser montados em fábrica desde o revestimento do teto (caso o CLT não seja suportado por vigas) até o ripado, sob condição de que cumpra-se o acesso para ligação mecânica e as sobras necessárias para a sobreposição das membranas em obra na ocasião das juntas entre painéis. As camadas de painéis de aglomerado de cimento, impermeabilização e revestimento são, então, executadas *in situ*. Já a opção inclinada beneficia-se da pré-fabricação apenas a partir da utilização dos painéis sanduíches, sendo a estrutura e camadas superiores instaladas *in situ*.

4.4.9. Varanda (Var_CLT)

As varandas (Figura 4.27), cuja estrutura é a continuidade do próprio CLT dos pisos intermediários, apresentam uma camada contínua em XPS tipo *Roofmate SL-A* (Tabela 4.11), da Dow, com 60 mm de espessura envolvendo todo perímetro do CLT, evitando pontes térmicas do encontro da varanda com a fachada termicamente isolada.

1. Abeto (19 mm)
2. XPS (60 mm)
3. CLT
4. XPS (60 mm)
5. Ripado (30 mm)
6. Aglomerado de cimento (22 mm)
7. Base impermeável
8. Ripado (30 mm)
9. Abeto (19 mm)

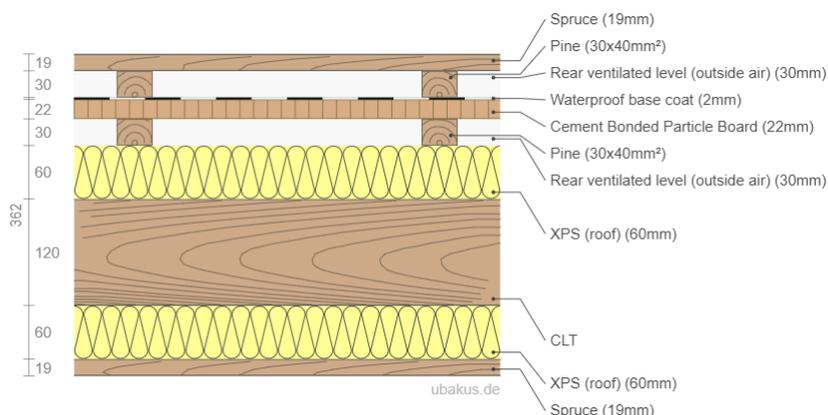
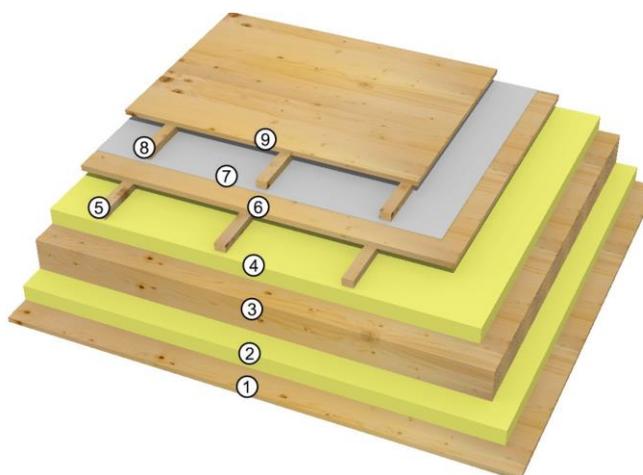


Figura 4.27 – Var_CLT

Na face inferior da varanda, reveste-se o teto com tábuas de madeira termo tratada em sistema *Lunawood Exterior Claddings (UTV LunaThermo-D)*, em abeto com espessura de 19 mm, como nas paredes de fachada. Já na face superior, é executada a subestrutura do deck em ripas de 40 mm de espessura seguida pelo fecho em painéis de aglomerado de cimento com 22 mm de espessura, formando a pendente necessária para escoamento da água, sobre os quais repousa uma camada impermeável em *Bytum Base 2500* (Tabela 4.14). A contraestrutura do deck é então finalizada e revestida com *Lunawood Decking Applications (SHP LunaThermo-D)*.

Assim como para a solução em cobertura ligeiramente inclinada, as varandas podem ser pré-fabricadas apenas até a camada inferior à impermeabilização, que é executada *in situ* para garantia da estanqueidade do elemento. As camadas superiores à ela podem ser pré-fabricadas em painéis e

posteriormente instaladas em obra, requerendo apenas pequenos ajustes de acabamento e maximizando os processos em fábrica.

4.5. Junção entre elementos

As ligações entre os elementos componentes do *timber-frame*, como montantes, banzos e elementos de travamento, é realizada a partir de pregos longos inseridos retos ou enviesados a depender da combinação dos elementos e da sequência de montagem.

Para a união de paredes adjacentes em *timber-frame*, seja ela em “L”, “T” ou “cruz”, para além da padronização de montantes e elementos de travamento, são adicionados um (para uniões em “L”) ou dois montantes (para uniões em “T” ou “cruz”) faceando a superfície em que se apoia a parede de encontro, com a mesma fita de material resiliente *Gips Band* entre ele e a placa de fecho em OSB para evitar a transmissão das vibrações por meio de pontes rígidas (Figura 4.28).

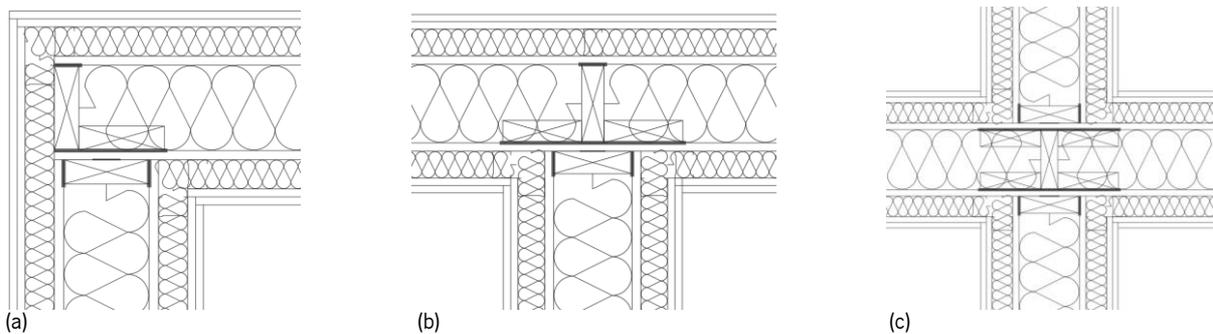


Figura 4.28 – Junções de paredes adjacentes em *timber-frame* em (a) “L”, (b) “T” e (c) “cruz”. Exemplo: Par_Int_Est_TF

Para as uniões em “T” ou “cruz” é proposta uma solução alternativa. São adicionados elementos de travamento em níveis distintos entre dois montantes consecutivos da parede contínua, no alinhamento em que serão ligadas as paredes de encontro (Figura 4.29). Essa opção permite maior flexibilidade na fabricação dos painéis, uma vez que fornece um trecho ao invés de um ponto para a junção da parede de encontro.

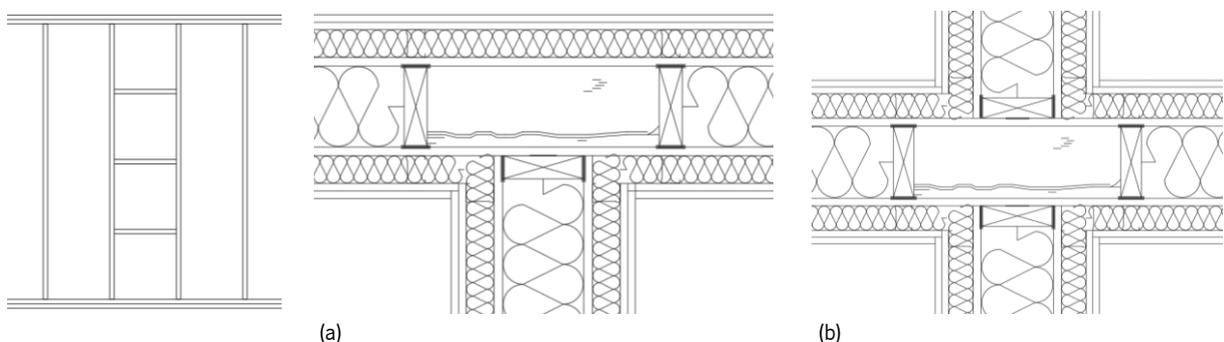


Figura 4.29 – Elementos de travamento adicionais para junções em (a) “T” e (b) “cruz” de paredes adjacentes em *timber-frame*. Exemplo: Par_Int_Est_TF

As paredes duplas apresentam as mesmas opções de junção citadas (Figura 4.30).

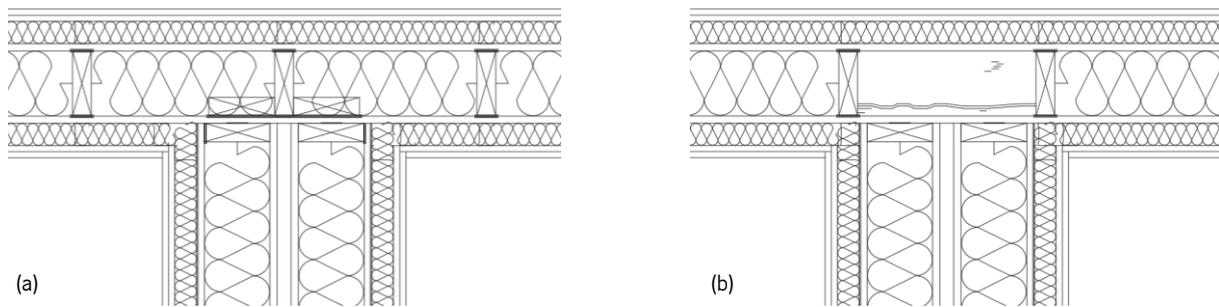


Figura 4.30 – Junções em “T” para paredes duplas. Exemplo: (a) Par_Int_Dupla_TF e (b) Par_Int_Est_TF

Para o encontro entre duas paredes em *timber-frame* a 180°, em CLT ou uma em CLT e outra em *timber-frame*, não é necessário qualquer pormenorização específica, pelo que essas têm suas estruturas originais ligadas umas às outras (Figura 4.31).

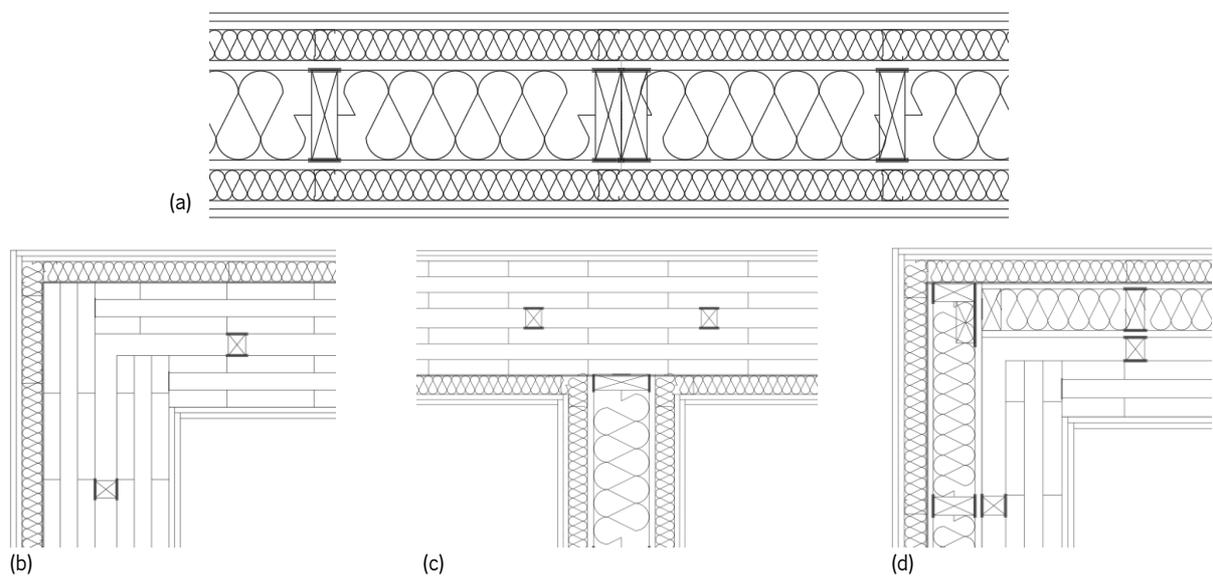


Figura 4.31 – (a) Junção a 180° entre duas paredes em *timber-frame*. Exemplo: Par_Int_Est_TF; (b) Junção entre duas paredes em CLT. Exemplo: Par_Nuc_CLT; (c) Junção entre uma parede em CLT e uma parede em *timber-frame*. Exemplos: Par_Nuc_CLT e Par_Int_Est_TF; (d) Junção entre duas paredes mistas. Exemplo: Par_Nuc_CLT_TF

Em ambas junções, a ligação entre paredes é feita por parafusos simples (para os encontros em “L” e a 180°) ou duplos (para os encontros em “T” ou “cruz”) inseridos enviesados a partir do exterior dos painéis fechados.

No encontro entre paredes, é adicionada uma camada de fita selante comprimível para juntas regulares tipo *Construction Sealing*, da Rothoblaas, em EPDM expandido com espessura de 3 mm. Quando se trata do encontro entre paredes de fachada deve-se, ainda, prezar pela continuidade da membrana respirável e barreira para-vapor, pelo que é preconizada uma sobreposição de 150 mm nas bordas laterais dos painéis, permitindo a sobreposição e selagem com fitas tipo *Easy Band* ou *Double Band*.

Tratando-se do encontro entre revestimentos internos, os bordos de placas de gesso cartonado adjacentes devem ser escalonados e apoiados por montantes metálicos nas duas direções. Para o

encontro do revestimento externo das fachadas, conforme anteriormente exposto, as tábuas das bordas são omitidas do processo de pré-fabricação e instaladas *in situ* como mostra a Figura 4.32.

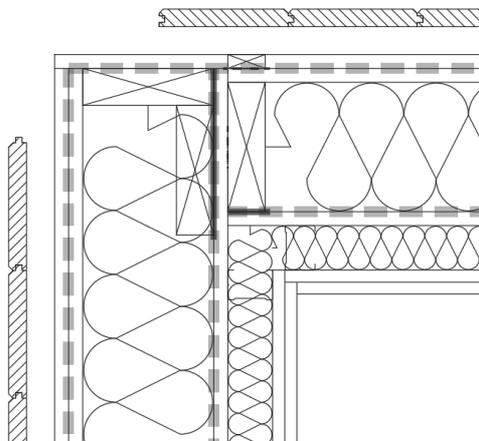


Figura 4.32 – Detalhe do encontro entre revestimentos de paredes adjacentes. Exemplo: Par_Ext_TF

Isso permite o acesso às juntas, sejam elas verticais ou horizontais, de encontro dos painéis com os demais painéis ou componentes estruturais avulsos (como vigas), permitindo sua vedação. Pelo exterior, a vedação deve ser feita com fitas *Easy Band* e, pelo interior, a mesma *Easy Band* ou *Seal Band*, em suporte em papel impregnado hidrorrepelente, colante acrílico e camada de separação.

Nas aberturas de janelas e portas na fachada, são considerados três níveis de proteção: membrana *Bytum Band* ou *Protect* pelo exterior do caixilho, ambos em composto butílico adesivo com suporte em tecido de polipropileno (PP) e camada de separação, para garantir a vedação aos agentes atmosféricos e proteção ao peitoril; *Frame Band* no perímetro do caixilho para garantir rendimento termoacústico e a fixação mecânica; e *Easy Band* ou *Seal Band* pelo interior do caixilho para garantir a vedação do ar e evitar a formação de condensação nas juntas.

O encontro entre paredes de *timber-frame* e pisos em CLT é feita apoiando-se o CLT sobre os banzos superiores da parede inferior ou sobre a viga de coroamento, ambos fixados por parafusos verticais (Figura 4.33). Neste último caso, as vigas de suporte para o pavimento são ligadas lateralmente à viga de coroamento por parafusos duplos inseridos enviesados. Importa referir que os conectores ilustrados nas figuras dessa seção tem caráter informativo acerca da tipologia a ser empregada e não refletem os esforços a que são sujeitos ou modelos específicos.

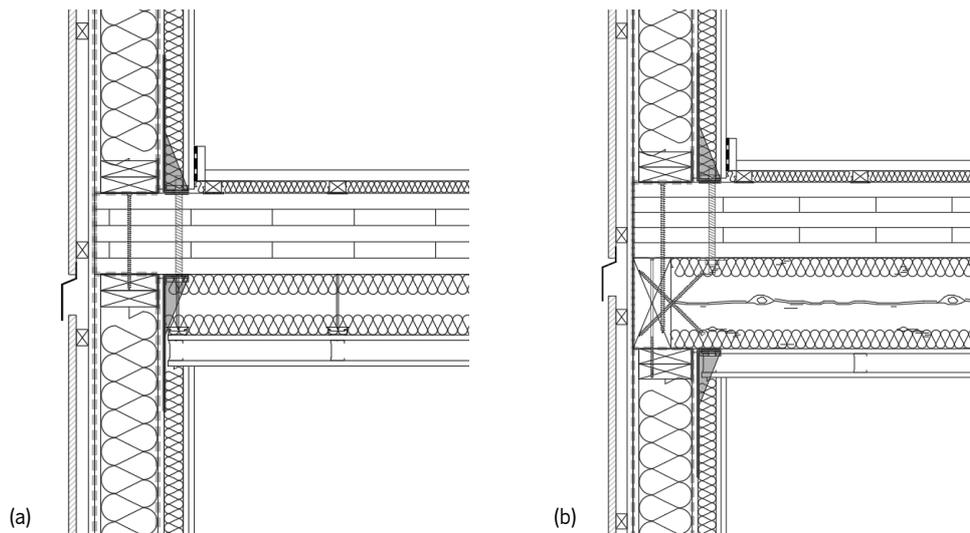


Figura 4.33 – Junção entre paredes em *timber-frame* e piso em CLT. (a) apoiado diretamente sobre as paredes e (b) apoiado sobre as vigas de coroamento. Exemplo: Par_Ext_TF e Pav_Int_CLT

O mesmo ocorre para a cobertura inclinada, que apoia os painéis sanduíche sobre as vigas de coroamento e da estrutura do telhado. As paredes são ainda fixadas ao piso, tanto na base quanto no topo, por conectores angulares (Figura 4.34). As paredes internas não-estruturais devem, igualmente, apoiar-se diretamente sobre o elemento estrutural do piso, e não sobre o soalho.

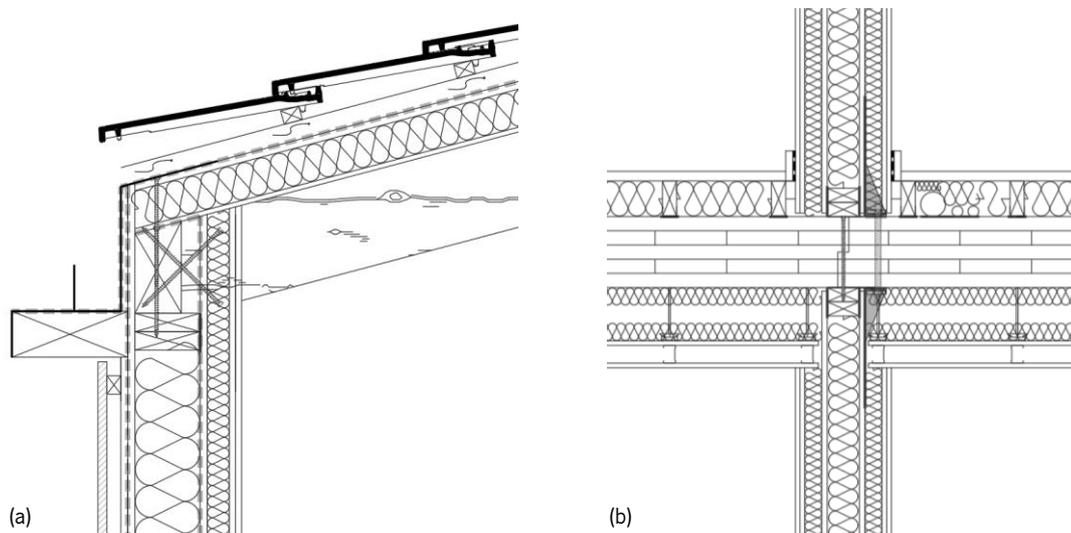


Figura 4.34 – (a) Junção entre as vigas da Cob_TAH e as vigas de coroamento; (b) Parede não estrutural apoiada diretamente sobre o CLT do piso intermediário. Exemplo: Par_Int_Nest_TF e Pav_Int_CLT

As Figuras 4.33 e 4.34 acima retratam, ainda, a continuidade das membranas da fachada através dos pisos e cobertura. No encontro entre paredes de fachada e pisos intermediários, é preconizada uma sobreposição suficiente para as bordas da membrana respirável e barreira para-vapor, com comprimento a depender das dimensões dos elementos estruturais apontadas segundo dimensionamento, para contornar o elemento de piso e emendar-se às membranas do painel de parede superior/inferior. O mesmo ocorre para o encontro entre paredes de fachada e a cobertura, onde a membrana respirável e

barreira para-vapor encontram-se formando um invólucro ao redor do edifício. Em ambos casos, usa-se selagem em fitas tipo *Easy Band* ou *Double Band*.

As membranas impermeáveis da cobertura e das varandas também apresentam certa continuidade entre elementos, pelo que devem prosseguir sob as calhas de recolha de águas e subir por, pelo menos, 20 cm nas paredes de fachada e platibanda da cobertura ligeiramente inclinada (Figura 4.35). Na cobertura inclinada, esta desce na fachada até proteger completamente o beiral (Figura 4.34). Como referido anteriormente, as folhas impermeáveis são aplicadas apenas *in situ* e seladas com fitas *Easy Band*.

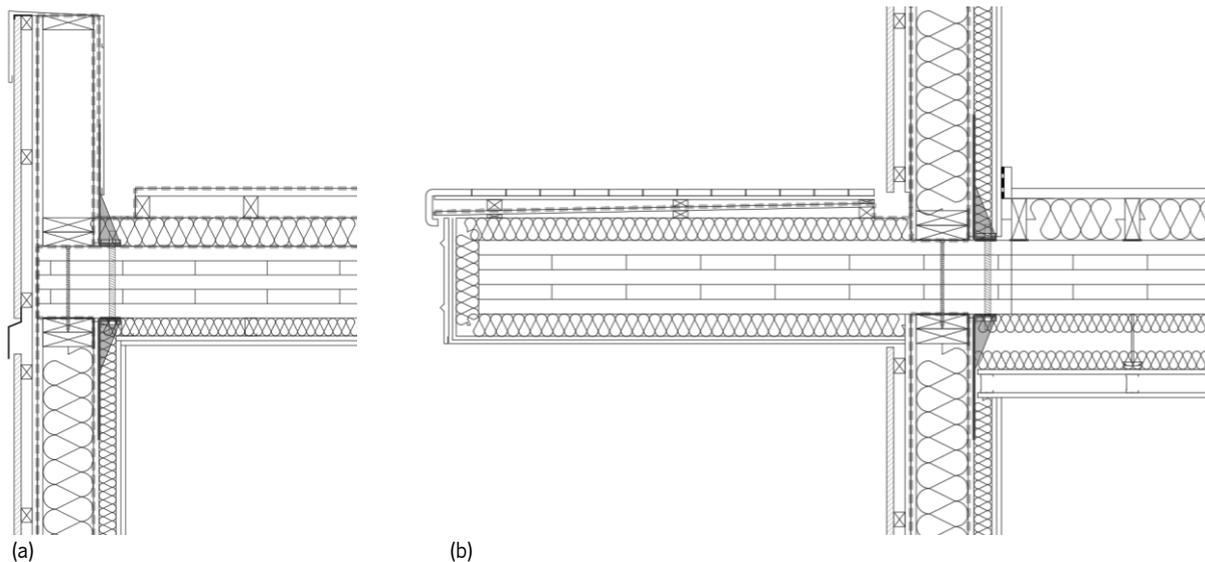


Figura 4.35 – Continuidade das membranas entre (a) Parede externa (Par_Ext_TF) e cobertura (Cob_CLT) e (b) Parede externa (Par_Ext_TF) e varanda (Var_CLT)

O encontro entre paredes em CLT, nomeadamente do núcleo, e os pisos não possibilita que o CLT do piso apoie-se sobre as paredes, uma vez que as paredes do núcleo são inteiriças verticalmente em toda a altura do edifício. Por isso, a ligação é feita lateralmente por sapatas metálicas, conforme mostra a Figura 4.36 a seguir.

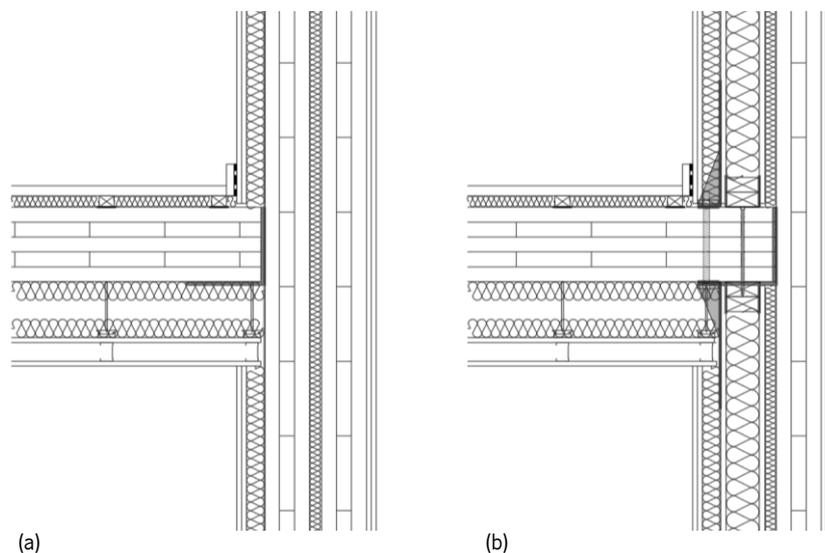


Figura 4.36 – Ligação entre pisos intermediários (Pav_Int_CLT) e paredes em CLT (a) Par_Nuc_CLT; (b) Par_Nuc_CLT_TF)

Independentemente do tipo de apoio, no encontro entre elementos estruturais apoiados verticalmente, como parede-piso (e vice-versa) e CLT-viga de pavimento, a camada em material resiliente para desligamento rígido em prol do desempenho acústico é feita pela fita *Xylofon*, da Rothoblaas, um perfil de alto desempenho em mistura de poliuretano com espessura de 6 mm e suporte à uma ampla gama de carregamentos (até 630 kN/m) que garante uma redução da transmissão de ruído em mais de 15 dB. Os conectores de ligação entre paredes e pisos também devem conter, na superfície em contato com os elementos estruturais, material resiliente em fitas *Gips Band*.

Ainda em função do desempenho acústico, preconiza-se um vão de 10 mm entre os revestimentos de parede e pisos e a superfície dos componentes estruturais do elemento de encontro. Os rodapés também devem ser isolados das paredes para garantia do desempenho acústico do piso flutuante, pelo que são adotadas fitas *Silent Edge*, da Rothoblaas, entre eles (Figura 4.37).

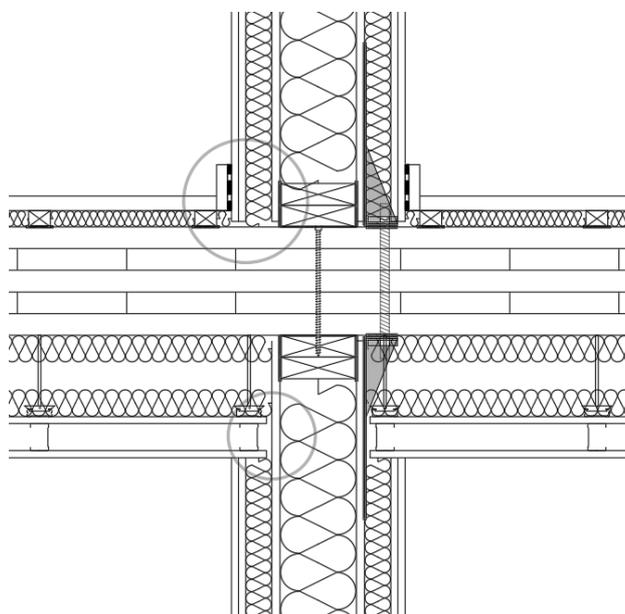


Figura 4.37 – Detalhe da separação rígida entre os componentes de acabamento dos elementos construtivos. Exemplo: Par_Int_Est_TF e Pav_Int_CLT

O encontro das paredes com o piso do rés do chão merece especial atenção. A parede é apoiada sobre frechal em madeira tratada em autoclave com dimensões 100 x 170 mm afixado à fundação em betão por parafusos de ancoragem para betão. Assim como as demais paredes, as paredes do rés do chão também são unidas ao frechal e à base de betão por conectores angulares. Entre o frechal e o elemento em betão e na face externa do frechal, é alocada uma camada de *Connect Band* selada à membrana impermeável *Floor Radon* do piso de rés do chão por fita *Supra Band*. Uma membrana impermeável, *Ground Band*, de, pelo menos, 20 cm acima e abaixo do nível da junta entre o frechal e o betão deve ser alocada e, sobre ela, uma camada de XPS *Wallmate CW-A*, com 60 mm de espessura, desde a fundação até, pelo menos, 40 cm acima do nível do terreno, de forma a proteger o revestimento externo em

madeira da humidade do solo e respingos. Sobre ele, ainda é executada uma camada impermeável em *Bytum Base 2500* que se encontra e sobrepõe ligeiramente a membrana respirável da parede de fachada. As paredes internas também apoiam-se sobre frechais, mas, nesse caso, executa-se apenas as camadas impermeáveis em *Floor Radon* e *Connect Band* (Figura 4.38).

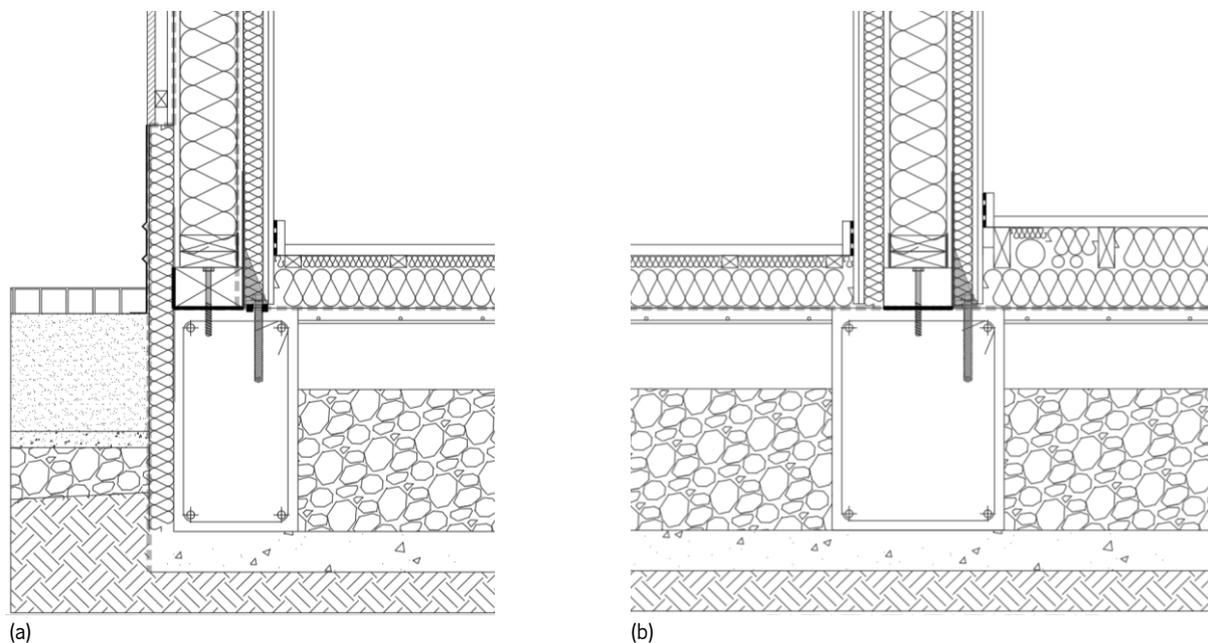


Figura 4.38 – Encontro das paredes com o piso do rés do chão (Pav_RC). Exemplos: (a) Par_Ext_TF e (b) Par_Int_Est_TF

4.6. Análise funcional

A seguir, são apresentadas as verificações quanto ao desempenho térmico e acústico dos painéis desenvolvidos segundo as metodologias descritas nas Seções 3.5.1.3 e 3.5.2.2 desse documento.

4.6.1. Análise térmica

A simulação térmica produzida no *software* Ubakus (Plag, 2011) resultou nos coeficientes de transmissão térmica (U) apresentados na Tabela 4.17 para cada um dos elementos construtivos desenvolvidos. A Tabela 4.17 ainda apresenta os valores máximos e de referência que cada elemento deve cumprir segundo o REH. Para precisar estes valores, foi considerado o pior caso, supondo as condições de clima e arquitetura que exigem o máximo desempenho previsto no REH em termos de qualidade térmica dos elementos opacos. Logo, assumiu-se para os valores de $U_{\text{máx}}$ e U_{ref} aqueles relativos à zona climática I3 e, para elementos de paredes e pisos internos com potencial para separação entre EU de ENU com $B_{\text{zu}} > 0,7$, ou seja, que possam configurar envolventes interiores com requisito de exterior, considerou-se, por defeito, B_{zu} igual a 0,8 para todos os eventuais ENU, impondo-se os requisitos particulares a esta circunstância.

Importa referir que todas as previsões do coeficiente de transmissão térmica dos elementos cuja configuração estrutural contém um ou mais painéis CLT baseou-se em dimensões estimadas para a espessura dos mesmos (72 mm para paredes e 120 mm para pisos e cobertura) segundo as cargas habituais verificadas em edifícios de até 5 pisos, pelo que convém proceder novamente à análise térmica destes elementos caso a espessura aplicada seja inferior àquela utilizada nas simulações deste estudo. Ainda, para todos os espaçamentos entre montantes ou ripas, assumiu-se a distância mínima considerada neste estudo, de 300 mm, uma vez que este configura o pior caso no que concerne as interrupções das camadas de isolamento contidas no interior dos elementos construtivos avaliados.

Tabela 4.17 – Verificação do coeficiente de transmissão térmica dos diversos elementos construtivos para a zona climática I3

Elemento	Tipo de envolvente	Zona climática I3		$U_{U_{bakus}}$ (W/m ² .°C)	Verificação $B_{2h} > 0,7$
		U_{ref} (W/m ² .°C) $B_{2h} > 0,7 - B_{2h} \leq 0,7$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/m ² .°C) $B_{2h} > 0,7 - B_{2h} \leq 0,7$		
Par_Ext_TF	Exterior	0,35	0,35	0,218	OK
Sem cam. serviço				0,275	OK
Par_Int_Est_TF	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,192	OK
Sem cam. serviço				0,268	OK
Par_Int_Nest_TF	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,240	OK
Sem cam. serviço				0,374	KO
Par_Int_Dupla_TF	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,110	OK
Sem cam. serviço				0,139	OK
Par_Nuc_CLT	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,274	OK
Sem cam. serviço				0,436	KO
Par_Nuc_CLT_TF	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,206	OK
Sem cam. serviço				0,254	OK
Pav_RC	Sem requisitos	–	–	0,257	–
Pav_Int_CLT	Interior	0,30 – 0,50	0,30 – 1,20	0,203	OK
Sem teto acústico				0,314	KO
Cob_CLT	Exterior	0,30	0,30	0,219	OK
Cob_TAH	Exterior	0,30	0,30	0,264	OK
Var_CLT	–	–	–	0,213	–

A Tabela 4.18 abaixo analisa os elementos reprovados para os requisitos impostos à zona climática I3 em condições mais brandas, pertinentes às zonas climáticas I1 e I2.

Tabela 4.18 – Verificação do coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos com desempenho insuficiente para a zona climática I3, nas zonas climáticas I1 e I2

Elemento	$U_{U_{bakus}}$ (W/m ² .°C)	$U_{m\acute{a}x}$ (W/m ² .°C) $B_{zu} > 0,7 - B_{zu} \leq 0,7$		Verificação ($B_{zu} > 0,7$)	
		Z.C. I1	Z.C. I2	Z.C. I1	Z.C. I2
Par_Int_Nest_TF Sem cam. serviço	0,374	0,50 – 2,00	0,40 – 2,00	OK	OK
Par_Nuc_CLT Sem cam. serviço	0,436	0,50 – 2,00	0,40 – 2,00	OK	KO
Pav_Int_CLT Sem teto acústico	0,314	0,40 – 1,65	0,35 – 1,30	OK	OK

Os dados de input e output do *software* para cada um dos elementos analisados estão disponíveis no Anexo 1 deste documento.

Para os painéis de parede de fachada (Par_Ext_TF), obteve-se um coeficiente de transmissão térmica inferior ao máximo estipulado. Quando simulada esta configuração de parede dispensando-se a aplicação da camada de serviço que, além de prover o vão para a passagens das instalações, forma uma faixa extra e contínua de material isolante pelo interior, atinge-se um coeficiente de transmissão térmica mais elevado, mas ainda em cumprimento ao requisito térmico imposto à este elemento. Quando a parede de fachada estiver justaposta à parede de fachada do edifício vizinho, nenhum requisito térmico é imposto, uma vez que se pressupõe que o fogo adjacente é um EU aquecido ou arrefecido de maneira a manter a temperatura interior de referência de conforto térmico.

A variedade de paredes interiores pode eventualmente fazer a divisão entre EU e ENU, compondo uma envolvente interior com requisitos de interior ($B_{zu} \leq 0,7$) ou exterior ($B_{zu} > 0,7$). No primeiro caso, todos os elementos analisados cumpriram largamente aos limites regulamentares, sejam eles referentes à zona climática I1, I2 ou I3. No segundo caso, apesar de mais rigoroso, específico e, possivelmente, menos frequente, as paredes internas estruturais (Par_Int_Est_TF) com ou sem ambas camadas de serviço ainda apresentam bom desempenho. Já as paredes interiores não-estruturais (Par_Int_Nest_TF), por apresentarem menor espessura e, conseqüentemente, menos material isolante em sua cavidade, não cumprem os requisitos quando ambas camadas de serviço são dispensadas. Assim, nos casos em que essa configuração de parede seja aplicada em uma envolvente interior com requisito de exterior em zona climática I3, esta necessariamente deve apresentar camada de serviço em pelo menos uma de sua faces, com coeficiente de transmissão térmica de 0,278 W/m².°C. Para as zonas climáticas I1 e I2, ambas configurações são satisfatórias, conforme mostra a Tabela 4.18.

O mesmo ocorre para as paredes de núcleo que, por confinarem caixas de escadas e de elevadores, têm maior potencial para comporem uma envolvente interior com requisitos de exterior a depender das

condições de ventilação, volume e área em contato com EU do ENU confinado. A solução Par_Nuc_CLT_TF tem comportamento satisfatório em ambas configurações simuladas (com ou sem camada de serviço) devido ao preenchimento total da cavidade do *timber-frame* com material isolante. Já a solução Par_Nuc_CLT não teve desempenho suficiente quando retirada a camada de serviço, pelo que esta é obrigatória em circunstâncias de aplicação da solução em CLT duplo (Par_Nuc_CLT) em envolventes interiores com requisito de exterior em zona climática I3 e também em zona climática I2, como apresentado na Tabela 4.18. Caso opte-se pela exposição do CLT como acabamento estético das paredes confinantes das caixas de escadas, o coeficiente de transmissão térmica aumenta cerca de $0,005 \sim 0,021 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, valor irrisório e insuficiente para refutar a aprovação destas configurações de painéis nos casos referidos.

As paredes internas duplas (Par_Int_Dupla_TF), por apresentarem, pelo menos, duas cavidades completamente preenchidas por material isolante, apresentaram coeficiente de transmissão térmica bastante inferiores, mesmo quando dispensadas as camadas de serviço. Esta configuração robusta de parede interna foi desenvolvida visando a promoção do conforto acústico entre frações vizinhas e, nestas condições de aplicação, sugere-se que nenhum requisito térmico seja imposto, uma vez ambos espaços adjacentes são considerados úteis. Contudo, a análise térmica foi igualmente efetuada supondo a eventual aplicação desta configuração em circunstâncias diversas que demandem elevado desempenho acústico, como a divisão entre frações e áreas comuns dos edifícios com elevada produção de ruído e características de ENU.

A solução construtiva para o rés do chão (Pav_RC) também dispensa requisitos, uma vez que está invariavelmente em contato com o solo. O elemento de varanda (Var_CLT) também não apresenta requisitos, pois sequer enquadra-se como envolvente. Apesar disso, a análise do coeficiente de transmissão térmica do elemento de varanda torna-se interessante, uma vez que este é envolto em material isolante com o objetivo de mitigar as pontes térmicas do encontro entre fachada e elementos de piso. Verifica, portanto, que o coeficiente de transmissão térmica dos elementos de varanda ($0,213 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), de piso intermediário ($0,203 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e de parede de fachada ($0,218 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) são compatíveis. Ainda, para o caso extremo em que uma varanda seja fechada e seu ambiente acondicionado formando um EU, verifica-se que o elemento apresentaria comportamento satisfatório enquanto componente da envolvente exterior.

Tratando-se dos pisos intermediários (Pav_Int_CLT), o elemento de painel proposto atende aos requisitos mais rigorosos quando contido em uma envolvente interior com requisito de exterior na zona climática I3. No entanto, uma vez que o teto falso acústico e suas camadas internas de material isolante são

excluídos, restando apenas uma camada de 60 mm de lã de rocha sob o CLT, a configuração passa a atender somente aos critérios das zonas climáticas I1 e I2. Para que a solução sem teto falso acústico seja satisfatoriamente aplicada para este propósito sob as condições da zona climática I3, é necessário que a camada de lã de rocha entre o CLT e as placas de gesso cartonado tenha, pelo menos, cerca de 82 mm (considerando as mesmas propriedades do material). Utilizando-se uma camada de 90 mm (a primeira espessura superior a 60 mm disponível do produto inicialmente escolhido – *Comfort*, *Volcalis*), verifica-se um coeficiente de transmissão térmica total do elemento de $0,293 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Ambas as opções de cobertura atendem aos requisitos impostos às zona climáticas I1 a I3 e, caso opte-se por utilizar-se do apelo estético do CLT para o acabamento do teto, a solução *Cob_CLT* passa a apresentar um coeficiente de transmissão térmica igual a $0,293 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, valor ligeiramente inferior ao limite máximo tolerado.

Além da análise narrada acima, os elementos de painéis necessariamente contidos nas envolventes exteriores dos edifícios (soluções de cobertura e fachada) foram analisados de maneira mais aprofundada quanto ao seu comportamento frente as variações de temperatura e humidade. No entanto, importa referir que, apesar de completa, a análise do *software* em matéria da proteção a humidade só é possível quando impõe-se as condições de clima e metodologias de cálculo definidas pela DIN 4108-3, uma norma alemã que não reflete as condições climáticas observadas no contexto português. A seguir, são apresentados os resultados obtidos para os painéis de parede de fachada.

Segundo o *software*, a parede de fachada (*Par_Ext_TF*) oferece capacidade de armazenamento de calor de $76 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$, considerando todos os componentes do elemento, e $42 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$, considerando apenas as camadas internas. A amplitude térmica é, então, atenuada em 18 vezes, ou seja, a temperatura no exterior varia 18 vezes mais forte do que a temperatura no interior, com um atraso térmico de 10,5 horas, que é o tempo após o qual o pico de temperatura do exterior atinge o interior. A Figura 4.39 mostra o gráfico da amplitude térmica no exterior (em vermelho) e no interior (em azul) ao longo de um dia, onde nota-se que o máximo da temperatura da superfície interna ocorre durante a segunda metade da noite, conforme preferível.

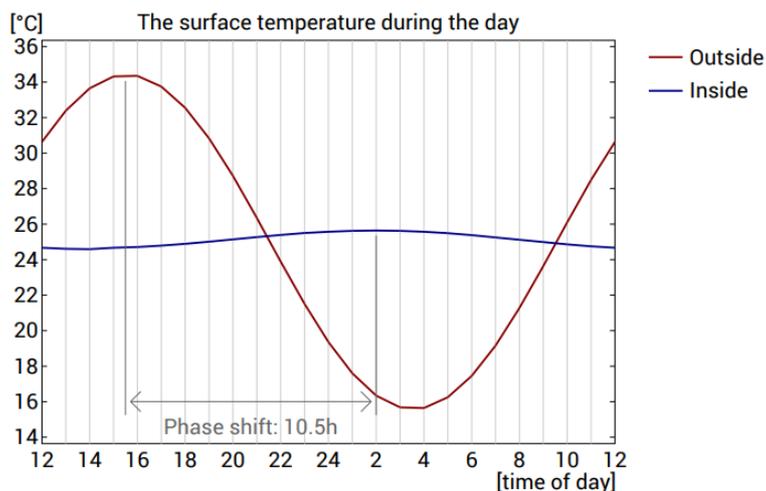


Figura 4.39 – Atenuação da amplitude térmica produzida pela Par_Ext_TF (em azul) com relação à temperatura exterior (em vermelho)

Apesar de não haver diferenças expressivas entre a capacidade de armazenamento de calor da configuração original e da configuração em que se dispensa a camada de serviço (de 76 kJ/m².K para 73 kJ/m².K), ao simular a segunda, a amplitude térmica passa a ser atenuada em apenas 11,4 horas, com a mudança de fase ocorrendo em um período de 7,7 horas.

O perfil abaixo (Figura 4.40) apresenta a simulação da atenuação da temperatura promovida pela configuração original dos painéis de fachada para seis horários distintos do dia: três diurnos (7h, 11h, 15h; em castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; em vermelho).

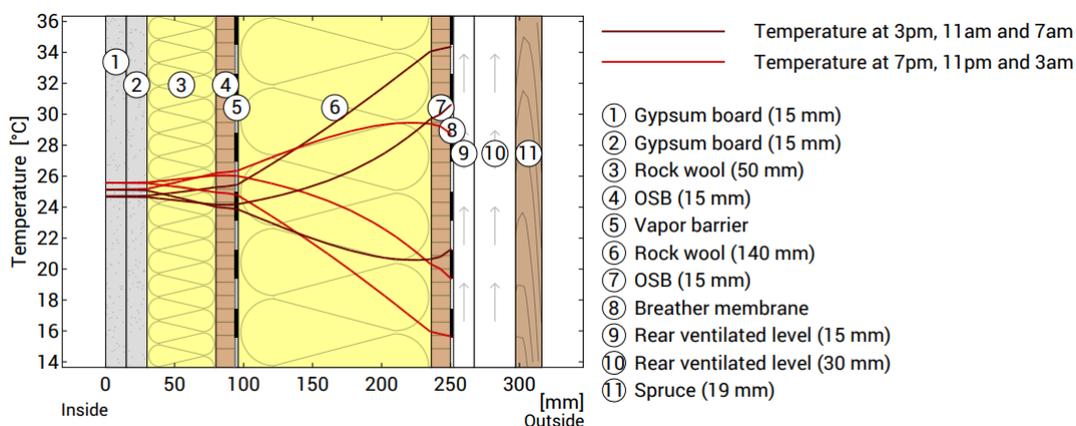


Figura 4.40 – Atenuação térmica através das camadas da Par_Ext_TF para seis horários distintos do dia: três diurnos (7h, 11h, 15h; em castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; em vermelho)

Importa referir que a avaliação da proteção térmica é independente de inputs específicos acerca da temperatura exterior, pelo que os resultados obtidos para a atenuação da amplitude térmica e atraso térmico objetivam simplesmente identificar o potencial do elemento construtivo e não têm o propósito de fornecer qualquer informação sobre a temperatura interna esperada.

Em seguida, impôs-se condições de clima específicas segundo as prescrições da DIN 4108-3 (interior: 20 °C e 50% de humidade; exterior: -5 °C e 80% de humidade) para a verificação do desempenho do elemento quanto a proteção à humidade.

Numa análise referente à temperatura da superfície interna da parede, os painéis de parede de fachada na sua configuração original apresentaram temperaturas mínimas na superfície exterior e interior de -4,8 °C e 17,9 °C, respetivamente. A seguir, apresenta-se o perfil de temperatura na espessura da seção longitudinal da configuração original (Figura 4.41), onde é possível também notar a influência do alinhamento de montantes na progressão de temperatura através dos componentes do elemento.

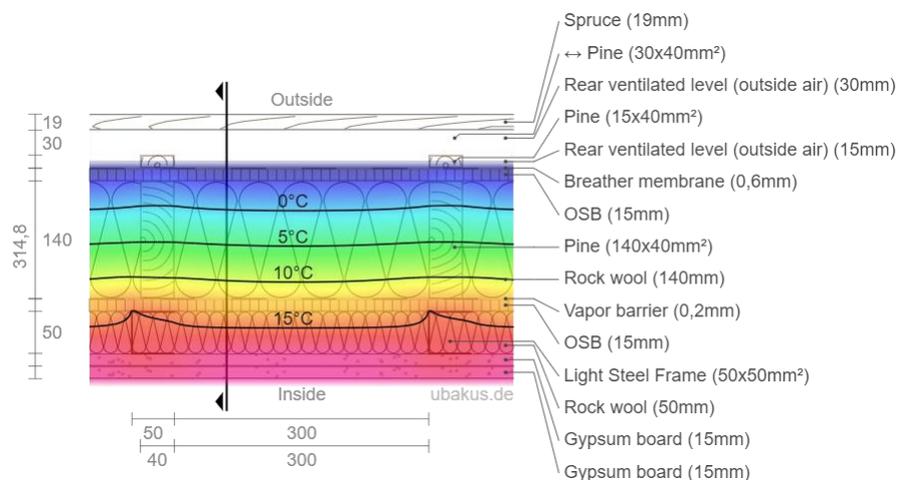


Figura 4.41 – Perfil de temperatura no interior da Par_Ext_TF para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3

A já referida temperatura da superfície interna (17,9 °C) implica uma humidade relativa de 57% na superfície, condições sob as quais não é esperada a formação de mofo. A Figura 4.42 a seguir apresenta o perfil de humidade relativa através dos componentes do elemento (em preto) e o ponto de saturação (em azul) em um corte transversal.

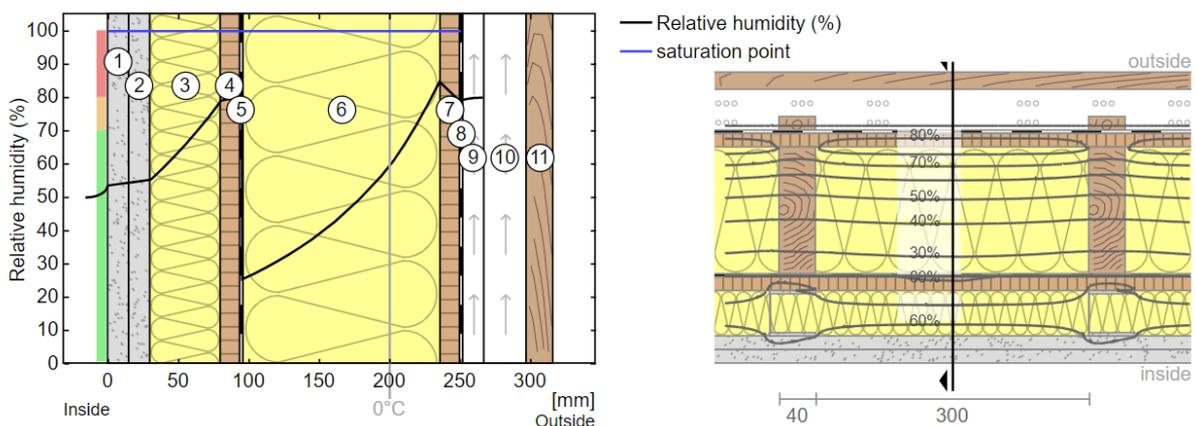


Figura 4.42 – Perfil de humidade no interior da Par_Ext_TF para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3

Ao expor o elemento às referidas condições climáticas por 90 dias, obteve-se que o elemento tem potencial para se manter livre de condensações, uma vez que a sua reserva de secagem, segundo os métodos de cálculo da mesma referência normativa, é igual a 110 g/m².a (superior ao mínimo requerido de 100 g/m².a para paredes e tetos). Isso deve-se à transmissão do vapor de água (Sd) atingida pelo elemento (total: 162,41 m; até o plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno, ou seja, entre a lâ de rocha e o OSB: 154,06 m), principalmente devido à membrana para-vapor escolhida (Sd = 150 m), garantindo um potencial de evaporação no inverno de 0,012 kg/m² e massa de evaporação máxima no verão de 0,10 kg/m². Os diagramas de difusão no período do inverno e do verão apresentados na Figura 4.43 mostram a pressão de vapor (em preto) e o ponto de saturação (em azul) no interior do elemento.

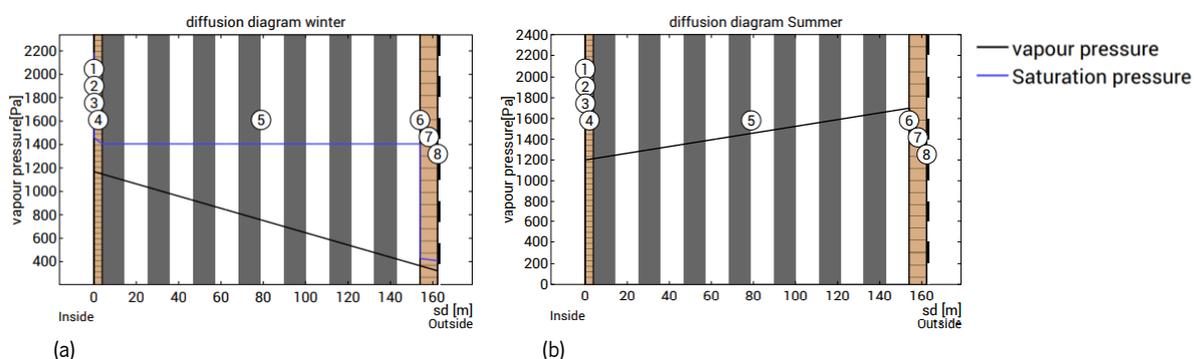


Figura 4.43 – Diagramas de difusão no plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno da Par_Ext_TF. (a) Inverno; (b) Verão

Tratando-se dos painéis de cobertura Cob_CLT e Cob_TAH, estes apresentaram os seguintes resultados para a capacidade de armazenamento de calor total e das camadas internas, atenuação da amplitude térmica e atraso térmico (Tabela 4.19).

Tabela 4.19 – Resultados obtidos para os parâmetros térmicos da Cob_CLT e Cob_TAH

Parâmetro		Elemento	
		Cob_CLT	Cob_TAH
Capacidade de armazenamento de calor (kJ/m ² .K)	Total	119	62
	Camadas internas	78	11
Atenuação da amplitude térmica		71,4	2,7
Mudança de fase (h)		14,3	6,0

A seguir têm-se os gráficos da amplitude térmica no exterior (em vermelho) e no interior (em azul) ao longo de um dia para ambas soluções (Figura 4.44), onde pode-se observar com clareza a diferença significativa na contribuição de cada uma delas no atraso térmico do ambiente interior, e os perfis com

a simulação da atenuação da temperatura para seis horários distintos do dia (Figura 4.45): três diurnos (7h, 11h, 15h; em castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; em vermelho).

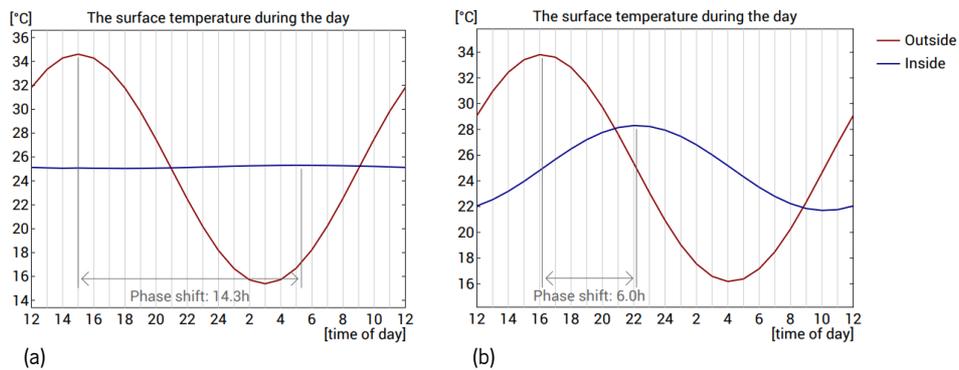


Figura 4.44 – Atenuação da amplitude térmica produzida pela (a) Cob_CLT e pela (b) Cob_TAH (em azul) com relação à temperatura exterior (em vermelho)

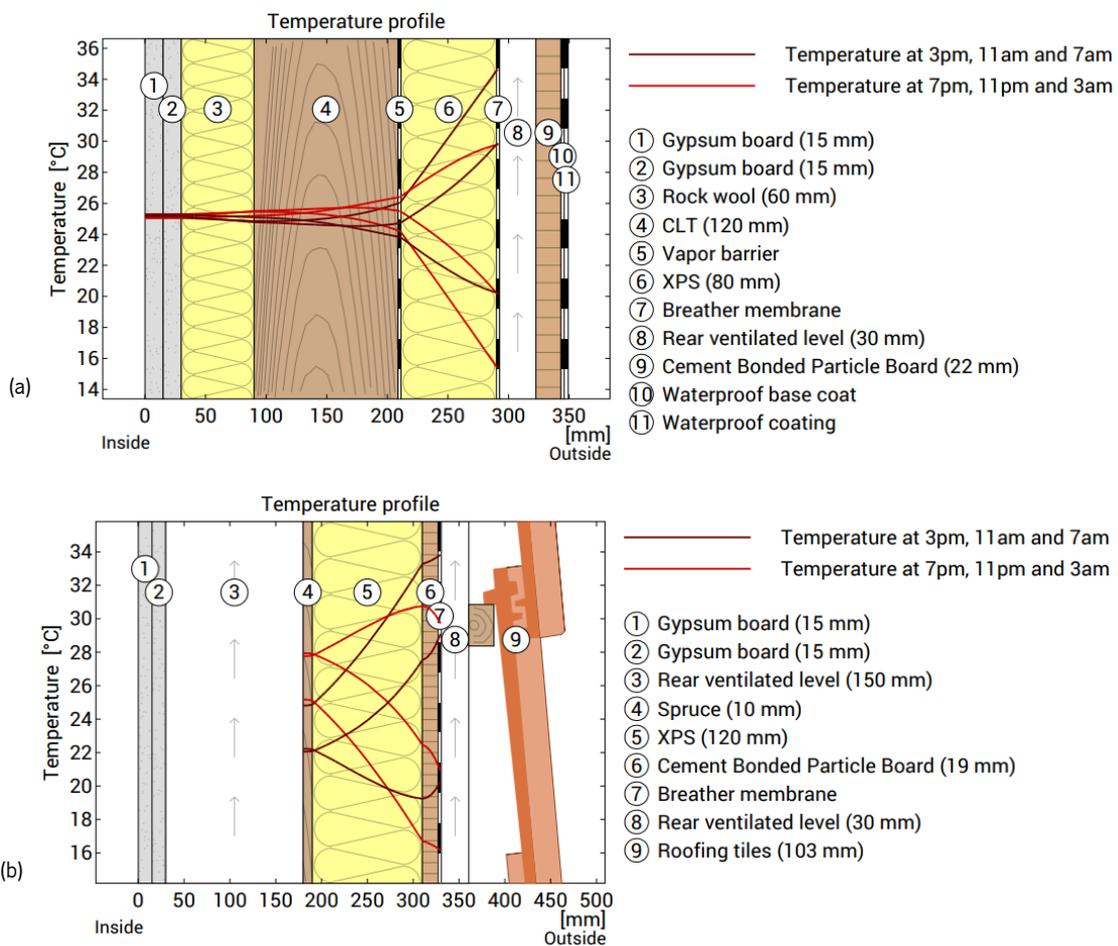


Figura 4.45 – Atenuação térmica através das camadas da (a) Cob_CLT e da (b) Cob_TAH para seis horários distintos do dia: três diurnos (7h, 11h, 15h; em castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; em vermelho)

Simulando as mesmas condições climáticas impostas ao painel de fachada, obteve-se para os painéis de cobertura Cob_CLT e Cob_TAH temperatura mínima na superfície interior de 18,0 °C e 18,4 °C, respetivamente, e pode-se considerar que não houve diferença entre as temperaturas mínimas na

superfície exterior dos elementos de cobertura (-4,8 °C e -4,7 °C). A seguir são apresentados os perfis de temperatura de ambas soluções (Figura 4.46).

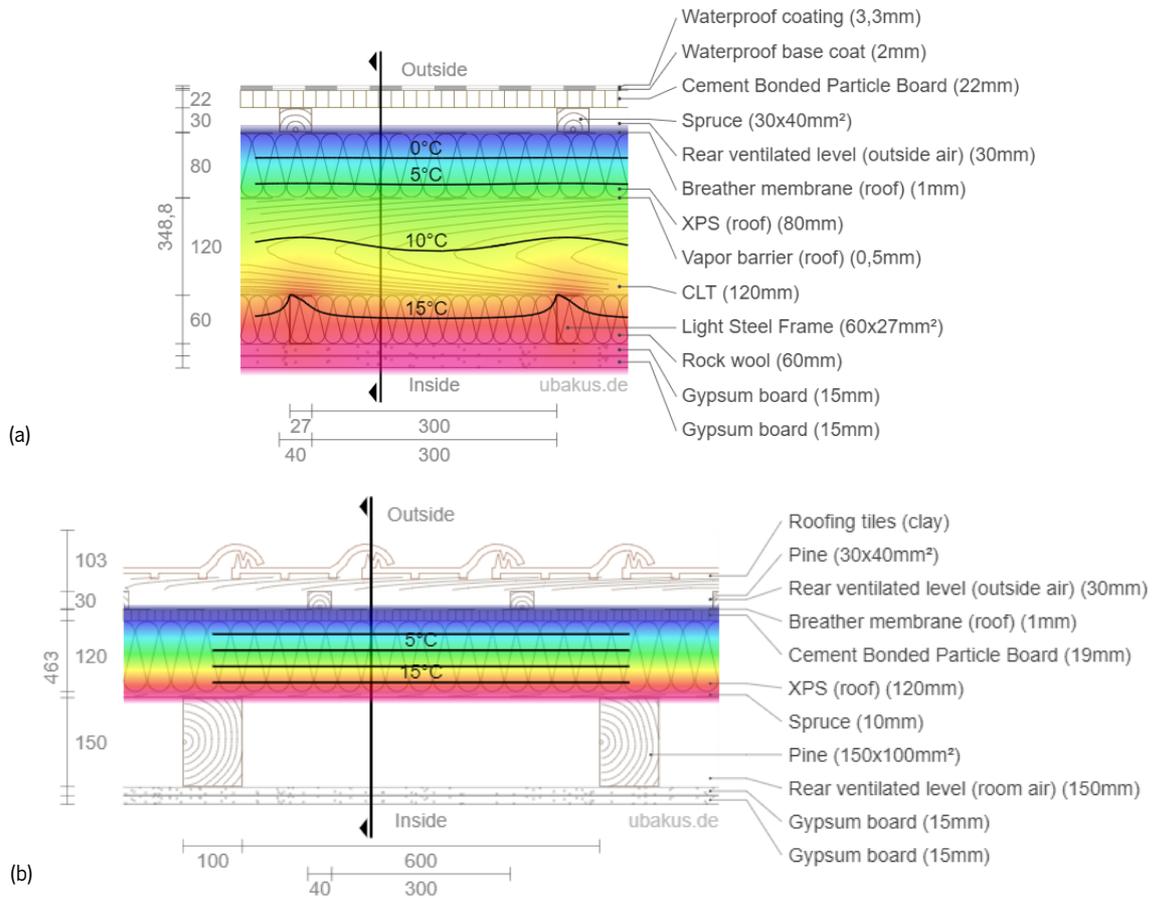


Figura 4.46 – Perfil de temperatura no interior da (a) Cob_CLT e da (b) Cob_TAH para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3

Para as referidas temperaturas mínimas na superfície interior, os painéis Cob_CLT e Cob_TAH apresentam humidade relativa na superfície de 57% e 55%, condições sob as quais não é esperada a formação de mofo. A Figura 4.47 a seguir apresenta o perfil de humidade relativa através dos componentes do elemento (em preto) e o ponto de saturação (em azul) em cortes transversais.

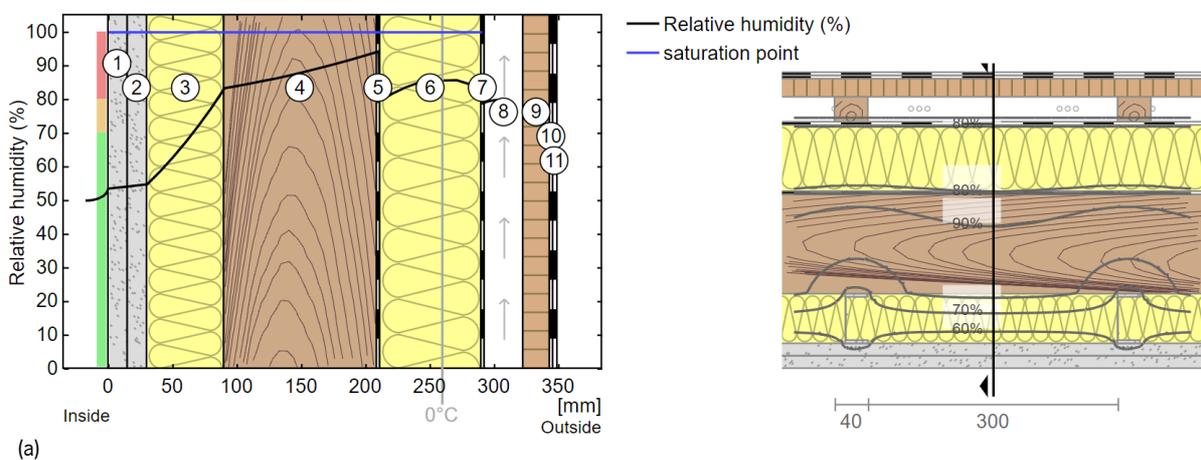


Figura 4.47 – Perfil de humidade no interior da (a) Cob_CLT e da (b) Cob_TAH para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3

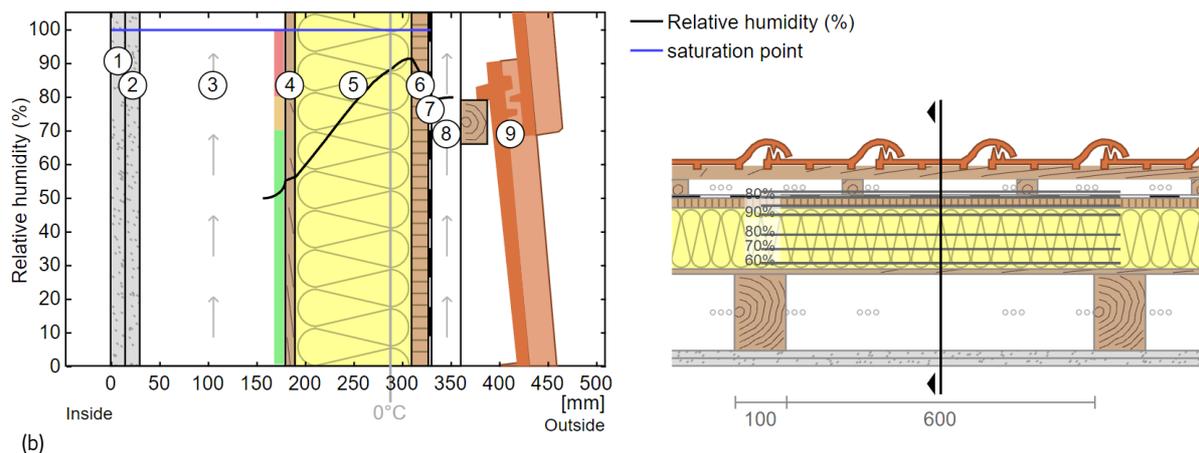


Figura 4.47 – Perfil de humidade no interior da (a) Cob_CLT e da (b) Cob_TAH para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3 (Continuação)

A seguir, na Tabela 4.20, são apresentados os valores considerados e obtidos no desenvolvimento da análise referente à reserva de secagem dos elementos de cobertura.

Tabela 4.20 – Resultados obtidos para os parâmetros de humidade da Cob_CLT e Cob_TAH

Parâmetro		Elemento	
		Cob_CLT	Cob_TAH
Plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno		Entre CLT e barreira para-vapor	No XPS
Sd (m)	Barreira para-vapor	2,5	–
	Total	13,88	13,35
	No plano	3,18	10,87
Potencial de evaporação no inverno (kg/m ²)		–	0,039
Condensação (kg/m ²)		0,020	–
Massa de evaporação máxima no verão (kg/m ²)		0,508	0,62
Reserva de secagem atingida (g/m ² .a)		487	655
Reserva de secagem mínima requerida (g/m ² .a)		250	

O elemento Cob_TAH tem potencial para manter-se livre de condensações, uma vez que sua reserva de secagem é superior ao mínimo requerido para coberturas, segundo a DIN 68800-2. Já o elemento Cob_CLT apresentou condensação sutil no plano com menor capacidade de evaporação no período do inverno (entre o CLT e a barreira para-vapor), de 0,020 kg/m². Entretanto, esta quantidade de água de condensação está abaixo do máximo tolerado (0,5 kg/m²) e é completamente seca na estação do verão, uma vez que a massa de evaporação máxima é significativamente superior. Ainda, o método de cálculo usado não leva em consideração a condutividade capilar dos materiais, fenômeno que acaba por favorecer a secagem da condensação devido ao espalhamento do volume de água. Assumindo que a água de condensação é totalmente aplicada à camada em CLT, verifica-se um aumento no teor de

umidade relacionado à massa da madeira de 0,036%, valor irrisório comparado à tolerância usualmente praticada de 5%. Além disso e como referido anteriormente, o *software* impõe condições de clima mais rigorosas do que aquelas comuns ao território português.

Os diagramas de difusão no período do inverno e do verão apresentados nas Figuras 4.48 e 4.49 mostram a pressão de vapor (em preto) e o ponto de saturação (em azul) no interior dos elementos.

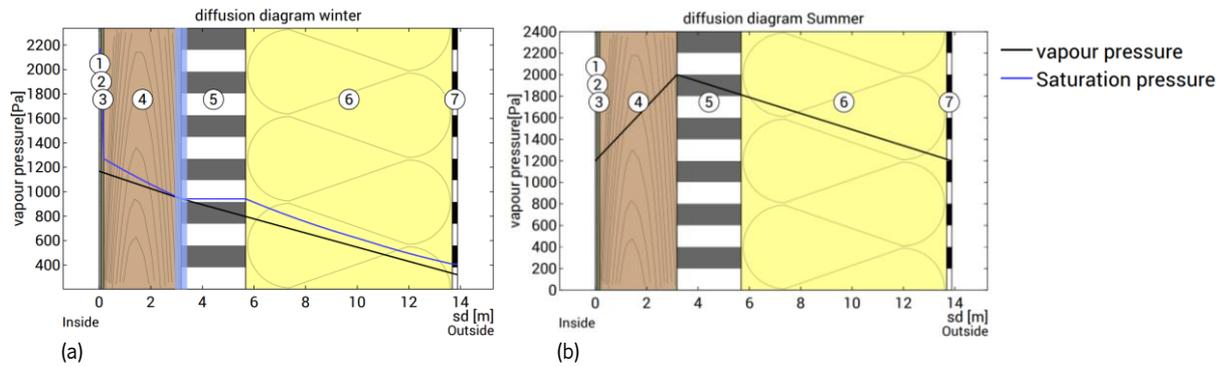


Figura 4.48 – Diagramas de difusão no plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno da Cob_CLT. (a) Inverno; (b) Verão

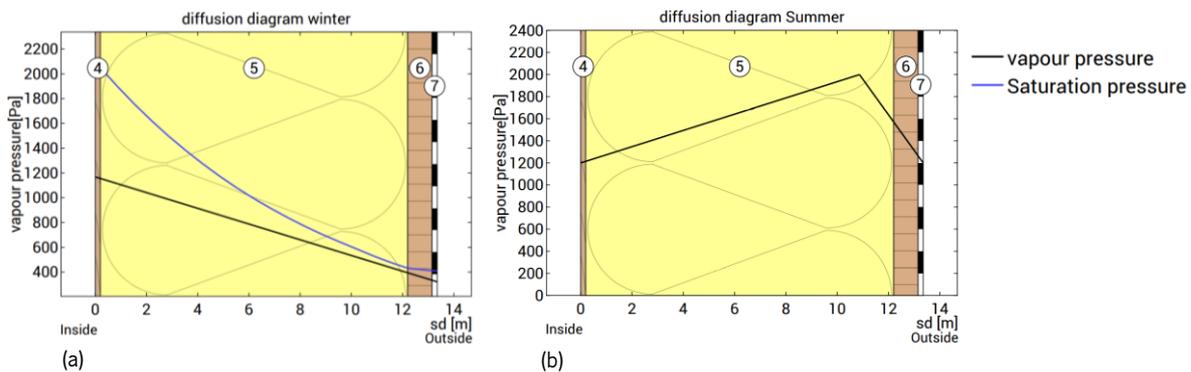


Figura 4.49 – Diagramas de difusão no plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno da Cob_TAH. (a) Inverno; (b) Verão

No Anexo 1 também são detalhados os dados e considerações empregues na avaliação de proteção à humidade dos três elementos da envolvente exterior analisados.

Convém que as análises referentes à proteção contra a humidade sejam abordadas em estudos futuros aplicando-se metodologias de cálculo portuguesas e parametrizando-se as condições climáticas para a realidade do território nacional.

4.6.2. Análise acústica

A simulação acústica produzida no *software* INSUL (Marshall Day, 2021) resultou nos índices de isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão (R_w e $L_{n,w}$) apresentados nas Tabelas 4.21 e 4.22 para cada um dos elementos construtivos desenvolvidos. As Tabelas 4.21 e 4.22 ainda apresentam os valores máximos, para sons aéreos, e mínimos, para sons de percussão, que cada elemento deve cumprir segundo o RRAE. Para precisar estes valores, foram consideradas as supostas localizações e funções

que determinado elemento construtivo poderia assumir em um edifício, exigindo o desempenho adequado previsto no RRAE em termos de isolamento acústico.

Para todas as simulações, considerou-se um espaçamento fixo entre ripas e montantes de 300 mm apesar do sistema aceitar espaçamentos de 300 mm até 600 mm, pois este representa o pior caso uma vez que aumenta os pontos de apoios entre os diversos panos dos elementos construtivos. Os elementos construtivos que contam com painéis CLT foram analisados para a espessura de 72 mm quando aplicados em paredes e de 120 mm quando em pisos.

Tabela 4.21 – Verificação do índice de redução sonora para sons aéreos dos diversos elementos construtivos segundo o RRAE

Elemento	Local da emissão	RRAE	INSUL	Fator I	Verificação
		$D_{2m,nT,w}$ ou $D_{nT,w}$	R_w		
Par_Ext_TF	Exterior ¹	28	55	+3	OK
		33			OK
Par_Int_Est_TF	Circulação comum ou interior de um fogo ²	48	63	+3	OK
		50			OK
Par_Int_Nest_TF	Circulação comum ou interior de um fogo ²	48	63	+3	OK
		50			OK
Par_Int_Dupla_TF	Circulação comum ou interior de um fogo ²	48	77	+3	OK
		50			OK
Par_Nuc_CLT	Circulação vertical ³	40	63	+3	OK
		48			OK
Par_Nuc_CLT_TF	Circulação vertical ³	40	65	+3	OK
		48			OK
Pav_Int_CLT	Garagem ou serviços ⁴	50	61	+3	OK
		58			OK

¹ O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, $D_{2m,nT,w}$, entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos deve ser superior a 28 dB em zonas sensíveis e a 33 dB em zonas mistas.

² O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, $D_{nT,w}$, entre compartimentos de um fogo (emissão) e quartos ou zonas de estar de outro fogo (recepção) num edifício deve ser superior a 50 dB. Já quando a emissão provém de locais de circulação comum do edifício, o $D_{nT,w}$ deve ser superior a 48 dB em condições gerais.

³ O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, $D_{nT,w}$, entre um caminho de circulação vertical servido por elevadores (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção) deve ser superior a 40 dB. Já quando o caminho de circulação vertical é servido por escadas, aplica-se $D_{nT,w} \geq 48$ dB conforme o item anterior.

⁴ O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, $D_{nT,w}$, entre garagem de estacionamento automóvel (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção) deve ser superior a 50 dB. Já quando considerada a possibilidade de haver uma instalação comercial no piso de rés do chão dos edifícios em uso do sistema construtivo e a emissão provém desses locais destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, aplica-se $D_{nT,w} \geq 58$ dB.

Tabela 4.22 – Verificação do isolamento sonoro a sons de percussão dos diversos elementos construtivos segundo o RRAE

Elemento	Local de emissão	RRAE	INSUL	Fator I	Verificação
		$L'_{nT,w}$	$L_{n,w}$		
Pav_Int_CLT	Interior de um fogo ou circulação comum ou serviços ¹	60	51	-3	OK
		50			KO
Cob_CLT	Circulação comum	60	64	-3	KO

¹ No interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção), o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, proveniente de uma percussão normalizada sobre pavimentos dos outros fogos ou de locais de circulação comum do edifício (emissão), deve ser inferior a 60 dB. Já quando a emissão ocorre sobre pavimentos de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão (emissão), o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, deve ser inferior a 50 dB.

Os gráficos de saída do *software* para cada um dos elementos analisados estão disponíveis no Anexo 2 deste documento.

Apesar do *software* ser uma alternativa prática de previsão do isolamento acústico, foram encontradas limitações. A versão de estudante do *software* não permite a parametrização de novos materiais, limitando a análise aos materiais pré-existentes em seu banco de dados. Dessa maneira, foi necessário assumir materiais diferentes daqueles especificados na Seção 4.4, procurando aqueles que apresentassem propriedades semelhantes. Ainda, os métodos empregues pelo *software* suportam, no máximo, elementos triplos, o que implica na limitação ao número de cavidades entre os panos do elemento (máximo de duas), pelo que, para a devida análise dos elementos que apresentavam mais de duas cavidades, foram necessárias considerações e adaptações que permitissem que todas as camadas do elemento fossem apreciadas na previsão de seu desempenho acústico.

A previsão do isolamento acústico dos painéis de parede de fachada (Par_Ext_TF) acusou um índice de redução sonora de 55 dB (Figura 4.50) para a configuração descrita na Seção 4.4.1 (Figura 4.11).

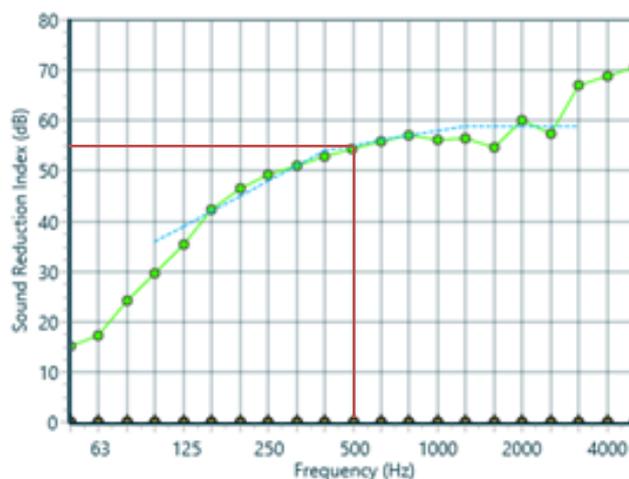


Figura 4.50 – Exemplo de curva do índice de redução sonora a sons aéreos previsto (em verde) e da curva de referência (em azul) – Par_Ext_TF. Gráfico dos restantes elementos construtivos no Anexo 2

No entanto, algumas simulações foram feitas para identificar a contribuição de cada componente na garantia do isolamento acústico requerido e desejado. Caso o material resiliente utilizado no contato entre os elementos rígidos (montantes e OSB) fosse dispensado, observar-se-ia uma diminuição de cerca de 6 dB na redução sonora prevista. Da mesma maneira, quando considerado um montante metálico de suporte das placas de gesso cartonado mais rígido que o originalmente considerado com 0,55 mm de espessura, atinge-se níveis de isolamento inferiores: 53 dB com montantes de 0,75 mm e 49 dB com montantes entre 1 mm a 1,6 mm. Se, ao invés de duas camadas de gesso cartonado, fosse aplicada apenas uma, ver-se-ia uma diminuição da redução sonora para 52 dB e a piora do isolamento nas baixas frequências. Ainda, ao considerar-se a dispensa da camada de serviço mantendo-se as duas camadas de gesso cartonado de acabamento, viu-se um aumento da redução sonora em 1 dB (56 dB). Este fato pode ser justificado pela menor rigidez das placas de gesso cartonado quando apoiadas sobre a lã de rocha em comparação com o caso em que são apoiadas diretamente sobre o OSB, permitindo maior oscilação deste pano de parede e, conseqüentemente, a propagação das ondas sonoras através dos seus componentes. Caso se dispense a camada de serviço e faça-se o acabamento com apenas uma camada de gesso cartonado, o índice de redução sonora seria de 52 dB. Independente das variações impostas para fins de simulação, em todos os casos, a parede de fachada cumpre os requisitos aos quais está sujeita, pois, mesmo sem qualquer revestimento interno ou camada extra de material absorvente, seu miolo estrutural (*timber-frame* com cavidade preenchida com lã de rocha e material resiliente entre os montantes e OSB) atinge redução sonora de 46 dB.

Ambas as paredes interiores, estrutural e não-estrutural em *timber-frame* (Par_Int_Est_TF e Par_Int_Nest_TF), apresentaram índice de redução sonora de 63 dB, pelo que a diferença de espessuras do *timber-frame* e, conseqüentemente, do material absorvente no interior das cavidades (140 mm e 90 mm, respetivamente) não teve influência significativa na previsão de suas performances. Quando retiradas as duas camadas de serviço, o isolamento sonoro de ambas soluções cai para 60 dB.

Os resultados obtidos para as diversas simulações desenvolvidas para as paredes de fachada e paredes internas estrutural e não-estrutural mostram que a maior contribuição para o isolamento sonoro advém do acabamento em placas de gesso cartonado duplas, bem como suas condições de apoio no pano adjacente, e do desligamento entre os elementos rígidos dos painéis.

Através da análise da configuração de parede dupla (Par_Int_Dupla_TF), que apresentou isolamento sonoro de 77 dB, pôde-se quantificar a contribuição das camadas de membrana acústica. Uma vez retiradas, a Par_Int_Dupla_TF atingiu redução sonora de 76 dB, um resultado muito próximo da configuração original que, por ser tão robusta e largamente aprovada quando sujeita aos limites mínimos

regulamentares, torna questionável a necessidade do uso das membranas acústicas na promoção do conforto acústico. Uma configuração menos robusta desta solução de parede, dispensando as camadas de serviço, apresentou previsão do isolamento acústico de 74 dB. Importa referir que os gráficos de saída da análise das paredes duplas apresentaram diferenças significativas entre as curvas do isolamento previsto e as curvas de referência.

O mesmo foi observado para as paredes do núcleo, Par_Nuc_CLT e Par_Nuc_CLT_TF, que apresentaram uma diminuição de 1 dB e 0 dB com relação à configuração original a partir da retirada da membrana acústica. Apesar da baixa contribuição para o isolamento acústico para a frequência de 500 Hz, notou-se a melhora do comportamento dos painéis com utilização da membrana acústica para os sons de baixa frequência (125 Hz). No entanto, importa referir que os resultados de baixa frequência estão associados a dificuldades de medição, tornando esses resultados mais incertos.

Ainda referente aos painéis de parede do núcleo, quando se simulou a dispensa das camadas de gesso cartonado para exposição estética do CLT, o índice redução sonora diminuiu de 63 dB para 57 dB nas Par_Nuc_CLT e de 65 dB para 62 dB nas Par_Nuc_CLT_TF. Associando a retirada das camadas de gesso cartonado na face do CLT com a retirada da camada de serviço, observa-se alguma alteração apenas na Par_Nuc_CLT, que reduz seu isolamento sonoro para 54 dB e piora significativamente o nível de isolamento para a gama das baixas frequências (mais evidente devido à retirada da camada de serviço). A Par_Nuc_CLT_TF, por já apresentar material absorvente no interior da cavidade do *timber-frame*, não apresentou qualquer alteração com a retirada da camada de serviço, mantendo o isolamento sonoro de 62 dB e, em todas as suas configurações (original e alternativas), apresentou índices de isolamentos nas baixas frequências superiores e mais estáveis que os resultados apresentados pela Par_Nuc_CLT.

Em termos do isolamento a sons aéreos do Pav_Int_CLT, o elemento cumpre o requisito acústico para emissão proveniente de zonas comerciais sem qualquer margem de segurança quando se aplica o fator I. Sabendo-se que a previsão do isolamento acústico se baseia numa análise delicada que frequentemente pode levar a equívocos quando comparada com o isolamento acústico real do elemento, faz-se necessário estudos adicionais para determinar de forma rigorosa o desempenho deste elemento para garantir o comportamento mínimo requerido. Entretanto, na Seção 4.4.7 foram discutidas variações na configuração original que podem aumentar seu desempenho acústico: o aumento da cavidade do soalho flutuante para 100 mm e a adesão a membranas acústicas contínuas sobre o CLT, ambos motivados pela passagem de instalações. Para a aplicação isolada ou associada de ambas estratégias, obteve-se o mesmo aumento da redução sonora para 62 dB. Importa referir que esta análise considerou

espaçamentos entre ripas e suspensores do teto falso acústico de 300 mm, pelo que para qualquer espaçamento superior, o isolamento acústico será favorecido. Ainda, assim como observado para as paredes quando simulada a omissão das camadas de serviço e, essencialmente, de seu material absorvente interior, para o Pav_Int_CLT notou-se que a adoção de uma ou duas camadas de material absorvente no interior do teto acústico não surtiu variações no isolamento acústico. No entanto, notou-se uma contribuição expressiva do teto falso acústico no isolamento aos sons de baixa frequência, principalmente quando em associação ao aumento da cavidade do soalho flutuante para 100 mm. Quando utilizada sobre garagens, cujo requisito é inferior, pode-se considerar a troca do teto falso acústico por camada de lã de rocha de 60 mm sob o CLT, resultando num isolamento acústico de 55 dB. Esta configuração pode ser igualmente incrementada a partir da utilização da membrana acústica e aumento da cavidade do soalho flutuante, resultando num isolamento acústico de 56 dB, apesar dessa medida não ser necessária.

Em termos de isolamento dos sons de percussão, o Pav_Int_CLT (Figura 4.22) tem comportamento satisfatório quando este provém dos impactos produzidos no interior de um fogo ou áreas de circulação comum do edifício (Figura 4.51).

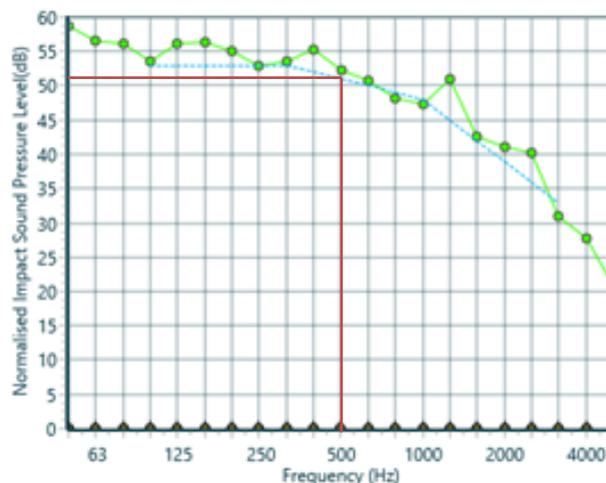


Figura 4.51 – Exemplo de curva do isolamento sonoro a sons de percussão previsto (em verde) e da curva de referência (em azul) – Pav_Int_CLT. Gráfico dos restantes elementos construtivos no Anexo 2

O cumprimento dos requisitos mantém-se mesmo quando o teto falso acústico é substituído pela opção mais esbelta para o elemento, em que uma camada de 60 mm de lã de rocha é alocada sob o CLT e fechada com o gesso cartonado duplo, com isolamento sonoro a sons de percussão de 56 dB. O mesmo não foi observado quando a emissão é advinda de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão. Contudo, este trabalho volta-se essencialmente para a análise do sistema construtivo desenvolvido quando aplicado em edifícios multifamiliares, pelo que o requisito mais rigoroso ($L'_{n,w} \leq 50$ dB) não se aplica. A avaliação do sistema construtivo para os demais usos dos edifícios será

objeto de estudos futuros. No entanto, procurando identificar o potencial da solução também para estes casos, simulou-se a aplicação de suspensores do teto falso acústico e sistemas de amortecimento para o soalho flutuante mais eficientes do que os inicialmente apreciados neste estudo, com potencial para atingir cerca de 45 dB de isolamento sonoro a sons de percussão.

Ainda, supondo que a cobertura ligeiramente inclinada visitável seja uma área de circulação comum dos usuários do edifício, simulou-se seu desempenho frente aos sons de percussão. Apesar da configuração original da Cob_CLT não satisfazer aos requisitos impostos a este caso, ao utilizar-se material resiliente sob as ripas do deck e suspensores acústicos para o teto falso de 60 mm, atinge-se isolamento sonoro suficiente, igual a 57 dB.

Todos os resultados apresentados são uma previsão baseada em considerações acerca dos elementos construtivos, pelo que são necessários estudos futuros baseados preferencialmente em ensaios de laboratório em protótipos e medições *in situ* para determinar o desempenho acústico dos elementos construtivos elaborados com maior fiabilidade.

4.7. Análise de segurança ao fogo

Os elementos estruturais de edifícios de utilização-tipo I e 2ª categoria de risco, como é o caso dos edifícios tratados no desenvolvimento do sistema construtivo, devem possuir uma resistência ao fogo que garanta as suas funções de suporte de cargas, de isolamento térmico e de estanquidade durante todas as fases de combate ao incêndio, apresentando a resistência ao fogo padrão mínima de R 60 ou REI 60.

Os diversos pisos dos edifícios devem constituir compartimentos corta-fogo diferentes e serem isolados por elementos de construção (Pav_Int_CLT) com resistência mínima de EI 30 ou REI 30, sem prejuízo às condições e exigências de resistência ao fogo mais gravosas.

As paredes externas (Par_Ext_TF), de fachada ou empena, devem satisfazer à resistência ao fogo de, no mínimo, EI 60 para as condições de contorno impostas aos edifícios em utilização do sistema construtivo. Aquelas em confronto com outros edifícios devem garantir classe de resistência ao fogo padrão EI 60 ou REI 60.

Os elementos da cobertura ligeiramente inclinada (Cob_CLT) devem garantir, no mínimo, uma classe de resistência ao fogo padrão REI e os elementos estruturais da cobertura inclinada (Cob_TAH) para edifícios de média altura bastam ser em madeira.

Apesar de os edifícios e recintos de utilização mista não serem abordados neste documento, enquadrando-se em estudos futuros, argumenta-se a possibilidade dos edifícios de uso maioritariamente

habitacional dedicarem a zona do rés do chão a atividades de comércio (utilização-tipo: VIII; categoria de risco: 1º; local de risco A) ou restauração (utilização-tipo: VII; categoria de risco: 1º; local de risco C). Nesse caso, os elementos são classificados na categoria de risco mais elevada das respetivas utilizações-tipo, independentemente da área ocupada por cada uma dessas utilizações.

Para efeitos de isolamento e proteção, os espaços ocupados por diferentes utilizações-tipo devem ser separados por paredes e pavimentos cuja resistência ao fogo padrão seja igual ou superior a EI 60 para as paredes não resistentes ou REI 60 para os pavimentos e paredes resistentes. Embora podendo coexistir no mesmo edifício, não são permitidas comunicações interiores comuns da utilização-tipo I da 2ª categoria de risco com utilizações-tipo VII de qualquer categoria de risco.

O requisitos impostos às vias de evacuação horizontais dependem de suas características arquitetónicas (dimensões e localização no edifício) e as vias de evacuação verticais (Par_Nuc_CLT e Par_Nuc_CLT_TF) devem seguir os mesmos limites mínimos exigidos para os restantes elementos estruturais do edifício, ou seja, R 60 ou REI 60. Já as circulações verticais interiores que não constituem vias de evacuação devem ser separadas dos restantes espaços por paredes de classe de resistência ao fogo mínima igual a EI 30 para paredes não-resistentes e REI 30 para paredes resistentes. A proteção ao fogo das caixas de elevadores deve cumprir os mesmos requisitos expostos para as vias de circulação vertical.

A característica comum a todos os painéis de parede e teto – o revestimento duplo em placas de gesso cartonado que reveste totalmente a estrutura em madeira – é a principal responsável para a garantia do cumprimento dos requisitos de resistência ao fogo impostos pela regulamentação portuguesa (Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro, e Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro). De maneira a garantir a proteção ao fogo dos diversos elementos, principalmente os de função estrutural, escolheu-se configurações de revestimento em gesso cartonado que garantissem o mínimo de 60 minutos de resistência ao fogo. Logo, para as paredes de fachada e tetos, adotou-se as duas camadas de 15 mm cada e, para as paredes internas que beneficiam do revestimento em gesso cartonado nas duas faces, foi possível adotar duas placas de 13 mm de cada lado. Ambas configurações conferem resistência ao fogo EI 60.

Relativamente à reação ao fogo, o revestimento das paredes e tetos em gesso cartonado com classificação de reação ao fogo A1 garante a proteção de câmaras corta-fogo, vias de evacuação e dos locais de risco.

Quando optar-se pela exposição do CLT, que apresenta reação ao fogo classe D-s2 d0 para paredes e tetos e D_{FL}-s1 quando usado em acabamento visível nos pisos, cumpre-se o requisito estabelecido para os revestimentos dos locais de risco A (paredes e tetos: D-s2 d2; pavimentos: E_{FL}-s2), independente da

utilização tipo considerada, ou nos espaços interiores de cada fogo, entretanto, deve ser tratado para atender aos requisitos impostos aos revestimentos das vias de evacuação verticais (paredes e tetos: A2-s1 d0; pavimentos: C_{FL}-s1), horizontais (paredes e tetos: C-s2 d0; pavimentos: C_{FL}-s2) e de câmaras corta-fogo (paredes e tetos: A2-s1 d0; pavimentos: C_{FL}-s1). O mesmo ocorre para o revestimento de piso em madeira de pinho, que apresentam reação ao fogo classe D.

Nos tetos falsos, os materiais constituintes – lâ de rocha e suspensores – apresentam reação ao fogo classe A1, cumprindo com os requisitos mínimos estabelecidos para este elemento construtivo (isolamento térmico ou acústico: C-s2 d0; fixadores e suspensores: A1).

Como é requerida, para os elementos de revestimento exterior da fachada com caixa de ar, que a reação ao fogo para edifícios de média altura seja, no mínimo, B-s2 d0, então a madeira escolhida para a fachada (*Lunawood Exterior Claddings - UTV LunaThermo-D*), que apresenta originalmente reação ao fogo D-s1 d0, deverá ser tratada com produtos de proteção ao fogo ideais para a madeira, assim como sua estrutura de suporte em ripado horizontal e sub-ripado vertical. A membrana respirável que também confina o espaço de ar ventilado deve igualmente cumprir a esse requisito e, por isso, a escolha do produto baseou-se não apenas nas especificações desejadas em termos de controle de humidade, mas também na reação ao fogo classificada em B-s1 d0.

Quanto às opções de cobertura, exige-se que a solução ligeiramente inclinada (Cob_CLT) para edifícios de média elevação apresente revestimento com classe de reação ao fogo E_{FL}, o que é atendido tanto pelo revestimento em membrana betuminosa com ardósia *Bytum Slate 3500* (E_{FL}) como pela opção de revestimento em deck de madeira *Lunawood* (D-s1 d0). Já a solução inclinada (Cob_TAH) requer que o material de revestimento tenha, no mínimo, classe de reação ao fogo C-s2 d0, o que é cumprido pelas telhas cerâmicas adotadas.

CAPÍTULO 5

CASO DE ESTUDO

Este capítulo destina-se ao pré-dimensionamento de um edifício multifamiliar utilizando o sistema construtivo desenvolvido nos capítulos anteriores. O projeto do edifício em análise foi cedido pela empresa PORTILAME - Engenharia e Madeira, Lda. como parte da colaboração entre a empresa e a Universidade para o desenvolvimento do sistema construtivo. Objetiva-se, portanto, a validação estrutural do referido sistema para um edifício real e que se enquadra nas premissas da dissertação que visa a aplicação do sistema.

5.1. Descrição do edifício

O objeto de estudo é um edifício de utilização mista com 4 pisos, localizado na Rua Azevedo Coutinho em Fão, Esposende. Trata-se de um projeto de reabilitação que prevê uma zona comercial/restauração para o rés do chão e destina os restantes 3 pisos à habitação, perfazendo uma fração T1, uma fração T2, duas frações T2 Duplex e duas frações T3 Duplex.

Originalmente, o projeto assume estrutura em betão para o rés do chão (parcialmente abaixo do nível do solo) e estrutura em madeira para os restantes pisos. No entanto, visando validar uma estrutura em altura inteiramente concebida em madeira, considera-se que todos os pisos são elaborados em estrutura de madeira a partir do nível do solo, apoiada sobre uma subestrutura de fundações em betão armado. Ainda, inicialmente definiu-se que os dois primeiros pisos seriam revestidos com sistema ETICS, mas abandonou-se esta ideia para que o sistema pudesse ser aplicado sem que fossem necessárias maiores adaptações.

No Anexo 3, são encontrados os alçados Norte e Poente, as plantas dos pisos do edifício e os cortes transversal e longitudinal.

5.2. Aplicação do sistema construtivo e considerações gerais

As configurações identificadas na Tabela 5.1 foram as escolhidas para aplicação no edifício em estudo. A determinação destas configurações deu-se quer por razões estruturais e funcionais, quer pelas limitações arquitetónicas impostas.

Tabela 5.1 – Configurações aplicadas ao caso de estudo

Elemento	Configuração	Observações
Paredes de fachada	Par_Ext_TF	Com camada de serviço
Paredes do núcleo	Par_Nuc_CLT_TF	Com camada de serviço; Sem revestimento na superfície do CLT
Paredes internas	<i>Kits</i> comercializados de gesso cartonado e montantes metálicos	-
Piso rés do chão	Pav_RC	Acabamento cerâmico
Pisos entre habitações	Pav_Int_CLT	Sem teto falso acústico; Com cavidade de 100 mm para o soalho flutuante
Pisos entre habitações e a zona comercial	Pav_Int_CLT	Com teto falso acústico; Com cavidade de 30 mm ou 100 mm para o soalho flutuante
Cobertura	Cob_TAH	Sem gesso cartonado pelo interior
Varanda	Pav_Int_CLT	Com membrana que desempenhe função acústica a sons de percussão e de barreira para-vapor e sistema de deck

As paredes de fachada e de núcleo são as responsáveis por resistir às cargas verticais impostas pelos elementos de piso e cobertura. Assim, uma vez que as paredes internas não desempenham função estrutural, adotou-se paredes em *kits* comercializados de placas de gesso cartonado suportadas apenas por montantes metálicos e totalmente preenchidas com lã de rocha para atender às espessuras identificadas no projeto arquitetónico (100 mm) e critérios comerciais da empresa. Como as paredes internas fazem necessariamente a divisão entre compartimentos de um fogo e quartos ou zonas de estar de outro fogo, estas devem apresentar índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea superior a 50 dB. Para tanto, considerando o isolamento acústico (R_w) declarado pelo fornecedor e o fator I (+3 dB), deve-se optar pelo sistema com 122 mm de espessura (70 mm de cavidade e duas camadas de gesso cartonado de 13 mm em cada face), que apresenta R_w igual a 55 dB.

Para as paredes do núcleo, optou-se pela configuração Par_Nuc_CLT_TF especialmente devido ao seu desempenho acústico, uma vez que estas fazem a divisão direta entre a única zona de circulação comum do edifício, supondo trânsito frequente de pessoas, e os compartimentos privativos. Isso implica em ajustes arquitetónicos mínimos para que o projeto suporte uma espessura de parede do núcleo superior à preconizada em projeto. Na face voltada para a caixa de escadas, o valor estético do CLT é explorado, deixando-o exposto. Como trata-se de uma via de evacuação vertical, deve-se cumprir os mesmos limites

mínimos exigidos para os restantes elementos estruturais do edifício, ou seja, R 60 ou REI 60. A verificação do painel CLT quanto à resistência ao fogo será abordada na Seção 5.3.4.

Ademais, visando explorar o valor estético das vigas de madeira da cobertura, bem como o acabamento em friso de abeto dos painéis TAH, optou-se por não protegê-las ao fogo através de placas de gesso cartonado. Apesar de que, para elementos estruturais de cobertura inclinada em edifícios de média altura, seja suficiente que sejam elaborados em madeira para garantia do cumprimento aos requisitos de resistência ao fogo, estes elementos são igualmente verificados na Seção 5.3.4.

De maneira a cumprir com as espessuras previstas no projeto arquitetónico para os elementos de piso e evitar reduções ao pé direito, optou-se pela configuração Pav_Int_CLT sem o teto falso acústico para os pisos entre habitações. As tubagens são dispostas na cavidade do soalho flutuante, com 100 mm de espessura. Entretanto, para o piso entre habitações e a instalação comercial no rés do chão, faz-se necessário o uso do teto falso acústico de maneira a cumprir os requisitos desta matéria ($D_{nt,w} \geq 58$ dB). Estes elementos exigem especial atenção ao cumprimento dos requisitos de resistência ao fogo, pois, para além de atuarem na compartimentação corta-fogo dos diversos pisos, fazem a separação dos espaços ocupados por diferentes utilizações-tipo, devendo atingir, no mínimo, REI 60 (Seção 4.7).

A varanda do edifício, localizada sobre o terceiro piso, requer que a membrana acústica utilizada para a separação dos elementos rígidos também desempenhe função para-vapor.

Em termos dos requisitos térmicos, os parâmetros climáticos pertinentes à estação de aquecimento para a localidade do edifício indicam que ele está compreendido na zona climática I1 (Anexo 4). Logo, considerando que se impõem os requisitos térmicos nacionais mais brandos já verificados na Seção 4.6.1, que a envolvente interior do edifício em contato com o espaço não-útil (caixa de escadas) tem requisitos de interior ($B_{zu} = 0,4$; Anexo 4) e que, para os elementos em painéis CLT, é provável que se utilize espessuras superiores àquelas assumidas no desenvolvimento da análise térmica do sistema, conclui-se que, para este edifício, os coeficientes de transmissão térmica dos elementos cumprem os requisitos regulamentares com uma margem considerável.

5.3. Modelação do edifício

5.3.1. Definições estruturais

A modelação do edifício em estudo (Figura 5.1) foi desenvolvida no *software* RFEM (Dlubal Software, 2021) visando a compreensão seu comportamento estrutural global.

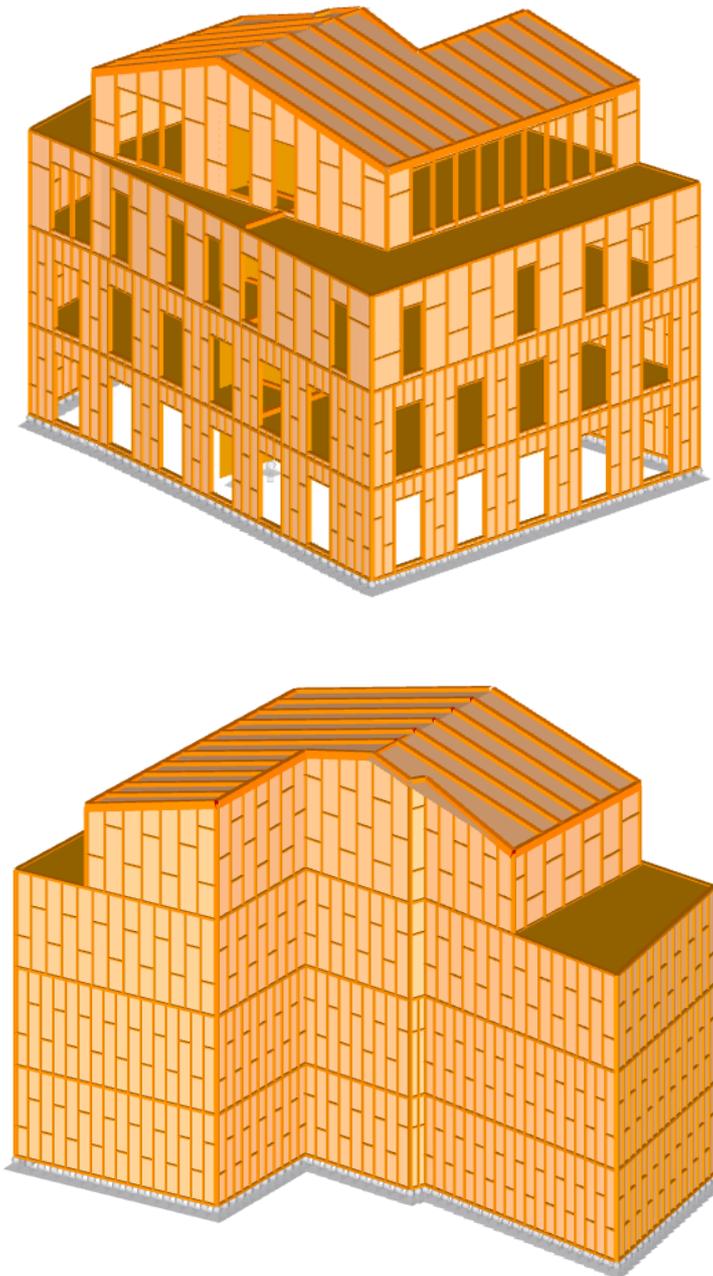


Figura 5.1 – Modelo tridimensional do edifício em estudo

Dado que o edifício apresenta quatro pisos e o sistema construtivo é suposto resistir até cinco pisos com espaçamentos entre montantes de seção $40 \times 140 \text{ mm}^2$ variando entre cerca de 300 mm e 600 mm, inicialmente adotou-se os seguintes espaçamentos médios entre montantes (Tabela 5.2, Figura 5.2).

Tabela 5.2 – Espaçamento entre montantes para os diversos pisos do edifício

Piso	Espaçamento médio entre montantes (mm)
1º	400
2º	400
3º	500
4º	600

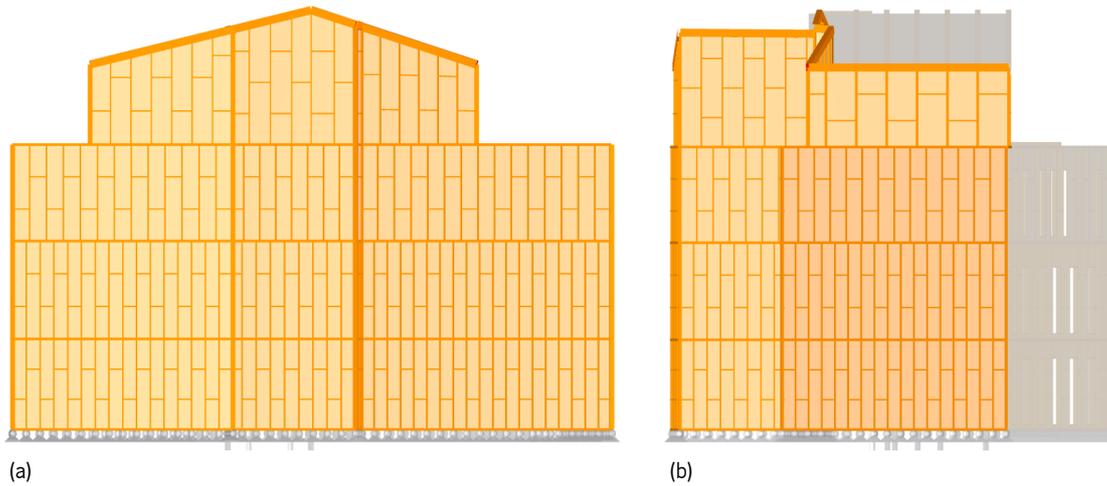


Figura 5.2 – Alçados. (a) Oeste; (b) Sul

Nos dois últimos pisos, entretanto, a existência de palas arquitetônicas na fachada e o elevado número de aberturas levou à decisão de adotar espaçamentos maiores entre montantes nas paredes que contém aberturas. Assim, optou-se por utilizar montantes duplos (80 x 140 mm²) espaçados de cerca de 900 mm, a condizer com as laterais das aberturas e as palas verticais (Figura 5.3).

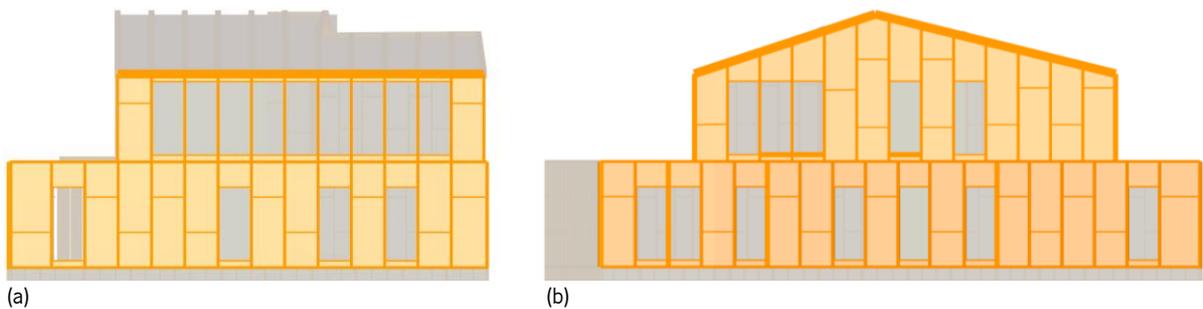


Figura 5.3 – Paredes dos pisos 3 e 4. (a) Norte; (b) Leste

Considerando que as placas OSB de fecho dos painéis em *timber-frame* têm 1250 mm de largura, pode-se representar uma prumada da fachada Norte e uma prumada da fachada Oeste como mostra a Figura 5.4.

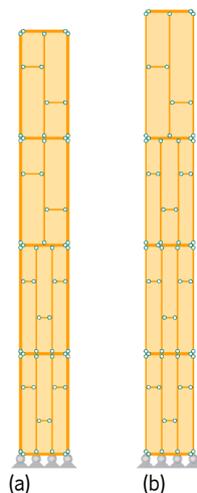


Figura 5.4 – Prumadas das fachadas do edifício para uma largura de placa OSB de fecho dos painéis (a) Norte; (b) Oeste

O núcleo do edifício, que contém a caixa de escadas, é representado na Figura 5.5 abaixo.

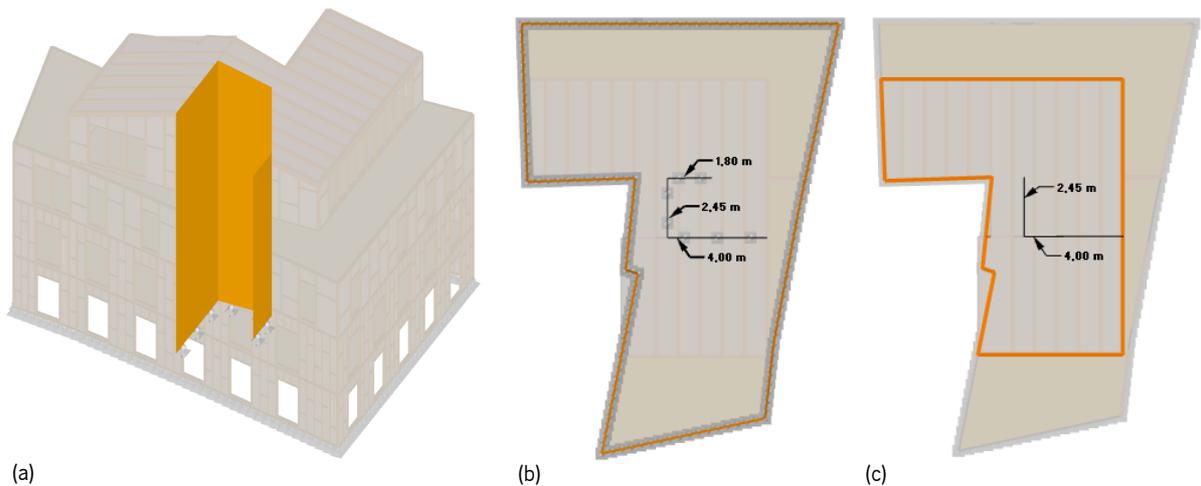


Figura 5.5 – Núcleo do edifício: Caixa de escadas. (a) 3D; (b) Localização em planta nos pisos 1, 2 e 3; (c) Localização em planta no piso 4

Além de resistir às cargas laterais, a parede mais extensa do núcleo, contínua entre todos os pisos do edifício, também é responsável por suportar a cumeeira da cobertura de duas vertentes, pelo que as vigas de cobertura se apoiam sobre ela e uma das paredes de fachada (Norte ou Sul) (Figura 5.6).

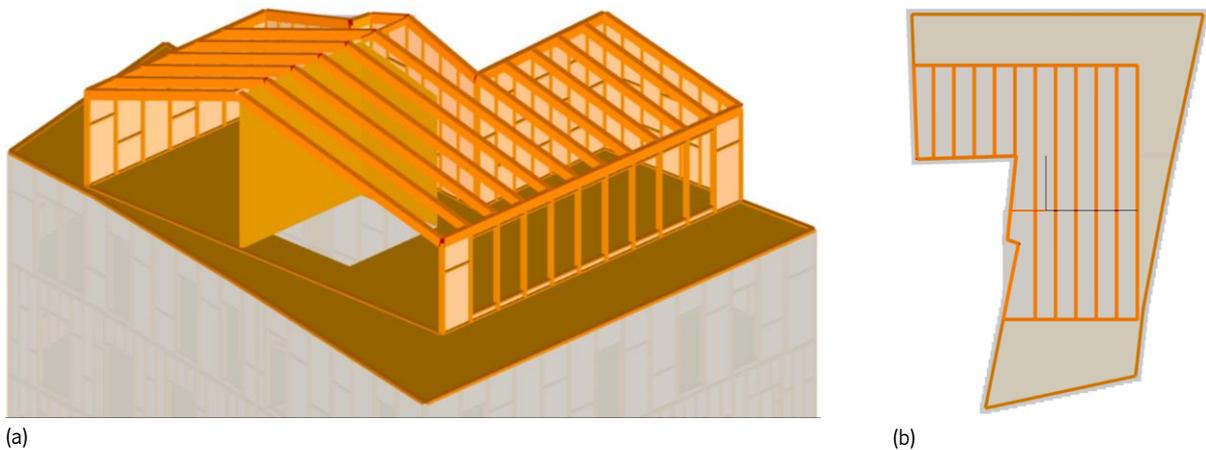


Figura 5.6 – Parede de núcleo suportando as vigas de cobertura. (a) 3D; (b) Planta da cobertura

Os pisos do edifício, materializados por painéis CLT, apresentam zonas com orientações distintas, de maneira a vencer os menores vãos possíveis. Na parte frontal do edifício, os painéis CLT são orientados conforme a Figura 5.7b e apoiam-se, em uma das extremidades, sobre as paredes da fachada norte. Na outra extremidade, podem ligar-se lateralmente aos painéis contínuos do núcleo ou a vigas adicionais que cobrem os vãos entre a parede de núcleo e as fachadas laterais (Figura 5.8). Já na parte posterior do edifício, os painéis CLT são orientados conforme a Figura 5.7c e apoiam-se, maioritariamente, sobre as paredes de fachada Leste e Oeste.

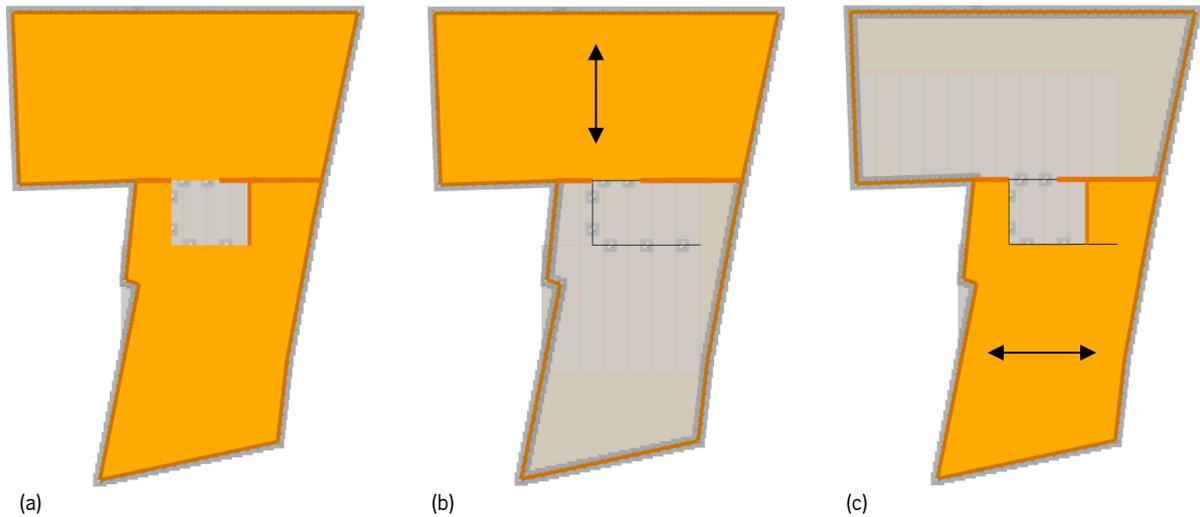


Figura 5.7 – Orientação dos painéis CLT de piso. (a) Pavimento completo; (b) Orientação dos painéis da zona frontal do edifício; (c) Orientação dos painéis da zona posterior do edifício

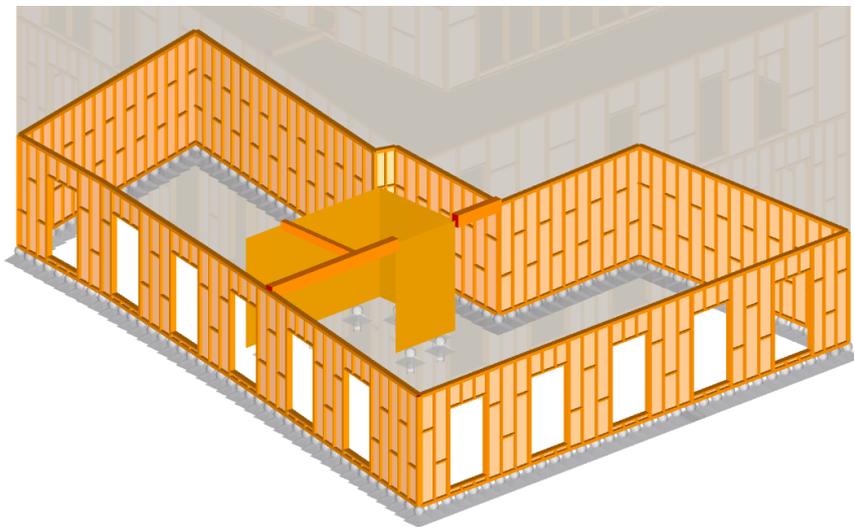


Figura 5.8 – Esquema estrutural para apoio dos painéis CLT de piso

5.3.2. Materiais e seções

Os materiais e seções empregues, para além dos espaçamentos entre montantes, foram estimados e serão verificados na Seção 5.3.4 deste documento. A Tabela 5.3 abaixo apresenta os materiais e seções aplicados ao modelo.

Tabela 5.3 – Materiais e seções aplicados aos diferentes componentes estruturais do edifício

Material	Seções (mm)	Aplicação
Pinho bravo – classe C18	40 x 140	Montantes e barras de travamento
	80 x 140	Montantes duplos e banzos
OSB	30 mm	Placas de fecho
CLT (abeto – classe C24)	100 (20-20-20-20-20)	Paredes do núcleo
	180 (40-30-40-30-40)	Pisos
Glulam (abeto – GL24h)	150 x 200	Viga de continuação da cumeeira ¹ Viga de fecho da caixa de escadas ²
	160 x 240	Vigas da cobertura ³
	200 x 300	Vigas para apoio do piso ⁴

^{1,4} Identificação das vigas na Figura 5.9.

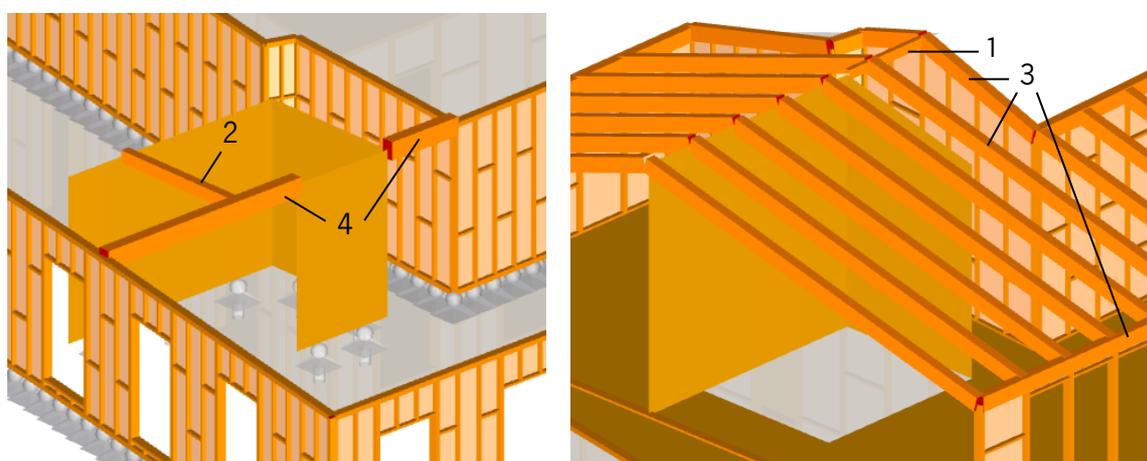


Figura 5.9 – Identificação das variadas seções de viga Glulam GL24h

As propriedades e características específicas a cada material e seção são detalhadas no Anexo 5 deste documento.

5.3.3. Cargas aplicadas

Foram aplicadas ao modelo cargas permanentes, sobrecargas e cargas de vento em x e y segundo uma distribuição uniforme.

No que concerne às cargas permanentes, considerou-se o peso próprio dos elementos modelados, bem como seus enchimentos e revestimentos. Tendo em conta as espessuras, seções e densidade de cada material, obtiveram-se os carregamentos apresentados na Tabela 5.4 para cada elemento. As densidades consideradas para cada componente são aquelas apresentadas nas Tabelas 4.1 – 4.16 do capítulo anterior, complementadas pelas apresentadas na Tabela 5.5, compatíveis com os valores declarados pelos fornecedores da empresa PORTILAME. Os cálculos detalhados para determinação das cargas permanentes são expostos no Anexo 6.

Tabela 5.4 – Cargas permanentes

Elemento	Cargas permanentes			
	Peso próprio da estrutura, enchimentos e revestimentos			
	Piso 0 ¹	Piso 1 ²	Piso 2 ³	Piso 3 ⁴
Par_Ext_TF (kN/m)	2,21	2,38	2,30	2,62
Paredes internas (kN/m)	1,31	1,42	1,40	-
Par_Nuc_CLT_TF (kN/m)	3,23	3,49	3,44	4,78
Pav_Int_CLT (kN/m ²)	1,58			
Cob_TAH (kN/m ²)	0,98			

¹ Pé direito igual a 2,69 m; Espaçamento entre montantes com cerca de 400 mm.

² Pé direito igual a 2,91 m; Espaçamento entre montantes com cerca de 400 mm.

³ Pé direito igual a 2,87 m; Espaçamento entre montantes com cerca de 500 mm.

⁴ Pé direito médio de 3,50 m; Espaçamento entre montantes com cerca de 600 mm.

Tabela 5.5 – Densidades consideradas para os elementos de madeira

Material		Densidade (kg/m ³)
Madeira	<i>Pinus pinaster</i>	540
	<i>Picea abies</i>	500
Placa OSB		640

Segundo o Eurocódigo 1 (EN 1991-1-1 (CEN, 2002)), desde que o pavimento apresente uma constituição que permita a distribuição eficaz das cargas aplicadas sobre ele, como é o caso dos painéis CLT de piso adotados, o peso próprio referente às paredes internas, que configuram divisórias amovíveis, pode ser considerado como uma carga uniformemente distribuída a ser adicionada às sobrecargas aplicadas ao pavimento. Sendo assim, uma vez que o peso próprio das paredes internas para os diversos pisos do edifício está contida no intervalo entre 1,0 kN/m e 2,0 kN/m, aplica-se uma sobrecarga $q_k = 0,8 \text{ kN/m}^2$ sobre os pisos 1 e 2 para este propósito.

Como trata-se de um edifício destinado às atividades domésticas e habitacionais nos pisos 1, 2 e 3, aplica-se uma sobrecarga $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ pertinente à esta utilização específica. Nas zonas de varanda, esse valor é aumentado para $q_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$. A sobrecarga das escadas, suportada principalmente pelas três paredes do núcleo dos pisos 0, 1 e 2, é considerada igual a $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$ e aplicada nos seus comprimentos a depender da área de influência de cada uma delas. Para a cobertura, considerou-se uma sobrecarga $q_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$ referente a eventuais operações de manutenção e reparação. A Tabela 5.6 a seguir apresenta o resumo das sobrecargas aplicadas ao modelo do edifício.

Tabela 5.6 – Sobrecargas

Elemento		Sobrecargas			
		Utilização e paredes internas			
		Piso 0	Piso 1	Piso 2	Piso 3
Pav_Int_CLT (kN/m ²)	Paredes internas	-	0,8	0,8	-
	Utilização (Pavimentos/Varanda)	-	2,0	2,0	2,0/2,5
Par_Nuc_CLT_TF (kN/m)	Utilização (Escadas)	1,84-2,98	1,84-2,98	1,84-2,98	-
Cob_TAH	Manutenção	-	-	-	0,4

Para este projeto, considerou-se dois casos de incidência de ventos na estrutura: nas direções x e y, conforme apresenta a Figura 5.10.

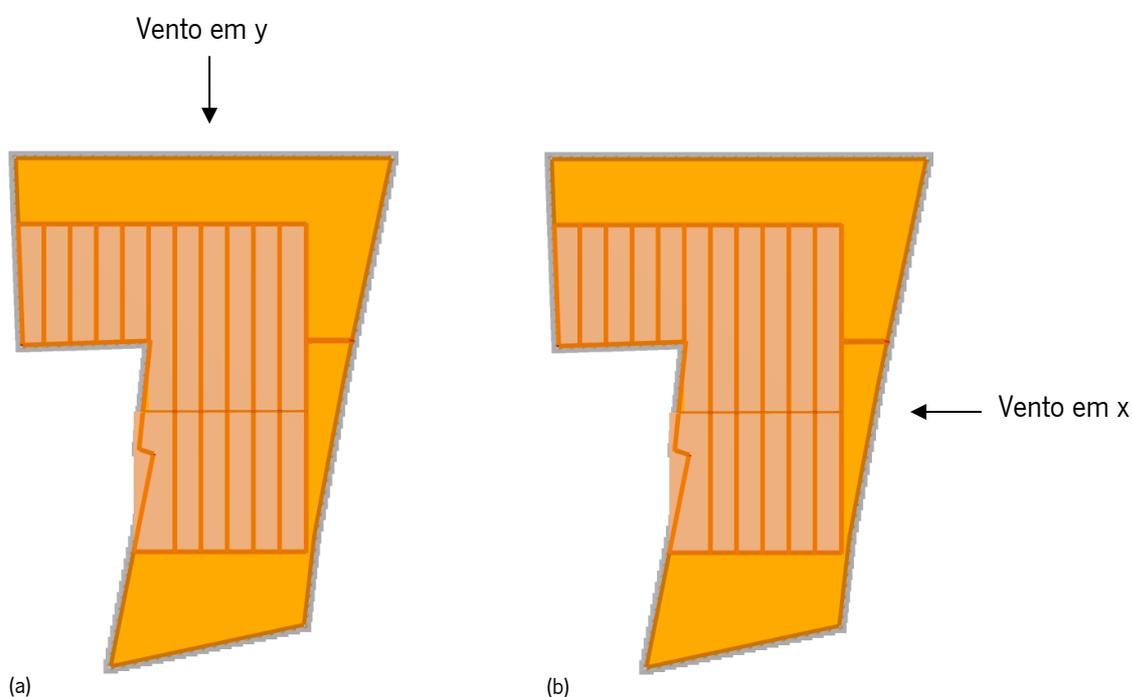


Figura 5.10 – Orientação das ações do vento para as duas situações de projeto. (a) Vento em y; (b) Vento em x

A determinação das ações do vento para as duas situações de projeto dá-se em função das pressões impostas às superfícies do edifício.

Considerando coeficientes de sazão e direção iguais a 1,0 e que o edifício está contido na Zona B (faixa costeira com 5 km de largura; $v_{b,0} = 30$ m/s), tem-se que o valor de referência da velocidade do vento para uma altura de 10 metros acima da superfície de um terreno da categoria II é $v_b = 30$ m/s.

Assim, a pressão dinâmica de referência (q_b) é igual a 562,5 Pa. Assumindo que o terreno é plano – com coeficiente de orografia ($c_o(z)$) e coeficiente de turbulência (k_t) iguais a 1,0 –, que enquadra-se na categoria III em termos de rugosidade e que o edifício tem cerca de 12 metros de altura, tem-se coeficiente de exposição $c_e(12) = 1,75$ e pressão dinâmica de pico $q_p(12) = 0,98$ kN/m².

Para a obtenção das pressões exercidas nas superfícies exteriores (w_e) e interiores (w_i), utiliza-se dos coeficientes de pressão para a pressão exterior (c_{pe}) e interior (c_{pi}) apresentados na Tabela 5.7, considerando-se que todas as superfícies carregadas tenham mais de 10 m² (aplica-se coeficientes globais $c_{pe,10}$), que o edifício apresenta planta retangular com rácio entre a altura e comprimento das paredes de contraventamento entre $0,25 < h/d < 1,0$ e que a cobertura contém duas vertentes com inclinação de 10°. Para a cobertura, foram considerados apenas os coeficientes que produzem pressão (vento em y), uma vez que o efeito de sucção alivia os esforços na estrutura. Devido à geometria do edifício, os coeficientes de atrito às superfícies paralelas ao vento foram desconsiderados.

Tabela 5.7 – Coeficientes de pressão c_{pe} e c_{pi}

Elemento	Coeficientes de pressão	Zonas				
		A	B	C	D	E
Par_Ext_TF	$c_{pe,10}$	-1,2	-0,8	-0,5	+0,8	-0,5
	c_{pi}	+0,2	+0,2	+0,2	-0,3	+0,2
		F	G	H	I	J
Cob_TAH	$c_{pe,10}$	+0,1	+0,1	+0,1	-	+0,1

Assim, tendo em conta que a pressão dinâmica de pico $q_p(12)$ é igual a 0,98 kN/m² e que o coeficiente estrutural $c_s c_d$ é igual a 1,0 para edifícios com altura inferior a 15 metros, a força (F_w) exercida pelo vento sobre as diversas superfícies da construção são as seguintes (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Forças de vento F_w

Elemento	Par_Ext_TF					Cob_TAH				
Zonas	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
F_w (kN/m ²)	1,38	0,98	0,67	1,08	0,69	0,098				

Devido à geometria do edifício, as forças aplicadas às paredes de barlavento poderão ser aplicadas uniformemente em toda sua elevação. As zonas D e E referem-se, respetivamente, às paredes de barlavento e sotavento. Já as zonas A, B e C estão contidas nas paredes paralelas ao vento e, neste edifício, foram dispostas conforme mostra a Figura 5.11.

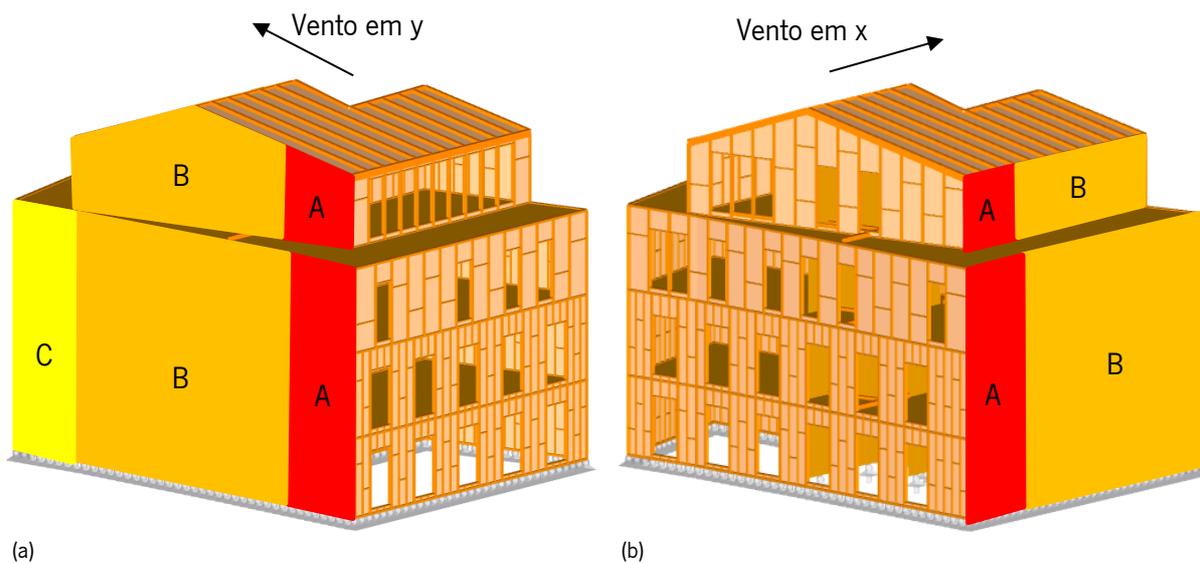


Figura 5.11 – Localização das zonas A, B e C nas paredes paralelas ao vento. (a) Vento em y; (b) Vento em x

Como o edifício encontra-se contíguo em duas de suas fachadas (Sul e Oeste) aos edifícios adjacentes, as cargas referentes à parede de sotavento e às zonas A e B são aplicadas à fachada Sul apenas no piso 3, conforme explicitado na Figura 5.12. Nos restantes pisos, nenhuma carga de vento é aplicada à essas paredes. Por esse mesmo motivo, não foram impostos casos de ação do vento nas direções -x e -y.

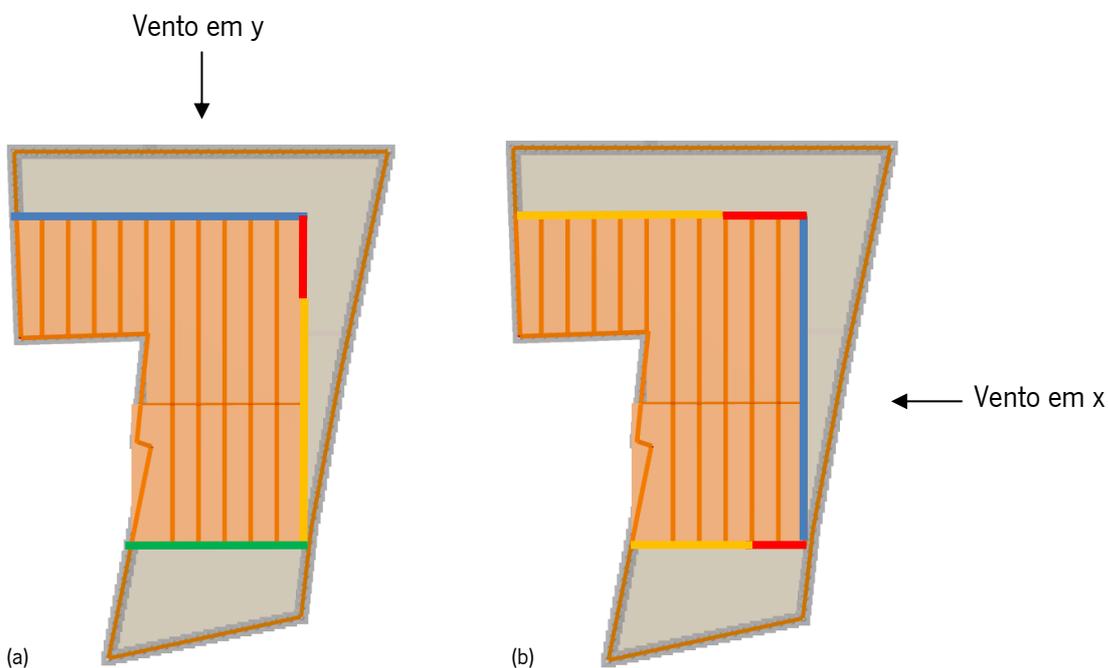


Figura 5.12 – Localização das paredes de barlavento (em azul), sotavento (em verde) e zonas A (em vermelho) e B (em laranja) nas paredes do Piso 3. (a) Vento em y; (b) Vento em x

Como se descartaram os efeitos de sucção para a cobertura e quatro dos cinco coeficientes de pressão positiva são iguais, optou-se por aplicar o mesmo carregamento à toda área de cobertura, independente das zonas pré-definidas.

A Figura 5.13 abaixo apresenta a aplicação dos variados carregamentos no modelo do edifício.

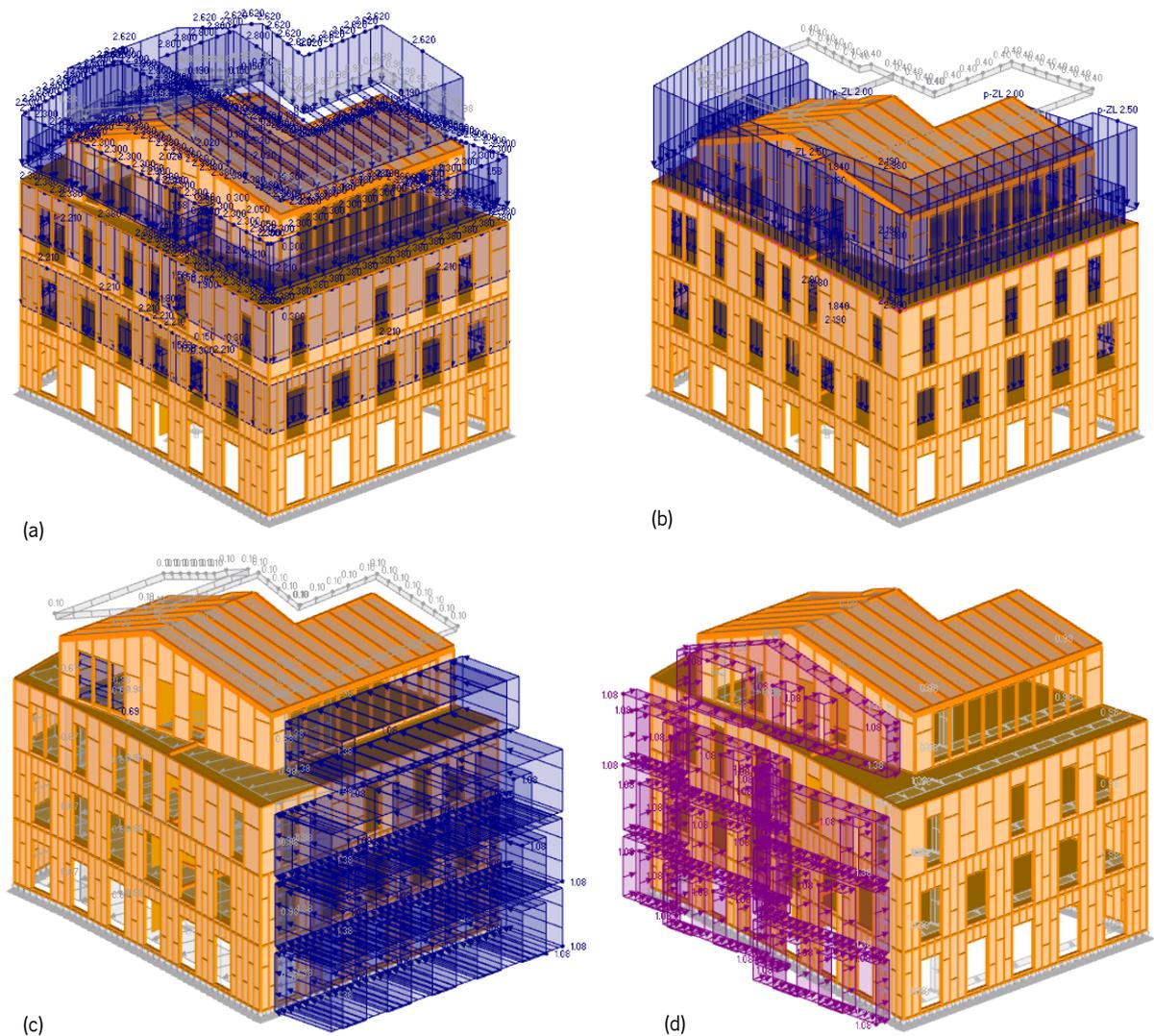


Figura 5.13 – Resumo da aplicação das variadas cargas permanentes, sobrecargas e cargas no modelo do edifício. (a) Permanentes; (b) Sobrecargas; (c) Vento em y; (d) Vento em x

5.3.4. Verificações

A partir da modelação do edifício e dos carregamentos nele aplicados, é possível identificar os esforços atuantes em cada elemento estrutural e assim proceder à verificação dos estados limite últimos, de serviço incluindo a resistência ao fogo.

Os primeiros elementos verificados foram os painéis de piso (Figura 5.14). Para tanto, considerou-se o maior vão a ser vencido pelos painéis CLT numa zona onde aplica-se a maior das sobrecargas previstas. O apoio A refere-se à parede de fachada (espessura de 140 mm) e o apoio B à sapata metálica ligada aos painéis CLT de parede do núcleo (espessura de 100 mm). Os painéis CLT foram limitados às deflexões máximas definidas na Tabela 5.9.

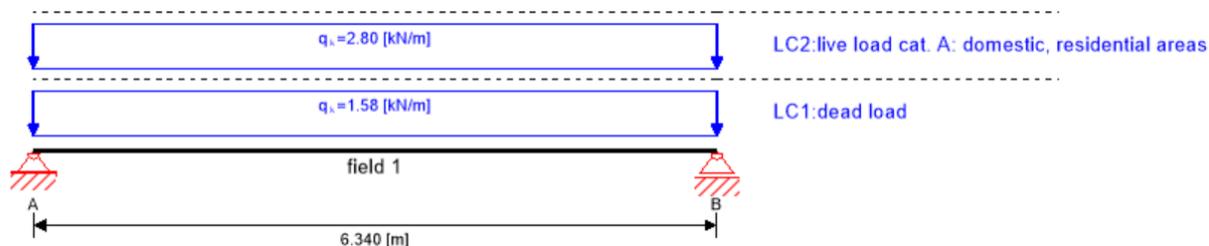


Figura 5.14 – Sistema estrutural para verificação dos painéis CLT de piso

Tabela 5.9 – Limites impostos às flechas dos painéis CLT de piso

Flecha	Limite
W_{inst}	$L/400$
$W_{net,fin}$	$L/300$
W_{fin}	$L/250$

Segundo a análise, os painéis de 5 camadas com espessura de 180 mm obtiveram desempenho satisfatório, governado essencialmente pelo estado limite de serviço quanto à flecha final (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 – Análise quanto à flecha final para os painéis de piso em CLT

Eurocódigo 5	$W_{net,fin}$ (mm)	W_{calc} (mm)	Aproveitamento
Seção 7.2	21,1	20,3	96%

As flechas instantânea e final também apresentaram valores próximos aos limites estabelecidos, com rácios de 82% e 87%, respectivamente. Dentre as análises realizadas para o estado limite último (governado pela combinação $1,35/0,80 \times$ Permanente + $1,50/0,00 \times$ Sobrecargas), o comportamento à flexão apresentou os maiores esforços (Tabela 5.11; Figura 5.15), seguido do comportamento de corte deslizante (Tabela 5.12; Figura 5.16).

Tabela 5.11 – Análise quanto à flexão para os painéis de piso em CLT

Eurocódigo 5	k_m (-)	$M_{y,d}$ (kNm)	$\sigma_{m,y,d}$ (N/mm ²)	$\sigma_{m,z,d}$ (N/mm ²)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$f_{m,y,d}$ (N/mm ²)	$f_{m,z,d}$ (N/mm ²)	Aproveitamento
Seção 6.1.6	1,00	31,82	-7,02	0,00	24,00	16,90	0,00	42%

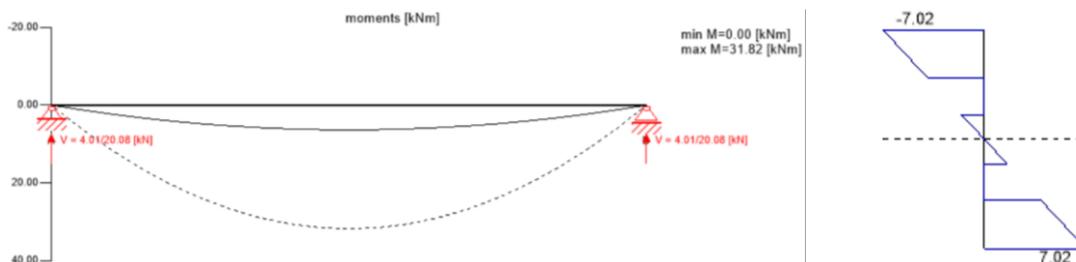


Figura 5.15 – Diagrama de momentos fletores e respetivas tensões normais para os painéis de piso em CLT

Tabela 5.12 – Análise quanto ao corte para os painéis de piso em CLT

Eurocódigo 5	V_d (kN)	$\tau_{r,d}$ (N/mm ²)	$f_{r,k}$ (N/mm ²)	$f_{r,d}$ (N/mm ²)	Aproveitamento
Seção 6.1.7	-20,08	0,14	1,15	0,74	19%

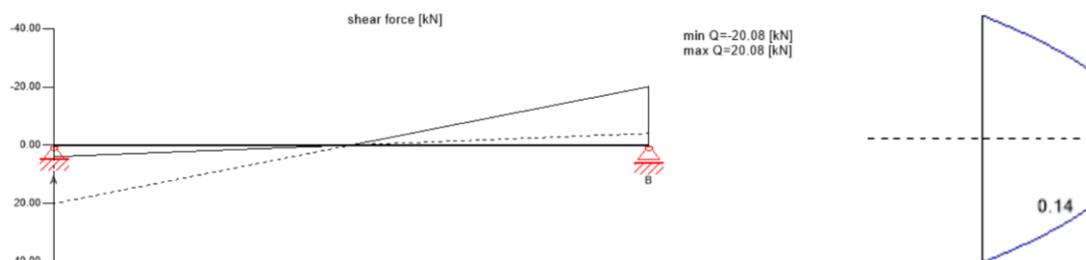


Figura 5.16 – Diagrama de esforço transverso e tensões de corte deslizante para os painéis de piso em CLT

Para a análise de resistência ao fogo, impôs-se a resistência mínima de R60 e considerou-se a proteção promovida pelas duas camadas de placa de gesso cartonado tipo A e pela camada de lã de rocha posicionadas sob o CLT. Combinando-se $1,00/1,00 \times$ Permanente + $1,00/0,00 \times 0,30 \times$ Sobrecarga, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.13.

A Tabela 5.13 resume os aproveitamentos verificados para as combinações de esforços mais gravosas para os painéis de piso. As propriedades resistentes dos materiais e seções considerados, bem como o detalhamento das verificações e gráficos adicionais são apresentados no Anexo 7.

Tabela 5.13 – Resumo dos aproveitamentos obtidos segundo as verificações realizadas para os painéis de piso em CLT

Verificação		Aproveitamento
ELU	Flexão	42%
	Corte	6%
	Corte deslizante	19%
ELS	w_{inst}	82%
	w_{fin}	87%
	$w_{net,fin}$	96%
ELU Fogo	Flexão	9%
	Corte	1%
	Corte deslizante	4%
Apoios	A	5%
	B	6%

Em seguida, foram verificadas as seções das vigas adicionais ao sistema construtivo (Figura 5.9).

As vigas que destinam-se ao apoio do piso e fecho da caixa de escadas, assim como os painéis de piso, foram verificadas para uma resistência ao fogo R60 dispondo da proteção ao fogo oferecida pelo gesso cartonado e lã de rocha. No entanto, aquelas contidas na cobertura foram analisadas sem qualquer proteção, expondo três de suas faces à ação do fogo. Por esse motivo, a seção adotada para a viga de

cumeeira define-se segundo a verificação da flexão no estado limite último quando sob a ação do fogo, de maneira a garantir a camada de sacrifício necessária para manutenção da estrutura íntegra por, pelo menos, 60 minutos (cerca de 49 mm em cada face) (Figura 5.17).

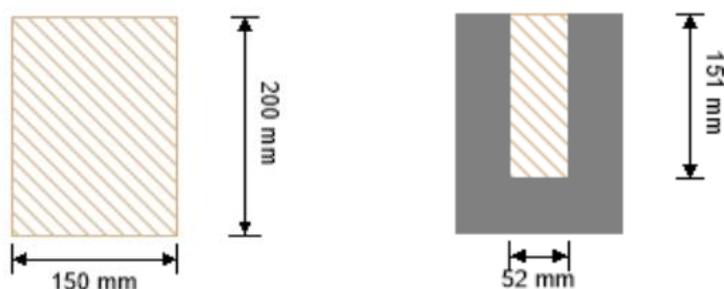


Figura 5.17 – Camada de sacrifício para as vigas de seção 150 x 200 mm²

A verificação determinante para cada viga e seu aproveitamento são mostrados na Tabela 5.14. Os relatórios de verificação completos de cada uma das vigas é apresentado no Anexo 7.

Tabela 5.14 – Verificações determinantes para a variedade de vigas da estrutura

Elemento	Verificação	Aproveitamento
Viga de continuação da cumeeira (150 x 200 mm ²)	ELU Fogo – Flexão	44%
Viga de fecho da caixa de escadas (150 x 200 mm ²)	ELU – Flexão	53%
Vigas da cobertura (160 x 240 mm ²)	ELS – $w_{net,fin}$	97%
Vigas para apoio do piso (200 x 300 mm ²)	ELU – Flexão	89%

Para a verificação dos painéis de parede do núcleo, foram extraídas as forças atuantes em cada uma delas a partir da modelação do edifício. Assim, foram contabilizados os esforços verticais resultantes dos carregamentos permanentes e sobrecargas e a força lateral paralela ao eixo horizontal resistida por cada uma delas nos casos de ação do vento. A Tabela 5.15 apresenta os valores levantados para as paredes identificadas na Figura 5.18. Apesar de contínuos através de todos os pisos do edifício, para esta análise considerou-se um comprimento efetivo de 2,70 metros para os painéis, igual à dimensão do pé direito do Piso 0 (mais sobrecarregado), uma vez que os pavimentos intermediários do edifício atuam como um travamento lateral (Figura 5.18).

Tabela 5.15 – Carregamentos impostos às paredes do núcleo

Elemento	Carregamento			
	Permanentes (kN)	Sobrecargas (kN)	Vento em y (kN/m)	Vento em x (kN/m)
Parede 1 (L = 4,00 m)	145,73	125,45	22,38	19,01
Parede 2 (L = 2,45 m)	97,84	92,52	20,97	20,16
Parede 3 (L = 1,80 m)	94,94	101,55	7,65	6,76

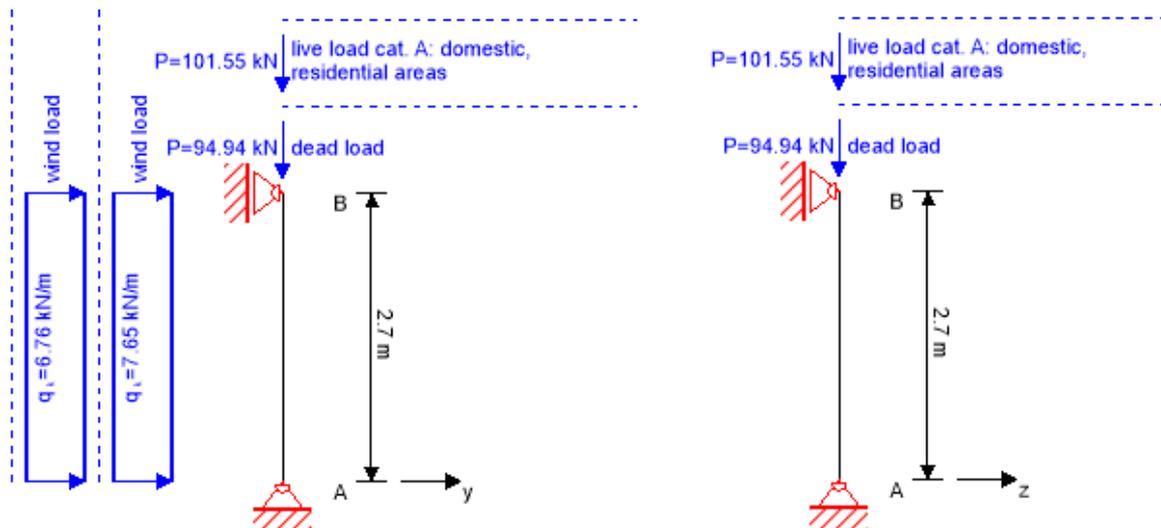


Figura 5.18 – Sistema estrutural para verificação dos painéis CLT de parede do núcleo (Exemplo Parede 3)

Para os painéis em CLT com 5 camadas e 100 mm de espessura (Figura 5.19a), a verificação dos ELU resulta num aproveitamento entre 26% e 41%. No entanto, a escolha desta configuração de painel justifica-se devido à necessária resistência ao fogo. A opção por manter os painéis CLT expostos na caixa de escadas implica na necessidade de garantir uma camada de sacrifício na face que confina esse ambiente e, para que isso seja viável para as paredes 1, 2 e 3, fez-se obrigatório o uso de uma configuração com 5 lamelas e, no mínimo, 100 mm (Figura 5.19b). Neste caso, o efeito mais gravoso aos painéis quando sob a ação do fogo é o da encurvadura sob a combinação de ações $1,00/1,00 \times$ Vento em $y + 1,00/0,00 \times 0,30 \times$ Sobrecarga. Nesta verificação específica, atingiu-se um aproveitamento dos painéis de 54%, 60% e 82% para as Paredes 1, 2 e 3, respetivamente. A Tabela 5.16 apresenta a verificação referente à Parede 3, que detém o pior desempenho dentre elas.

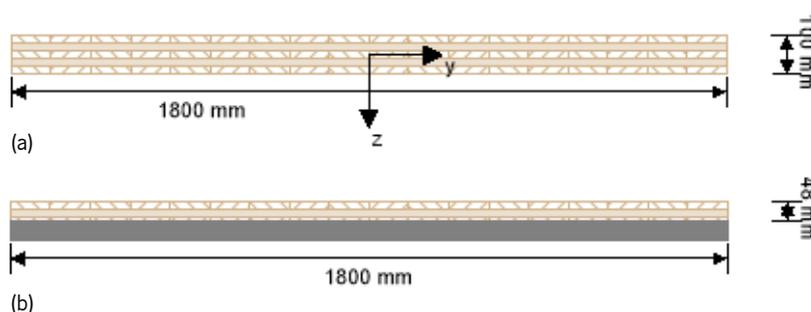


Figura 5.19 – Painéis CLT de parede do núcleo. (a) Seção aplicada ao sistema estrutural verificado; (b) Camada de sacrifício para os painéis CLT com 5 lamelas e 100 mm de espessura (Stora Enso, 2021)

Tabela 5.16 – Análise quanto à encurvadura para o painel CLT da parede de núcleo 3

Euroc.	k_m	$k_{c,y}$	$k_{c,z}$	$N_{c,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	$f_{m,k}$	$f_{c,0,d}$	$f_{m,y,d}$	$f_{m,z,d}$	Aprov.
					(N/mm ²)							
5	(-)	(-)	(-)	(kN)								
Seção 6.3	1,00	0,13	1,00	125,41	2,49	0,00	0,00	24,00	24,15	30,36	27,60	82%

O mesmo foi feito para as paredes de fachada em *timber-frame*. Através da análise aplicada ao modelo, foi possível induzir a distribuição das cargas entre todas as paredes e identificar a prumada (com comprimento igual a 1250 mm, referente à largura de um painel de fecho em OSB do *timber-frame*, uma vez que é obrigatório que as bordas das placas coincidam com os montantes para sua devida fixação) sujeita aos maiores esforços na estrutura. A localização desta prumada no edifício e a prumada equivalente considerando os espaçamentos médios adotados para cada piso são apontadas na Figura 5.20.

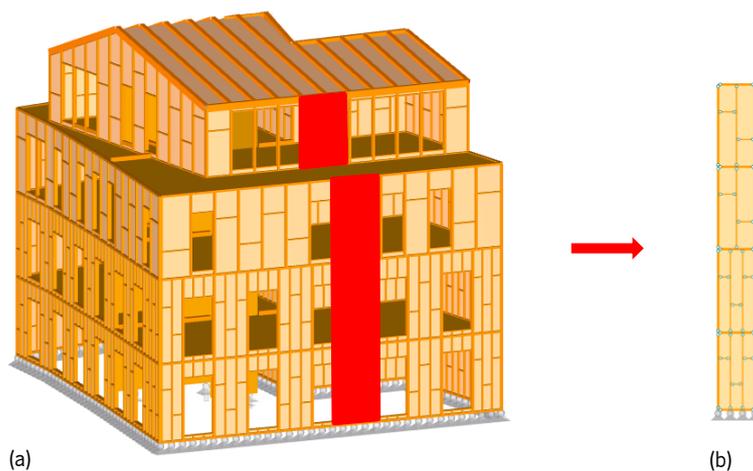


Figura 5.20 – (a) Localização da prumada do edifício com as maiores solicitações de esforços; (b) Prumada equivalente

Como esta prumada encontra-se entre aberturas, atribuiu-se secções simples ($40 \times 140 \text{ mm}^2$) e duplas ($80 \times 140 \text{ mm}^2$) para os montantes intermediários e extremos, respetivamente. Os montantes mais solicitados de cada seção, localizados no Piso 0, são identificados na Figura 5.21.

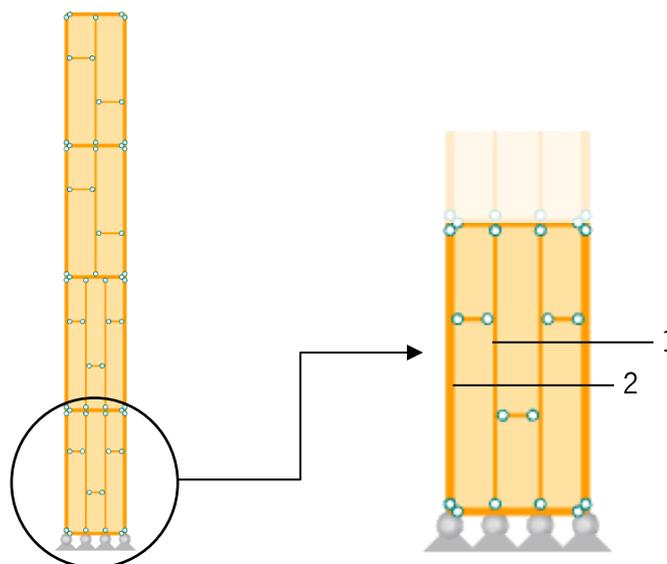


Figura 5.21 – Identificação dos montantes de seção simples (1) e dupla (2) mais solicitados da estrutura

Os montantes 1 e 2 apresentaram os seguintes esforços axiais quando submetidos aos carregamentos permanentes, sobrecargas e de vento (Tabela 5.17).

Tabela 5.17 – Resumo dos esforços axiais máximos nos montantes 1 e 2 para os carregamentos impostos

Carregamento	Esforço axial máximo (kN)	
	Montante 1	Montante 2
Permanente	7,81	14,07
Sobrecargas	7,91	14,42
Vento em y	1,26	10,22

Aplica-se, então, estes carregamentos ao sistema ilustrado na Figura 5.22. Os montantes foram atribuídos à classe de serviço 1 e impôs-se um espaçamento entre travamentos laterais de 0,90 m para os montantes simples, que têm sua deformação lateral em y limitada por duas barras de travamento, e de 1,80 m para os montantes duplos que, por localizarem-se nas extremidades de aberturas, apresentam barra de travamento em apenas um dos lados (Figura 5.23). Conforme preconizado para as paredes de fachada, os montantes foram avaliados para uma resistência ao fogo R60 quando protegidos por duas camadas de gesso cartonado de 15 mm e mais 50 mm de camada de lã de rocha.

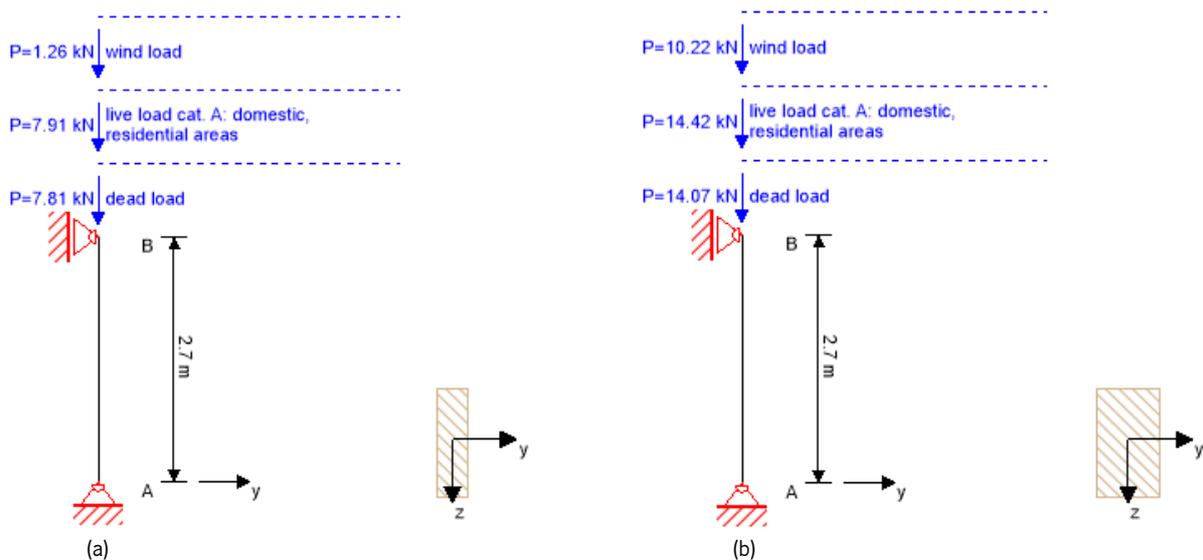


Figura 5.22 – Sistemas para verificação dos montantes do Piso 0. (a) Montante simples 1; (b) Montante duplo 2

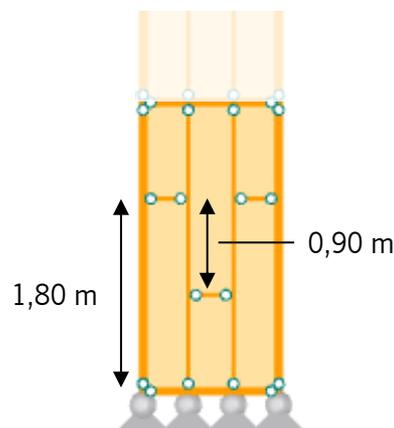


Figura 5.23 – Comprimento efetivo dos montantes devido aos travamentos laterais em y

Segundo a análise, o comportamento dos montantes é ditado pela possibilidade de encurvadura no ELU considerando as seguintes combinações mais gravosas (Tabela 5.18).

Tabela 5.18 – Combinação de ações mais gravosa para a análise do efeito de encurvadura nos montantes 1 e 2

Elemento	Combinação de ações
Montante 1	$1.35/0.80 \times \text{Permanente} + 1.50/0.00 \times \text{Sobrecarga}$
Montante 2	$1.35/0.80 \times \text{Permanente} + 1.50/0.00 \times \text{Sobrecarga} + 1.50/0.00 \times 0.60 \times \text{Vento em y}$

Assim, o aproveitamento dos montantes 1 e 2 quanto à encurvadura é de 89% e 88%, respetivamente (Tabelas 5.19 e 5.20).

Tabela 5.19 – Análise quanto à encurvadura para o montante 1

Euroc. 5	k_m (-)	$k_{c,y}$ (-)	$k_{c,z}$ (-)	$N_{c,d}$ (kN)	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	$f_{m,k}$	$f_{c,0,d}$	$f_{m,y,d}$	$f_{m,z,d}$	Aprov.
					(N/mm ²)							
Seção 6.3	1,00	0,55	0,43	22,41	4,00	0,00	0,00	16,00	10,46	9,98	12,80	89%

Tabela 5.20 – Análise quanto à encurvadura para o montante 2

Euroc. 5	k_m (-)	$k_{c,y}$ (-)	$k_{c,z}$ (-)	$N_{c,d}$ (kN)	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	$f_{m,k}$	$f_{c,0,d}$	$f_{m,y,d}$	$f_{m,z,d}$	Aprov.
					(N/mm ²)							
Seção 6.3	1,00	0,55	0,43	49,82	4,45	0,00	0,00	16,00	11,77	11,23	12,56	88%

Quando analisados sob a ação do fogo, o aproveitamento dos montantes 1 e 2 quanto à encurvadura é de 20% e 18%, respetivamente. As considerações para a análise da resistência ao fogo, bem como para as restantes verificações, são detalhadas no Anexo 7.

O aproveitamento suficiente dos montantes indica que o espaçamento adotado entre eles para o Piso 0 (cerca de 400 mm) é adequado para a estrutura. Para o Piso 1, onde também se adotou espaçamento de 400 mm, analisou-se a configuração original e uma alternativa, com espaçamento superior (cerca de 600 mm, o espaçamento máximo sugerido para o sistema construtivo). Para tanto, aplicou-se o carregamento imposto neste trecho de parede a um modelo único da prumada equivalente, alterando o espaçamento entre os montantes do Piso 1 (Figura 5.24). Os carregamentos normais impostos ao modelo de prumada são detalhados na Tabela 5.21.

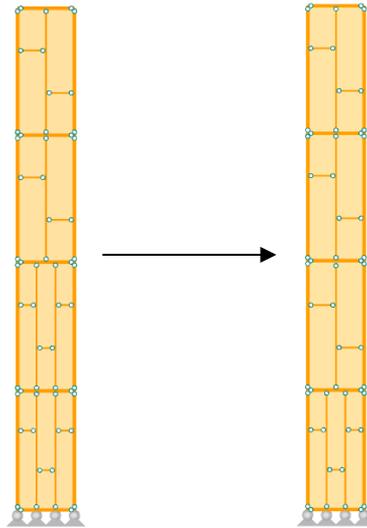


Figura 5.24 – Alteração do espaçamento entre montantes no Piso 2 na prumada equivalente

Tabela 5.21 – Carregamentos normais impostos a cada piso no modelo da prumada equivalente

Nível	Carga (kN)		
	Permanente	Sobrecarga	Vento em y
Piso 1	16,65	19,55	-
Piso 2	13,90	12,65	-
Piso 3	5,50	0,91	14,10

Os esforços axiais obtidos na modelação da prumada foram combinados no Calculatis (Stora Enso, 2021) para um sistema de altura $L = 2,91$ m, a altura do pé-direito do Piso 1, e espaçamento entre travamentos laterais de 0,97 m para os montantes simples (Figura 5.25) e 1,912 m para os montantes duplos (Figura 5.26).

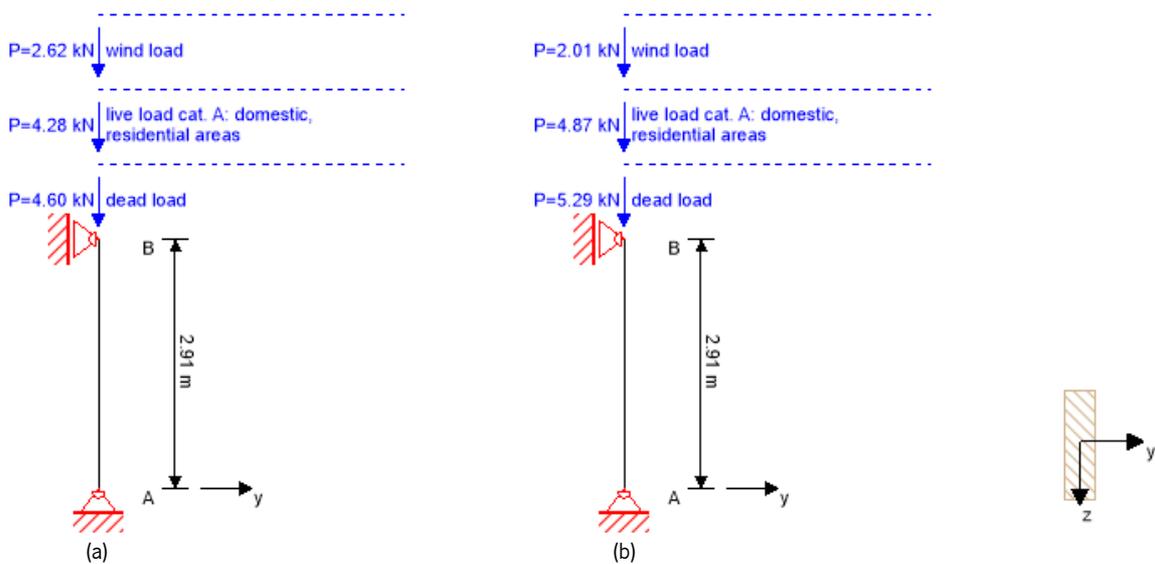


Figura 5.25 – Sistemas para verificação do montante simples 1 para espaçamentos de cerca de (a) 400 mm; (b) 600 mm

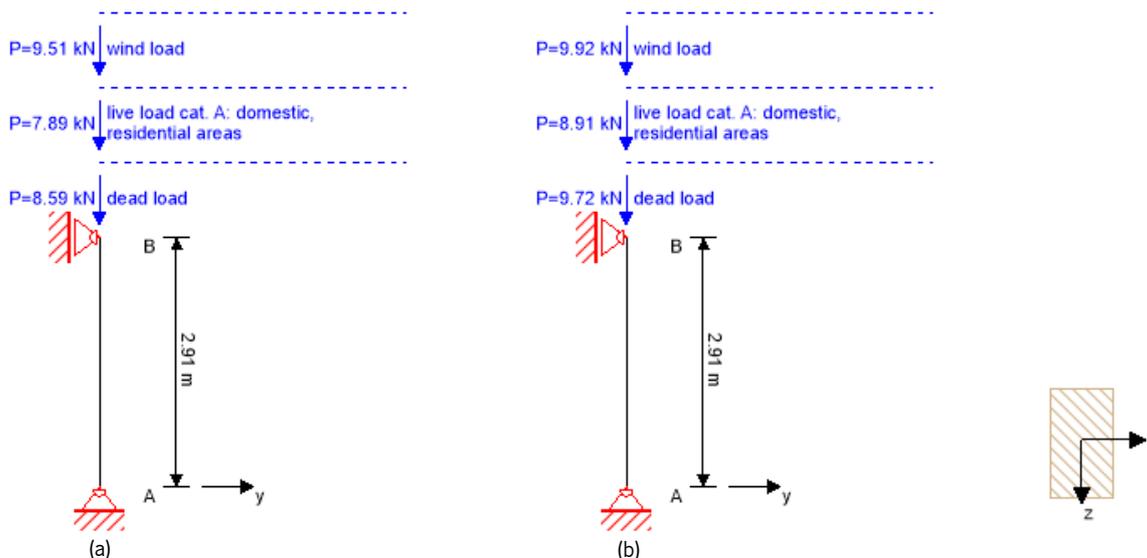


Figura 5.26 – Sistemas para verificação do montante duplo 2 para espaçamentos de cerca de (a) 400 mm; (b) 600 mm

Para a configuração com espaçamento de cerca de 400 mm, o montante simples 1 obteve aproveitamento de 60% relativamente ao efeito da encurvadura, enquanto que na configuração em que se assume espaçamento máximo de 600 mm, teve aproveitamento de 65%. Os montantes duplos variaram de 67% referente à configuração original, para 73% na configuração alternativa. Isso mostra que, a partir do Piso 1, todos os restantes pisos podem adotar o espaçamento máximo de 600 mm sem prejuízos à segurança estrutural do edifício. Os relatórios das análises desenvolvidas para os montantes 1 e 2 são apresentados no Anexo 7.

Entretanto, para as fachadas Norte e Leste, devido à quantidade de aberturas e ao adorno arquitetónico da fachada, optou-se por utilizar sempre montantes duplos espaçados em cerca de 900 mm. Para verificar esta variação para os Pisos 2 e 3, analisou-se os montantes contidos na prumada mais solicitada, identificados na Figura 5.27.



Figura 5.27 – Identificação dos montantes duplos espaçados de cerca de 900 mm nos Pisos 2 e 3

Considerando comprimento $L = 2,87$ m e espaçamento entre travamentos laterais de 0,956 m para o montante do piso 2 e $L = 2,38$ sem travamentos laterais para o Piso 3, analisou-se os montantes para os sistemas apresentados na Figura 5.28. As forças atuantes refletem os esforços axiais verificados para cada elemento a partir da modelação do edifício.

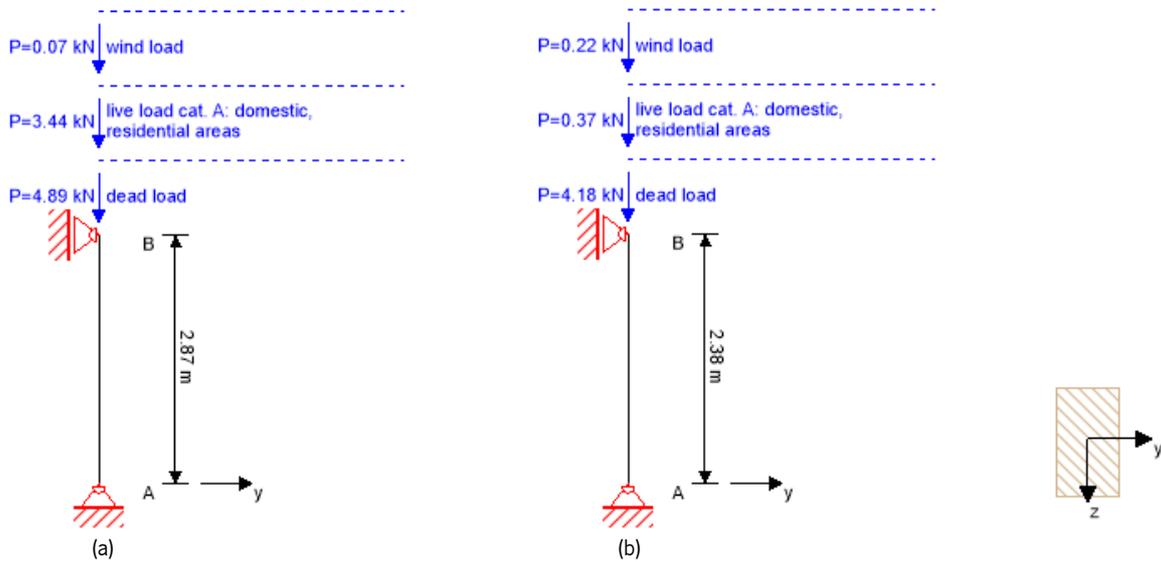


Figura 5.28 – Sistema para verificação dos montantes duplos espaçados em cerca de 900 mm dos Pisos 2 e 3

Quando considerada a seção dupla (80×140 mm²), os montantes dos Pisos 2 e 3 apresentaram aproveitamento de 20% e 24% quanto ao efeito da encurvadura. O montante do piso 2, devido aos seus travamentos laterais, ainda apresentaria aproveitamento suficiente caso a seção fosse reduzida para 40×140 mm² (aproveitamento de 52%). O mesmo não ocorre para o montante do Piso 3, que apresenta comprimento efetivo igual à altura do pé-direito. Isso mostra que, para esses dois pisos, o espaçamento excepcional de 900 mm pode ser mantido, desde que se garanta que todos os montantes adjacentes às aberturas apresentem seção dupla.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este capítulo destina-se à apresentação das conclusões deste trabalho. Os resultados principais são evidenciados e seu valor para a comunidade de pesquisa é destacado.

Devido às limitações deste estudo e ao interesse em aprimorar o sistema construtivo desenvolvido, são identificados possíveis estudos futuros que permitam alargar os conhecimentos nesta temática.

6.1. Síntese de resultados

Segundo a Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019 (2019), é na década de 2021-2030 que os maiores esforços para a redução das emissões de gases com efeito de estufa devem se concentrar em busca de um futuro neutro em carbono. Com este propósito e em consonância com a Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020 (2020), principal instrumento da política energética e climática nacional onde foram estabelecidos objetivos ambiciosos mas exequíveis para 2030, este trabalho buscou desenvolver uma solução promissora para a construção de cidades sustentáveis, principalmente no que diz respeito à neutralidade de carbono, a partir do uso da madeira, um material natural, renovável e armazenador de carbono.

Além dos benefícios associados ao uso da madeira nas diversas fases do ciclo de vida dos edifícios, desde a baixa energia incorporada e o sequestro de carbono nas fases de extração, produção, construção e operação, até a possibilidade de reciclagem no seu fim de vida, as excelentes propriedades térmicas da madeira, associadas ao desenvolvimento adequado dos projetos de edifícios, têm potencial para viabilizar edifícios com elevado desempenho energético e, conseqüentemente, economia de energia, conforto térmico e qualidade do ar. Além disso, o processo de pré-fabricação inerente à construção moderna em madeira contribui para a agilidade e racionalização da construção, reduzindo o desperdício e, conseqüentemente, a pegada ecológica do sistema construtivo, e proporciona ambientes internos saudáveis a partir da precisão do processo produtivo e controle de qualidade.

No entanto, a pesquisa de opinião realizada no âmbito deste estudo e apresentada no Capítulo 1 deste documento mostrou que não somente o público utilizador dos edifícios mantém o estigma associado ao uso estrutural da madeira, considerando-a menos segura, resistente e durável que os demais materiais estruturais e valorizando-a essencialmente para fins estéticos, como os profissionais do sector da

construção, em sua maioria, ainda detém pouco conhecimento e formação para a devida aplicação e aceitação do material. Consequentemente, a madeira e seus benefícios são, desde logo, desconsiderados nas fases iniciais de projeto em favor da utilização replicada do betão e do aço, materiais considerados consolidados e confiáveis pelo mercado, apesar de seus já conhecidos malefícios. Este trabalho, portanto, teve como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema construtivo em painéis pré-fabricados de madeira indicado para a construção de edifícios até 5 pisos e adequado aos padrões e necessidades do contexto Português, esperando-se promover um recurso que contribua diretamente para o alcance das metas de redução de emissões de gases com efeito de estufa em Portugal, nomeadamente os de carbono, em alinhamento à estratégia de neutralidade carbónica até 2050 e à limitação dos avanços do aquecimento global fixados no Acordo de Paris, além de preencher as lacunas do conhecimento, determinantes na privação ao uso da madeira estrutural, diminuindo a disparidade de avanços e incentivos relativamente às tecnologias em betão e aço.

O sistema construtivo foi, então, idealizado baseado nas regras e boas-práticas de conceção para estruturas de madeira identificadas na literatura, considerando os padrões de oferta e consumo do mercado nacional (espécies, produtos e tecnologias de pré-fabricação do sector), as condições e restrições de produção, transporte e construção, bem como os requisitos normativos aplicáveis, tratados extensivamente no Capítulo 3 deste documento. Além disso, foram definidos os pré-requisitos e as condições de projeto impostos ao sistema, dos quais destacam-se a adoção de painéis como unidades básicas do sistema; a utilização da madeira como material estrutural exclusivo, priorizando espécies de madeira nacional e origem local para o fortalecimento da bioeconomia, com exceção da fundação e eventuais ligações metálicas associadas aos elementos de madeira; a utilização de materiais complementares em consonância com os padrões de consumo e de acessibilidade técnica-financeira nacionais, de modo a facilitar a replicação e aceitação do sistema; e a adequação para estruturas de edifícios multifamiliares até 5 pisos, quer para construção nova, quer para reabilitação.

Após concebidos, os painéis foram avaliados quanto ao seu desempenho funcional e mecânico em cumprimento aos requisitos regulamentares nacionais. Segundo as análises realizadas no âmbito do desempenho funcional dos painéis, estes apresentaram resultados bastante favoráveis em termos térmicos (Tabelas 4.17 e 4.18), sendo aprovados em todas as suas configurações originais e na maioria das variações supostas para a utilização na zona climática mais rigorosa do território nacional português (I3), considerando as condições mais desfavoráveis para cada tipo de elemento construtivo. Os painéis que constituem os elementos construtivos expostos à humidade também apresentaram bom comportamento higroscópico e potencial para se manter livre de condensações. Isso não descarta, no

entanto, que o projeto térmico seja desenvolvido para cada projeto em utilização do sistema construtivo, uma vez que os aspectos arquitetónicos e os elementos envidraçados foram desconsiderados da análise realizada. Assim, questões como a presença e interferência de pontes térmicas, a inércia térmica e o desempenho energético do edifício a depender das condições de ventilação, exposição solar e sistemas técnicos devem ser avaliadas caso a caso. A previsão do desempenho acústico apontou resultados favoráveis para o isolamento a sons aéreos (Tabela 4.21) e parcialmente favoráveis para o isolamento a sons de percussão (Tabela 4.22), a depender dos ambientes separados pelo elemento construtivo. Assim como para a análise térmica, a análise acústica foi desenvolvida desvinculada de uma arquitetura definida e invariável, por isso é indispensável a avaliação de aspetos como a transmissão marginal, acústica interior, elementos adicionais que provoquem quebras no isolamento acústico e elementos de fecho de vãos, como portas, janelas e caixas de estore para cada projeto em utilização do sistema construtivo. Vale ressaltar, ainda, que os métodos para previsão do isolamento acústico são, geralmente, imprecisos e podem levar a valores irreais, pelo que as medições *in situ* acabam por ser a alternativa mais fiável.

A Tabela 6.1 a seguir apresenta um resumo do desempenho funcional dos painéis desenvolvidos nesse estudo. Em verde, são destacados os painéis cujas configurações originais e variações mostraram desempenho conforme, segundo os requisitos normativos e regulamentares nacionais. Em vermelho, são destacados aqueles que apresentaram alguma vulnerabilidade no cumprimento aos requisitos, quer devido à imposição de requisitos mais rigorosos implicados por uma situação específica, quer devido à uma variação inadequada da configuração original. Importa referir que todas as debilidades detetadas foram contornadas e as soluções e considerações adotadas foram amplamente debatidas na Seção 4.6 deste documento, pelo que a interpretação da Tabela 6.1 abaixo não dispensa a leitura íntegra e associada da referida seção para completa compreensão das potencialidades e limites de cada configuração de painel verificada.

Tabela 6.1 – Resumo do desempenho funcional (coeficiente de transmissão térmica e isolamento a sons aéreos e de percussão) dos painéis pré-fabricados em madeira

Elemento	Verificação térmica – U (W/m ² .°C)			Verificação acústica – R _w ou L _{n,w} (dB)	
	Z.C. I1	Z.C. I2	Z.C. I3	Sons aéreos	Sons de percussão
Par_Ext_TF	OK	OK	OK	OK	–
Par_Int_Est_TF	OK	OK	OK	OK	–
Par_Int_Nest_TF	OK	OK	KO	OK	–
Par_Int_Dupla_TF	OK	OK	OK	OK	–
Par_Nuc_CLT	OK	KO	KO	OK	–
Par_Nuc_CLT_TF	OK	OK	OK	OK	–
Pav_RC	–	–	–	–	–

Tabela 6.1 – Resumo do desempenho funcional (coeficiente de transmissão térmica e isolamento a sons aéreos e de percussão) dos painéis pré-fabricados em madeira (Continuação)

Elemento	Verificação térmica – U (W/m ² .°C)			Verificação acústica – R _w ou L _{n,w} (dB)	
	Z.C. I1	Z.C. I2	Z.C. I3	Sons aéreos	Sons de percussão
Pav_Int_CLT	OK	OK	KO	OK	KO
Cob_CLT	OK	OK	OK	–	KO
Cob_TAH	OK	OK	OK	–	–
Var_CLT	–	–	–	–	–

No que concerne a reação ao fogo, todos os materiais e componentes aplicados aos painéis foram escolhidos de maneira a apresentarem o comportamento mínimo requerido conforme a localização de sua camada e exposição ao fogo. Já quanto à resistência ao fogo, apesar das camadas de gesso cartonado responsáveis pela garantia ao cumprimento dos requisitos de resistência ao fogo impostos pela regulamentação portuguesa, recomenda-se que os componentes estruturais dos painéis sejam dimensionados para resistirem ao tempo mínimo requerido, principalmente quando optar-se por mantê-los expostos, conforme foi feito para o caso de estudo desenvolvido. As considerações e verificações quanto à resistência e reação ao fogo são apresentadas nas Seções 4.7 e 5.3.4 deste documento.

A análise estrutural desenvolvida, que considerou a aplicação do sistema construtivo para um edifício de 4 pisos, demonstrou a sua adequação a estruturas desse porte e sinalizou a viabilidade de aplicação para estruturas de 5 pisos, com manutenção da segurança e seguindo os critérios inicialmente estabelecidos (como, por exemplo, espaçamentos entre montantes variando entre 300 e 600 mm), conforme era ansiado nos objetivos dessa pesquisa. Para a arquitetura, soluções estruturais carregamentos e seções adotados, os elementos estruturais dos painéis apresentaram os seguintes aproveitamentos para as respetivas verificações determinantes observadas (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 – Resumo dos aproveitamentos obtidos para as respetivas verificações determinantes dos elementos estruturais dos painéis, segundo as considerações feitas para o caso de estudo

Elemento	Verificação determinante	Aproveitamento
Painéis de piso em CLT (40-30-40-30-40)	ELS – $w_{net,fin}$	96%
Viga de continuação da cumeeira (150 x 200 mm ²)	ELU Fogo – Flexão	44%
Viga de fecho da caixa de escadas (150 x 200 mm ²)	ELU – Flexão	53%
Vigas da cobertura (160 x 240 mm ²)	ELS – $w_{net,fin}$	97%
Vigas para apoio do piso (200 x 300 mm ²)	ELU – Flexão	89%
Painéis de parede do núcleo em CLT (20-20-20-20-20)	ELU Fogo – Encurvadura	82%
Montante simples (40 x 140 mm ²)	ELU – Encurvadura	89%
Montante duplo (80 x 140 mm ²)	ELU – Encurvadura	88%

Conclui-se, portanto, que, para além de propor uma solução com elevado potencial de aplicação e impacto sustentável nas cidades portuguesas, este trabalho contribui, sobretudo, para o enriquecimento científico e para a promoção da aceitação e interesse pela utilização estrutural da madeira em edifícios coletivos, aspetos fundamentais à concretização das necessárias e ambicionadas mudanças nos padrões antiquados e nocivos replicados pelo sector da construção.

6.2. Estudos futuros

Quer pelas limitações deste estudo, quer pelo interesse em ampliar e aprimorar os conhecimentos acerca do sistema construtivo, são identificados e propostos os seguintes estudos futuros:

- Desenvolvimento das verificações e adaptações aos painéis para atenderem também a edifícios de utilizações-tipo diferentes da habitacional, como edifícios comerciais, por exemplo;
- Aferição dos resultados obtidos na previsão do comportamento funcional (resistência e transmitância térmicas, estanqueidade à água e ao ar, isolamento a sons aéreos e de percussão, reação e resistência ao fogo) e estrutural (capacidade de carga, comportamento dos diafragmas, resistência das ligações mecânicas, controlo das vibrações nos pisos) dos painéis através de ensaios físicos e mecânicos em provetes de diferentes escalas;
- Aferição dos resultados obtidos na previsão do comportamento funcional e estrutural dos painéis através de ensaios físicos e mecânicos e medições *in situ* em um edifício modelo para determinação da qualidade do ar interior, inércia térmica e desempenho energético;
- Simulações numéricas para validação final do sistema quanto a segurança estrutural, estados limite de serviço e comportamento ao sismo e a eficiência energética, simulando as necessidades energéticas para uma fração do edifício modelo. Para o efeito, pode-se desenvolver um estudo paramétrico considerando diferentes localizações do edifício em Portugal (p.e. Bragança, Porto, Lisboa, Faro), variando intensidade sísmica, exposição solar, clima, etc.;
- Alargamento do processo de pré-fabricação, de modo a incorporar os sistemas de redes nos painéis ainda em fábrica através, por exemplo, do projeto integrado em ambiente BIM que possibilite compatibilizar especialidades, otimizar o uso de materiais em função da dimensão dos painéis e siga um método baseado nas preferências/restrições de roteamento de redes que considere os padrões de corte ideais;
- Geração de instruções de controle numérico computadorizado automatizado com base em projeto integrado em ambiente BIM para favorecer o fluxo de informação na transição entre a

fase de projeto e a fase de produção, como a criação de objetos parametrizados por um conjunto de dados pré-aprovados;

- Elaboração do plano de construção, considerando as prescrições de aplicação em obra sugeridas pela nova geração dos Eurocódigos;
- Elaboração do plano de inspeção/monitorização e manutenção, considerando as boas-práticas sinalizadas pela literatura e pela indústria dos materiais integrantes do sistema;
- Elaboração do projeto de durabilidade para edifícios em uso do sistema construtivo, com as prescrições de projeto que influenciam a longevidade e higiene da construção (classes de exposição, controle de humidade, etc.);
- Quantificação dos impactos ambientais de ciclo de vida do sistema e na avaliação do seu desempenho sustentável em contraposição ao uso dos materiais convencionais;
- Simulações de certificação energética, aplicando a regulamentação em vigor (REH/RECS), e de certificação de sustentabilidade do edifício modelo (SBTool, LEED, etc.).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABANDA, F.; TAH, J.; CHEUNG, F. – BIM in off-site manufacturing for buildings. J. Build. Eng. Vol. 14 (2017), p. 89–102.

ABERGEL, T.; DEAN, B.; DULAC, J. – Towards a Zero-Emission, Efficient, and Resilient Buildings and Construction Sector: Global Status Report 2017. UN Environment and International Energy Agency, Paris, 2017.

AITCHISON, M.; BASHIRZADEH, T.; BEIM, A.; COUPER, R.; DOE, R.; ENGSTROM, D.; KUZMANOVSKA, I.; LIDELow, H.; MAXWELL, D.; MACARTHUR, J.; NELSON, J.; NOGUCHI, M.; NORMAN, M.; RUDBERG, M.; RUPNIK, I.; SMITH, R.; STEHN, R.; TORERO CULLEN, J. – Prefab Housing and the Future of Building Product to Process. London: Lund Humphries, 2018.

APA – Case study: Mass timber has banks seeing green: First United Bank invests in first mass timber buildings in Texas, Oklahoma. Vol. 135 (2019).

ARANO, I. M.; TOPI, C.; PETTENELLA, D.; SECCO, L.; MASIERO, M.; FOLLESA, M.; FRAGIACOMO, M.; CARNUS, J.; LEFÈVRE, F.; RIGOLOT, E.; LABIDI, J.; LLANO-PONTE, R.; PROKOFIEVA, I.; FELICIANO, D.; MUYS, B. – A forest-based circular bioeconomy for southern Europe: visions, opportunities and challenges: Reflections on the bioeconomy. European Forest Institute. (2018).

ARCHELLO. 2022. Disponível em: <https://archello.com/project/stadthaus>

ARCHITECTURE & DESIGN. [S.d.] Disponível em: <https://www.architectureanddesign.com.au/projects/multi-residential/forte-by-lend-lease>

ARUP – Rethinking Timber Buildings: seven perspectives on the use of timber in building design and construction. 2019.

AUGUSTIN, M. – Wood Based Panels. In Handbook 1 - Timber Structures. Leonardo da Vinci Pilot Projects: Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures - TEMTIS. (2008), p. 63-99.

BANEMA. [S.d.] Disponível em: <https://www.banema.pt/pt/produtos/paineis-de-madeira/aglomerado/>

BAYNE, K.; TAYLOR, S. Attitudes to the use of Wood as a Structural Material in Non-residential Building Applications: Opportunities for Growth. Victoria, Melbourne: Forest and Wood Products Australia, 2006.

BEEBE, K.; KAM-BIRON, M. – Five Ds of Moisture Management: Deflection, Drainage, Drying, Distance, and Durable Materials. In SEAC 2016 CONVENTION PROCEEDINGS, Seattle, WA, 2016.

BINDERHOLZ. [S.d.]. Disponível em: <https://www.binderholz.com/en-us/products/clt-bbs/>

BONEV, M.; WÖRÖSCH, M.; HVAM, L. – Utilizing platforms in industrializes construction. Constr. Innov. Vol. 15:nº 1 (2015), p. 84-106.

BORGSTRÖM, Eric – Design of timber structures. Swedish Wood. (2016).

BRANCO, J. M. – Casas de madeira: Da tradição aos novos desafios. In Lourenço, P. B.; Branco, J. M.; Cruz, H.; Nunes, L. – Casas de madeira. Livro de atas do Seminário Casas de Madeira. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2013.

BRANDNER, R.; FLATSCHER, G.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G.; THIEL, A. – Cross laminated timber (CLT): Overview and development. Eur. J. Wood Wood Prod. Vol. 74 (2016), p. 331–351.

CANADIAN WOOD COUNCIL – The design possibilities of Engineered Wood Products. Ottawa, Ontario: International Building Series, 2006.

CARVALHO, L. F.; JORGE, L. F. C.; JERÓNIMO, R. – Plug-and-Play Multistory Mass Timber Buildings: Achievements and Potentials. Journal of Architectural Engineering. Vol. 26:nº 2 (2020).

CECCOTTI, A.; SANDHAAS, C.; OKABE, M.; YASUMURA, M.; MINOWA, C.; KAWAI, N. – SOFIE project: 3D shaking table test on a seven-story full-scale cross-laminated timber building. Earthq. Eng. Struct. Dyn. Vol. 42 (2013), p. 2003–2021.

CEN – EN 300:2019 - Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specifications. Brussels: European Committee for Standardization, 2019.

CEN – EN 312:2010 - Particleboards – Specifications. Brussels: European Committee for Standardization, 2010.

CEN – EN 338:2016 - Structural timber - Strength classes. Brussels: European Committee for Standardization, 2016.

CEN – EN 350:2016 - Durability of wood and wood-based products - Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. Brussels: European Committee for Standardization, 2016.

CEN – EN 386:2001 - Glued laminated timber - Performance requirements and minimum production requirements. Brussels: European Committee for Standardization, 2001.

CEN – EN 622:2003 - Fibreboards - Specifications - Part 1: General requirements. Brussels: European Committee for Standardization, 2003.

CEN – EN 622-5:2009: Fibreboards - Specifications - Part 5: Requirements for dry process boards (MDF). Brussels: European Committee for Standardization, 2009.

CEN – EN 634:1995 - Cement-bonded particleboards - Specification - Part 1: General requirements. Brussels: European Committee for Standardization, 1995.

CEN – EN 636:2012 - Plywood – Specifications. Brussels: European Committee for Standardization, 2012.

CEN – EN ISO 717-1:2013 - Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Brussels: European Committee for Standardization, 2013.

CEN – EN ISO 717-2:2020 - Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. Brussels: European Committee for Standardization, 2020.

CEN – EN 789:2004 - Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

CEN – EN 1058:2009 - Wood-based panels - Determination of characteristic 5-percentile values and characteristic mean values. Brussels: European Committee for Standardization, 2009.

CEN – EN 1156:2013 - Wood-based panels - Determination of duration of load and creep factors. Brussels: European Committee for Standardization, 2013.

CEN – EN 1194:1999 - Timber structures - Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values. Brussels: European Committee for Standardization, 1999.

CEN – EN 1990:2002 - Eurocode - Basis of structural design. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

CEN – EN 1991-1-1:2002 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

CEN – EN 1991-1-2:2002 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

CEN – EN 1991-1-3:2002 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions – Snow loads. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

CEN – EN 1995-1-1:2004 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

CEN – EN 1995-1-2:2004 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

CEN – EN ISO 6946:2017 - Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods. Brussels: European Committee for Standardization, 2017.

CEN – EN 12369-1:2001 - Wood-based panels - Characteristic values for structural design - Part 1: OSB, particleboards and fibreboards. Brussels: European Committee for Standardization, 2001.

CEN – EN 13986:2004 - Wood-based panels for use in construction - Characteristics, evaluation of conformity and marking. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

CEN – EN 14279:2004 - Laminated Veneer Lumber (LVL) - Definitions, classification and specifications. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

CHEN, T. Y.; BURNETT, J.; CHAU, C. K. – Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. *Energy*. Vol. 26 (2001), p. 323–340.

CHEN, Z.; GU, H.; BERGMAN, R.; LIANG, S. – Comparative Life-Cycle Assessment of a High-Rise Mass Timber Building with an Equivalent Reinforced Concrete Alternative Using the Athena Impact Estimator for Buildings. *Sustainability*. Vol. 12:n° 4708 (2020).

CHEN, Z.; POPOVSKI, M.; NI, C. – Novel floor-isolation and recentering seismic system for prefabricated modular mass timber construction – preliminary investigation on modelling and response. FPInnovations Technical Report. Vol. 222 (2020).

CMHC – CANADA MORTGAGE AND HOUSING CORPORATION – Housing Observer 2016. Mid-rise residential wood construction n° 1. Canada: CMHC, 2016.

CNC CREATIONS. 2020. Disponível em: <https://cnccreations.co.uk/product/standard-mdf/>

COUNCIL DIRECTIVE 89/106/EEC. The construction products directive. European Commission (21 December 1988).

D'AMICO, D.; POMPONI, F.; HART, J. – Global potential for material substitution in building construction: the case of cross laminated timber. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 279:n°. 123487 (2021).

DANOSA. Disponível em: <https://www.danosa.com/pt-pt/familia/protecao-frente-ao-ruído/>

DAVIS, S. J.; LEWIS, N. S.; SHANER, M.; AGGARWAL, S.; ARENT, D.; AZEVEDO, I. L.; BENSON, S. M.; BRADLEY, T.; BROUWER, J.; CHIANG, Y. M.; et al. – Net-zero emissions energy systems. *Science*. Vol. 360:n° 6396 (2018).

DÉCRET n°8 2010-273. L'utilisation du bois dans certaines constructions. Legifrance (15 mars 2010).

DIAS, A.; SKINNER, J.; CREWS, K.; TANNERT, T. – Timber-concrete-composites increasing the use of timber in construction. *Eur. J. Wood Wood Prod*. Vol. 74 (2016), p. 443–451.

DIETSCH, P.; BRANDNER, R. – Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements: A state-of-the-art report. *Constr. Build. Mater*. Vol. 97 (2015), p. 78–89.

DINWOODIE, J. M. – *Timber: Its Nature and Behaviour* (2^a ed.). New York: CRC Press, 2000.

DLUBAL SOFTWARE – RFEM. Versão 6. Alemanha: Dlubal Software, 2021.

DOW – Isolamento para edificações. Disponível em: <https://www.dow.com/pt-br/market/mkt-building-construction/sub-build-building-envelope/app-build-bldgenv-building-insulation.html>

ENGENHO & ARTE. [S.d.] Disponível em: <https://www.engenhoearte.info/post/18-andares-em-madeira-a-mais-alta-torre-constru%C3%ADda-em-madeira>

ETA-06/0138. KLH-Massivholzplatten / KLH solid wood slabs. Austrian Institute of Construction Engineering (20 february 2017).

EU Forest-Based Industries 2050: A vision of sustainable choices in a climate-friendly future. Bruxelas: The European Confederation of Woodworking Industries (CEI-BOIS), 2019.

EVISON, D.; KREMER, P.; GUIVER, J. – Mass Timber Construction in Australia & New Zealand - Status, and Economic and Environmental Influences on Adoption. *Wood and Fiber Science*. Vol. 50 (2018).

FAST, P.; GAFNER, B.; JACKSON, R.; LI, J. – Case study: An 18 story tall mass timber hybrid student residence at the University of British Columbia, Vancouver. In THE WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING (WCTE2016), Vienna, Austria, 22–25 agosto 2016.

FORESTRY INNOVATION INVESTMENT – Assessing the impact of the Japanese wood first act on demand for PFC in the public non-residential market in Japan. 2012.

FORESTRY INNOVATION INVESTMENT – Naturally wood – information resource. 2014.

FORSSÉN, J.; KROPP, J.; BRUNSKOG, J.; LJUNGGREN, S.; BARD, D.; SANDBERG, G.; LJUNGGREN, F.; AGREN, A.; HALLSTROM, O.; DYBRO, H.; LARSSON, K.; TILLBERG, K.; JARNERO, K.; SJOKVIST L.; OSTMAN, B.; HAGBERG, K.; BOLMSVIK, A.; OLSSON, A.; EKSTRAND, C.; JOHANSSON, M. – Acoustics in wooden buildings: State of the art 2008. Stockholm: Vinnova project 2007, 2008.

FOSTER, R. M.; REYNOLDS, T. P. S.; RAMAGE, M. H. – Proposal for Defining a Tall Timber Building. *Journal of Structural Engineering*. (2016).

FRANZINI, F. – Wooden multistory construction in finland: perceptions of municipality civil servants. Helsinki: Helsingin Yliopisto Helsingfors Universitet, 2018.

FUX, X.; GUO, D.; LIU, X.; PAN, G.; QIAN, Y.; SUN, D. – Chinese Architecture. Yale University Press, New Haven, CT, USA, 2002.

GALLO, P.; ROMANO, R.; BELARDI, E. – Smart Green Prefabrication: Sustainability Performances of Industrialized Building Technologies. *Sustainability*. Vol. 13:n° 4701 (2021).

GAN, X.; CHANG, R.; ZUO, J.; WEN, T.; ZILLANTE, G. – Barriers to the transition towards off-site construction in China: an interpretative structural modeling approach. *J. Clean. Prod.* Vol. 197 (2018), p. 8-18.

GANEY, R.; BERMAN, J.; AKBAS, T.; LOFTUS, S.; DOLAN, J. D.; SAUSE, R.; RICLES, J.; PEI, S.; VAN DE LINDT, J.; BLOMGREN, H. E. – Experimental investigation of self-centering cross-laminated timber walls. *J. Struct. Eng.* Vol. 143 (2017).

GASPARRI E.; AITCHISON, M. – Unitised timber envelopes. A novel approach to the design of prefabricated mass timber envelopes for multi-storey buildings. *Journal of Building Engineering*. Vol. 26 (2019).

GAVRIC, I.; FRAGIACOMO, M.; CECCOTTI, A. – Cyclic behavior of CLT wall systems: Experimental tests and analytical prediction models. *J. Struct. Eng.* Vol. 141 (2015).

GETTY IMAGES. [S.d.] Disponivel em: <https://www.gettyimages.pt/>

GRANTHAM, R. – Design Guidance for multi-storey timber frame buildings. Warford: Building Research Establishment, 2004.

GREEN, M. – Tall Wood. In CHALLENGE OF HOUSING THE WORLD AND THE ROLE OF WOOD, 2011.

GREEN, M. C.; KARSH, J. E. – The Case for Tall Wood Buildings: How Mass Timber Offers a Safe, Economical, and Environmentally Friendly Alternative for Tall Building Structures. FPIInnovations. Canada: Creative Commons (CC) Licence, 2012.

GRUPO ECONOMIA CIRCULAR E AMBIENTE – A Economia Circular: uma aposta de todos em prol do bem comum. Portugal: Rede RSO PT, 2020.

HALSTENBERG, F. A.; BUCHERT, T.; BONVOISIN, J.; LINDOW, K.; STARK, R. – Target-oriented modularization: addressing sustainability goals in product modularization. *Procedia CIRP*. Vol. 29 (2015), p. 603-608.

HAMBURG, P.; TUPENAITE, L.; NAIMAVICIENE, J.; KANAPECKIENE, L.; SAJJADIAN, S.; AMADO, M.; GUERREIRO; LELLEP, K.; KIISA, M.; VAHTRAMÄE, E.; KIVIL, L.; JALAS, R.; TAYLOR, R.; ŠULCIENĖ, V.; HANSEN, N.; BRITO, J.; SILVESTRE, J.; TOMÉ, A.; HAMADYK, E. – International study on best practices and knowledge gaps for construction of high-rise timber buildings. *Sustainable High-Rise Buildings Designed and Constructed in Timber (HiTimber)*. 2018.

HAZLEDEN, D. G.; MORRIS, P. I. – Designing for durable wood construction: The 4 DS. In Lacasse, M. A.; Vanier, D. J. (Eds.) – *Durability of building materials and components*. Ottawa, ON: Institute for Research in Construction, 1999. p. 734–745.

HOSSAIN, A.; DANZIG, I.; TANNERT, T. – Cross-laminated timber shear connection with innovative self-tapping screw assemblies. *J. Struct. Eng.* Vol. 142 (2016).

HOSSAIN, A.; POPOVSKI, M.; TANNERT, T. – Cross-laminated timber connections assembled with a combination of screws in withdrawal and screws in shear. *Eng. Struct.* Vol. 168 (2018), p. 1–11.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S. – Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 177 (2018), p. 387-397.

INDUFOR – CEI-Bois Roadmap 2010: Summary of Work Packages 1.1, 1.2 and 5.1. Bruxelles: European Confederation of Woodworking Industries (CEI-Bois), 2004.

JEFFREE, M. – *Wood: Building the bioeconomy*. The European Confederation of Woodworking Industries. Bruxelles. Out. 2019.

JI, Y.; ZHU, F.; LI, H.; AL-HUSSAIN, M. – Construction industrialization in China: current profile and the prediction. *Appl. Sci.* Vol. 7:n° 2 (2017), p. 1-13.

JONSSON, R. – *Prospects For Timber Frame In Multi-Storey House Building In England, France, Germany, Ireland, The Netherlands and Sweden*. In CONCERTO. Växjö, Sweden: Växjö University, School of Technology and Design, 2009.

KARMATRENDZ. 2009. Disponível em: https://karmatrendz.wordpress.com/2009/11/15/e_3-housing-in-berlin-by-kaden-klingbeil-architekten/

KOLAITIS, D.; ASIMAKOPOULOU, E.; FOUNTI, M. – Fire protection of light and massive timber elements using gypsum plasterboards and wood based panels: A large-scale compartment fire test. *Construction and Building Materials*. Vol. 73 (2014), p. 163-170.

KOPPELHUBER, D.; MAGG, A. – Building services in timber construction – Investigation on difficulties and reliefs during the installation procedures in multi-storey timber residential buildings. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Vol. 800 (2020).

KREMER, P. D.; SYMMONS, M. A. – Mass timber construction as an alternative to concrete and steel in the Australia building industry: a PESTEL evaluation of the potential. *International Wood Products Journal*. Vol 6:n° 3 (2015), p. 138-147.

KREMER, P. D.; SYMMONS, M. A. – Overcoming Psychological Barriers to Widespread Acceptance of Mass Timber Construction in Australia. Forest & Wood Products Australia. (2016).

KUZMAN, M. K.; SANDBERG, D. – A new era for multi-storey timber buildings in Europe. In 70TH FOREST PRODUCTS SOCIETY INTERNATIONAL CONVENTION, Portland, Oregon, USA, 26-29 junho 2016 – New Horizons for the Forest Products Industry. Oregon: Forest Products Society, 2016.

KUZMANOVSKA, I.; GASPARRI, E.; TAPIAS MONNÉ, D.; AITCHISON, M. – Tall Timber Buildings: Emerging trends and typologies. In 2018 WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, Seoul, Korea, 2018.

LAGUARDA MALLO, M.; ESPINOZA, O. – Outlook for Cross-Laminated Timber in the United States. BioResources. Vol. 9:nº 4 (2014), p. 7427-7443.

LAM, F.; HE, M. – Example of traditional tall timber buildings in China – The Yingxian Pagod. Struct. Eng. Int. Vol. 18:nº 2 (2008), p. 126–129.

LATTKE, F.; LEHMANN, S. – Multi-Storey Residential Timber Construction: Current Developments in Europe. Journal of Green Building. Vol. 2 (2007), p. 119-129.

LEHMANN, S.; HAMILTON, C. – Sustainable Infill Development using Low Carbon CLT Prefabrication: Adaptation for the South Australian Context. Adelaide, Australia: University of South Australia, Zero Waste SA Research Centre for Sustainable Design and Behaviour, 2011.

LEHMANN, S. Sustainable construction for urban infill development using engineered massive wood panel systems. Sustainability. 2707-2742. Vol. 4 (2012).

LESSING, J.; STEHN, L.; EKHOLM, A. – Industrialised housing: definition and categorization of the concept. In 13TH INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION CONFERENCE PROCEEDINGS, Sydney, Australia, 2005, p. 471–480.

LIAO, F.; PAN, H.; ZHANG, J. – Application of BIM technology in the design of prefabricated architecture. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. Vol. 760 (2021).

LOSS, C.; ROSSI, S.; TANNERT, T. – In-plane stiffness of hybrid steel-cross-laminated timber floor diaphragms. J. Struct. Eng. Vol. 144 (2018).

LOTUFFO OLIVEIRA, G.; OLIVEIRA, F. – As interferências do processo produtivo na concepção de projeto de edifícios em CLT – Cross Laminated Timber. In 1º WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS, São Paulo, Brasil, 2017.

LOURENÇO, P. B.; BRANCO, J. M. – Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI. In HISTÓRIA DA CONSTRUÇÃO – ARQUITETURAS E TÉCNICAS CONSTRUTIVAS. Porto: Centro de Investigação Transdisciplinar «Cultura, Espaço e Memória» (CITCEM), 2012.

LUCEJKO, J. J.; TAMBURINI, D.; ZBOROWSKA, M.; et al. – Oak wood degradation processes induced by the burial environment in the archaeological site of Biskupin (Poland). Herit Sci. Vol. 8:nº 44 (2020).

LUNAWOOD. Disponível em: <https://lunawood.com/thermowood/>

MACHADO, J. Saporiti – Produtos de madeira maciça para a construção: Desafios da qualidade. Silva Lusitana. Vol. 12:nº 2 (2004), p. 203-212.

MAHAPATRA, K.; GUSTAVSSON, L. – Multi-storey Timber Buildings: Breaking Industry Path Dependency. *Building Research & Information*. Vol. 36:nº 6 (2008), p. 638-648.

MAHAPATRA, K.; GUSTAVSSON, L. General Conditions for Construction of Multi-storey Wooden Buildings in Western Europe. In *CONCERTO*. Växjö, Sweden: Växjö University, School of Technology and Design, 2009.

MAHAPATRA, K.; GUSTAVSSON, L.; HEMSTRÖM, K. – Multi-storey wood-frame buildings in Germany, Sweden and the UK. *Construction Innovation*. Vol. 12:nº 1 (2012), p. 62–85.

MAPSTON, M.; WESTBROOK, C. – Prefabricated building units and modern methods of construction (MMC). *Mater. Energy Effic. Therm. Comf. Build.* (2010), p. 427–454.

MARQUES, A. C. – A tradição da madeira na actualidade: Noruega e Portugal. Porto: Universidade do Porto – Faculdade de Arquitectura, 2011.

MARSHALL DAY – INSUL. Versão 9.0.23. Nova Zelândia: Marshall Day, 2021.

MCGAVIN, R. L.; DAKIN, T.; SHANKS, J. – Mass-timber construction in Australia: Is CLT the only answer?. *BioRes*. 4642-4645. Vol. 15:nº 3 (2020).

MCGREGOR, R. M.; EVISON, D.; OZANNE, L. – A pilot survey of structural engineers' perceptions of laminated veneer lumber in single-storey industrial buildings. *SESOC Journal*. Vol. 24:nº 1 (2011), p. 25-28.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. *Global: Imagining Construction's Digital Future*. 2016.

METSÄWOOD. 2022. Disponível em: <https://www.metsawood.com/global/Products/finnjoist/Pages/Finnjoist.aspx#>

MORGADO, L. – A oferta da habitação em madeira em Portugal: A procura de uma alternativa no âmbito da arquitectura. In 1º CONGRESSO IBERO-LATINO AMERICANO DE MADEIRA NA CONSTRUÇÃO, Coimbra, Portugal, 2011. Livro de Resumos. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, 2011, p. 163-164.

MORGADO, L.; PEDRO, J. B.; CRUZ, H.; PONTÍFICE, P. – Projeto e construção de casas de madeira em Portugal. In *ENGENHARIA PARA A SOCIEDADE: INVESTIGAÇÃO E INOVAÇÃO*, Lisboa, 2021. Cidades e desenvolvimento. Lisboa: LNEC, 2012.

NAWARI, N. – BIM Standardization and Wood Structures. *Comput. Civ. Eng.* (2012), p. 293–300.

NEGRÃO, J. – Estruturas de madeira em Portugal: Presente e passado recente. Negrão. In 1º CONGRESSO IBERO-LATINO AMERICANO DE MADEIRA NA CONSTRUÇÃO, Coimbra, Portugal, 2011. Livro de Resumos. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, 2011, p. 479-480.

NEW NORDIC TIMBER. 2022. Disponível em: <https://newnordictimber.com/articles/engineered-wood-products>

NI, C.; POPOVSKI, M. – Mid-rise wood-frame construction handbook. FPIInnovations Special Publication SP-57E. Canada: Pointe-Claire, 2015.

- NORLANDER, T. – Multi-storey wooden buildings are in focus in Sweden. [S.l.:s.n.]. 2017.
- OKODI-HYAH, E.Y. – A comparative evaluation os the environment impact os prefabrication versus conventional construction in UAE’s construction industry. Dubai: The British University in Dubai (BUiD), 2012.
- ORLOWSKI, K. – Automated manufacturing for timber-based panelised wall systems. *Automation in Construction*. Vol. 109:nº 102988 (2020).
- ÖSTMAN, B.; KÄLLSNER, B. – National Building Regulations In Relation To Multistorey Wooden Buildings In Europe. In CONCERTO. Växjö, Sweden: Växjö University, School of Technology and Design, 2011.
- ÖSTMAN, B.; BRANDON, D.; FRANTZICH, H. – Fire safety engineering in timber buildings. *Fire Safety Journal*. Vol. 91 (2017).
- PARRY-HUSBANDS, H., & PARKER, G. – Wood naturally better: Media advertising & consumer research. *Forest & Wood Products Australia*. (2014).
- PEI, S.; VAN DE LINDT, J. W.; POPOVSKI, M.; BERMAN, J. W.; DOLAN, J. D.; RICLES, J. M.; SAUSE, R.; BLOMGREN, H.; RAMMER, D. R. – Cross laminated timber for seismic regions: Progress and challenges for research and implementation. *J. Struct. Eng.* Vol. 142 (2016).
- PIOT, A.; WOLOSZYN, M.; BRAU, J.; ABELE, C. – Experimental Wooden Frame House for the Validation of Whole Building Heat and Moisture Transfer Numerical Models. *Energy and Buildings*. Vol. 43:nº 6 (2011), p. 1322–1328.
- PLADUR. Disponível em: <https://corporativo.pladur.com/pt-pt/produtos/>
- PLAG, R. – Ubakus. [Em linha]. Alemanha: Ralf Plag, 2009, 2011. Disponível em: ubakus.de
- Portugal Market Report. Lisboa: Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, 2020.
- QU, M.; PELKONEN, P.; TAHVANAINEN, L.; AREVALO, J.; GRITTEN, D. – ‘Experts’ Assessment of the Development of Wood Framed Houses in China. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 31 (2012), p. 100–105.
- RAMAGE, M.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P.; SCHERMAN, O. – The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 68:nº 1 (2016), p. 333-359.
- RAMETSTEINER, E.; OBERWIMMER, R.; GSCHWANDTL, I. – Europeans and wood: What do Europeans think about wood and its uses? A review of consumer and business surveys in Europe. *Forest & Wood Products Australia*. (2007).
- Reducing UK Emissions: Progress Report to Parliament. United Kingdom: Committee on Climate Change, 2018.
- RESOLUÇÃO DO CONSELHO DE MINISTROS n.º 132/2017. Planeamento e das Infraestruturas. *Diário da República*, 1ª série, no. 196 (11 de outubro de 2017).

RESOLUÇÃO DO CONSELHO DE MINISTROS n.º 107/2019. RNC 2050 – Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050: Estratégia de Longo Prazo para a Neutralidade Carbónica da Economia Portuguesa em 2050. Diário da República, 1ª série, n.º 123 (1 de julho de 2019).

RESOLUÇÃO DO CONSELHO DE MINISTROS n.º 53/2020. Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030). Diário da República, 1ª série, no. 133 (07 de julho de 2020).

RICHARD, R. B. – Industrialised building systems: Reproduction before automation and robotics. *Automation in Construction*. Vol. 14 (2005), p. 442–451.

RIGGIO, M.; ALHARIRI, N.; HANSEN, E. – Paths of innovation and knowledge management in timber construction in North America: a focus on water control design strategies in CLT building enclosures. *Architectural Engineering and Design Management*. Vol. 16:nº 1 (2019), p. 1-26.

ROOS, A.; WOXBLOM, L.; MCCLUSKEY, D. – The Influence of Architects and Structural Engineers on Timber Construction: Perceptions and Roles. *Silva Fennica*. Vol. 44:nº 5 (2010), p. 871-884.

ROTHOBLAAS. Disponível em: <https://www.rothoblaas.pt/catalogos-rothoblaas>

RUSKE, W. – *Timber Construction for Trade, Industry, Administration*. Basel: Birkhäuser, 2004.

SACKS, R.; DAVE, B.; KOSKELA, L.; OWEN, R. – Analysis Framework for the Interaction Between Lean Construction and Building Information Modelling. In *17TH INTERNATIONAL GR. LEAN CONSTR.*, 2009, p. 221–234.

SANTI, S.; PIEROBON, F.; CORRADINI, G.; CAVALLI, R.; ZANETTI, M. – Massive wood material for sustainable building design: the Massiv-Holz-Mauer wall system. *J Wood Sci*. Vol. 62 (2016), p. 416-428.

SCHWATKA, N. V.; BUTLER, L. M.; ROSECRANCE, J. R. – An Aging Workforce and Injury in the Construction Industry. *Epidemiol*. Vol. 34 (2012), p. 156–167.

SHANKS, W.; DUNANT, C.; DREWNIOK, M. P.; LUPTON, R.; SERRENHO, A.; ALLWOOD, J. M. – How much cement can we do without? lessons from cement material flows in the UK. *Resour. Conserv. Recycl*. Vol. 141 (2019), p. 441-454.

SHMUELLY-KAGAMI, T.; MATSUMURA, S. – Progress of Timber Multi-Storey Apartment Building in Europe and Japan. In *10TH WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING*, Miyazaki, Japan, 2-5 junho 2008.

SIGA. 2022. Disponível em: https://www.siga.swiss/global_en/projects/hoho-wien

SILVA, C.; BRANCO, J. M.; LOURENÇO, P. B. – MLCC na Construção em Altura. In *Congresso Construção*, Coimbra, Portugal, 2012.

SILVA, C. – *Tall buildings using CLT: An integrated design considering moisture induced effects*. Guimarães: Universidade do Minho – Escola de Engenharia, 2020.

SHAHNEWAZ, M.; TANNERT, T.; ALAM, M. S.; POPOVSKI, M. – In-plane stiffness of cross-laminated timber panels with openings. *Struct. Eng. Int*. Vol. 27 (2017), p. 217–223.

SMITH, I.; FRANGI, A. – Tall Timber Buildings: Introduction. Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering. Vol. 18:nº 2 (2008).

SMITH, I.; SNOW, M. – Timber: an ancient construction material with a bright future. Forest Chron. Vol. 84:nº 4 (2008), p. 504-510.

SMITH, I.; FRANGI, A. – Use of Timber in Tall Multi-Storey Buildings. Zürich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). (2014).

SMITH, R. E.; GRIFFIN, G.; RICE, T.; HAGEHOFER-DANIELL, B. – Mass timber: evaluating construction performance. Architectural Engineering and Design Management. Vol. 14:nº 1-2 (2018), p. 127-138.

State of Europe's Forests. Zvolen: Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe (FOREST EUROPE), 2020.

STEELE, M. – Timber buildings reach market share of more than 16%. Global Timber Forum. [S.l.: s.n.]. 2015.

STORA ENSO – Calculatis. [Em linha]. Version 4.03.0. Finlândia: Stora Enso e Universidade do Minho, 2021. Disponível em: calculatis.storaenso.com

Survey of international tall wood buildings. Canada: Forestry Innovation Investment and Binational Softwood Lumber Council, 2014.

Sustainable urbanization strategy: UNDP's support to sustainable, inclusive and resilient cities in the developing world. Nova Iorque: United Nations Development Programme (UNDP), 2016.

SUTINEN, R. – The Strategic Programme for the Forest Sector 2008 - 2015. [S.l.:s.n.]. 2013.

ŠVAJLENKA, J.; KOZLOVSKÁ, M. – Construction-technical specifics of a prefabricated wood construction system. Journal of Interdisciplinary Research. Vol. 10:nº 2 (2020), p. 373-376.

SWEDISH WOOD. [S.d.] Disponível em: https://www.swedishwood.com/inspired_by_wood/architecture/limnologen/

Tackle Climate Change: Use Wood. Bruxelas: The European Confederation of Woodworking Industries (CEI-Bois), 2008.

TENÓRIO, M. C. U.; BRANCO, J. M.; SILVA, S. M. - Prefabricated wooden based system for collective buildings in the Portuguese context. In CONSTRUCTION, ENERGY, ENVIRONMENT & SUSTAINABILITY, Coimbra, Portugal, 2021. Coimbra: Itecons - Institute for Research and Technological Development in Construction, Energy, Environment and Sustainability, 2021.

TESFAMARIAM, S.; STIEMER, S. F.; DICKOF, C.; BEZABEH, M. A. – Seismic vulnerability assessment of hybrid steel-timber structure: Steel moment resisting frames with CLT infill. J. Earthq. Eng. Vol. 18 (2014), p. 929–944.

THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA. [S.d.] Disponível em: <https://vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/>

THERMOCHIP. Disponível em: <https://www.thermochip.com/productos/>

TIMBER STRUCTURES 3.0 AG. [S.d.] Disponível em: https://www.ts3.biz/de/aktuelles/meldungen/2021-05-03.1_news.php

TOPECA. [S.d.] Disponível em: <https://pt.topeca.pt/catalogo/fachadas-paredes-tetos/sistema-regularizacao-placas/placa-viroc/placa-viroc.html>

TOPPINEN, A.; et al. – The future of wooden multistory construction in the forest bioeconomy: A Delphi study from Finland and Sweden. *Journal of Forest Economics*. Vol. 31 (2018), p. 3-10.

TRADA. Timber frame construction (4rd ed). High Wycombe: TRADA Technology Ltd, 2008.

UNITED NATIONS – World population prospects - The 2017 revision: Key findings and advance tables. New York: Department of economic and social affairs population division, 2017.

VAN DE KUILEN, J.; CECCOTTI, A.; XIA, Z.; HE, M. – Very Tall Wooden Buildings with Cross Laminated Timber. Elsevier. Vol. 14 (2011), p. 1621-1628.

VERBIST, M.; NUNES, L.; JONES, D.; BRANCO, J.M. – 11: Service life design of timber structures. In Ghiassi, B.; Lourenço, P.B. – Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Long-term Performance and Durability of Masonry Structures. Woodhead Publishing, 2019.

Vision 2040 of the European forest-based sector. Bruxelas: The European Technology Platform for the forest-based sector, 2019.

VOLCALIS – Isolamentos minerais. Disponível em: <https://www.volcalis.pt/>

WAHL, A.; LAVOIE, P.; BROOKS, D. – Wood Market Trends in Europe. FPIInnovations n° 49. Canada: Natural Resources Canada, 2008.

WOETZEL, J.; MISCHKE, J.; BARBOSA, F.; JOÃO RIBEIRINHO, M.; SRIDHAR, M.; PARSONS, M.; BERTRAM, N.; BROWN, S. – Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity. Shanghai: McKinsey Global Institute, 2017.

Wood Construction. Finland: Invest in Finland - A National Organization, 2006.

Wood first act. Canada: Parliament of British Columbia, 2009.

XIA, B.; O'NEILL, T.; ZUO, J.; SKITMORE, M.; CHEN, Q. – Perceived obstacles to multi-storey timber-frame construction: an Australian study. *Architectural Science Review*. Vol. 57:n° 3 (2014), p. 169–176.

YATES, M.; LINEGAR, M.; DUJIC, B. – Design of an 8 storey residential tower from KLH cross laminated solid timber panels. [S.l.:s.n.]. 2008.

ZHANG, X.; FAIRHURST, M.; TANNERT, T. – Ductility estimation for a novel timber–steel hybrid system. *J. Struct. Eng.* 2016, Vol. 142 (2016).

ZÜBLIN TIMBER. 2022. Disponível em: <https://www.zueblin-timber.com/en/references/multi-storey-construction/treet-residential-high-rise-bergen.html>

ANEXO 1 – ANÁLISE TÉRMICA

A seguir, são apresentados os relatórios de saída gerados pelo software Ubakus (Plag, 2011) para todas as análises térmicas referidas na Seção 4.6.1.

Par_Ext_TF

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
2	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
3	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
4	OSB	1,50	0,120	0,125
5	Vapor barrier	0,02	0,400	0,001
6	Rock wool	14,00	0,037	3,784
	Pine (12%)	14,00	0,130	1,077
7	OSB	1,50	0,120	0,125
8	Breather membrane	0,06	0,300	0,002
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Ventilation level

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 5,219 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,970 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,315$ (maximum allowed: 1,5)

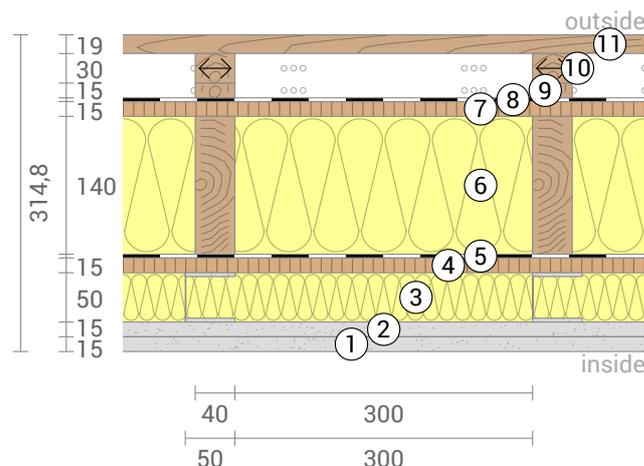
The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 4,595 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 14%

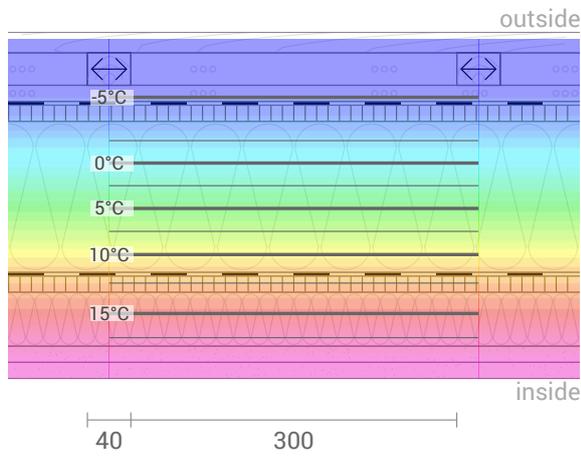
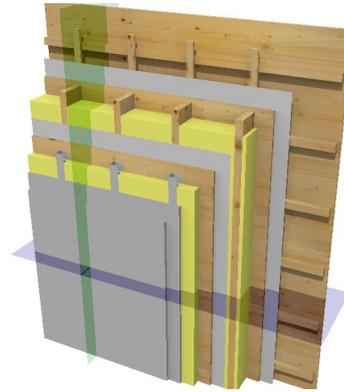
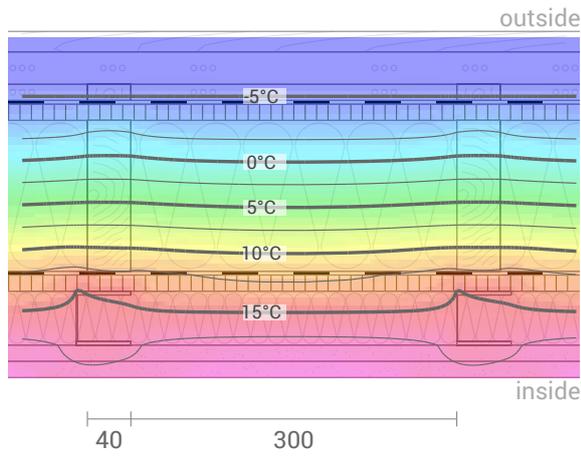
Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,22 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 35 cm. This, however, is not true for at least layer 6 with a total width of 34 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.



Par_Ext_TF, $U=0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Temperature profile



Top left: Temperature profile in the blue section (see right illustration). Bottom left: Temperature profile in the green section.

Par_Ext_TF, U=0,22 W/(m²K)

Layers (from inside to outside)

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	Temperatur [°C]		Weight [kg/m ²]
				min	max	
	Thermal contact resistance*		0,250	17,9	20,0	
1	1,5 cm Gypsum board	0,250	0,060	17,4	18,9	10,2
2	1,5 cm Gypsum board	0,250	0,060	16,4	18,6	10,2
3	5 cm Rock wool	0,037	1,351	12,8	18,4	3,0
	5 cm Steel (0,17%)	50,000	0,001	15,1	16,4	0,8
	0,06 cm Steel (Width: 5 cm)	50,000	0,000	14,5	15,1	0,9
	0,06 cm Steel (Width: 5 cm)	50,000	0,000	16,4	17,0	0,9
4	1,5 cm OSB	0,120	0,125	12,3	15,1	9,6
5	0,02 cm Vapor barrier	0,400	0,001	12,3	13,6	0,1
6	14 cm Rock wool	0,037	3,784	-4,3	13,6	7,2
	14 cm Pine (12%)	0,130	1,077	-3,4	13,3	10,6
7	1,5 cm OSB	0,120	0,125	-4,8	-3,1	9,6
8	0,06 cm Breather membrane	0,300	0,002	-4,8	-4,6	0,2
	Thermal contact resistance*		0,040	-5,0	-4,6	
9	1,5 cm Rear ventilated level (outside air)			-5,0	-5,0	0,0
10	3 cm Rear ventilated level (outside air)			-5,0	-5,0	0,0
11	1,9 cm Spruce			-5,0	-5,0	8,6
	31,48 cm Whole component		4,595			74,7

*Thermal contact resistances according to DIN 4108-3 for moisture protection and temperature profile. The values for the U-value calculation can be found on the page 'U-value calculation'.

Surface temperature inside (min / average / max): 17,9°C 18,6°C 18,9°C
 Surface temperature outside (min / average / max): -4,8°C -4,8°C -4,6°C

Par_Ext_TF, U=0,22 W/(m²K)

Moisture proofing

For the calculation of the amount of condensation water, the component was exposed to the following constant climate for 90 days: inside: 20°C und 50% Humidity; outside: -5°C und 80% Humidity. This climate complies with DIN 4108-3.

This component is free of condensate under the given climate conditions.

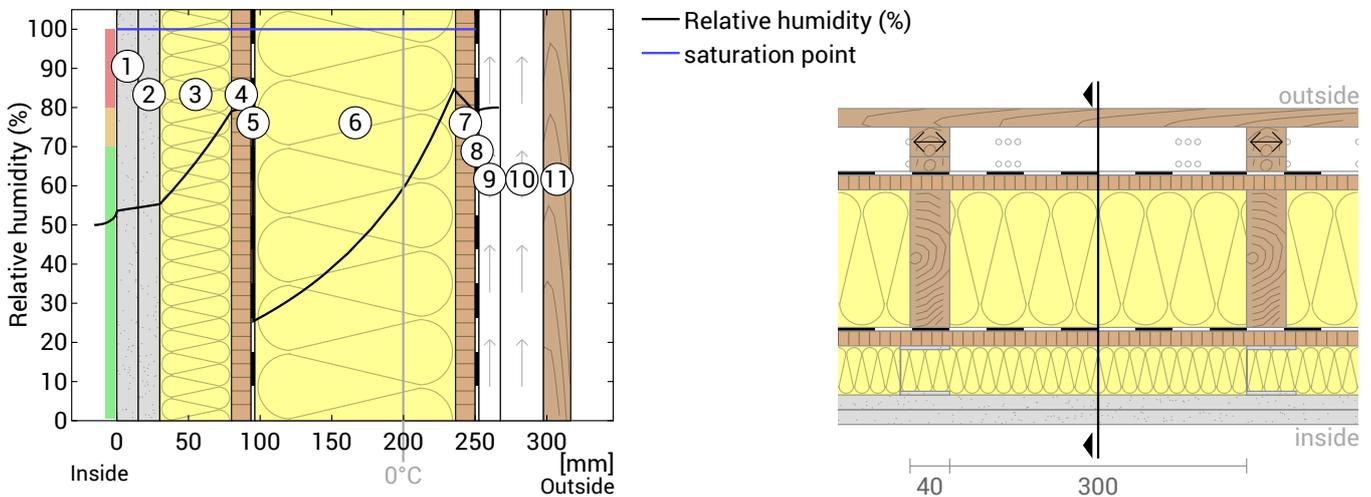
Drying reserve according to DIN 4108-3:2018: 110 g/(m²a)
 At least required by DIN 68800-2: 100 g/(m²a)

#	Material	sd-value [m]	Condensate		Weight [kg/m²]
			[kg/m²]	[Gew.-%]	
1	1,5 cm Gypsum board	0,06	-		10,2
2	1,5 cm Gypsum board	0,06	-		10,2
3	5 cm Rock wool	0,05	-		3,0
	5 cm Steel (0,17%)	18,00	-		0,8
	0,06 cm Steel (Width: 5 cm)	1500	-		0,9
	0,06 cm Steel (Width: 5 cm)	1500	-		0,9
4	1,5 cm OSB	3,75	-	-	9,6
5	0,02 cm Vapor barrier	150,00	-		0,1
6	14 cm Rock wool	0,14	-		7,2
	14 cm Pine (12%)	7,00	-	-	10,6
7	1,5 cm OSB	8,25	-	-	9,6
8	0,06 cm Breather membrane	0,04	-		0,2
31,48 cm Whole component		186,90			74,7

Humidity

The temperature of the inside surface is 17,9 °C leading to a relative humidity on the surface of 57%.Mould formation is not expected under these conditions.

The following figure shows the relative humidity inside the component.



- ① Gypsum board (15 mm)
- ② Gypsum board (15 mm)
- ③ Rock wool (50 mm)
- ④ OSB (15 mm)
- ⑤ Vapor barrier
- ⑥ Rock wool (140 mm)
- ⑦ OSB (15 mm)
- ⑧ Breather membrane
- ⑨ Rear ventilated level (15 mm)
- ⑩ Rear ventilated level (30 mm)
- ⑪ Spruce (19 mm)

Layers marked with <-> run parallel to the illustrated cutting plane and were not taken into account in the moisture protection calculation.

Notes: Calculation using the Ubakus 2D-FE method. Convection and the capillarity of the building materials were not considered. The drying time may take longer under unfavorable conditions (shading, damp / cool summers) than calculated here.

Par_Ext_TF, U=0,22 W/(m²K)

Moisture protection in accordance with DIN 4108-3:2018 Appendix A

 This moisture proofing is only valid for **non-air-conditioned** residential buildings.

Please note the hints at the end of these moisture proofing calculations.

#	Material	λ [W/mK]	R [m²K/W]	sd [m]	ρ [kg/m³]	T [°C]	ps [Pa]	Σ sd [m]
Thermal contact resistance			0,250			18,92	2186	0
1	1,5 cm Gypsum board	0,250	0,060	0,06	680	18,66	2151	0,06
2	1,5 cm Gypsum board	0,250	0,060	0,06	680	18,40	2117	0,12
3	5 cm Rock wool	0,037	1,351	0,05	60	12,58	1457	0,17
4	1,5 cm OSB	0,120	0,125	3,75	640	12,04	1406	3,92
5	0,02 cm Vapor barrier	0,400	0,001	150	650	12,04	1405	154
6	14 cm Rock wool	0,037	3,784	0,14	60	-4,28	427	154
7	1,5 cm OSB	0,120	0,125	8,25	640	-4,82	408	162
8	0,06 cm Breather membrane	0,300	0,002	0,1	300	-4,83	407	162
Thermal contact resistance			0,040					

 Temperature (T), vapor saturation pressure (ps), and the sum of the sd-values (Σ sd) apply to the layer boundary.

Relative air humidity on the surface

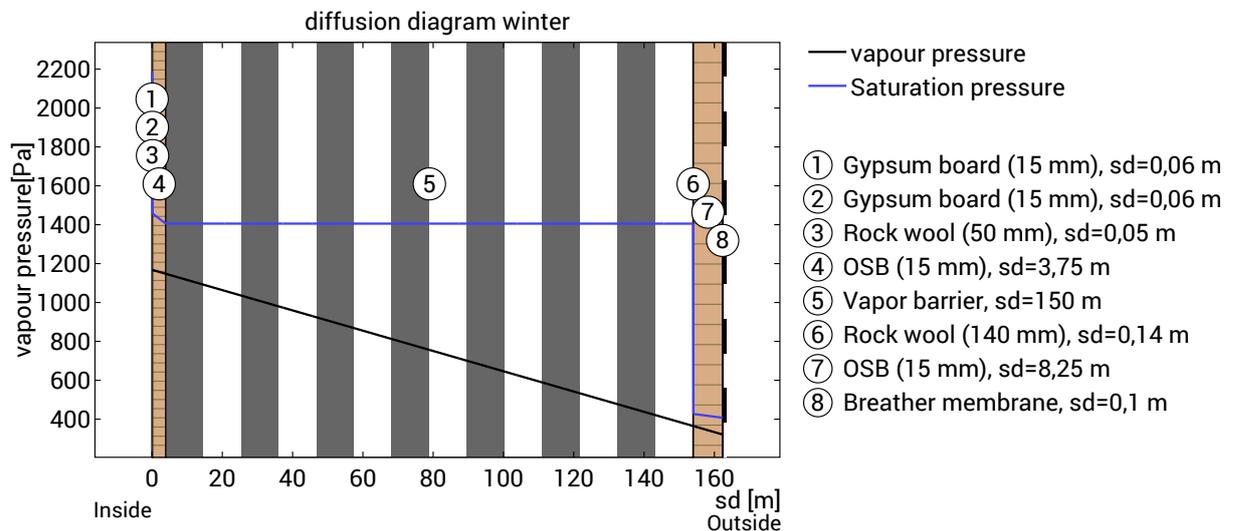
The relative humidity on the interior surface is 53%. Requirements for the prevention of building material corrosion depend on material and coating and have not been investigated.



Dew period (winter)

Boundary conditions

Vapor pressure inside at 20°C and 50% humidity	$p_i = 1168 \text{ Pa}$
Vapor pressure outside at -5°C and 80% humidity	$p_e = 321 \text{ Pa}$
Duration of condensation period (90 days)	$t_c = 7776000 \text{ s}$
Water vapor diffusion coefficient in static air	$\delta_0 = 2.0E-10 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$
sd-value (Whole component.)	$s_{de} = 162,41 \text{ m}$



The section under investigation is free of condensate under the given climate conditions.



Calculate evaporation potential for the drying reserve in the dew period for the plane with the lowest evaporation potential:

 $s_d = 154,06 \text{ m}$; $x = 23,52 \text{ cm}$; $p_s = 427 \text{ Pa}$:

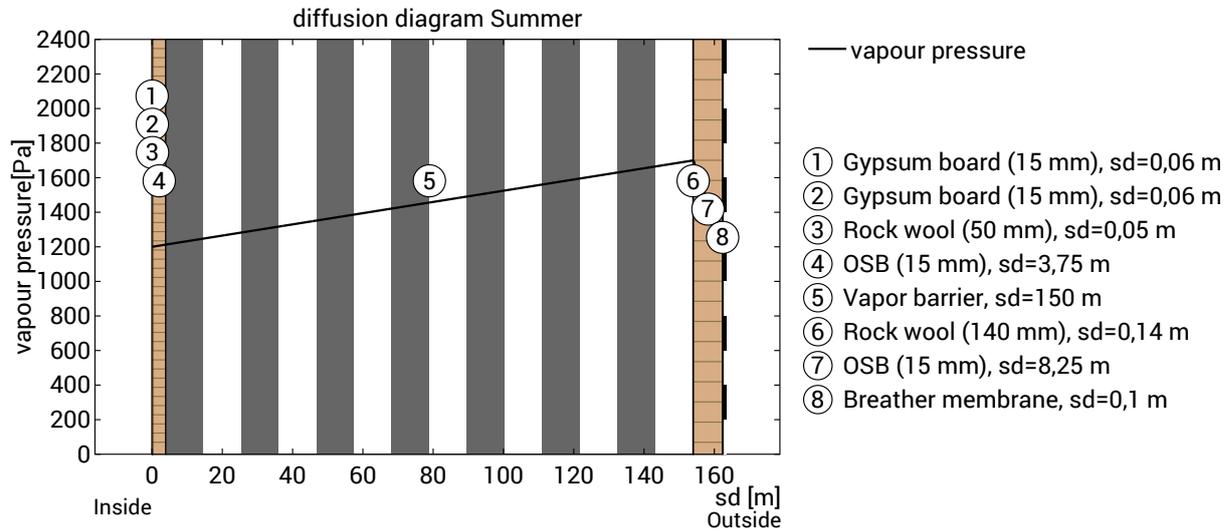
Layer boundary between Rock wool and OSB

$$M_{ev, \text{Tauperiode}} = t_c \cdot \delta_0 \cdot \left(\frac{(p_s - p_i)}{s_{d_{ev}}} + \frac{(p_s - p_e)}{(s_{d_e} - s_{d_{ev}})} \right) = 0,012 \text{ kg/m}^2$$

Par_Ext_TF, U=0,22 W/(m²K)

Evaporation period (summer)

Boundary conditions	
Interior vapor pressure	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Exterior vapor pressure	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Saturation vapour pressure in the condensation area	$p_s = 1700 \text{ Pa}$
Length of drying season (90 days)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$
sd-values remain unchanged.	



Condensate-free component: The maximum possible evaporation mass for the drying reserve is calculated. Consider the level that has the lowest evaporation potential in the dew period, at $sd=154,06 \text{ m}$; $x=23,52 \text{ cm}$:

Layer boundary between Rock wool and OSB

Evaporation mass: $M_{ev} = \delta_0 \cdot t_{ev} \cdot [(p_s - p_i) / sd + (p_s - p_e) / (s_{de} - sd)] = 0,10 \text{ kg/m}^2$

Drying reserve (DIN 68800-2)

Dew-water-free component: The evaporation potential of the dew period is also taken into account.

Drying reserve: $M_r = (M_{ev} + M_{ev, Tauperiode}) \cdot 1000 = 110 \text{ g/m}^2/\text{a}$

Minimum requested for walls and ceilings: $100 \text{ g/m}^2/\text{a}$



Evaluation according to DIN 4108-3

The component is permissible regarding the moisture protection.

Hints

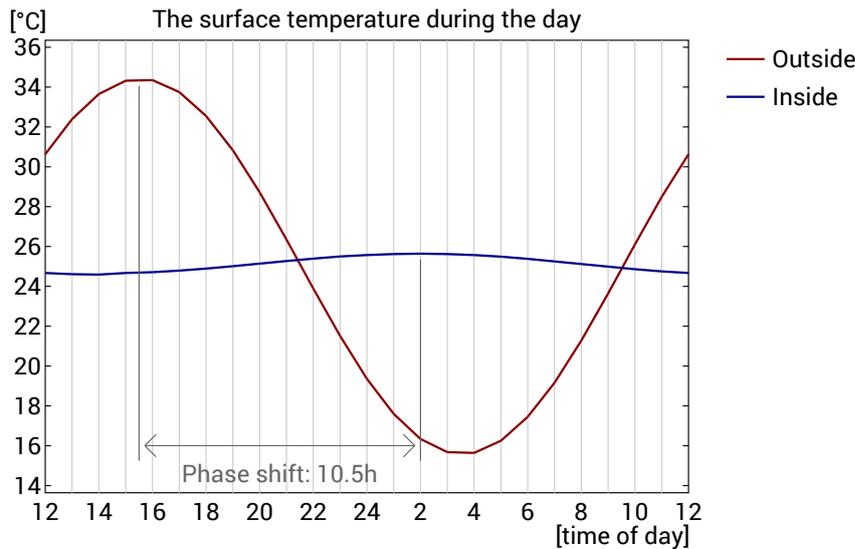
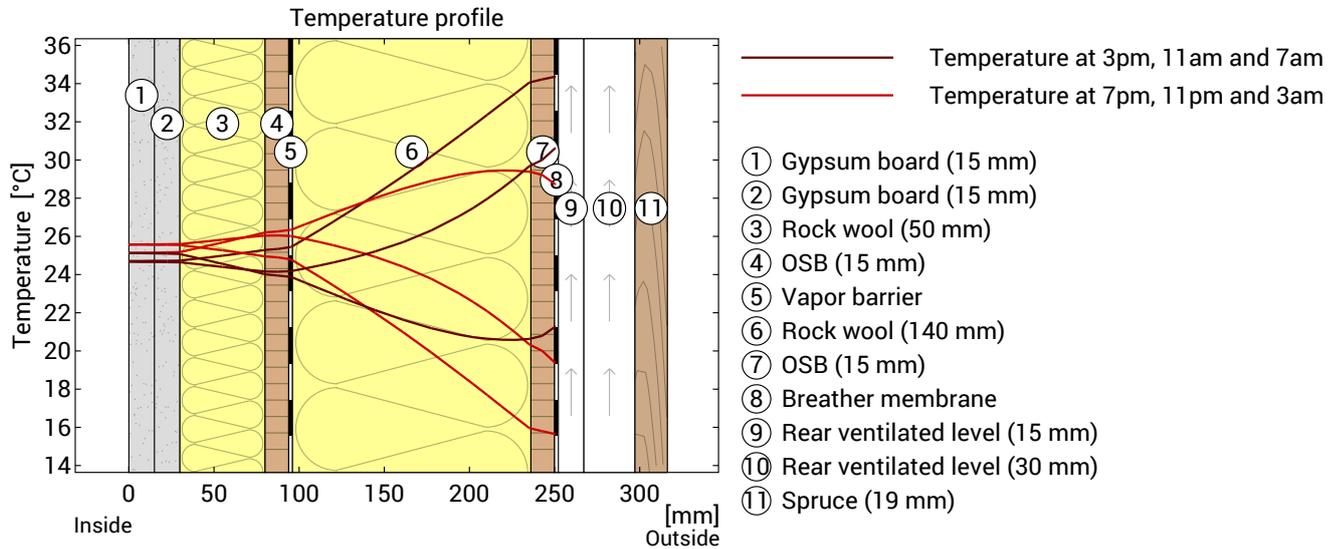
In the case of inhomogeneous constructions, such as skeleton-, stand- or frame constructions, as well as in wooden beam, rafter or half-timbered constructions or the like, the one-dimensional diffusion calculations are only to be demonstrated for the compartment area. Exceptional cases are special constructions in which, for example, The diffusion-inhibiting layer is also laid section-wise over the outer area. In these exceptional cases, the calculation performed here is invalid.

DIN 4108-3 describes in Section 5.3 components for which no moisture proofing is required as there is no risk of condensation water or the method is not suitable for the assessment. It is not possible to assess whether the component under test is underneath.

Par_Ext_TF, U=0,22 W/(m²K)

Heat protection

The following results are properties of the tested component alone and do not make any statement about the heat protection of the entire room:



Top: Temperature profile within the component at different times. From top to bottom, brown lines: at 3 pm, 11 am and 7 am and red lines at 7 pm, 11 pm and 3 am.

Bottom: Temperature on the outer (red) and inner (blue) surface in the course of a day. The arrows indicate the location of the temperature maximum values. The maximum of the inner surface temperature should preferably occur during the second half of the night.

Phase shift*	10,5 h	Heat storage capacity (whole component):	76 kJ/m²K
Amplitude attenuation **	18,0	Thermal capacity of inner layers:	42 kJ/m²K
TAV ***	0,056		

* The phase shift is the time in hours after which the temperature peak of the afternoon reaches the component interior.

** The amplitude attenuation describes the attenuation of the temperature wave when passing through the component. A value of 10 means that the temperature on the outside varies 10x stronger than on the inside, e.g. outside 15-35 °C, inside 24-26 °C.

*** The temperature amplitude ratio TAV is the reciprocal of the attenuation: TAV = 1 / amplitude attenuation

Note: The heat protection of a room is influenced by several factors, but essentially by the direct solar radiation through windows and the total amount of heat storage capacity (including floor, interior walls and furniture). A single component usually has only a very small influence on the heat protection of the room.

The calculations presented above have been created for a 1-dimensional cross-section of the component.

Par_Ext_TF - Sem camada de serviço

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,130
1	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
2	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
3	OSB	1,50	0,120	0,125
4	Vapor barrier	0,02	0,400	0,001
5	Rock wool	14,00	0,037	3,784
	Pine (12%)	14,00	0,130	1,077
6	OSB	1,50	0,120	0,125
7	Breather membrane	0,06	0,300	0,002
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Ventilation level

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 3,723 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,553 \text{ m}^2\text{K/W}$.

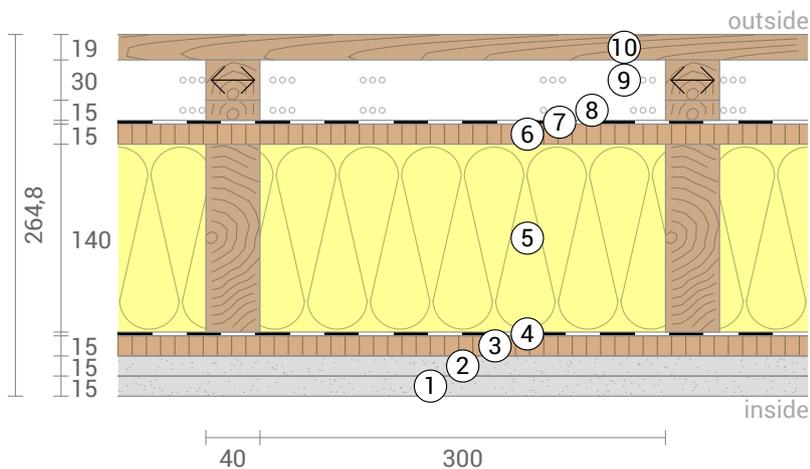
Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,048$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 3,638 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 2,3%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Par_Int_Est_TF

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
4	OSB	1,50	0,120	0,125
5	Rock wool	14,00	0,037	3,784
	Pine (12%)	14,00	0,130	1,077
6	OSB	1,50	0,120	0,125
7	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
8	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
9	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 6,706 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 4,453 \text{ m}^2\text{K/W}$.

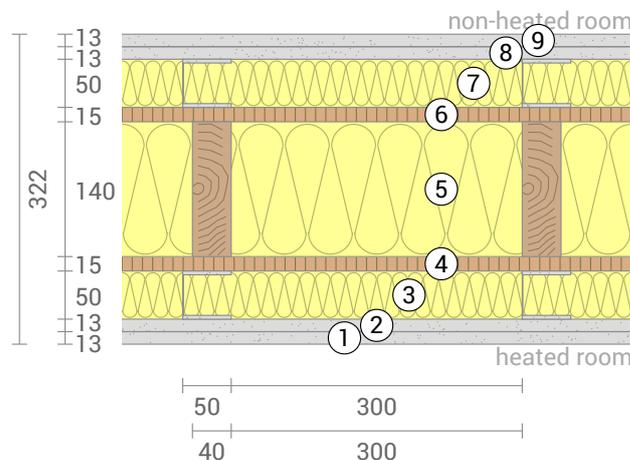
Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,506$ (maximum allowed: 1,5)

DIN 6946 must not be used because the ratio of the upper limit value of the thermal resistance to the lower limit value of the thermal resistance is more than 1.5.

Heat transfer coefficient from finite-elements method **U = 0,192 W/(m²K)**

numerical uncertainty ~0,41%

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 35 cm. This, however, is not true for at least layer 5 with a total width of 34 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.



Par_Int_Est_TF - Sem camadas de serviço

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	OSB	1,50	0,120	0,125
4	Rock wool	14,00	0,037	3,784
	Pine (12%)	14,00	0,130	1,077
5	OSB	1,50	0,120	0,125
6	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
7	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 3,823 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,638 \text{ m}^2\text{K/W}$.

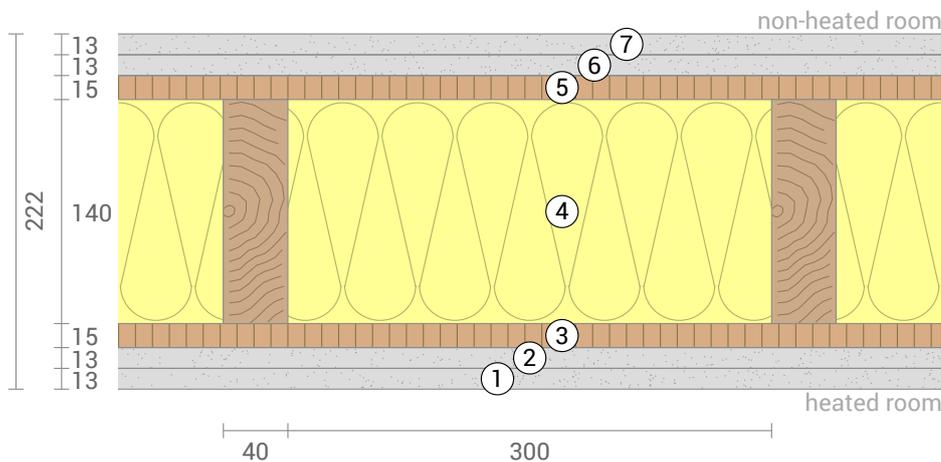
Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,051$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 3,731 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 2,5%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Par_Int_NEst_TF

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
4	OSB	1,50	0,120	0,125
5	Rock wool	9,00	0,037	2,432
	Pine (12%)	9,00	0,130	0,692
6	OSB	1,50	0,120	0,125
7	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
8	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
9	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{\text{tot};\text{upper}} = 5,552 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{\text{tot};\text{lower}} = 3,404 \text{ m}^2\text{K/W}$.

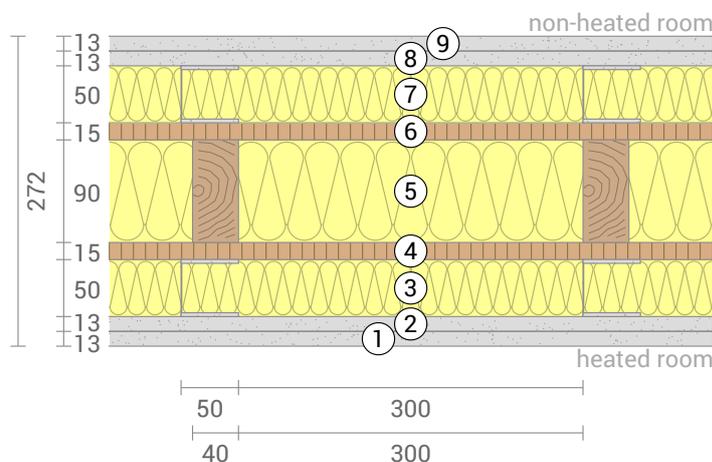
Check applicability: $R_{\text{tot};\text{upper}} / R_{\text{tot};\text{lower}} = 1,631$ (maximum allowed: 1,5)

DIN 6946 must not be used because the ratio of the upper limit value of the thermal resistance to the lower limit value of the thermal resistance is more than 1.5.

Heat transfer coefficient from finite-elements method **U = 0,240 W/(m²K)**

numerical uncertainty ~0,40%

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 35 cm. This, however, is not true for at least layer 5 with a total width of 34 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.



Par_Int_NEst_TF - Sem camadas de serviço

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	OSB	1,50	0,120	0,125
4	Rock wool	9,00	0,037	2,432
	Pine (12%)	9,00	0,130	0,692
5	OSB	1,50	0,120	0,125
6	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
7	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 2,751 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 2,595 \text{ m}^2\text{K/W}$.

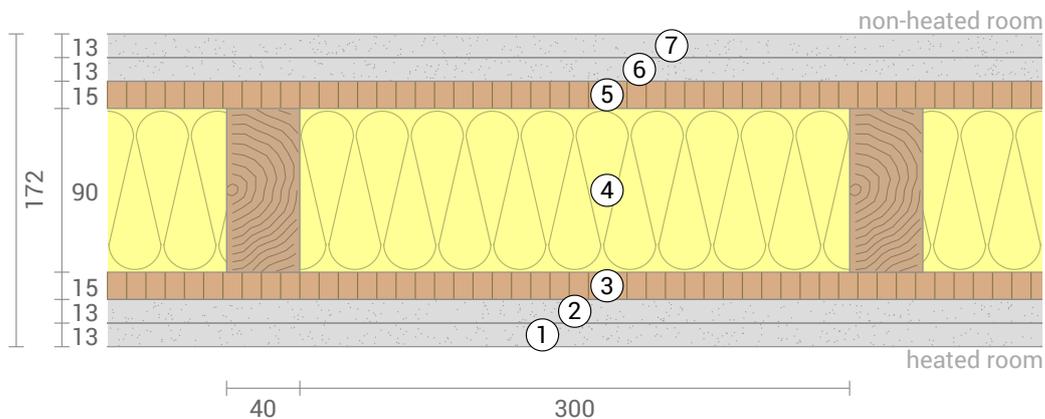
Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,060$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 2,673 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 2,9%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,37 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Par_Int_Dupla_TF

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
4	OSB	1,50	0,120	0,125
5	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
6	Rock wool	14,00	0,037	3,784
	Pine (12%)	14,00	0,130	1,077
7	OSB	1,50	0,120	0,125
8	Stationary air (unventilated)	5,00	0,278	0,180
9	OSB	1,50	0,120	0,125
10	Rock wool	14,00	0,037	3,784
	Pine (12%)	14,00	0,130	1,077
11	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
12	OSB	1,50	0,120	0,125
13	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
14	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
15	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Thermal transfer resistances of resting air layers were calculated as follows:

Layer 8: Thickness 5 cm, Width ∞ , DIN EN ISO 6946 Table 8, heat flow direction horizontally

Upper limit of thermal resistance $R_{\text{tot,upper}} = 10,335 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{\text{tot,lower}} = 7,843 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{\text{tot,upper}} / R_{\text{tot,lower}} = 1,318$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

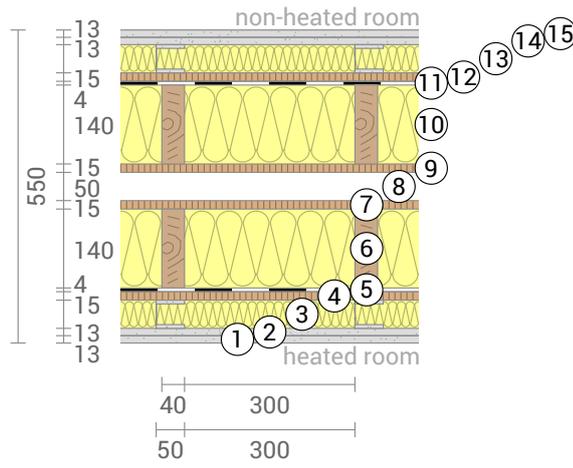
Thermal resistance $R_{\text{tot}} = (R_{\text{tot,upper}} + R_{\text{tot,lower}})/2 = 9,089 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 14%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{\text{tot}} = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 35 cm. This, however, is not true for at least layer 6 with a total width of 34 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.

Par_Int_Dupla_TF, U=0,11 W/(m²K)



Par_Int_Dupla_TF - Sem camadas de serviço

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	OSB	1,50	0,120	0,125
4	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
5	Rock wool	14,00	0,037	3,784
	Pine (12%)	14,00	0,130	1,077
6	OSB	1,50	0,120	0,125
7	Stationary air (unventilated)	5,00	0,278	0,180
8	OSB	1,50	0,120	0,125
9	Rock wool	14,00	0,037	3,784
	Pine (12%)	14,00	0,130	1,077
10	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
11	OSB	1,50	0,120	0,125
12	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
13	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Thermal transfer resistances of resting air layers were calculated as follows:

Layer 7: Thickness 5 cm, Width ∞ , DIN EN ISO 6946 Table 8, heat flow direction horizontally

Upper limit of thermal resistance $R_{tot,upper} = 7,330 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot,lower} = 7,008 \text{ m}^2\text{K/W}$.

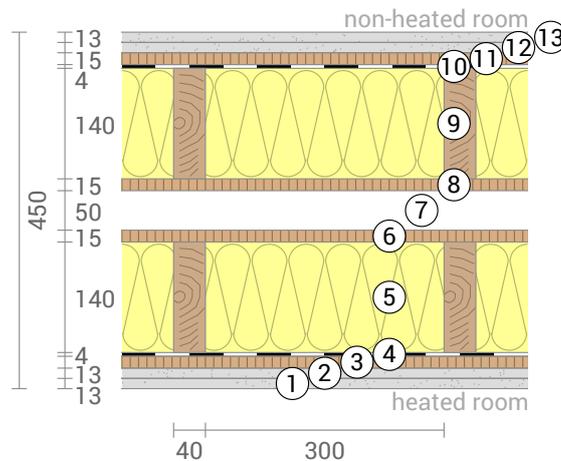
Check applicability: $R_{tot,upper} / R_{tot,lower} = 1,046$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot,upper} + R_{tot,lower})/2 = 7,169 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 2,2%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Par_Nuc_CLT

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Rock wool	5,00	0,037	1,351
4	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
5	CLT	7,20	0,130	0,554
6	Extruded polystyrene	3,00	0,035	0,857
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
7	CLT	7,20	0,130	0,554
8	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
9	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot,upper} = 3,708 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot,lower} = 3,587 \text{ m}^2\text{K/W}$.

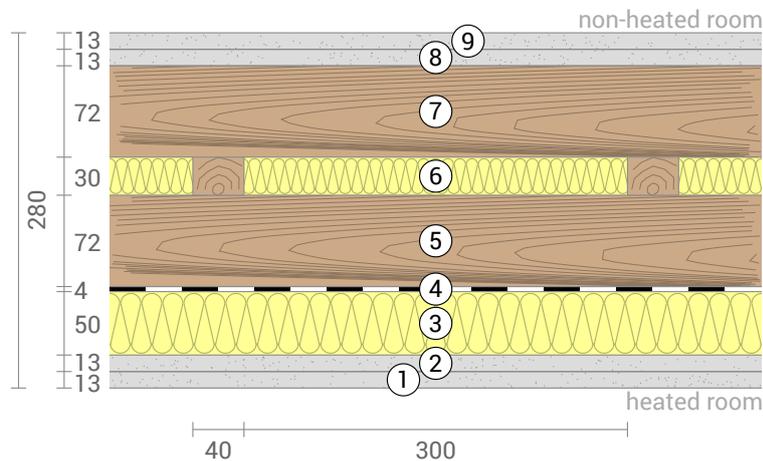
Check applicability: $R_{tot,upper} / R_{tot,lower} = 1,034$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot,upper} + R_{tot,lower})/2 = 3,647 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 1,7%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Par_Nuc_CLT - Sem camada de serviço

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
4	CLT	7,20	0,130	0,554
5	Extruded polystyrene	3,00	0,035	0,857
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
6	CLT	7,20	0,130	0,554
7	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
8	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot,upper} = 2,348 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot,lower} = 2,235 \text{ m}^2\text{K/W}$.

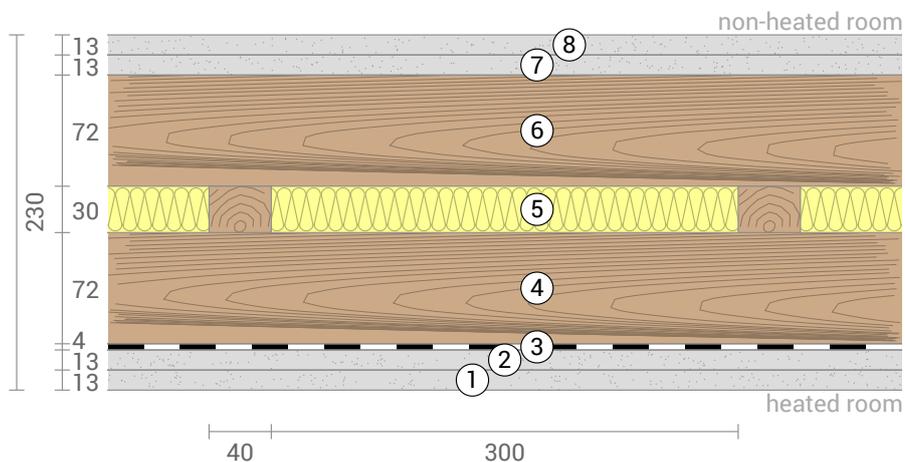
Check applicability: $R_{tot,upper} / R_{tot,lower} = 1,050$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot,upper} + R_{tot,lower})/2 = 2,291 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 2,4%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,44 \text{ W/(m}^2\text{K)}$



Par_Nuc_CLT - Acabamento CLT exposto

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Rock wool	5,00	0,037	1,351
4	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
5	CLT	7,20	0,130	0,554
6	Extruded polystyrene	3,00	0,035	0,857
7	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
7	CLT	7,20	0,130	0,554
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 3,604 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,483 \text{ m}^2\text{K/W}$.

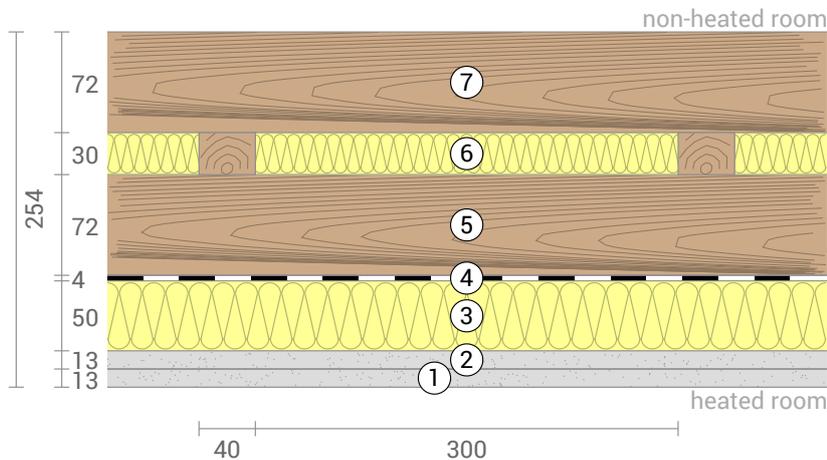
Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,035$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 3,543 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 1,7%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Par_Nuc_CLT - Sem camada de serviço - Acabamento CLT Exterior wall exposto

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
4	CLT	7,20	0,130	0,554
5	Extruded polystyrene	3,00	0,035	0,857
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
6	CLT	7,20	0,130	0,554
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 2,242 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 2,131 \text{ m}^2\text{K/W}$.

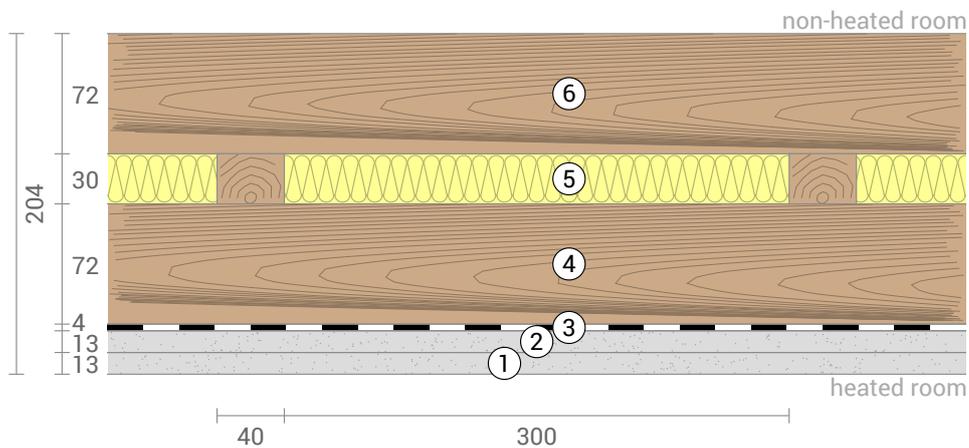
Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,052$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 2,187 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 2,5%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,46 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Par_Nuc_CLT_TF

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
4	OSB	1,50	0,120	0,125
5	Rock wool	9,00	0,037	2,432
	Pine (12%)	9,00	0,130	0,692
6	OSB	1,50	0,120	0,125
7	Extruded polystyrene	3,00	0,035	0,857
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
8	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
9	CLT	7,20	0,130	0,554
10	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
11	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{\text{tot;upper}} = 5,489 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{\text{tot;lower}} = 4,224 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{\text{tot;upper}} / R_{\text{tot;lower}} = 1,300$ (maximum allowed: 1,5)

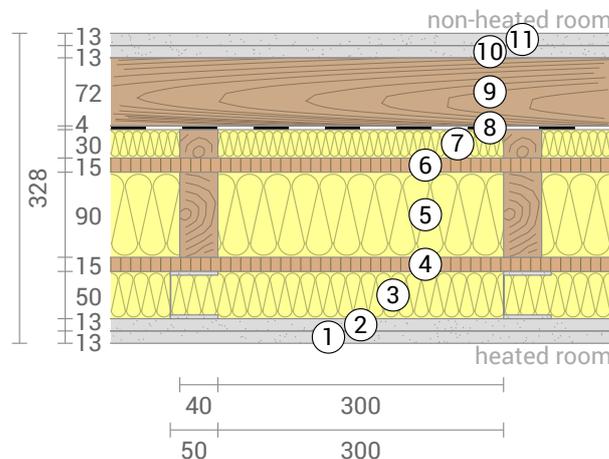
The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{\text{tot}} = (R_{\text{tot;upper}} + R_{\text{tot;lower}})/2 = 4,856 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 13%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{\text{tot}} = \mathbf{0,21 \text{ W/(m}^2\text{K)}}$

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 35 cm. This, however, is not true for at least layer 5 with a total width of 34 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.



Par_Nuc_CLT_TF - Sem camada de serviço

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	OSB	1,50	0,120	0,125
4	Rock wool	9,00	0,037	2,432
	Pine (12%)	9,00	0,130	0,692
5	OSB	1,50	0,120	0,125
6	Extruded polystyrene	3,00	0,035	0,857
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
7	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
8	CLT	7,20	0,130	0,554
9	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
10	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 4,059 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,809 \text{ m}^2\text{K/W}$.

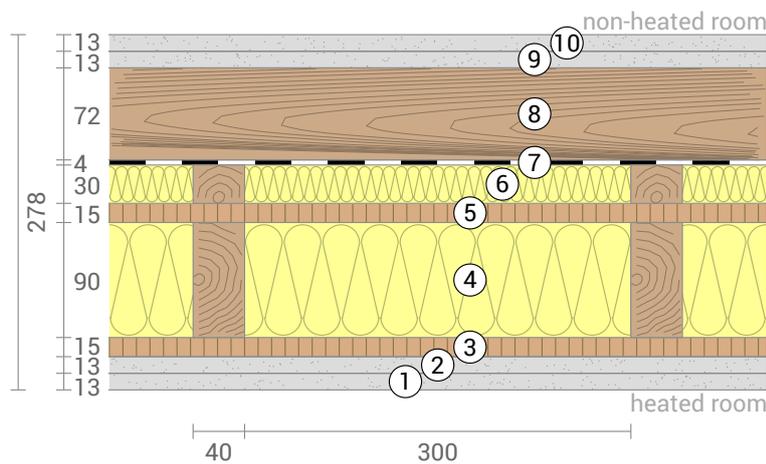
Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,066$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 3,934 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 3,2%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Par_Int_NEst_TF - Uma camada de serviço

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
4	OSB	1,50	0,120	0,125
5	Rock wool	9,00	0,037	2,432
	Pine (12%)	9,00	0,130	0,692
6	OSB	1,50	0,120	0,125
7	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
8	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 4,183 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,006 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,392$ (maximum allowed: 1,5)

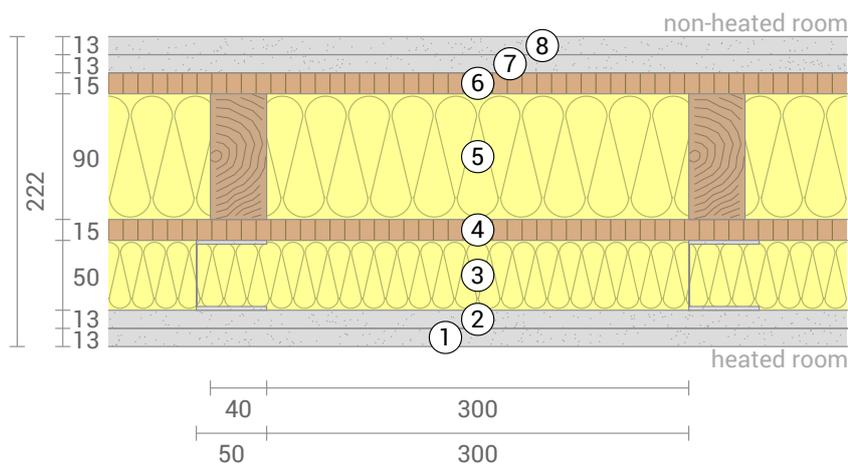
The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 3,595 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 16%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 35 cm. This, however, is not true for at least layer 5 with a total width of 34 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.



Par_Nuc_CLT_TF - Acabamento CLT exposto

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	Rock wool	5,00	0,037	1,351
	Steel (0,17%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 5 cm)	0,06	50,000	0,000
4	OSB	1,50	0,120	0,125
5	Rock wool	9,00	0,037	2,432
	Pine (12%)	9,00	0,130	0,692
6	OSB	1,50	0,120	0,125
7	Extruded polystyrene	3,00	0,035	0,857
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
8	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
9	CLT	7,20	0,130	0,554
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot,upper} = 5,380 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot,lower} = 4,120 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{tot,upper} / R_{tot,lower} = 1,306$ (maximum allowed: 1,5)

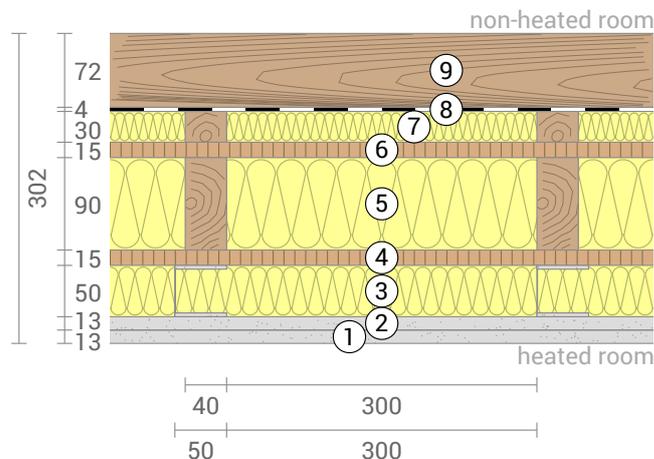
The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot,upper} + R_{tot,lower})/2 = 4,750 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 13%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 35 cm. This, however, is not true for at least layer 5 with a total width of 34 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.



Par_Nuc_CLT_TF - Sem camada de serviço - Acabamento CLT exposto

Exterior wall

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,130
1	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
2	Gypsum board	1,30	0,250	0,052
3	OSB	1,50	0,120	0,125
4	Rock wool	9,00	0,037	2,432
	Pine (12%)	9,00	0,130	0,692
5	OSB	1,50	0,120	0,125
6	Extruded polystyrene	3,00	0,035	0,857
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
7	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
8	CLT	7,20	0,130	0,554
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,130

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction horizontally

Rse: heat flow direction horizontally, outside: Non-heated room

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 3,945 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,705 \text{ m}^2\text{K/W}$.

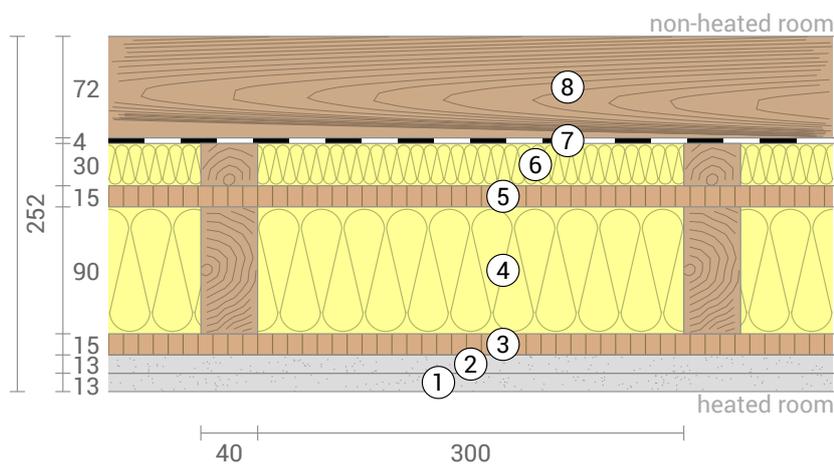
Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,065$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 3,825 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 3,1%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Pav_RC_CLT

Floor

U-value calculation

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,170
1	Pine	2,70	0,130	0,208
2	Rock wool	3,00	0,037	0,811
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
3	Waterproof membrane (ground)	0,04	0,400	0,001
4	XPS (ground)	10,00	0,036	2,778
5	Concrete	10,00	2,000	0,050
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,000

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction downward

Rse: heat flow direction downward, outside: Ground

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 3,940 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,833 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,028$ (maximum allowed: 1,5)

The procedure may be used.

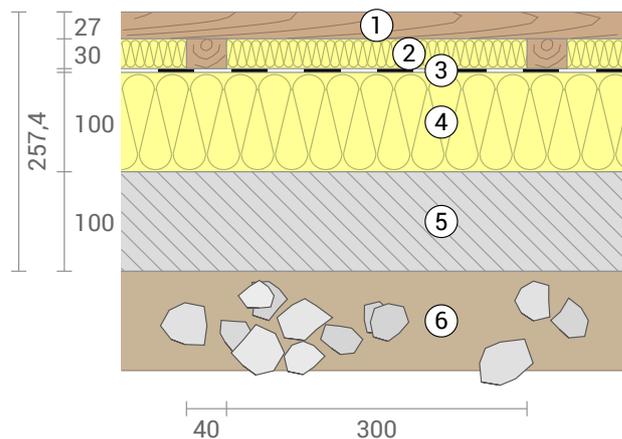
Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 3,887 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 1,4%

DIN 6946 may not be used for earth-contacting components. However, for the alternative method from DIN V 4108-6 Annex E, the required data on the size and position of this component are missing.

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

The constructive U-value was calculated. Heat losses across the ground or basement were not considered because the necessary data are missing.



Pav_Int_CLT

Ceiling

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,100
1	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
2	Inside air	5,00		0,100
	Steel (0,19%)	5,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 2 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 2 cm)	0,06	50,000	0,000
3	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
4	Rock wool	5,00	0,037	1,351
5	Stationary air (unventilated)	5,00	0,313	0,160
6	Rock wool	5,00	0,037	1,351
7	CLT	12,00	0,130	0,923
8	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
9	Rock wool	3,00	0,037	0,811
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
10	Pine	2,70	0,130	0,208
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,100

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction upwards

Rse: heat flow direction upwards, outside: Unheated roof space

Thermal transfer resistances of resting air layers were calculated as follows:

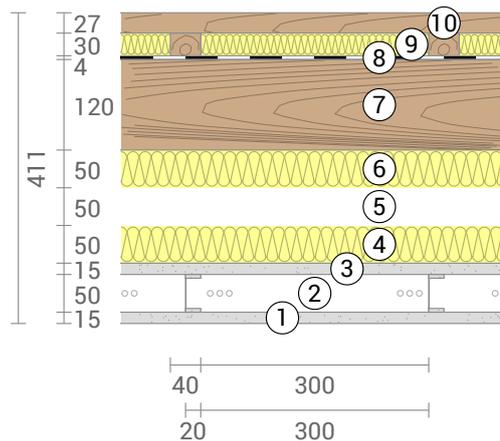
Layer 2.1: Thickness 5 cm, Width ∞ , DIN EN ISO 6946 Table 8, heat flow direction upwards

Layer 5: Thickness 5 cm, Width ∞ , DIN EN ISO 6946 Table 8, heat flow direction upwards

DIN 6946 should not be used because the component contains room or outside air.

Heat transfer coefficient from finite-elements method **U = 0,203 W/(m²K)**

numerical uncertainty ~0,032%



Pav_Int_CLT - Sem teto falso acustico (60 mm)

Ceiling

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,100
1	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
2	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
3	Rock wool	6,00	0,037	1,622
	Steel (0,18%)	6,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 2,7 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 2,7 cm)	0,06	50,000	0,000
4	CLT	12,00	0,130	0,923
5	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
6	Rock wool	3,00	0,037	0,811
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
7	Pine	2,70	0,130	0,208
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,100

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction upwards

Rse: heat flow direction upwards, outside: Unheated roof space

Upper limit of thermal resistance $R_{\text{tot;upper}} = 3,804 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{\text{tot;lower}} = 2,557 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{\text{tot;upper}} / R_{\text{tot;lower}} = 1,488$ (maximum allowed: 1,5)

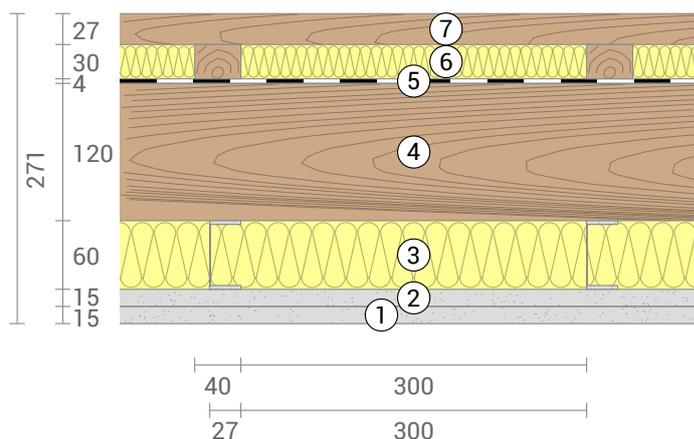
The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{\text{tot}} = (R_{\text{tot;upper}} + R_{\text{tot;lower}})/2 = 3,180 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 20%

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{\text{tot}} = 0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 34 cm. This, however, is not true for at least layer 3 with a total width of 32,7 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.



Pav_Int_CLT - Sem teto falso acustico (82 mm)

Ceiling

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,100
1	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
2	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
3	Rock wool	8,20	0,037	2,216
	Steel (0,18%)	8,20	50,000	0,002
	Steel (Width: 4 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 4 cm)	0,06	50,000	0,000
4	CLT	12,00	0,130	0,923
5	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
6	Rock wool	3,00	0,037	0,811
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
7	Pine	2,70	0,130	0,208
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,100

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction upwards

Rse: heat flow direction upwards, outside: Unheated roof space

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 4,395 \text{ m}^2\text{K/W}$.

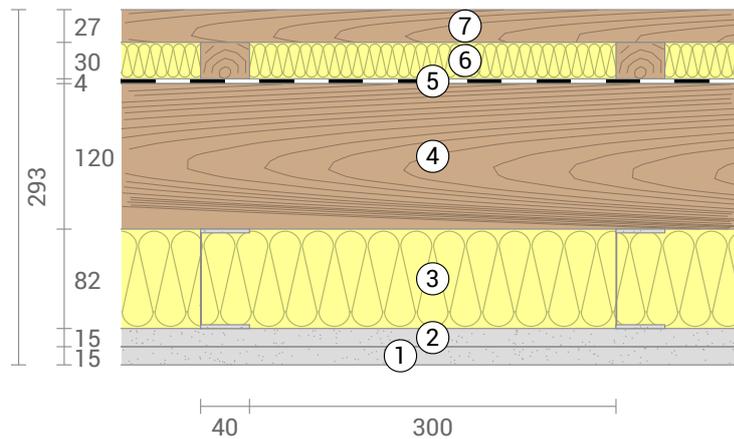
Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 2,732 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,608$ (maximum allowed: 1,5)

DIN 6946 must not be used because the ratio of the upper limit value of the thermal resistance to the lower limit value of the thermal resistance is more than 1.5.

Heat transfer coefficient from finite-elements method **U = 0,300 W/(m²K)**

numerical uncertainty ~0,39%



Pav_Int_CLT - Sem teto falso acustico (90 mm)

Ceiling

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,100
1	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
2	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
3	Rock wool	9,00	0,037	2,432
	Steel (0,17%)	9,00	50,000	0,002
	Steel (Width: 4,5 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 4,5 cm)	0,06	50,000	0,000
4	CLT	12,00	0,130	0,923
5	Acoustic membrane	0,40	0,400	0,010
6	Rock wool	3,00	0,037	0,811
	Pine (12%)	3,00	0,130	0,231
7	Pine	2,70	0,130	0,208
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,100

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction upwards

Rse: heat flow direction upwards, outside: Unheated roof space

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 4,613 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 2,806 \text{ m}^2\text{K/W}$.

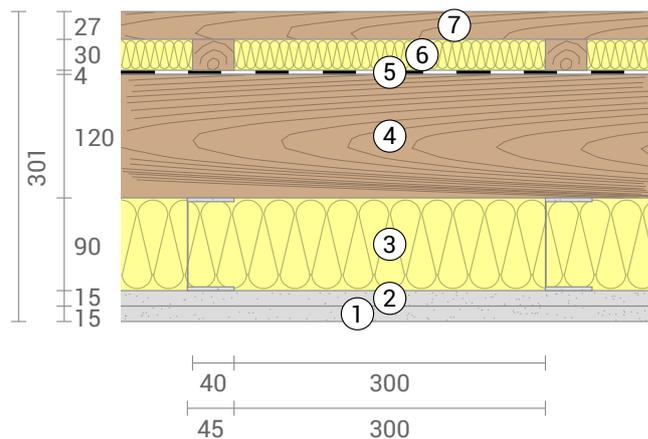
Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,644$ (maximum allowed: 1,5)

DIN 6946 must not be used because the ratio of the upper limit value of the thermal resistance to the lower limit value of the thermal resistance is more than 1.5.

Heat transfer coefficient from finite-elements method **U = 0,293 W/(m²K)**

numerical uncertainty ~0,47%

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 34,5 cm. This, however, is not true for at least layer 6 with a total width of 34 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.



Cob_CLT

Flat roof

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Thermal contact resistance inside (Rsi)			0,100
1	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
2	Gypsum board	1,50	0,250	0,060
3	Rock wool	6,00	0,037	1,622
	Steel (0,18%)	6,00	50,000	0,001
	Steel (Width: 2,7 cm)	0,06	50,000	0,000
	Steel (Width: 2,7 cm)	0,06	50,000	0,000
4	CLT	12,00	0,130	0,923
5	Vapor barrier (roof)	0,05	0,300	0,002
6	XPS (roof)	8,00	0,035	2,286
7	Breather membrane (roof)	0,10	0,400	0,003
	Thermal contact resistance outside (Rse)			0,100

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction upwards

Rse: heat flow direction upwards, outside: Ventilation level

Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 5,148 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 4,003 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,286$ (maximum allowed: 1,5)

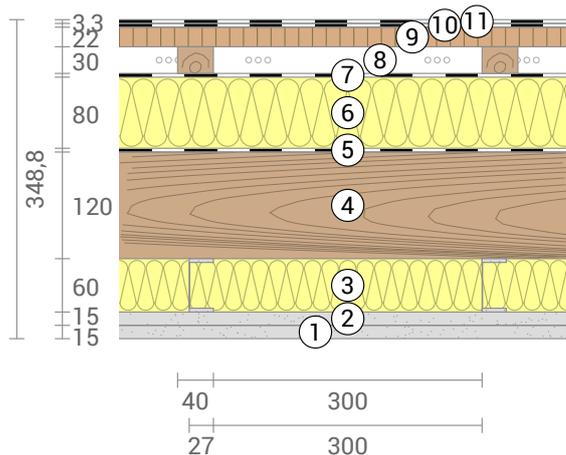
The procedure may be used.

Thermal resistance $R_{tot} = (R_{tot;upper} + R_{tot;lower})/2 = 4,575 \text{ m}^2\text{K/W}$

Estimated maximum relative uncertainty according to section 6.7.2.5: 13%

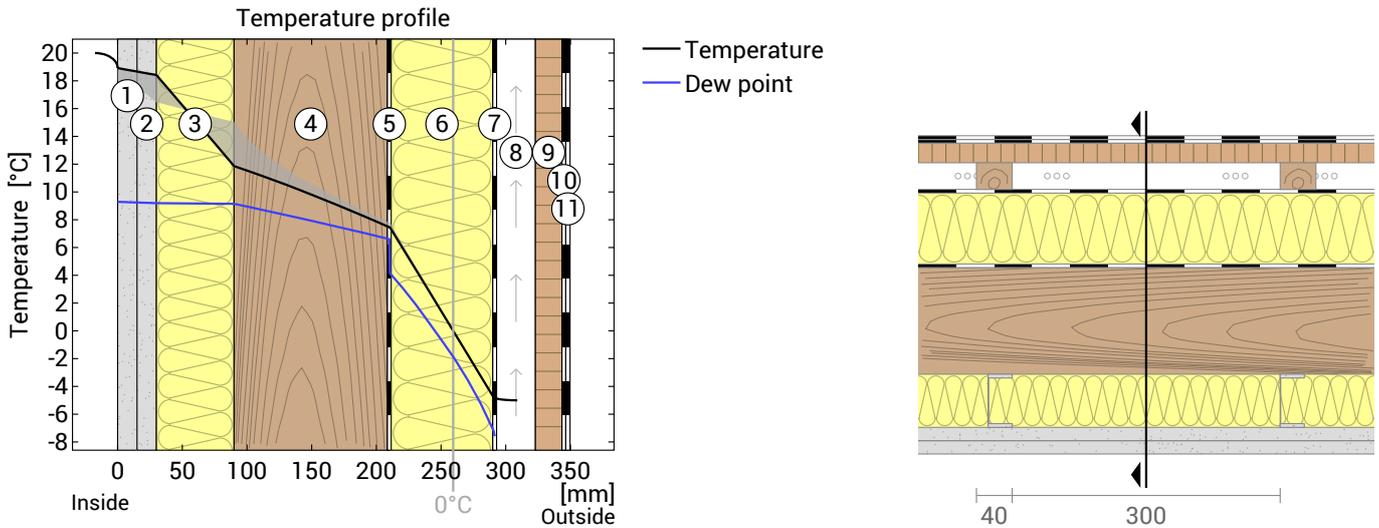
Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

This component includes several inhomogeneous layers of different overall width. For all the calculations it was assumed that the layer arrangement is repeated in width all 34 cm. This, however, is not true for at least layer 3 with a total width of 32,7 cm and can cause increased inaccuracy of the U-value.



Cob_CLT, U=0,22 W/(m²K)

Temperature profile



- | | | |
|------------------------|---------------------------------|--|
| ① Gypsum board (15 mm) | ⑤ Vapor barrier | ⑨ Cement Bonded Particle Board (22 mm) |
| ② Gypsum board (15 mm) | ⑥ XPS (80 mm) | ⑩ Waterproof base coat |
| ③ Rock wool (60 mm) | ⑦ Breather membrane | ⑪ Waterproof coating |
| ④ CLT (120 mm) | ⑧ Rear ventilated level (30 mm) | |

Left: Temperature and dew-point temperature at the place marked in the right figure. The dew-point indicates the temperature, at which water vapour condensates. As long as the temperature of the component is everywhere above the dew point, no condensation occurs. If the curves have contact, condensation occurs at the corresponding position.

Right: The component, drawn to scale.

Layers (from inside to outside)

#	Material	λ [W/mK]	R [m²K/W]	Temperatur [°C]		Weight [kg/m²]
				min	max	
	Thermal contact resistance*		0,250	18,0	20,0	
1	1,5 cm Gypsum board	0,250	0,060	17,4	18,9	10,2
2	1,5 cm Gypsum board	0,250	0,060	16,4	18,7	10,2
3	6 cm Rock wool	0,037	1,622	11,8	18,4	3,6
	6 cm Steel (0,18%)	50,000	0,001	15,1	16,4	1,0
	0,06 cm Steel (Width: 2,7 cm)	50,000	0,000	14,8	15,1	0,5
	0,06 cm Steel (Width: 2,7 cm)	50,000	0,000	16,4	16,7	0,5
4	12 cm CLT	0,130	0,923	7,4	15,1	56,5
5	0,05 cm Vapor barrier (roof)	0,300	0,002	7,4	7,8	0,2
6	8 cm XPS (roof)	0,035	2,286	-4,8	7,8	2,8
7	0,1 cm Breather membrane (roof)	0,400	0,003	-4,8	-4,8	0,3
	Thermal contact resistance*		0,040	-5,0	-4,8	
8	3 cm Rear ventilated level (outside air)			-5,0	-5,0	0,0
9	2,2 cm Cement Bonded Particle Board			-5,0	-5,0	29,7
10	0,2 cm Waterproof base coat			-5,0	-5,0	2,5
11	0,33 cm Waterproof coating			-5,0	-5,0	3,3
34,88 cm Whole component			4,537			123,3

*Thermal contact resistances according to DIN 4108-3 for moisture protection and temperature profile. The values for the U-value calculation can be found on the page 'U-value calculation'.

Surface temperature inside (min / average / max):	18,0°C	18,6°C	18,9°C
Surface temperature outside (min / average / max):	-4,8°C	-4,8°C	-4,8°C

Cob_CLT, U=0,22 W/(m²K)

Moisture proofing

For the calculation of the amount of condensation water, the component was exposed to the following constant climate for 90 days: inside: 20°C und 50% Humidity; outside: -5°C und 80% Humidity. This climate complies with DIN 4108-3.

This component is free of condensate under the given climate conditions.

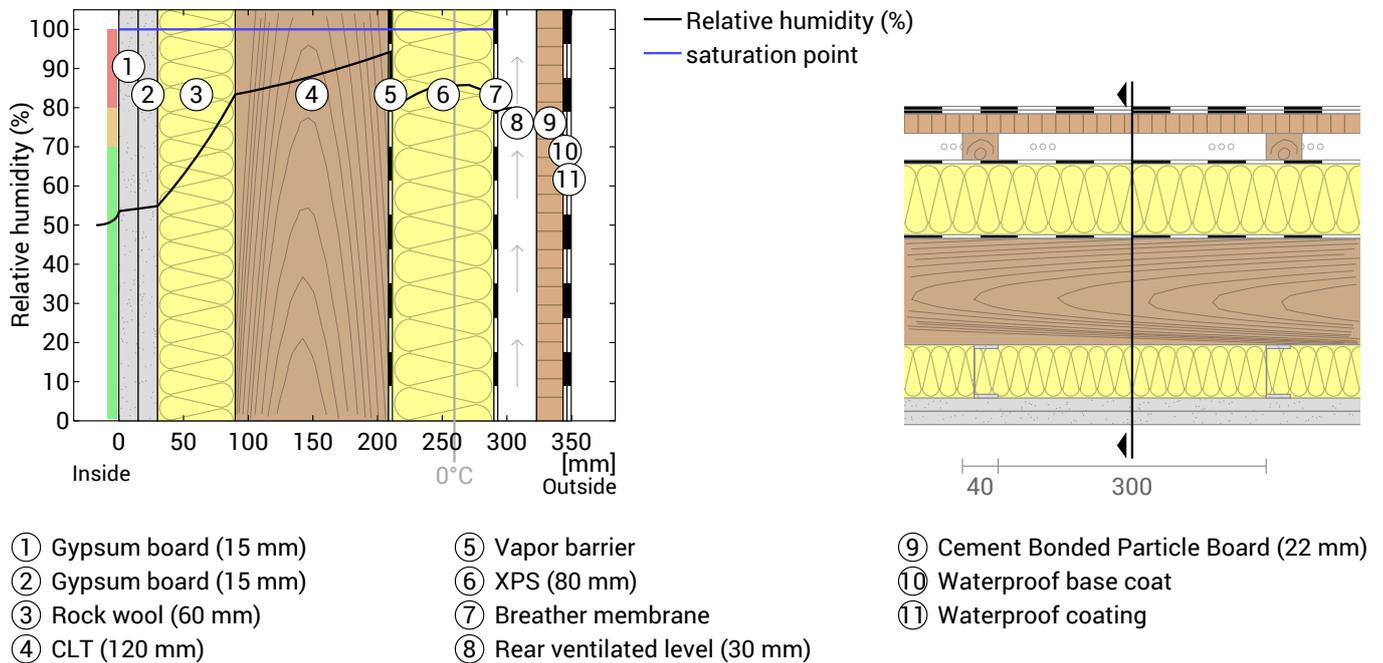
Drying reserve according to DIN 4108-3:2018: 487 g/(m²a)
 At least required by DIN 68800-2: 250 g/(m²a)

#	Material	sd-value [m]	Condensate		Weight
			[kg/m²]	[Gew.-%]	[kg/m²]
1	1,5 cm Gypsum board	0,06	-		10,2
2	1,5 cm Gypsum board	0,06	-		10,2
3	6 cm Rock wool	0,06	-		3,6
	6 cm Steel (0,18%)	15,00	-		1,0
	0,06 cm Steel (Width: 2,7 cm)	1500	-		0,5
	0,06 cm Steel (Width: 2,7 cm)	1500	-		0,5
4	12 cm CLT	3,00	-	-	56,5
5	0,05 cm Vapor barrier (roof)	2,50	-		0,2
6	8 cm XPS (roof)	8,00	-		2,8
7	0,1 cm Breather membrane (roof)	0,20	-		0,3
	34,88 cm Whole component	15,00			123,3

Humidity

The temperature of the inside surface is 18,0 °C leading to a relative humidity on the surface of 57%. Mould formation is not expected under these conditions.

The following figure shows the relative humidity inside the component.



Notes: Calculation using the Ubakus 2D-FE method. Convection and the capillarity of the building materials were not considered. The drying time may take longer under unfavorable conditions (shading, damp / cool summers) than calculated here.

Cob_CLT, U=0,22 W/(m²K)

Moisture protection in accordance with DIN 4108-3:2018 Appendix A

This moisture proofing is only valid for **non-air-conditioned** residential buildings.

In the case of roof structures with **tile coverings and wooden gratings**, this standard may not be applied. Whether this construction falls under it, is to be examined by the planner.

Please note the hints at the end of these moisture proofing calculations.

#	Material	λ [W/mK]	R [m²K/W]	sd [m]	ρ [kg/m³]	T [°C]	ps [Pa]	Σ sd [m]
Thermal contact resistance			0,250			18,81	2171	0
1	1,5 cm Gypsum board	0,250	0,060	0,06	680	18,52	2132	0,06
2	1,5 cm Gypsum board	0,250	0,060	0,06	680	18,24	2094	0,12
3	6 cm Rock wool	0,037	1,622	0,06	60	10,51	1270	0,18
4	12 cm CLT	0,130	0,923	3	471	6,11	942	3,18
5	0,05 cm Vapor barrier (roof)	0,300	0,002	2,5	320	6,10	941	5,68
6	8 cm XPS (roof)	0,035	2,286	8	35	-4,80	408	13,7
7	0,1 cm Breather membrane (roof)	0,400	0,003	0,2	340	-4,81	408	13,9
Thermal contact resistance			0,040					

Temperature (T), vapor saturation pressure (ps), and the sum of the sd-values (Σ sd) apply to the layer boundary.

Relative air humidity on the surface

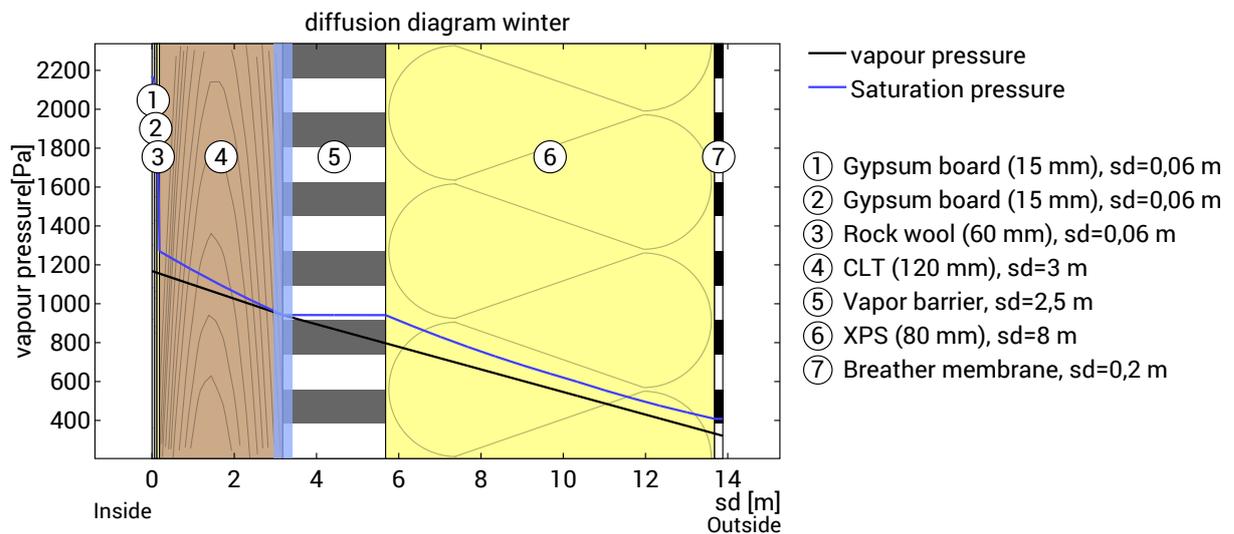
The relative humidity on the interior surface is 54%. Requirements for the prevention of building material corrosion depend on material and coating and have not been investigated.



Dew period (winter)

Boundary conditions

Vapor pressure inside at 20°C and 50% humidity	$p_i = 1168 \text{ Pa}$
Vapor pressure outside at -5°C and 80% humidity	$p_e = 321 \text{ Pa}$
Duration of condensation period (90 days)	$t_c = 7776000 \text{ s}$
Water vapor diffusion coefficient in static air	$\delta_0 = 2.0E-10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
sd-value (Whole component.)	$s_{de} = 13,88 \text{ m}$



Condensation area c_1 : Layer boundary between CLT and Vapor barrier (roof)
at $s_{d,c1}=3,18 \text{ m}$; $p_{c1}=942 \text{ Pa}$; $x_1=21 \text{ cm}$

Condensate amount: $M_c = t_c * \delta_0 * ((p_i - p_{c1})/s_{d,c1} - (p_{c1} - p_e)/(s_{de} - s_{d,c1})) = 0,020 \text{ kg/m}^2$

Für Schicht CLT wurde noch kein Wasseraufnahmekoeffizient hinterlegt. Es wird deshalb angenommen, dass mindestens eine Schicht nicht kapillar wasseraufnahmefähig ist.

Für Schicht Vapor barrier (roof) wurde noch kein Wasseraufnahmekoeffizient hinterlegt. Es wird deshalb angenommen, dass mindestens eine Schicht nicht kapillar wasseraufnahmefähig ist.

The maximum allowed amount of condensation water is at least $0,5 \text{ kg/m}^2$.

Total amount of condensate: $M_c = 0,020 \text{ kg/m}^2$



Increase of the mass-related moisture content in wood and wood materials

Assuming that the condensation water is completely applied to the layer 'CLT' with the bulk density $\rho = 471 \text{ kg/m}^3$, the following increase in the mass-related moisture content Δu in M.-% is obtained:

$$\Delta u = M_c / (\rho * d) * 100\% = 0,020 / (471 * 0,12) * 100\% = 0,036\%$$

Maximum allowed increase at Holz: 5%

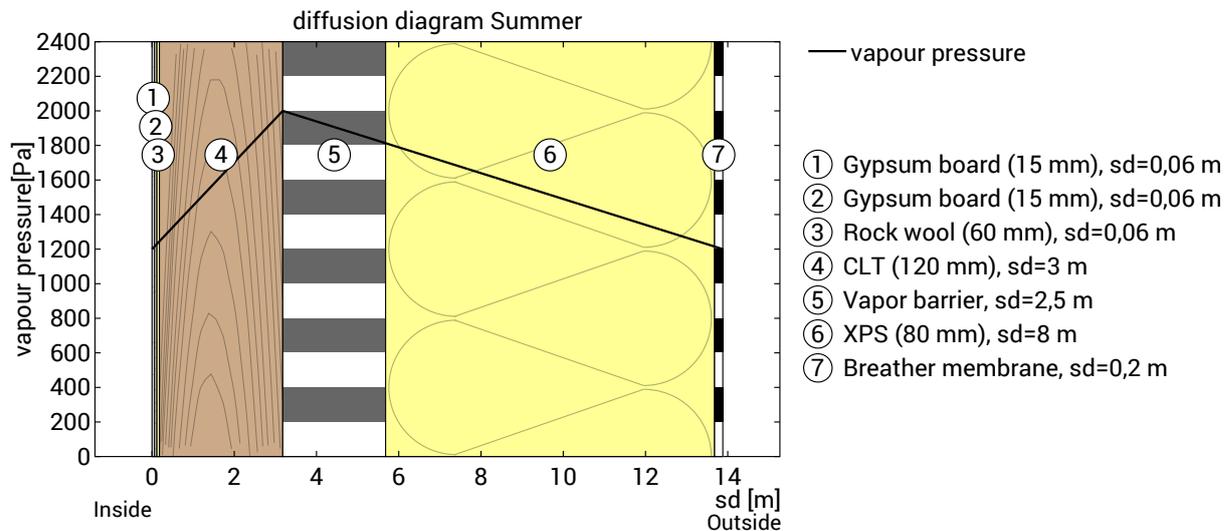


Evaporation period (summer)

Boundary conditions

Interior vapor pressure	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Exterior vapor pressure	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Saturation vapour pressure in the condensation area	$p_s = 2000 \text{ Pa}$ (Roof against outside air)
Length of drying season (90 days)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$

sd-values remain unchanged.



Maximum possible evaporation mass

$$M_{ev} = t_c * \delta_0 * ((p_s - p_i) / s_{d_{c1}} + (p_s - p_e) / (s_{d_e} - s_{d_{c1}})) = 0,508 \text{ kg/m}^2$$

The condensation amount of $0,020 \text{ kg/m}^2$ can dry completely.



Drying reserve (DIN 68800-2)

$$M_r = (M_{ev} - M_c) * 1000 = 487 \text{ g/m}^2/\text{a}$$

Minimum requested for roofs: $250 \text{ g/m}^2/\text{a}$



Evaluation according to DIN 4108-3

The component is permissible regarding the moisture protection.

Hints

In the case of inhomogeneous constructions, such as skeleton-, stand- or frame constructions, as well as in wooden beam, rafter or half-timbered constructions or the like, the one-dimensional diffusion calculations are only to be demonstrated for the compartment area. Exceptional cases are special constructions in which, for example, The diffusion-inhibiting layer is also laid section-wise over the outer area. In these exceptional cases, the calculation performed here is invalid.

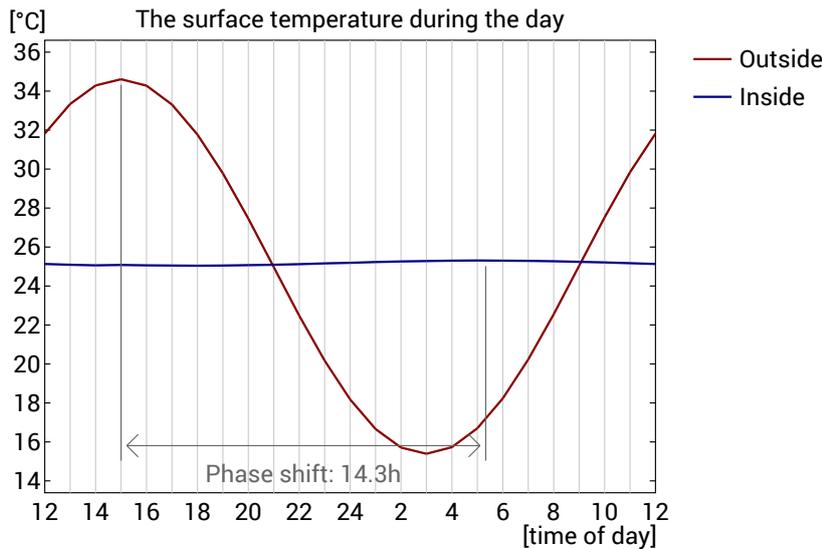
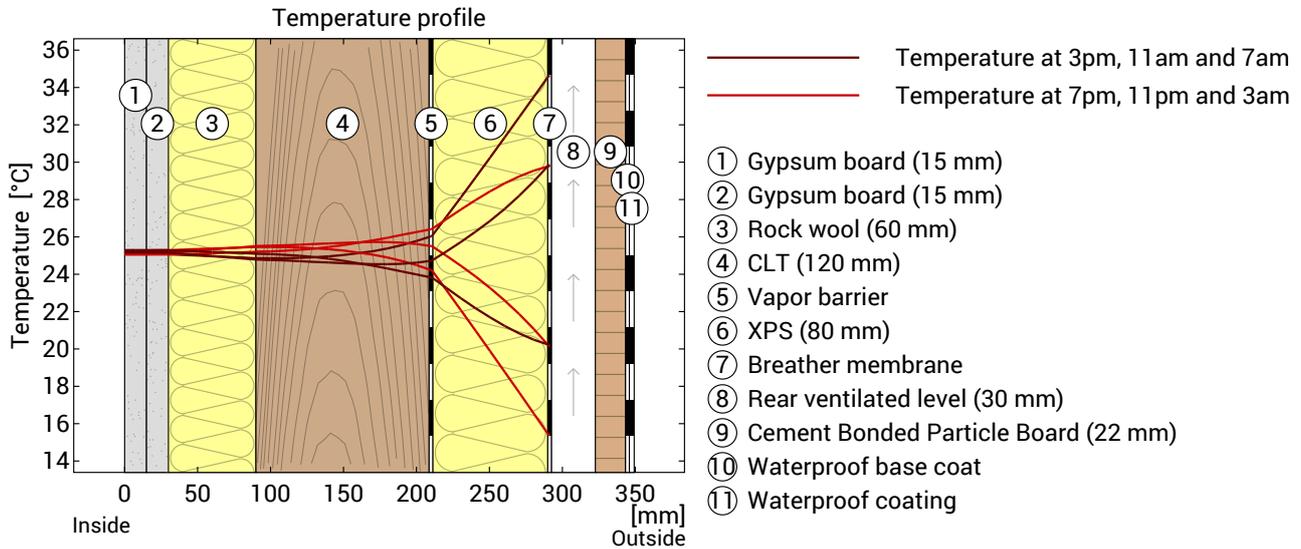
DIN 4108-3 describes in Section 5.3 components for which no moisture proofing is required as there is no risk of condensation water or the method is not suitable for the assessment. It is not possible to assess whether the component under test is underneath.

It is assumed that the roof is not predominantly shaded and does not have a very bright surface (as determined by the user). This has a positive effect on the drying capacity.

Cob_CLT, U=0,22 W/(m²K)

Heat protection

The following results are properties of the tested component alone and do not make any statement about the heat protection of the entire room:



Top: Temperature profile within the component at different times. From top to bottom, brown lines: at 3 pm, 11 am and 7 am and red lines at 7 pm, 11 pm and 3 am.

Bottom: Temperature on the outer (red) and inner (blue) surface in the course of a day. The arrows indicate the location of the temperature maximum values. The maximum of the inner surface temperature should preferably occur during the second half of the night.

Phase shift*	14,3 h	Heat storage capacity (whole component):	119 kJ/m²K
Amplitude attenuation **	71,4	Thermal capacity of inner layers:	78 kJ/m²K
TAV ***	0,014		

* The phase shift is the time in hours after which the temperature peak of the afternoon reaches the component interior.

** The amplitude attenuation describes the attenuation of the temperature wave when passing through the component. A value of 10 means that the temperature on the outside varies 10x stronger than on the inside, e.g. outside 15-35 °C, inside 24-26 °C.

*** The temperature amplitude ratio TAV is the reciprocal of the attenuation: TAV = 1 / amplitude attenuation

Note: The heat protection of a room is influenced by several factors, but essentially by the direct solar radiation through windows and the total amount of heat storage capacity (including floor, interior walls and furniture). A single component usually has only a very small influence on the heat protection of the room.

The calculations presented above have been created for a 1-dimensional cross-section of the component.

Cob_CLT - Acabamento CLT exposto

Flat roof

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,100
1	CLT	12,00	0,130	0,923
2	Vapor barrier (roof)	0,05	0,300	0,002
3	XPS (roof)	8,00	0,035	2,286
4	Breather membrane (roof)	0,10	0,400	0,003
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,100

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction upwards

Rse: heat flow direction upwards, outside: Ventilation level

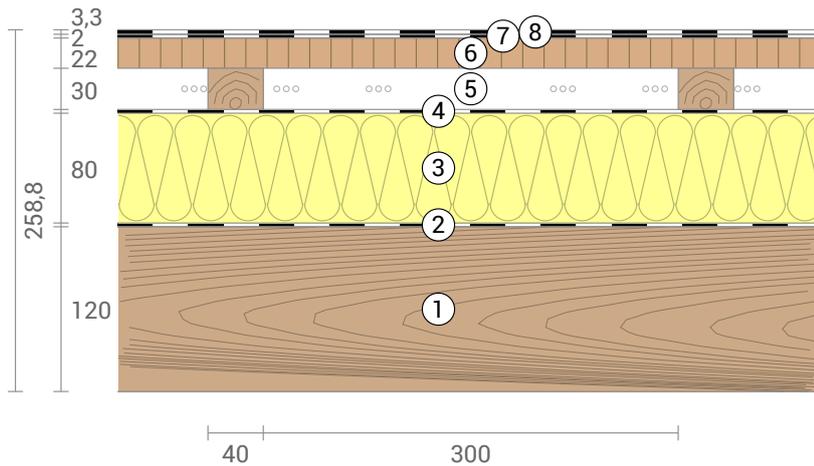
Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 3,413 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,413 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,000$ (maximum allowed: 1,5)

Thermal resistance $R_{tot} = 3,413 \text{ m}^2\text{K/W}$

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Cob_TAH

Roof construction

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,100
4	Spruce	1,00	0,130	0,077
5	XPS (roof)	12,00	0,035	3,429
6	Cement Bonded Particle Board	1,90	0,220	0,086
7	Breather membrane (roof)	0,10	0,400	0,003
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,100

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction upwards

Rse: heat flow direction upwards, outside: Ventilation level

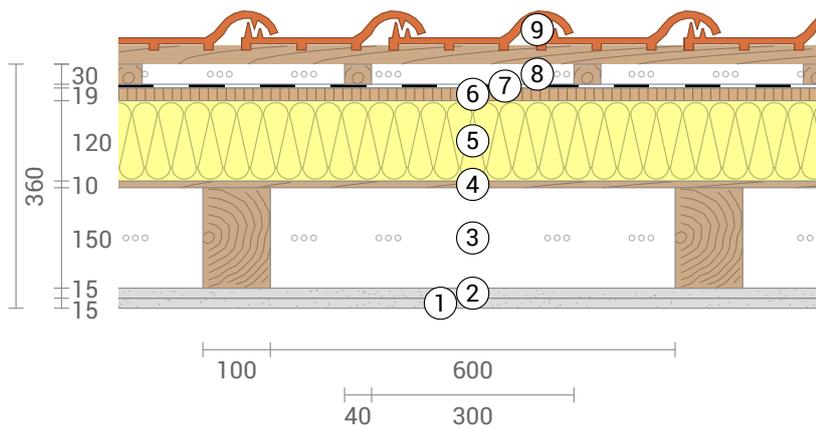
Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 3,794 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 3,794 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,000$ (maximum allowed: 1,5)

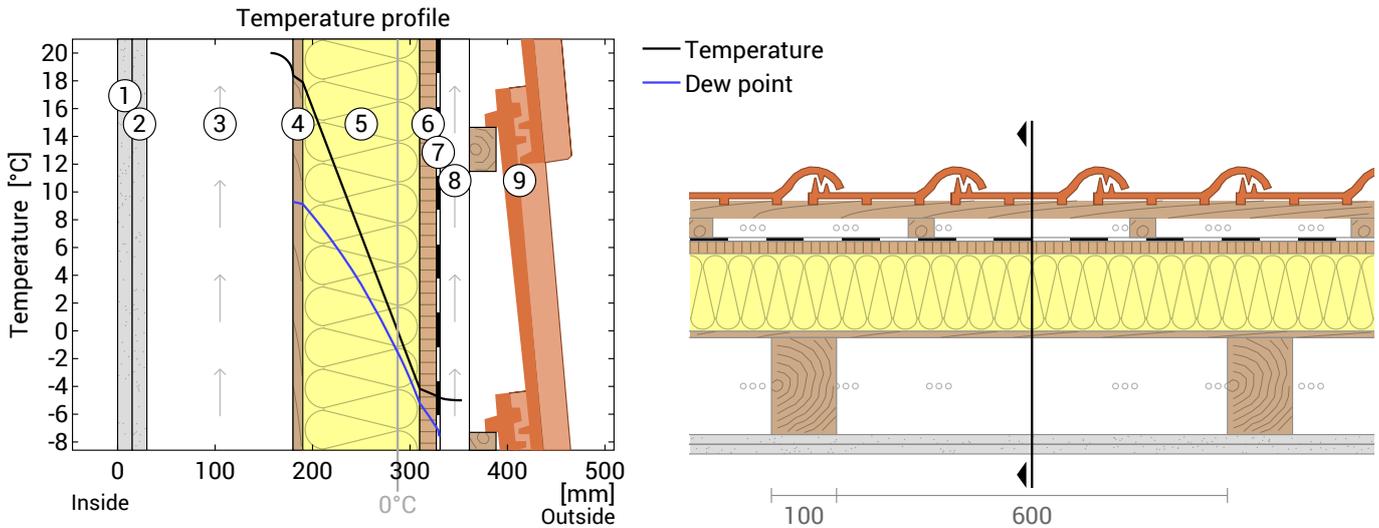
Thermal resistance $R_{tot} = 3,794 \text{ m}^2\text{K/W}$

Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Cob_TAH, U=0,26 W/(m²K)

Temperature profile



- | | | |
|----------------------------------|--|---------------------------------|
| ① Gypsum board (15 mm) | ④ Spruce (10 mm) | ⑦ Breather membrane |
| ② Gypsum board (15 mm) | ⑤ XPS (120 mm) | ⑧ Rear ventilated level (30 mm) |
| ③ Rear ventilated level (150 mm) | ⑥ Cement Bonded Particle Board (19 mm) | ⑨ Roofing tiles (103 mm) |

Left: Temperature and dew-point temperature at the place marked in the right figure. The dew-point indicates the temperature, at which water vapour condensates. As long as the temperature of the component is everywhere above the dew point, no condensation occurs. If the curves have contact, condensation occurs at the corresponding position.

Right: The component, drawn to scale.

Layers (from inside to outside)

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	Temperatur [°C]		Weight [kg/m ²]
				min	max	
1	1,5 cm Gypsum board			20,0	10,2	
2	1,5 cm Gypsum board			20,0	10,2	
3	15 cm Rear ventilated level (room air)			20,0	0,0	
	Thermal contact resistance*		0,250	18,4	20,0	
4	1 cm Spruce	0,130	0,077	17,9	18,4	4,5
5	12 cm XPS (roof)	0,035	3,429	-4,2	17,9	4,2
6	1,9 cm Cement Bonded Particle Board	0,220	0,086	-4,7	-4,2	25,7
7	0,1 cm Breather membrane (roof)	0,400	0,003	-4,7	-4,7	0,3
	Thermal contact resistance*		0,040	-5,0	-4,7	
8	3 cm Rear ventilated level (outside air)			-5,0	-5,0	0,0
9	10,3 cm Roofing tiles (clay)			-5,0	-5,0	51,5
46,3 cm Whole component			3,794			119,5

*Thermal contact resistances according to DIN 4108-3 for moisture protection and temperature profile. The values for the U-value calculation can be found on the page 'U-value calculation'.

Surface temperature inside (min / average / max): 18,4°C 18,4°C 18,4°C
 Surface temperature outside (min / average / max): -4,7°C -4,7°C -4,7°C

Cob_TAH, U=0,26 W/(m²K)

Moisture proofing

For the calculation of the amount of condensation water, the component was exposed to the following constant climate for 90 days: inside: 20°C und 50% Humidity; outside: -5°C und 80% Humidity. This climate complies with DIN 4108-3.

This component is free of condensate under the given climate conditions.

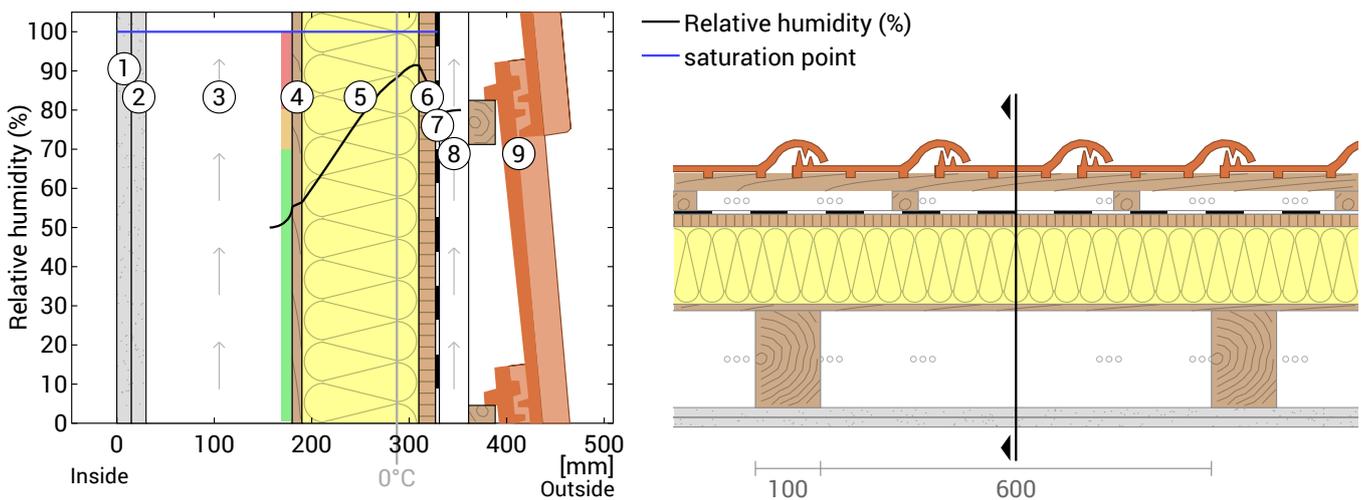
Drying reserve according to DIN 4108-3:2018: 655 g/(m²a)
 At least required by DIN 68800-2: 250 g/(m²a)

#	Material	sd-value [m]	Condensate		Weight [kg/m²]
			[kg/m²]	[Gew.-%]	
4	1 cm Spruce	0,20	-	-	4,5
5	12 cm XPS (roof)	12,00	-	-	4,2
6	1,9 cm Cement Bonded Particle Board	0,95	-	-	25,7
7	0,1 cm Breather membrane (roof)	0,20	-	-	0,3
46,3 cm Whole component		13,35			119,5

Humidity

The temperature of the inside surface is 18,4 °C leading to a relative humidity on the surface of 55%. Mould formation is not expected under these conditions.

The following figure shows the relative humidity inside the component.



- ① Gypsum board (15 mm)
- ② Gypsum board (15 mm)
- ③ Rear ventilated level (150 mm)
- ④ Spruce (10 mm)
- ⑤ XPS (120 mm)
- ⑥ Cement Bonded Particle Board (19 mm)
- ⑦ Breather membrane
- ⑧ Rear ventilated level (30 mm)
- ⑨ Roofing tiles (103 mm)

Notes: Calculation using the Ubakus 2D-FE method. Convection and the capillarity of the building materials were not considered. The drying time may take longer under unfavorable conditions (shading, damp / cool summers) than calculated here.

Cob_TAH, U=0,26 W/(m²K)

Moisture protection in accordance with DIN 4108-3:2018 Appendix A

This moisture proofing is only valid for **non-air-conditioned** residential buildings.

In the case of roof structures with **tile coverings and wooden gratings**, this standard may not be applied. Whether this construction falls under it, is to be examined by the planner.

Please note the hints at the end of these moisture proofing calculations.

#	Material	λ [W/mK]	R [m²K/W]	sd [m]	ρ [kg/m³]	T [°C]	ps [Pa]	Σ sd [m]
Thermal contact resistance			0,250			18,39	2115	0
4	1 cm Spruce	0,130	0,077	0,2	450	17,90	2050	0,2
5	12 cm XPS (roof)	0,035	3,429	12	35	-4,17	431	12,2
6	1,9 cm Cement Bonded Particle Board	0,220	0,086	0,95	1350	-4,73	411	13,1
7	0,1 cm Breather membrane (roof)	0,400	0,003	0,2	340	-4,74	410	13,3
Thermal contact resistance			0,040					

Temperature (T), vapor saturation pressure (ps), and the sum of the sd-values (Σ sd) apply to the layer boundary.

Relative air humidity on the surface

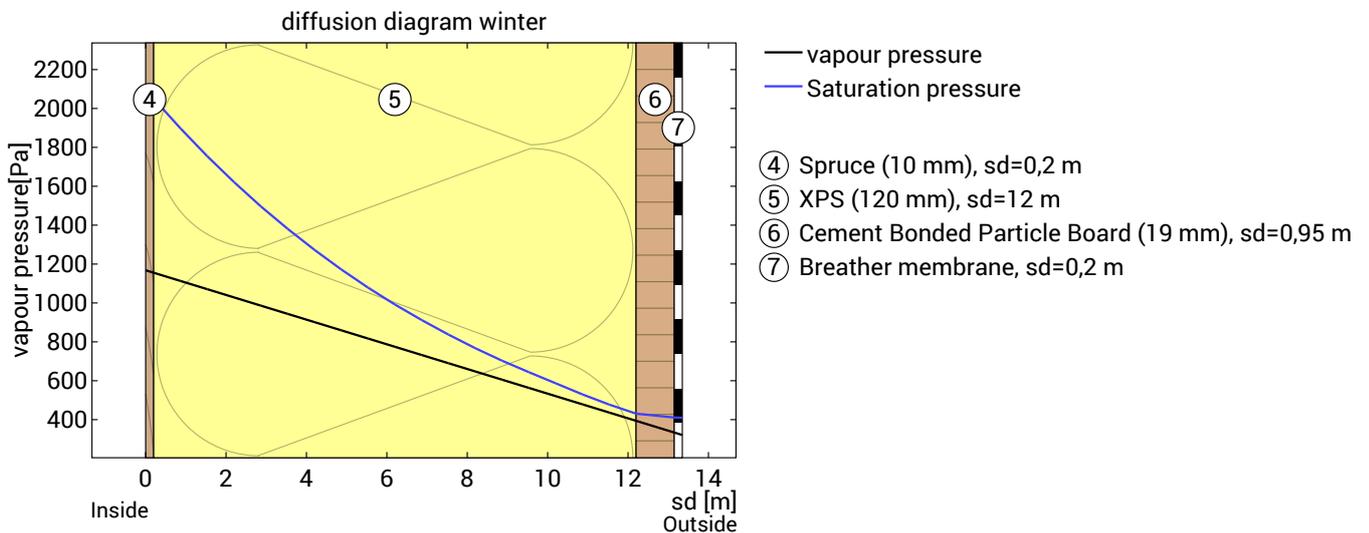
The relative humidity on the interior surface is 55%. Requirements for the prevention of building material corrosion depend on material and coating and have not been investigated.



Dew period (winter)

Boundary conditions

Vapor pressure inside at 20°C and 50% humidity	$p_i = 1168$ Pa
Vapor pressure outside at -5°C and 80% humidity	$p_e = 321$ Pa
Duration of condensation period (90 days)	$t_c = 7776000$ s
Water vapor diffusion coefficient in static air	$\delta_0 = 2.0E-10$ kg/(m*s*Pa)
sd-value (Whole component.)	$s_{de} = 13,35$ m



The section under investigation is free of condensate under the given climate conditions.



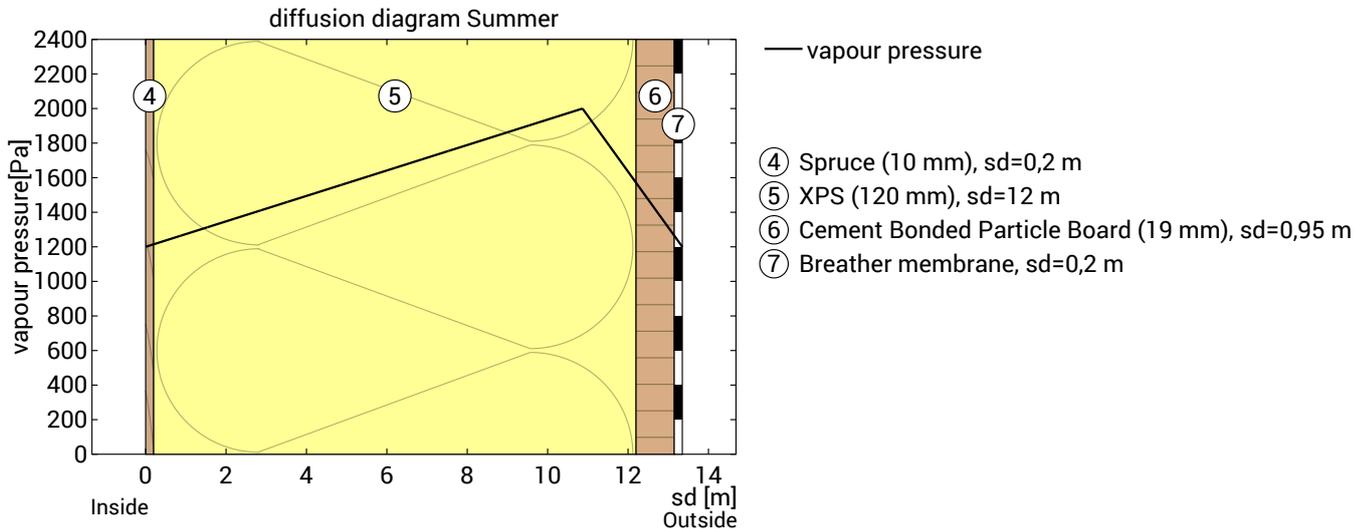
Calculate evaporation potential for the drying reserve in the dew period for the plane with the lowest evaporation potential: $s_d=10,87$ m; $p_s=530$ pa, within layer XPS (roof):

$$M_{ev, Tauperiode} = t_c * \delta_0 * ((p_s - p_i) / s_{d_{ev}} + (p_s - p_e) / (s_{d_e} - s_{d_{ev}})) = 0,039 \text{ kg/m}^2$$

Cob_TAH, U=0,26 W/(m²K)

Evaporation period (summer)

Boundary conditions	
Interior vapor pressure	pi = 1200 Pa
Exterior vapor pressure	pe = 1200 Pa
Saturation vapour pressure in the condensation area	ps = 2000 Pa (Roof against outside air)
Length of drying season (90 days)	tev = 7776000 s
sd-values remain unchanged.	



Condensate-free component: The maximum possible evaporation mass for the drying reserve is calculated. Consider the level that has the lowest evaporation potential in the dew period, at sd=10,87 m, within layer XPS (roof):

Evaporation mass: $M_{ev} = \delta_0 \cdot t_{ev} \cdot [(p_s - p_i) / s_d + (p_s - p_e) / (s_{de} - s_d)] = 0,62 \text{ kg/m}^2$

Drying reserve (DIN 68800-2)

Dew-water-free component: The evaporation potential of the dew period is also taken into account.

Drying reserve: $M_r = (M_{ev} + M_{ev, Tauperiode}) \cdot 1000 = 655 \text{ g/m}^2/\text{a}$

Minimum requested for roofs: 250 g/m²/a



Evaluation according to DIN 4108-3

The component is permissible regarding the moisture protection.

Hints

In the case of inhomogeneous constructions, such as skeleton-, stand- or frame constructions, as well as in wooden beam, rafter or half-timbered constructions or the like, the one-dimensional diffusion calculations are only to be demonstrated for the compartment area. Exceptional cases are special constructions in which, for example, The diffusion-inhibiting layer is also laid section-wise over the outer area. In these exceptional cases, the calculation performed here is invalid.

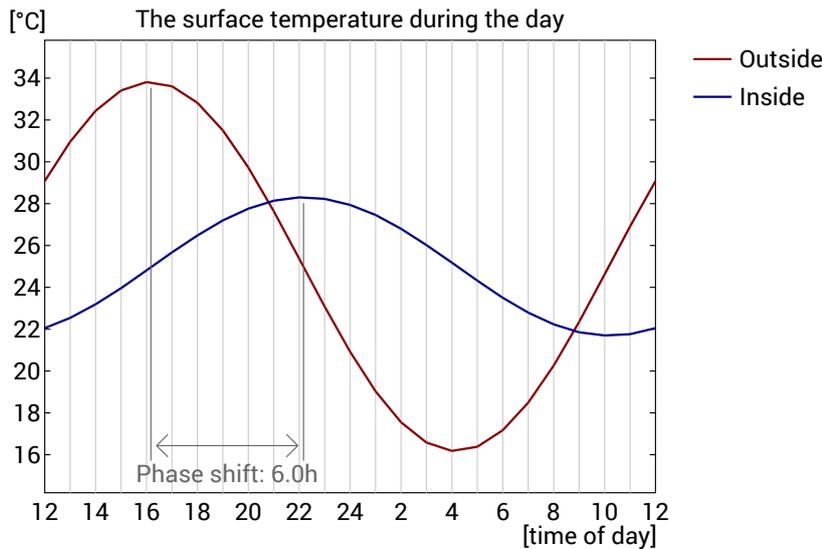
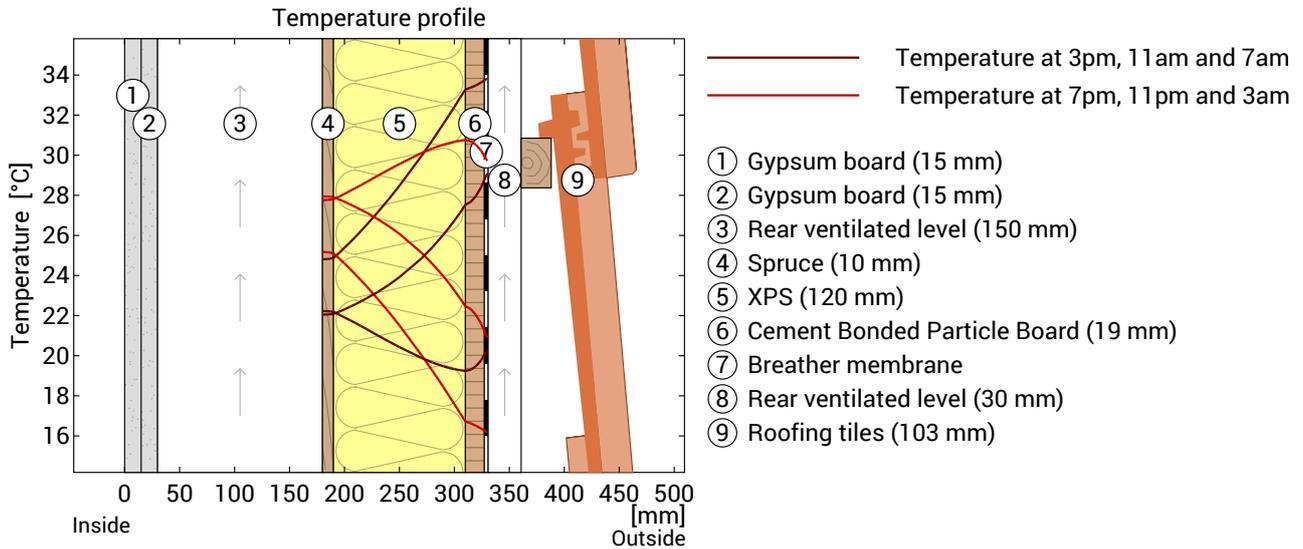
DIN 4108-3 describes in Section 5.3 components for which no moisture proofing is required as there is no risk of condensation water or the method is not suitable for the assessment. It is not possible to assess whether the component under test is underneath.

It is assumed that the roof is not predominantly shaded and does not have a very bright surface (as determined by the user). This has a positive effect on the drying capacity.

Cob_TAH, U=0,26 W/(m²K)

Heat protection

The following results are properties of the tested component alone and do not make any statement about the heat protection of the entire room:



Top: Temperature profile within the component at different times. From top to bottom, brown lines: at 3 pm, 11 am and 7 am and red lines at 7 pm, 11 pm and 3 am.

Bottom: Temperature on the outer (red) and inner (blue) surface in the course of a day. The arrows indicate the location of the temperature maximum values. The maximum of the inner surface temperature should preferably occur during the second half of the night.

Phase shift*	6,0 h	Heat storage capacity (whole component):	62 kJ/m²K
Amplitude attenuation **	2,7	Thermal capacity of inner layers:	11 kJ/m²K
TAV ***	0,375		

* The phase shift is the time in hours after which the temperature peak of the afternoon reaches the component interior.

** The amplitude attenuation describes the attenuation of the temperature wave when passing through the component. A value of 10 means that the temperature on the outside varies 10x stronger than on the inside, e.g. outside 15-35 °C, inside 24-26 °C.

*** The temperature amplitude ratio TAV is the reciprocal of the attenuation: TAV = 1 / amplitude attenuation

Note: The heat protection of a room is influenced by several factors, but essentially by the direct solar radiation through windows and the total amount of heat storage capacity (including floor, interior walls and furniture). A single component usually has only a very small influence on the heat protection of the room.

The calculations presented above have been created for a 1-dimensional cross-section of the component.

Var_CLT

Roof construction

U-Value calculation according to DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Thermal contact resistance inside (Rsi)				0,100
1	Spruce	1,90	0,130	0,146
2	XPS (roof)	6,00	0,035	1,714
3	CLT	12,00	0,130	0,923
4	XPS (roof)	6,00	0,035	1,714
Thermal contact resistance outside (Rse)				0,100

Thermal contact resistances have been taken from DIN 6946 Table 7.

Rsi: heat flow direction upwards

Rse: heat flow direction upwards, outside: Ventilation level

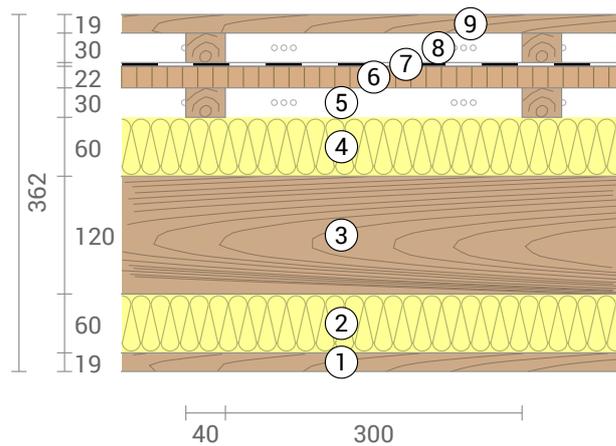
Upper limit of thermal resistance $R_{tot;upper} = 4,698 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lower limit of thermal resistance $R_{tot;lower} = 4,698 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Check applicability: $R_{tot;upper} / R_{tot;lower} = 1,000$ (maximum allowed: 1,5)

Thermal resistance $R_{tot} = 4,698 \text{ m}^2\text{K/W}$

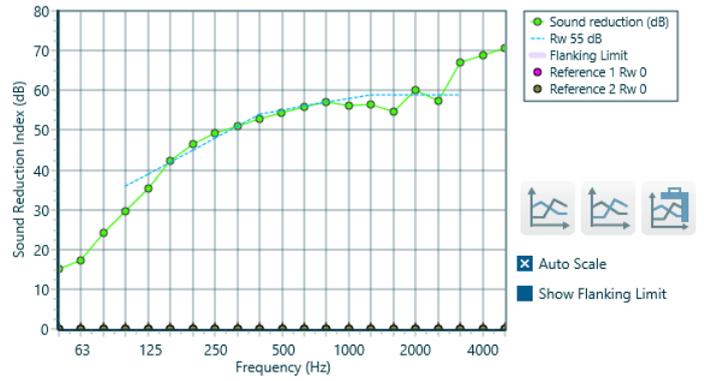
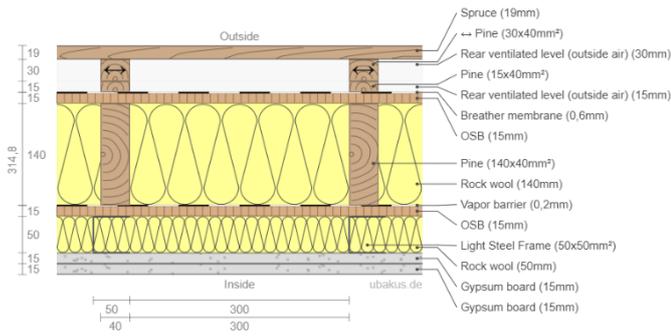
Heat transfer coefficient $U = 1/R_{tot} = 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



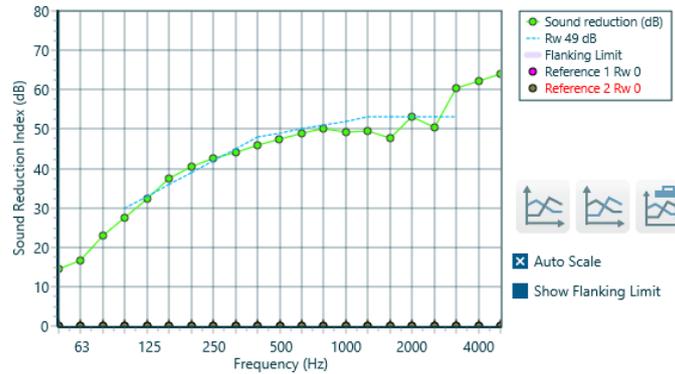
ANEXO 2 – ANÁLISE ACÚSTICA

A seguir, são apresentados os gráficos de saída gerados pelo software INSUL (Marshall Day, 2021) para todas as análises acústicas referidas na Seção 4.6.2.

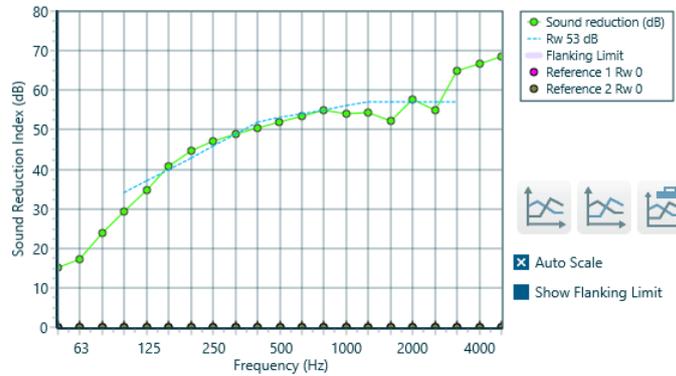
1. Par_Ext_TF



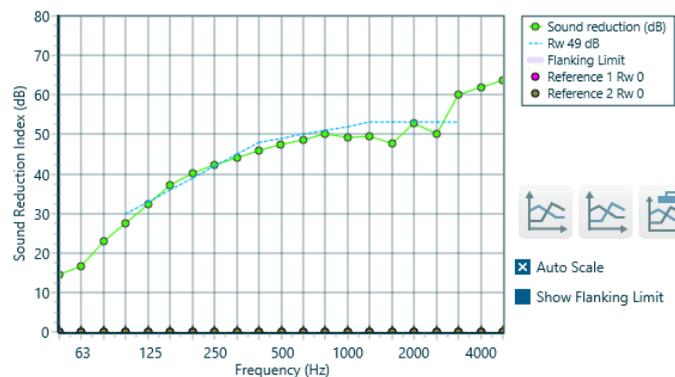
1.1.Par_Ext_TF sem material resiliente entre os montantes e o OSB interior



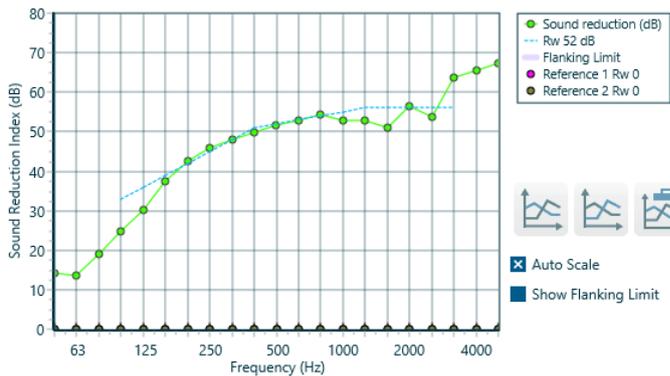
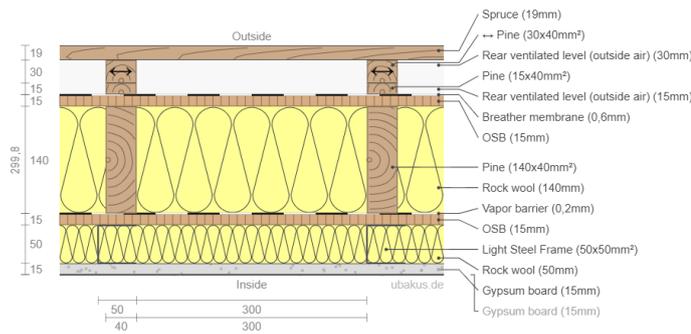
1.2.Par_Ext_TF com montante metálico de 0,75 mm de espessura para suporte das placas de gesso cartonado



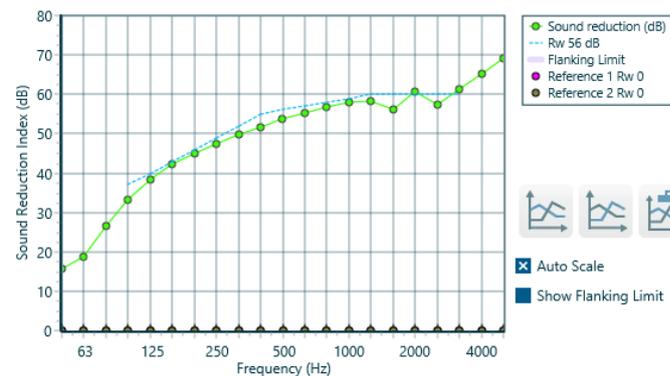
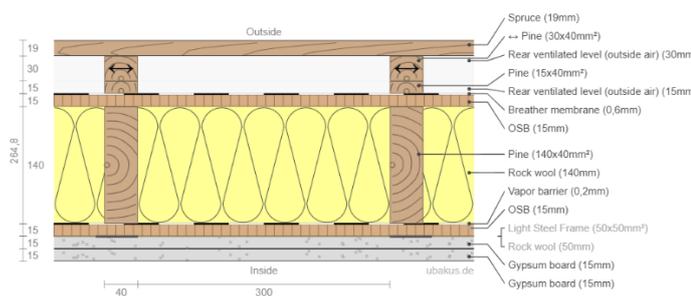
1.3.Par_Ext_TF com montante metálico de 1 – 1,6 mm de espessura para suporte das placas de gesso cartonado



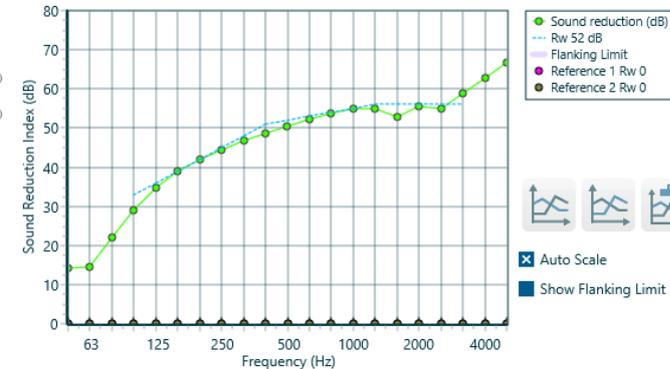
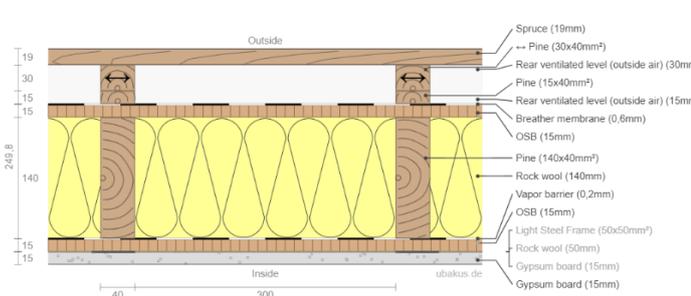
1.4.Par_Ext_TF com apenas uma camada de gesso cartonado



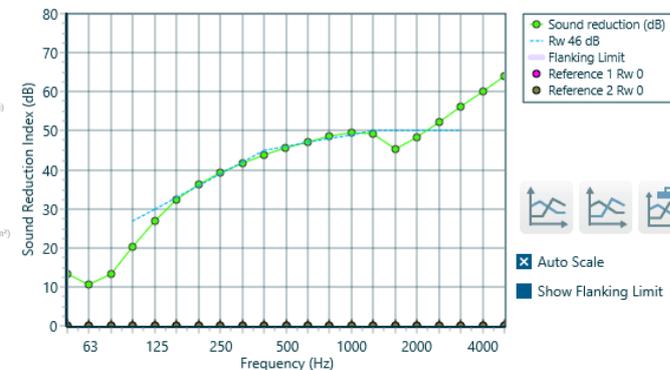
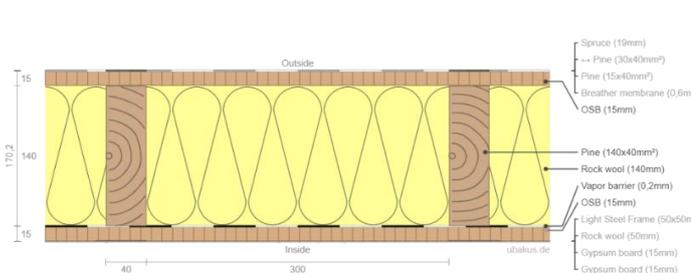
1.5.Par_Ext_TF sem camada de serviço



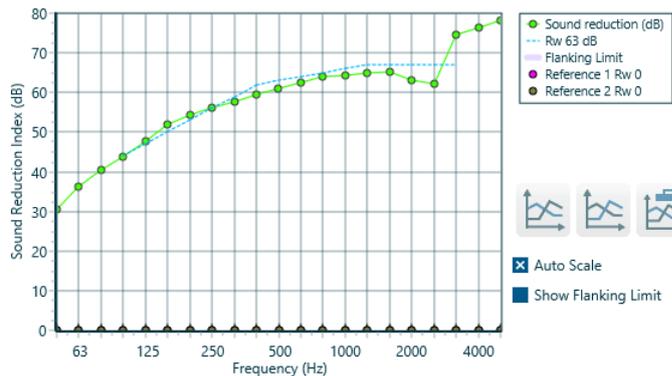
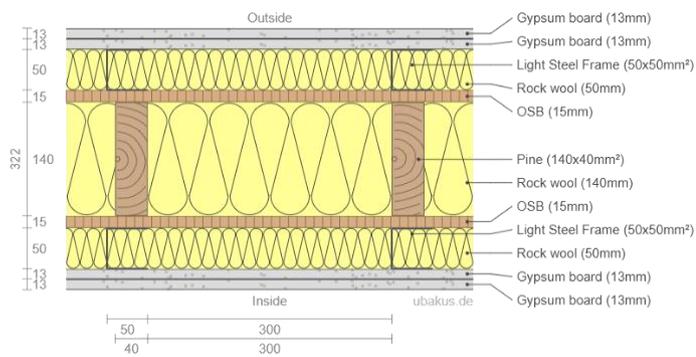
1.6.Par_Ext_TF sem camada de serviço e apenas uma camada de gesso cartonado



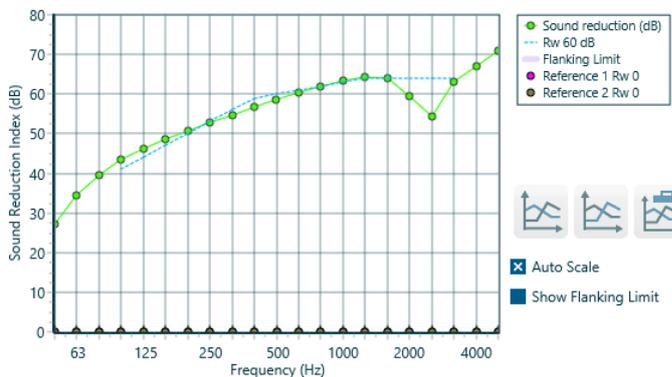
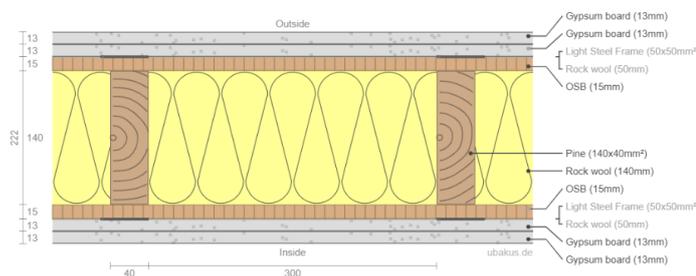
1.7.Par_Ext_TF sem qualquer revestimento



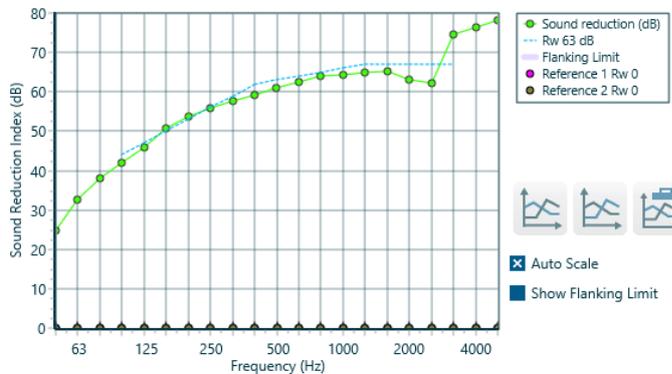
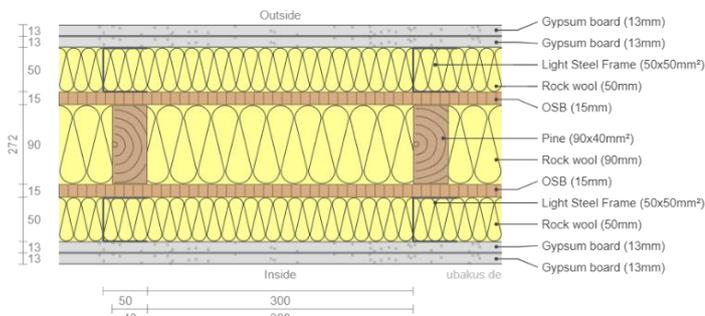
2. Par_Int_Est_TF



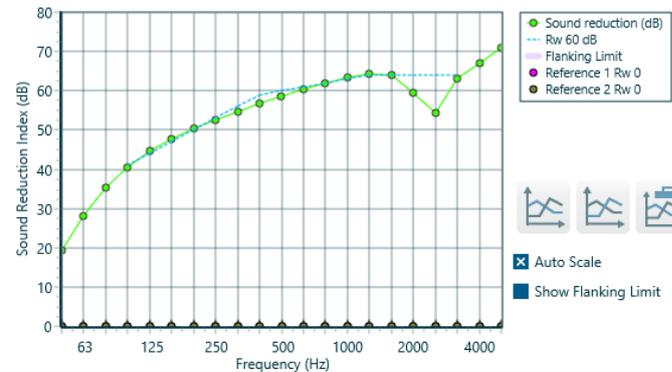
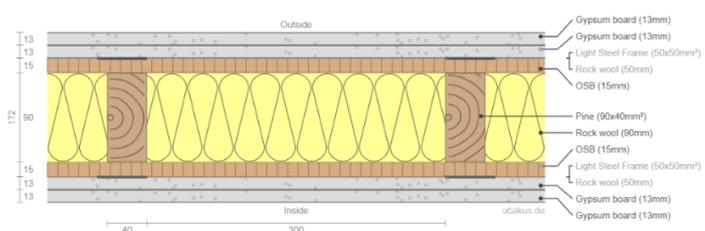
2.1. Par_Int_Est_TF sem camadas de serviço



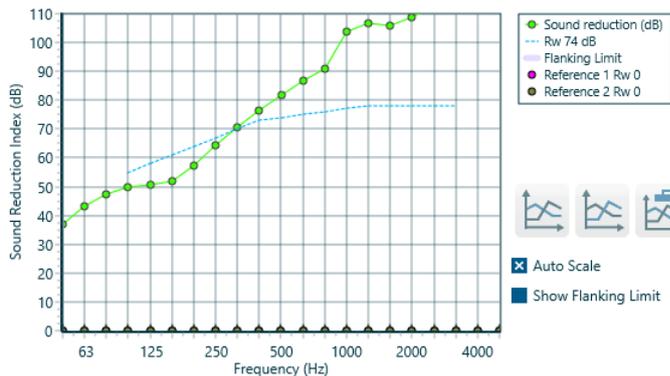
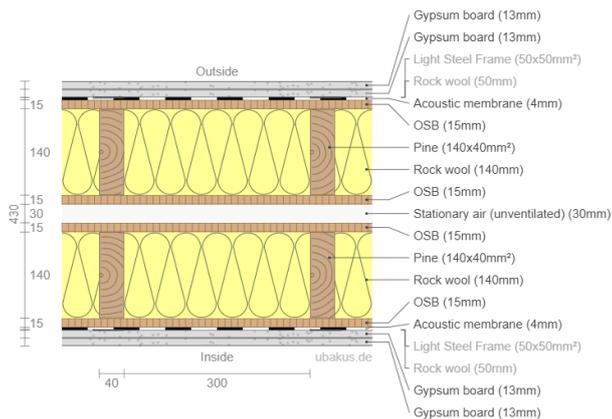
3. Par_Int_Nest_TF



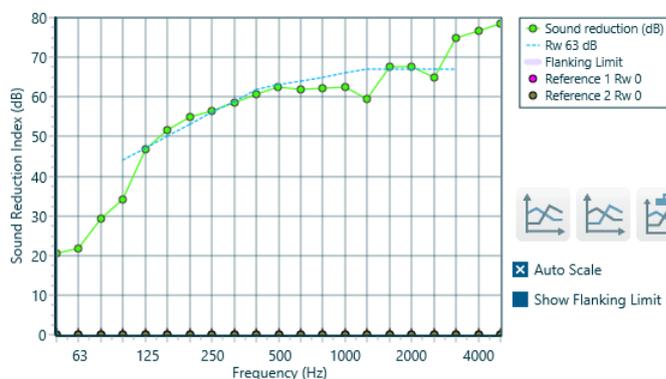
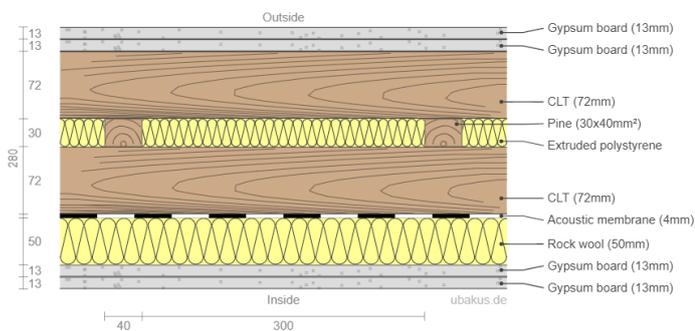
3.1. Par_Int_Nest_TF sem camadas de serviço



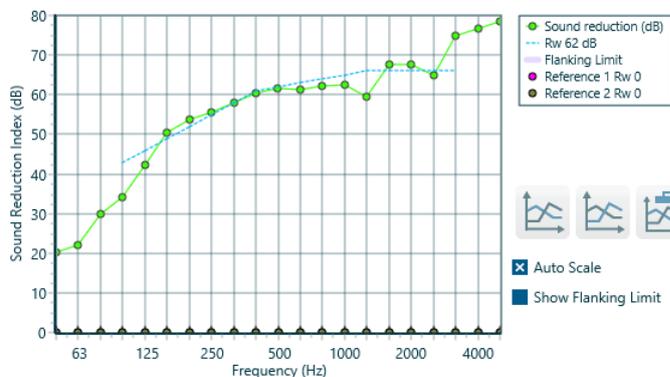
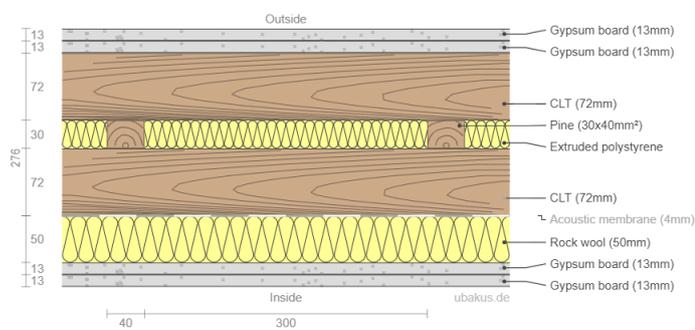
4.2.Par_Int_Dupla_TF sem camadas de serviço



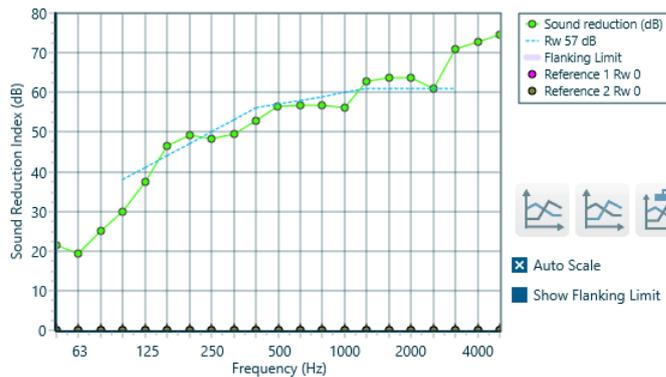
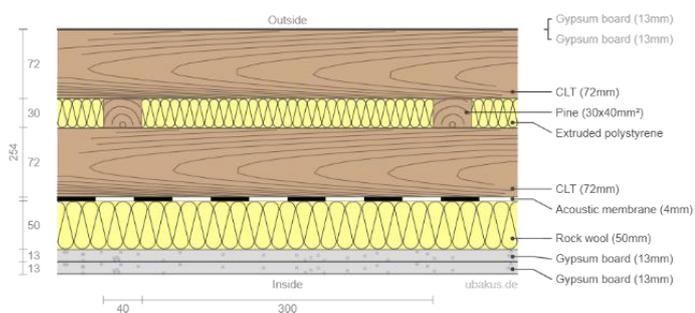
5. Par_Nuc_CLT



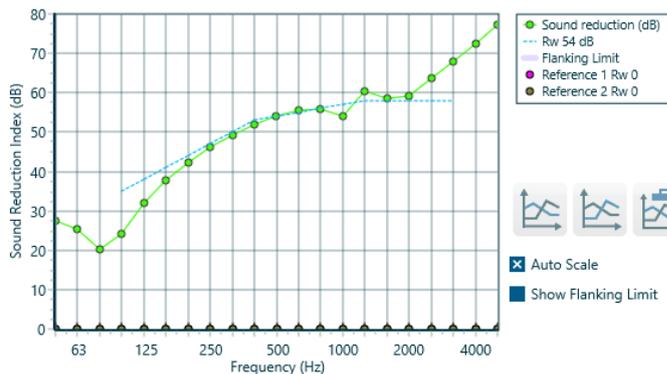
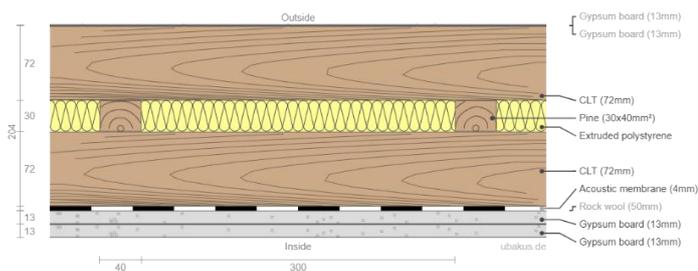
5.1.Par_Nuc_CLT sem membrana acústica



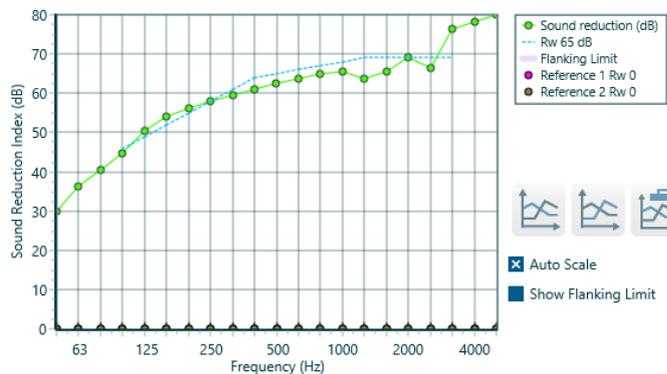
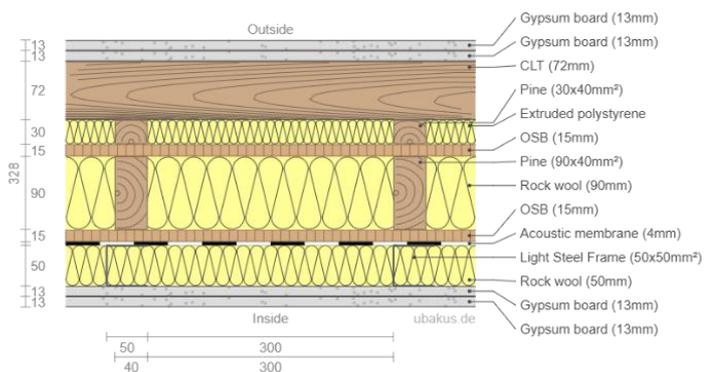
5.2.Par_Nuc_CLT com CLT exposto



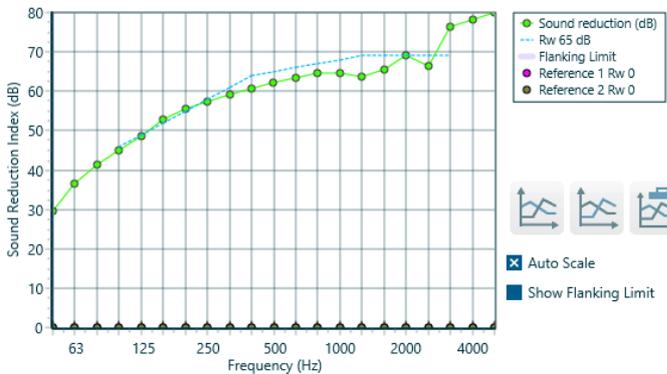
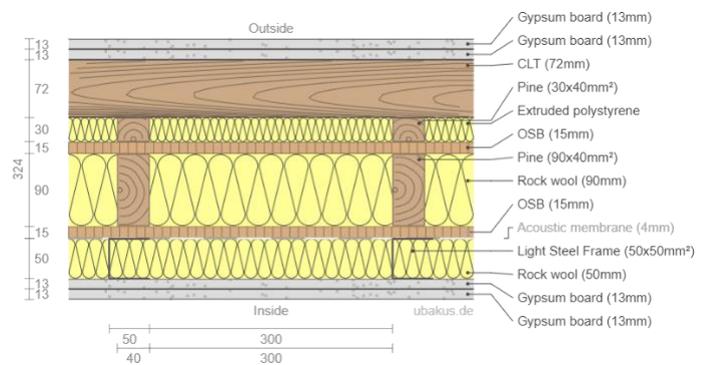
5.3.Par_Nuc_CLT sem camada de serviço e com CLT exposto



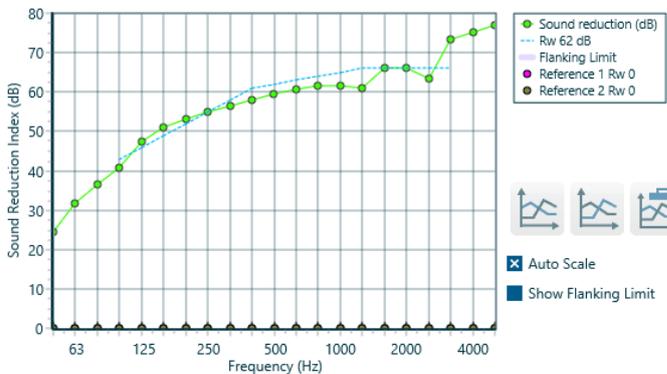
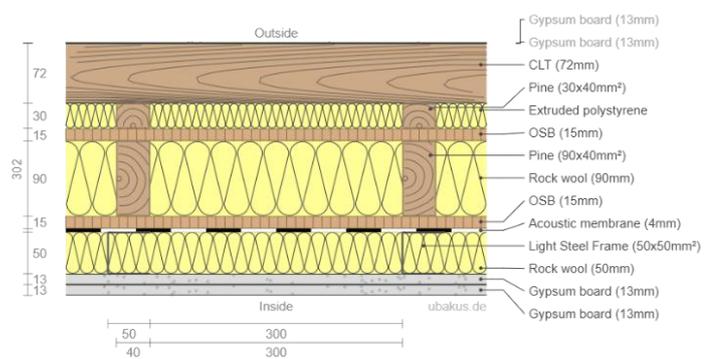
6. Par_Nuc_CLT_TF



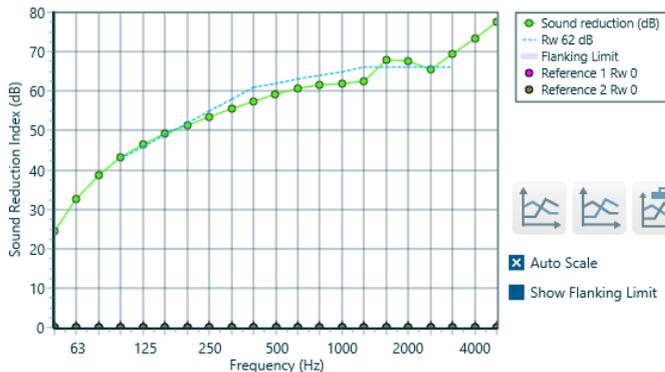
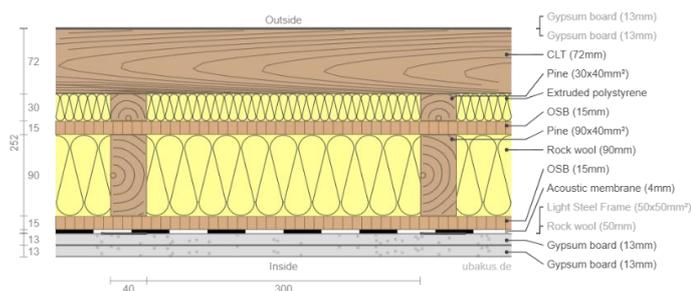
6.1.Par_Nuc_CLT_TF sem membrana acústica



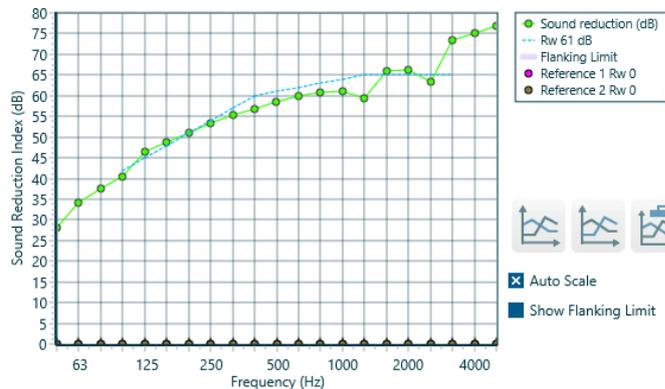
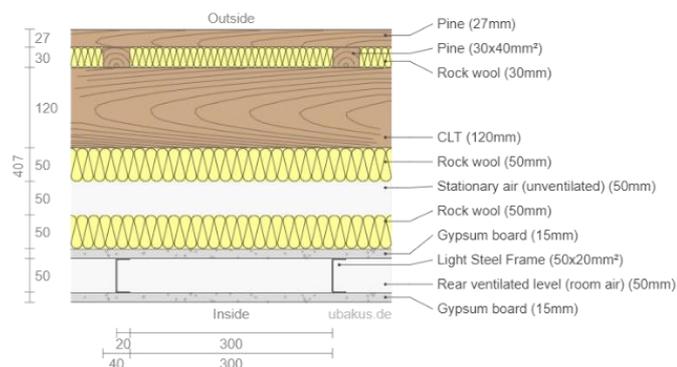
6.2.Par_Nuc_CLT_TF com CLT exposto



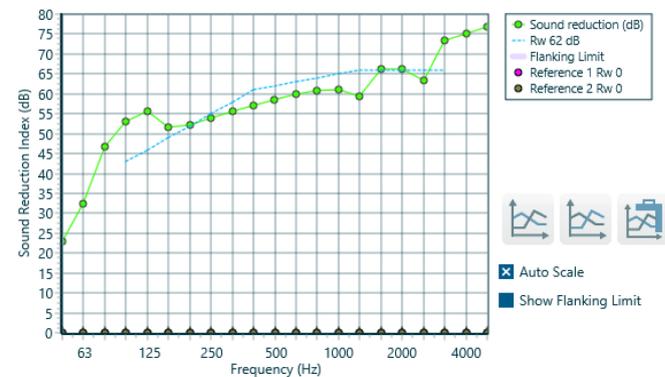
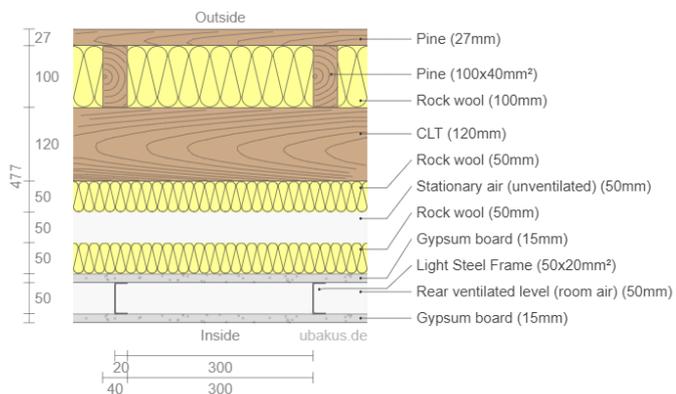
6.3.Par_Nuc_CLT_TF sem camada de serviço e com CLT exposto



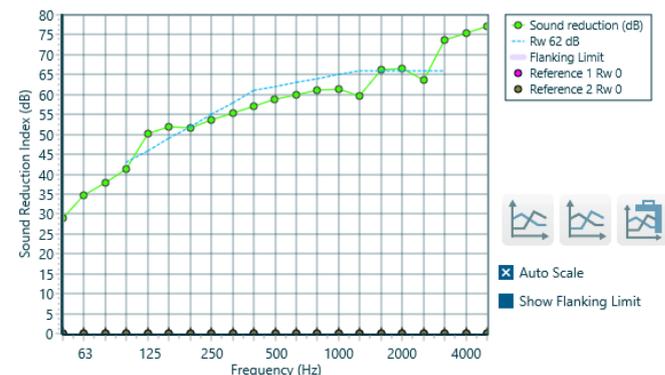
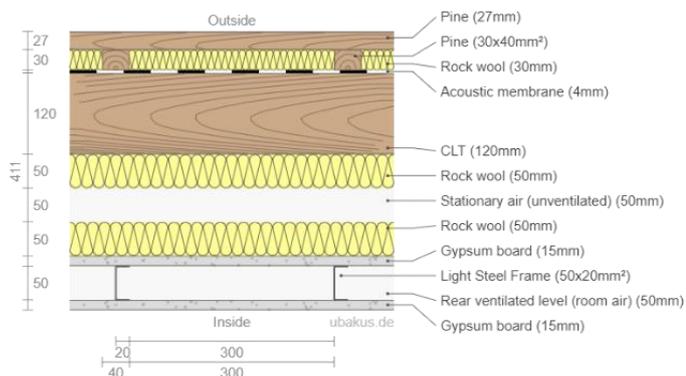
7. Pav_Int_CLT



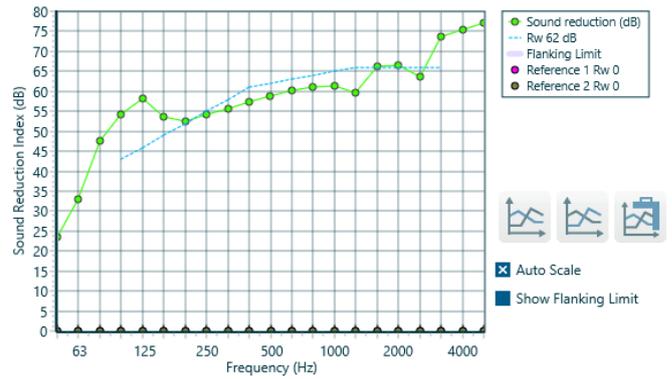
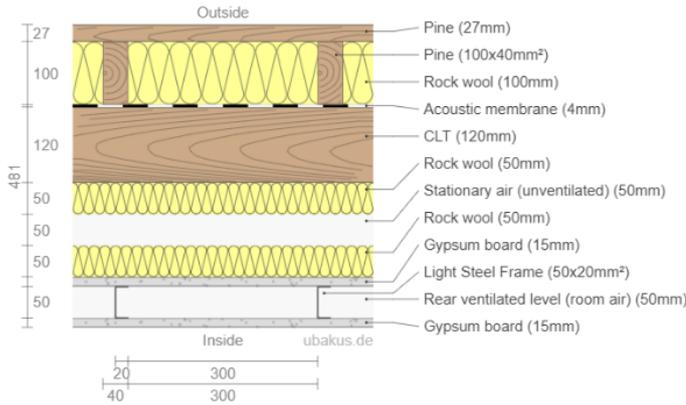
7.1.Pav_Int_CLT com cavidade de 100 mm para o soalho flutuante



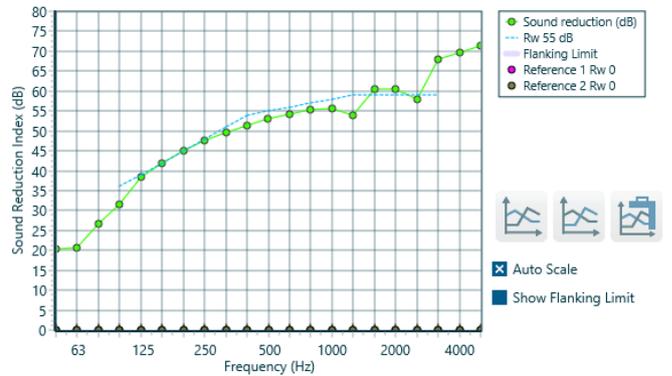
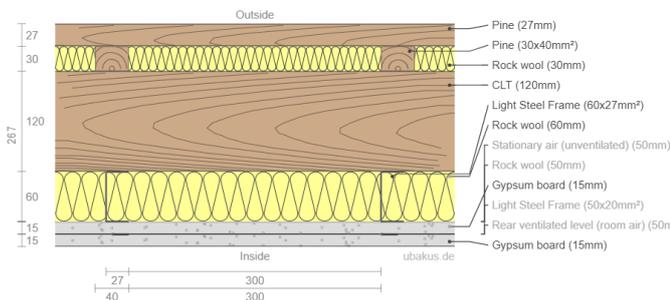
7.2.Pav_Int_CLT com membrana acústica sobre o CLT



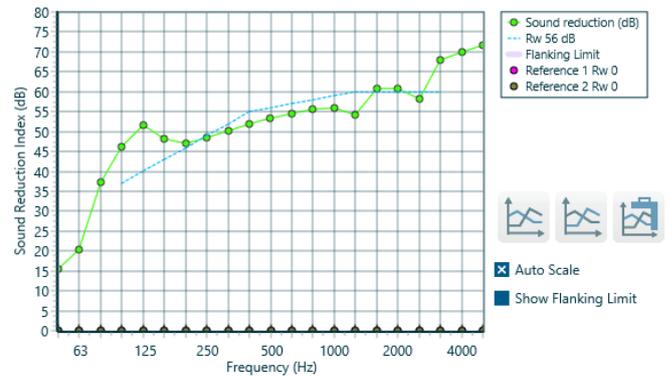
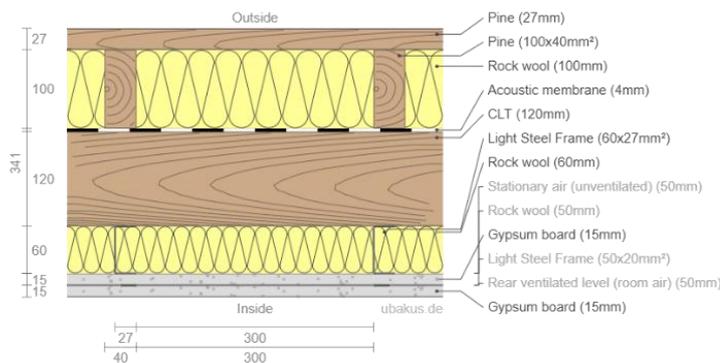
7.3. Pav_Int_CLT com cavidade de 100 mm para o soalho flutuante e membrana acústica sobre o CLT



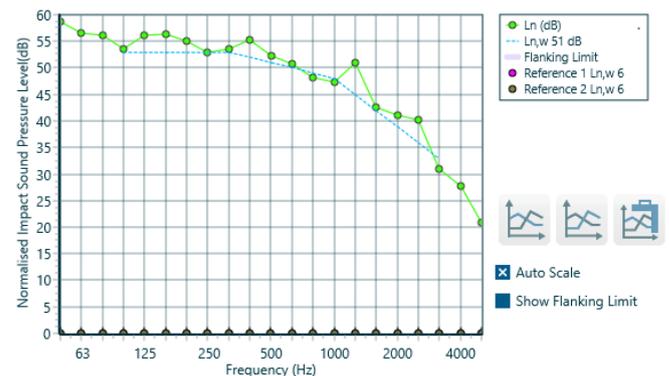
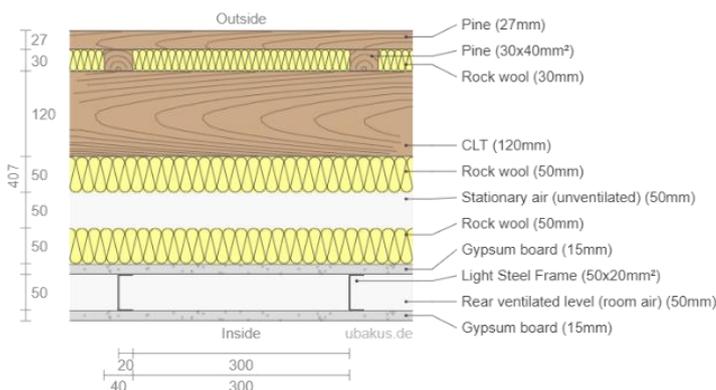
7.4. Pav_Int_CLT sem teto falso acústico (camada de 60 mm de lã de rocha sob o CLT)



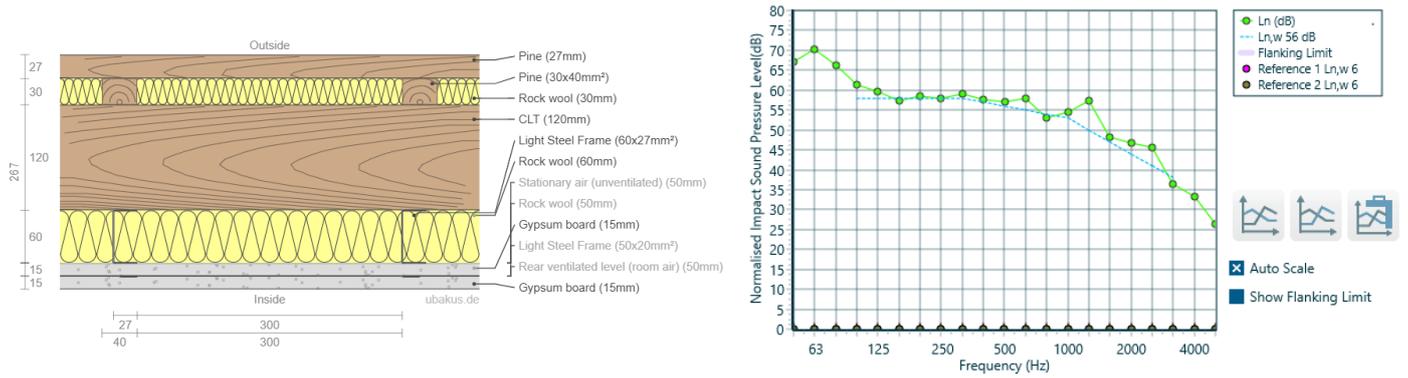
7.5. Pav_Int_CLT sem teto falso acústico (camada de 60 mm de lã de rocha sob o CLT), com cavidade de 100 mm para o soalho flutuante e membrana acústica sobre o CLT



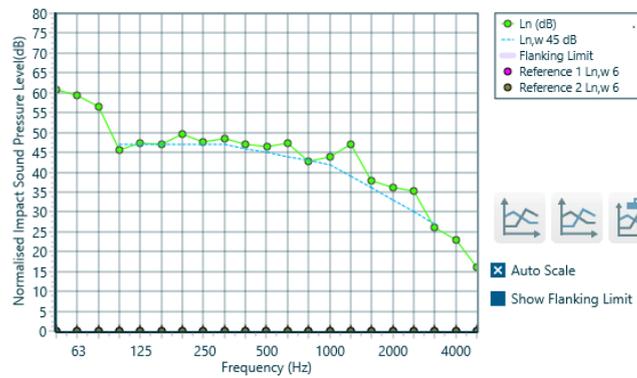
8. Pav_Int_CLT



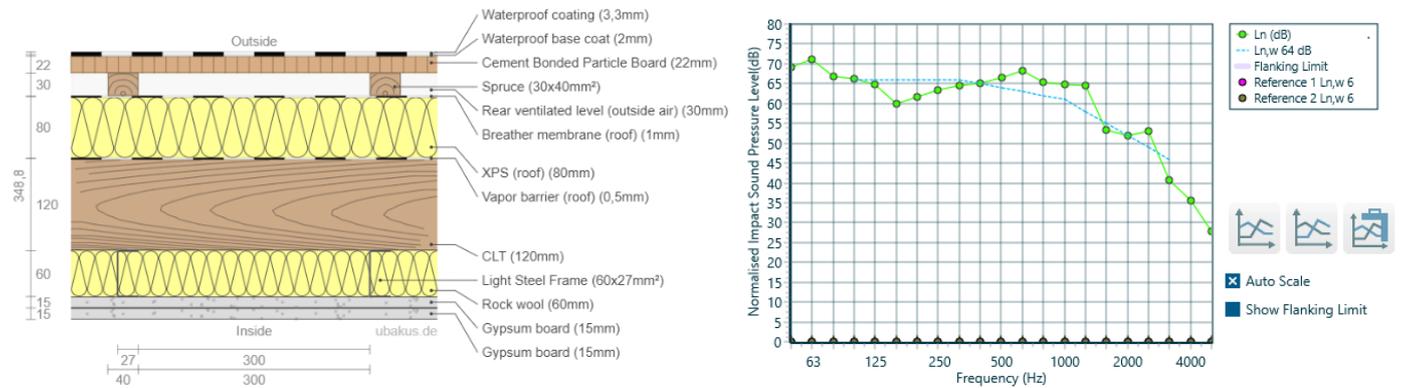
8.1. Pav_Int_CLT sem teto falso acústico (camada de 60 mm de lã de rocha sob o CLT)



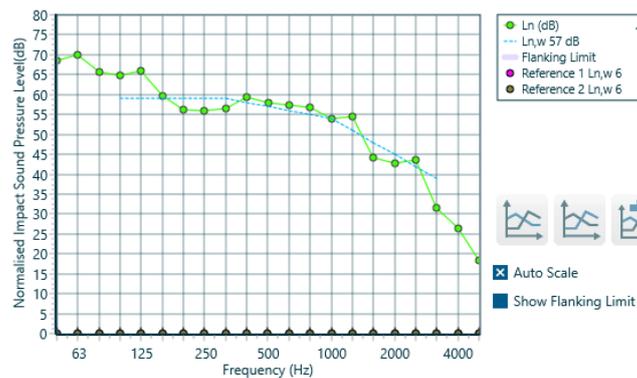
8.2. Pav_Int_CLT com suspensores do teto falso acústico e sistemas de amortecimento para o soalho flutuante mais eficientes



9. Cob_CLT



9.1. Cob_CLT com material resiliente sob as ripas do deck e suspensores acústicos para o teto falso de 60 mm



ANEXO 3 – EDIFÍCIO DO CASO DE ESTUDO



Figura A3.1 – Alçado Norte

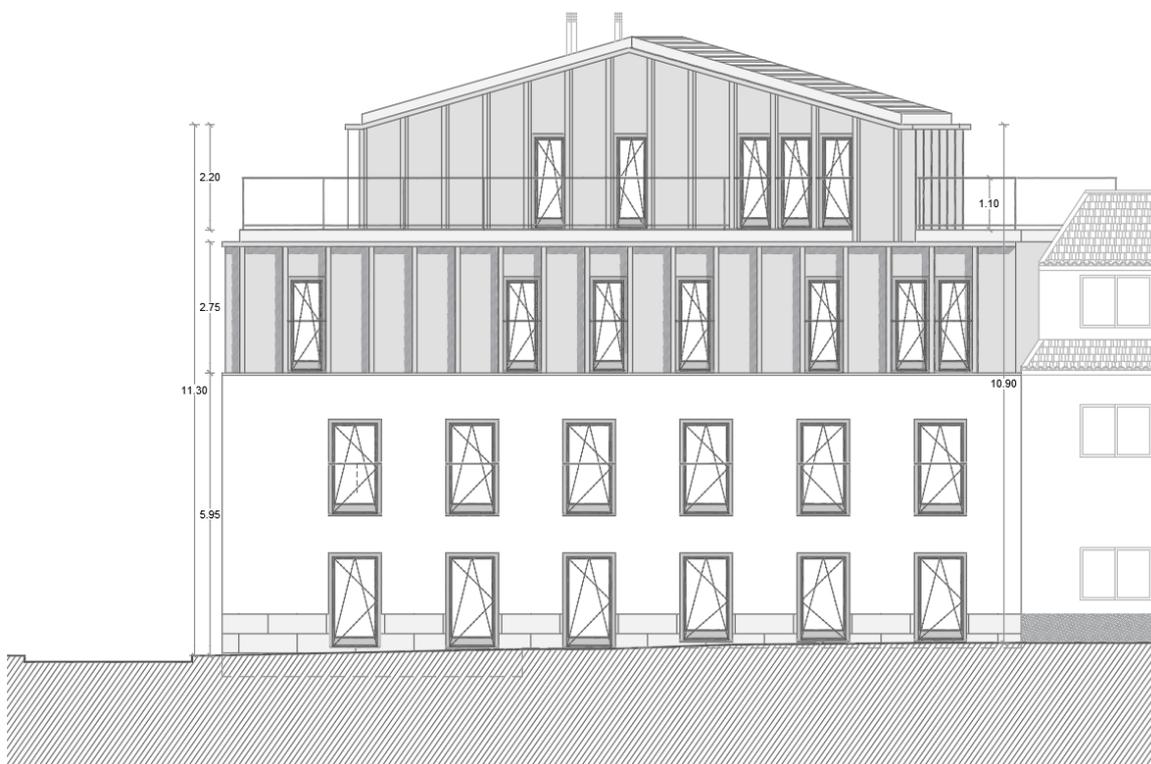


Figura A3.2 – Alçado Poente

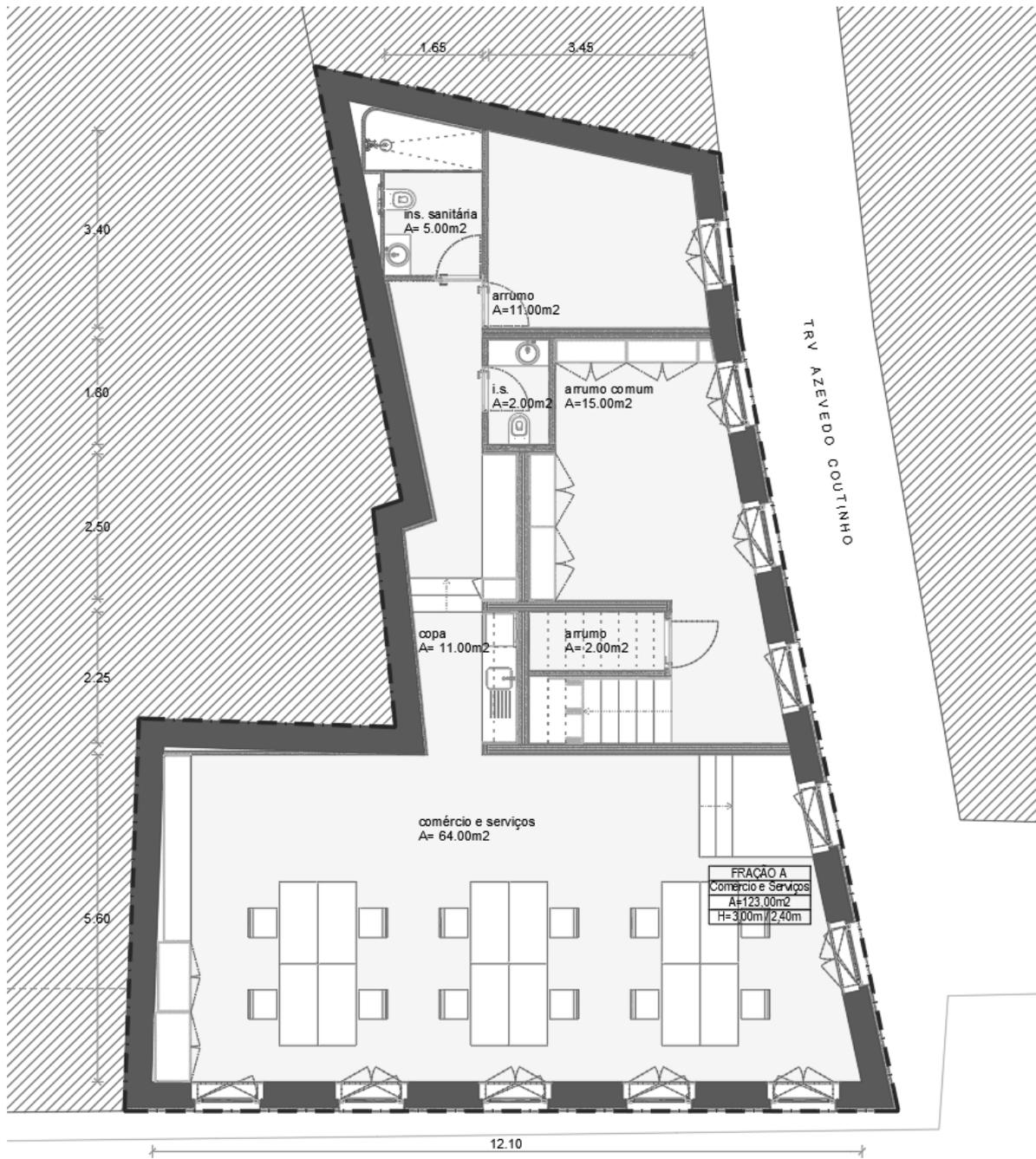


Figura A3.3 – Planta do Piso 0

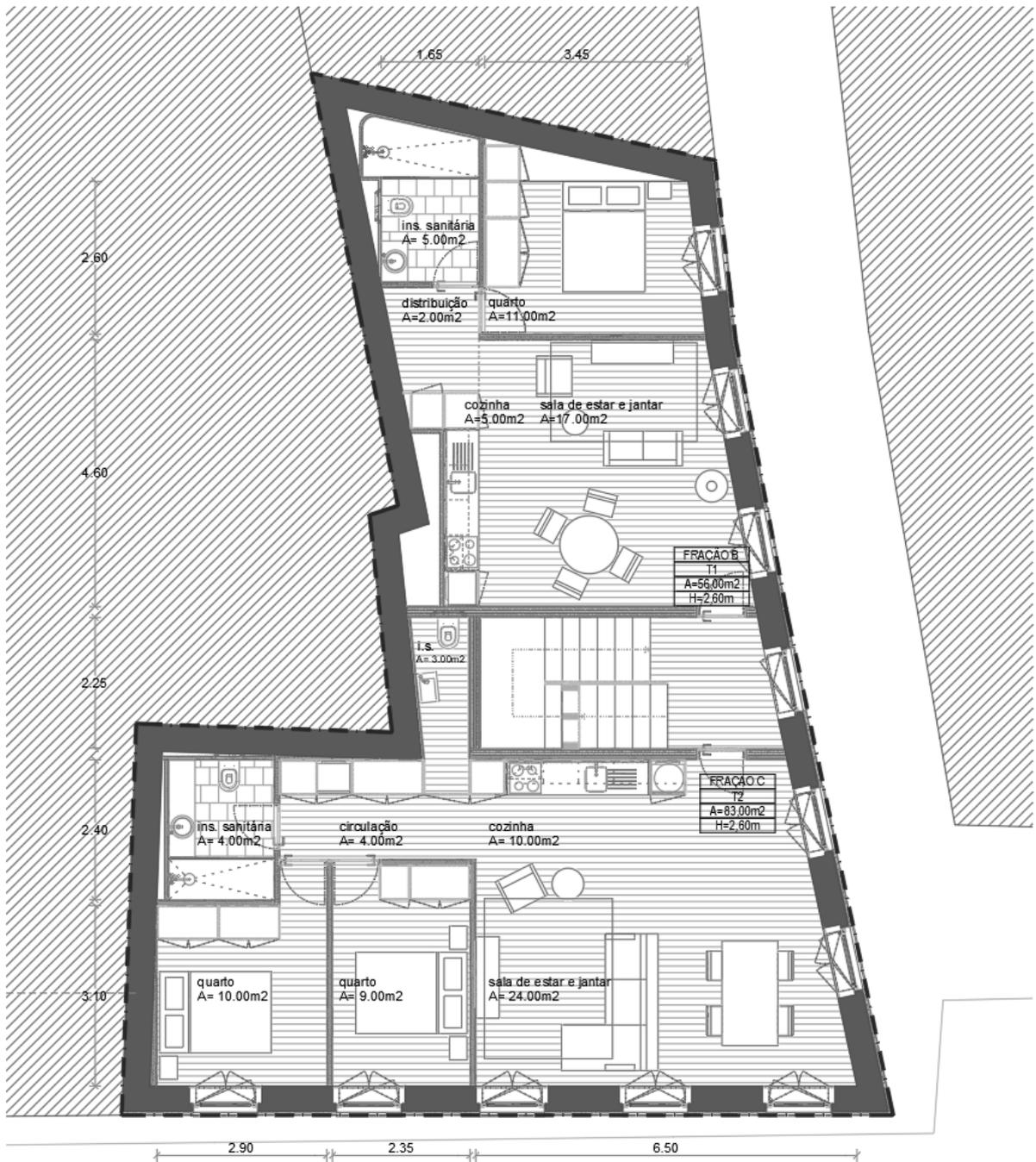


Figura A3.4 – Planta do Piso 1

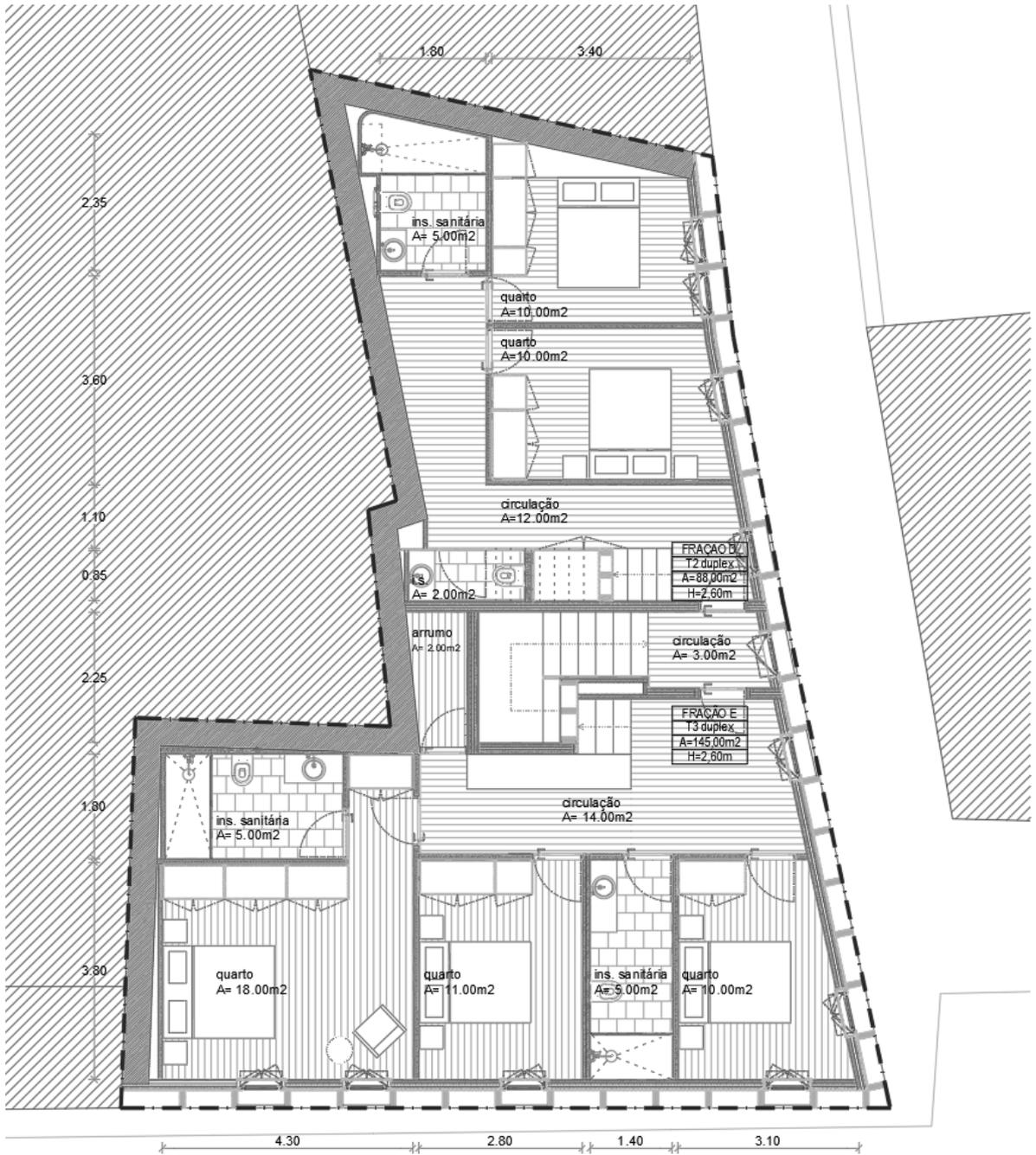


Figura A3.5 – Planta do Piso 2

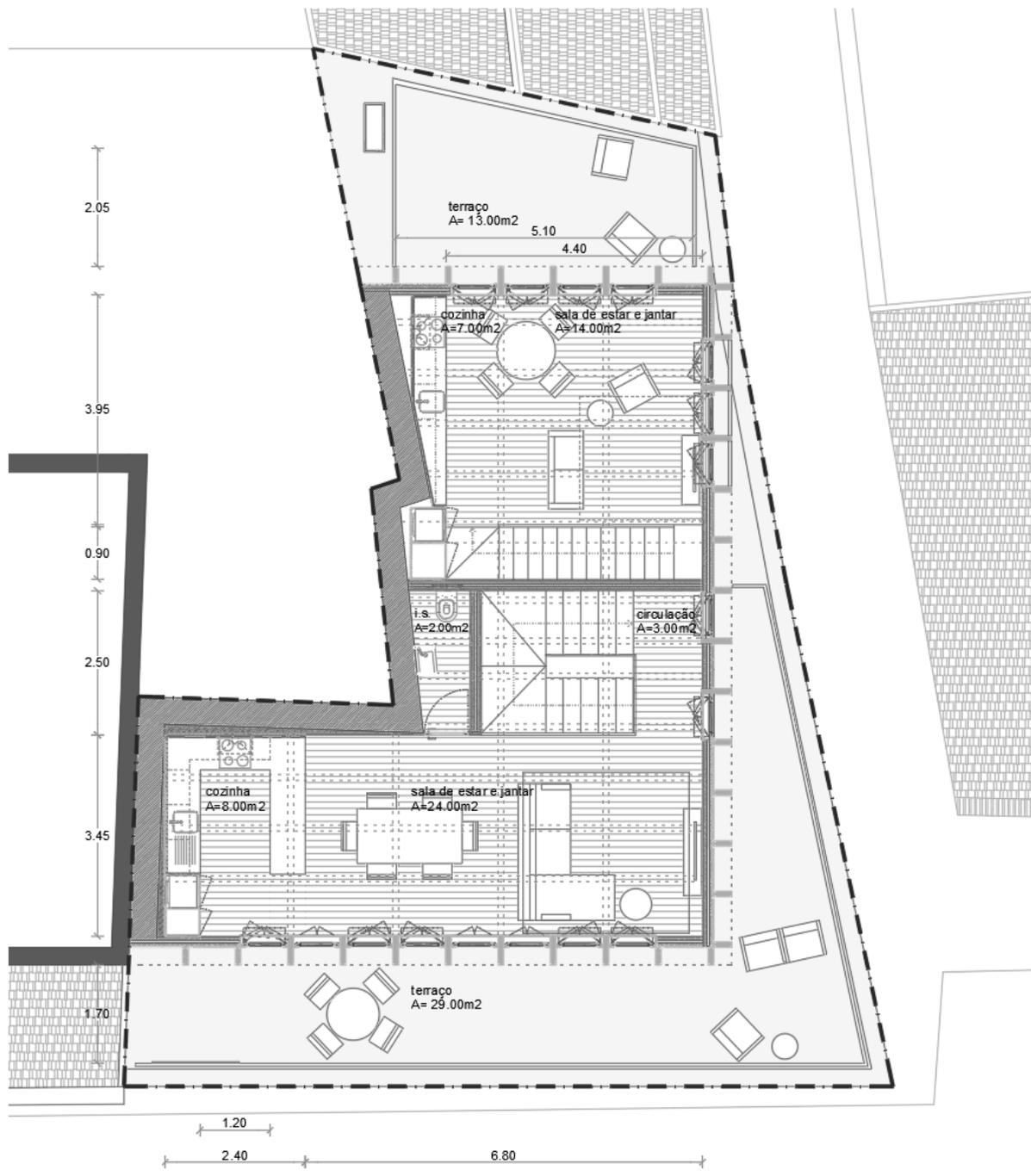


Figura A3.6 – Planta do Piso 3

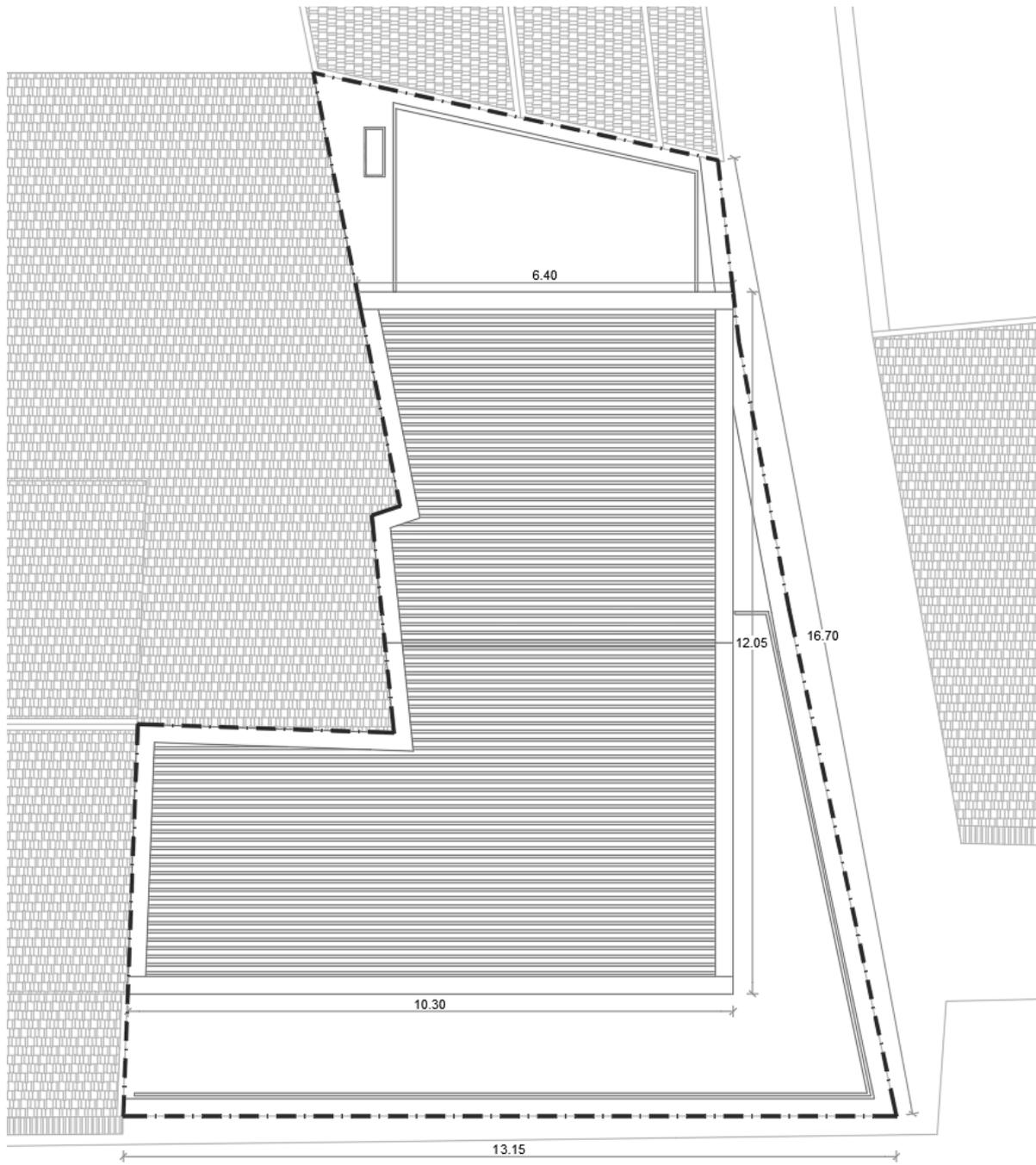


Figura A3.7 – Planta de Cobertura

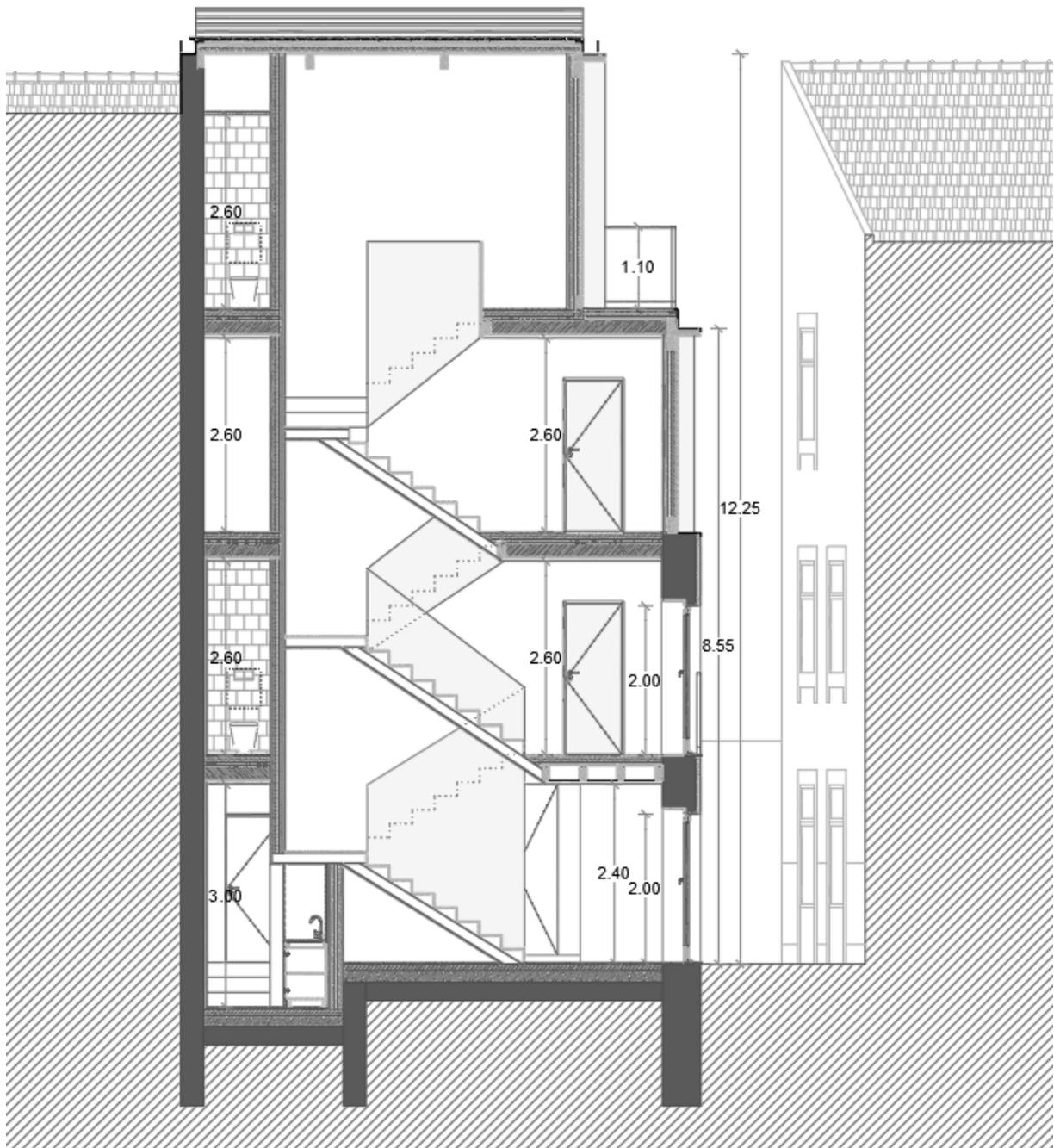


Figura A3.8 – Corte Transversal

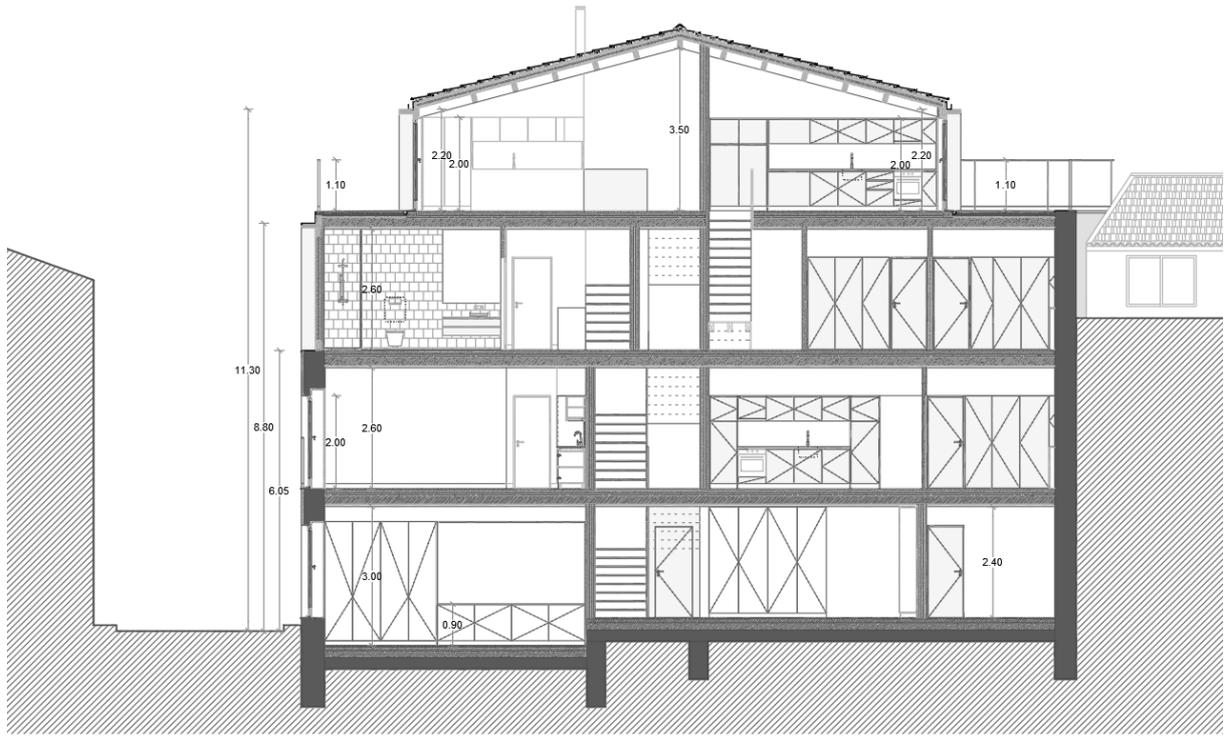


Figura A3.9 – Corte Longitudinal

ANEXO 4 – ANÁLISE TÉRMICA DO EDIFÍCIO DO CASO DE ESTUDO

Para a definição de parâmetros climáticos pertinentes à estação de aquecimento, considerou-se como localidade de referência o Cávado. A tabela abaixo apresenta os parâmetros climáticos de referência.

Tabela A4.1 – Dados para a localidade de referência

Localidade de referência	z	Graus Dia (GD)	
	REF (m)	REF (°C)	α (°C/km)
Cávado	171	1491	1300

Utilizando-se dos dados expostos e sabendo-se que o edifício em reabilitação encontra-se a uma cota $z = 5$ m, tem-se que:

$$GD = 1275,2 \text{ °C}$$

Assim, é possível determinar a zona climática de inverno à qual pertence a localidade da obra. Observando-se que a zona climática de inverno I1 abrange os valores de GD até 1300 °C, conclui-se que a localidade do edifício em reabilitação está compreendida na zona climática I1.

A partir da planta baixa de arquitetura e corte transversal do edifício em reabilitação, foram definidos os espaços úteis, espaços não úteis e envolventes.

Legenda:

-  Espaço não útil
-  Envolvente exterior
-  Envolvente interior
-  Envolvente sem requisitos



Figura A4.1 – Envolturas do edifício. (a) Piso 0; (b) Piso 1; (c) Piso 2; (d) Piso 3; (e) Corte transversal

As envolturas interiores são, então, analisadas quanto ao coeficiente de redução de perdas ($B_{z_{tu}}$) do ENU (espaço não útil) para definir se o mesmo apresenta requisitos de interior ou de exterior. O ENU identificado no edifício trata-se da caixa de escadas, cujo volume é:

$$6,53 \times 7,72 + 4,65 \times 5,32 + 2,65 \times 2,40 \text{ m} = 81,46 \text{ m}^2$$

A área total de paredes de compartimentação que constituem a caixa de escadas em contato com as frações é:

$$A_i = 12,57 \times 5,32 + 13,46 \times 2,40 \text{ m} = 99,26 \text{ m}^2$$

A área total de paredes de fachada que constituem a caixa de escadas separando-a do exterior é:

$$A_u = 2,30 \times 5,32 + 1,33 \times 2,40 \text{ m} = 15,39 \text{ m}^2$$

Relativamente à ventilação, é considerada que não é fortemente ventilados (f), com todas as ligações entre elementos bem vedadas e sem aberturas de ventilação permanentemente abertas. Tem-se que a razão A_i/A_u para o ENU da caixa de escadas é igual a 6,45.

A partir dos valores obtidos, verifica-se que o coeficiente de redução de perdas do espaço não útil da caixa de escadas é $B_{z_{tu}} = 0,4$. Logo, as envolturas que separam os EU (espaços úteis) do edifício do ENU da caixa de escada são envolturas interiores com requisito de interior.

ANEXO 5 – MATERIAIS E SEÇÕES DA MODELAÇÃO DO EDIFÍCIO

A seguir, é apresentado o relatório de saída gerado pelo software RFEM (Dlubal Software, 2021) contendo os materiais e seções empregues na modelação do edifício que é objeto de estudo do Capítulo 5.

Project: Model: Caso de estudo - Fão

Date: 26/11/2021

1.3 MATERIALS

Matl. No.	Modulus E [kN/cm ²]	Modulus G [kN/cm ²]	Poisson's Ratio ν [-]	Spec. Weight γ [kN/m ³]	Coeff. of Th. Exp. α [1/°C]	Partial Factor γ _M [-]	Material Model
1	RF-LAMINATE 3	CLT 180 mm		5.00	5.00E-06		
2	RF-LAMINATE 4	CLT 100 mm		5.00	5.00E-06		
3	Poplar and Softwood Timber C18 NP EN 338:2016-10	900.00	56.00	7.036	3.80	5.00E-06	1.30 Isotropic Linear Elastic
4	Glulam Timber GL24h NP EN 14080:2013-08	1150.00	65.00	7.846	4.20	5.00E-06	1.25 Isotropic Linear Elastic
5	OSB (EN 300), OSB/4, Wall Stress, Parallel (> 10 - 18 mm) EN 12369-1:2001-01			0.00E+00	5.00E-06		1.20 Orthotropic Elastic 2D...

1.3.5 MATERIALS - MATERIAL MODEL - ORTHOTROPIC ELASTIC 2D

Matl. No.	Modulus of Elasticity [kN/cm ²]		Shear Modulus [kN/cm ²]			Poisson's Ratio [-]	
	E _x	E _y	G _{yz}	G _{xz}	G _{xy}	ν _{xy}	ν _{yx}
5	OSB (EN 300), OSB/4, Wall Stress, Parallel (> 10 - 18 mm) EN 12369-1:2001-01						
	430.00	320.00	6.00	6.00	109.00	0.000	0.000

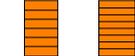
1.13 CROSS-SECTIONS

Section No.	Matl. No.	J [cm ⁴]	I _y [cm ⁴]	I _z [cm ⁴]	Principal Axes α [°]	Rotation α' [°]	Overall Dimensions [mm]	
		A [cm ²]	A _y [cm ²]	A _z [cm ²]			Width b	Height h
1	T-Rectangle 40/140	244.94	914.67	74.67	0.00	0.00	40.0	140.0
	3	56.00	46.67	46.67				
2	T-2B 140/0/40	1536.74	1829.33	597.33	0.00	0.00	80.0	140.0
	3	112.00	93.33	93.33				
4	T-Rectangle 150/250	17607.47	19531.25	7031.25	0.00	0.00	150.0	250.0
	4	375.00	312.50	312.50				
5	T-Rectangle 200/300	46947.82	45000.00	20000.00	0.00	0.00	200.0	300.0
	4	600.00	500.00	500.00				
6	T-Rectangle 150/200	12146.40	10000.00	5625.00	0.00	0.00	150.0	200.0
	4	300.00	250.00	250.00				

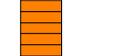
T-Rectangle 40/140 T-2B 140/0/40



T-Rectangle 150/250 T-Rectangle 200/300



T-Rectangle 150/200



Project: Model: Caso de estudo - Fão

Date: 26/11/2021

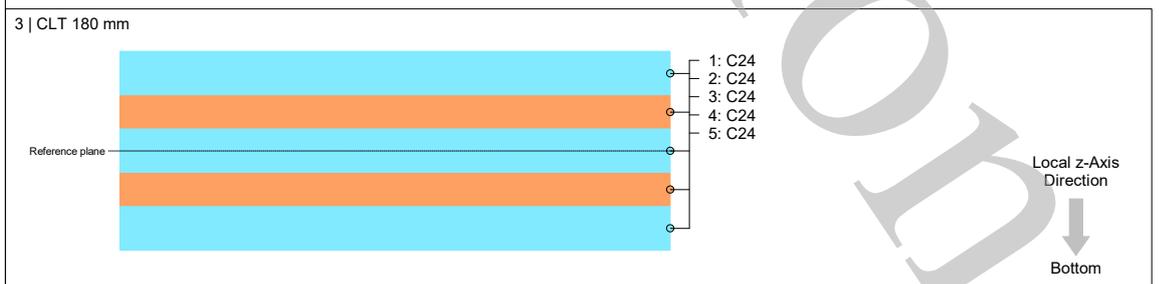
1.2.1 MATERIAL CHARACTERISTICS - A

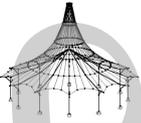
Comp. No.	Layer No.	Material Description	Factor Category	Thickness t [mm]	Poisson's Ratio [-]		Shear Modulus [N/mm ²]		
					ν_{xy}	ν_{yx}	G_{xz}	G_{yz}	G_{xy}
3	CLT 180 mm								
	1	C24	A	40.0	0.200	0.007	690.0	50.0	690.0
	CLT 180 L5s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)								
	2	C24	A	30.0	0.200	0.007	690.0	50.0	690.0
	CLT 180 L5s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)								
4	CLT 100 mm								
	1	C24	A	20.0	0.200	0.007	690.0	50.0	690.0
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)								
	2	C24	A	20.0	0.200	0.007	690.0	50.0	690.0
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)								
3	CLT 180 mm								
	3	C24	A	40.0	0.200	0.007	690.0	50.0	690.0
	CLT 180 L5s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)								
	4	C24	A	30.0	0.200	0.007	690.0	50.0	690.0
	CLT 180 L5s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)								
4	CLT 100 mm								
	3	C24	A	20.0	0.200	0.007	690.0	50.0	690.0
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)								
	4	C24	A	20.0	0.200	0.007	690.0	50.0	690.0
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)								
4	CLT 100 mm								
	5	C24	A	20.0	0.200	0.007	690.0	50.0	690.0
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)								
	Factor Category								
	A - Cross Laminated Timber								

1.2.2 MATERIAL CHARACTERISTICS - B

Comp. No.	Layer No.	Material Description	Angle β [°]	Modulus of Elasticity [N/mm ²]		Sp. Weight γ [kN/m ³]	Coeff. of Th. Exp. α_{tt} [1/K]
				E_x	E_y		
3	CLT 180 mm						
	1	C24	0.00	12000.0	0.0	5.00	5.0E-06
	CLT 180 L5s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)						
	2	C24	90.00	12000.0	0.0	5.00	5.0E-06
	CLT 180 L5s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)						
4	CLT 100 mm						
	1	C24	90.00	12000.0	0.0	5.00	5.0E-06
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)						
	2	C24	0.00	12000.0	0.0	5.00	5.0E-06
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)						
3	CLT 180 mm						
	3	C24	0.00	12000.0	0.0	5.00	5.0E-06
	CLT 180 L5s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)						
	4	C24	90.00	12000.0	0.0	5.00	5.0E-06
	CLT 180 L5s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)						
4	CLT 100 mm						
	3	C24	90.00	12000.0	0.0	5.00	5.0E-06
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)						
	4	C24	0.00	12000.0	0.0	5.00	5.0E-06
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)						
4	CLT 100 mm						
	5	C24	90.00	12000.0	0.0	5.00	5.0E-06
	CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349)						

1.2.4 LAYER DIAGRAMS





Project:

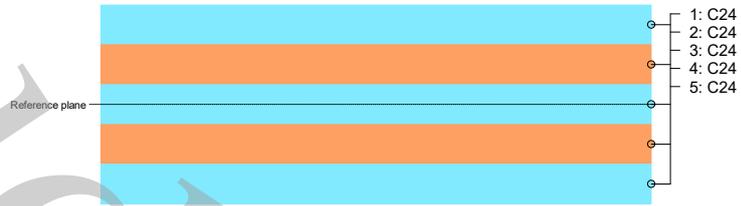
Model: Caso de estudo - Fão

Date:

26/11/2021

1.2.4 LAYER DIAGRAMS

4 | CLT 100 mm



Local z-Axis
Direction



Bottom

ANEXO 6 – CÁLCULO DOS CARREGAMENTOS APLICADOS À

MODELAÇÃO DO EDIFÍCIO

Paredes de fachada - Par_Ext_TF

Materiais	Densidad e (kg/m ³)	Esp. (m)/ Seção (m ²)	Densidad e (kg/m ³)	Paredes de fachada - Par_Ext_TF			
				Piso 0	Piso 1	Piso 2	Piso 3
Gesso cartonado	-	-	27,00	H (m)= 2,69	H (m)= 2,91	H (m)= 2,87	H (m)= 3,35
Montante met.	-	-	0,58	Esp. Mont. (m)= 0,40	Esp. Mont. (m)= 0,40	Esp. Mont. (m)= 0,50	Esp. Mont. (m)= 0,60
Lã de rocha	60	0,1860	11,16	Mont./m= 2,50	Mont./m= 2,50	Mont./m= 2,00	Mont./m= 1,67
OSB	640	0,0300	19,20				
Para vapor	-	-	0,13	OSB	51,61	OSB	55,87
Mem. Respirável	-	-	0,14	Montantes	20,32	Montantes	22,00
Revestimento ext.	450	0,0190	8,55	Travamento	3,02	Travamento	3,02
Ripado	540	0,0012	-	Banzos	12,10	Banzos	12,10
Sub ripado	540	0,0006	-	Gesso cartonado	72,58	Gesso cartonado	77,44
Estrutura	540	0,0056	-	Montante met.	1,56	Montante met.	1,66
				Lã de rocha	30,00	Lã de rocha	32,01
				Para vapor	0,35	Para vapor	0,37
				Mem. Respirável	0,36	Mem. Respirável	0,39
				Revestimento ext.	22,98	Revestimento ext.	24,52
				Ripado	3,48	Ripado	3,72
				Sub ripado	2,18	Sub ripado	1,86
				Total (kg/m)	220,54	Total (kg/m)	229,49
							Total (kg/m)
							261,78

Paredes internas

Materiais	Densidad e (kg/m ³)	Esp. (m)/ Seção (m ²)	Densidad e (kg/m ³)	Paredes internas			
				Piso 0	Piso 1	Piso 2	Piso 3
Gesso cartonado	-	-	44,00	H (m)= 2,69	H (m)= 2,91	H (m)= 2,87	H (m)= 3,35
Montante met.	-	-	0,58	Esp. Mont. (m)= 0,60			
Lã de rocha	60	0,07	4,20	Mont./m= 1,67	Mont./m= 1,67	Mont./m= 1,67	Mont./m= 1,67
				Gesso cartonado	118,27	Gesso cartonado	126,19
				Montante met.	1,56	Montante met.	1,66
				Lã de rocha	11,29	Lã de rocha	12,05
				Total (kg/m)	131,12	Total (kg/m)	139,90
							Total (kg/m)
							163,41

Paredes do núcleo - Par_Nuc_CLT_TF

Materiais	Densidad e (kg/m ³)	Esp. (m)/ Seção (m ²)	Densidad e (kg/m ³)	Paredes do núcleo - Par_Nuc_CLT_TF			
				Piso 0	Piso 1	Piso 2	Piso 3
Gesso cartonado	-	-	27,00	H (m)= 2,69	H (m)= 2,91	H (m)= 2,87	H (m)= 4,00
Montante met.	-	-	0,58	Esp. Mont. (m)= 0,30	Esp. Mont. (m)= 0,30	Esp. Mont. (m)= 0,30	Esp. Mont. (m)= 0,30
Lã de rocha	60	0,1400	8,40	Mont./m= 3,33	Mont./m= 3,33	Mont./m= 3,33	Mont./m= 3,33
OSB	640	0,0300	19,20				
Montantes/banzos	540	0,0036	-	CLT	134,4	CLT	143,4
XPS	30	0,0300	0,90	OSB	51,61	OSB	55,07
Membrana acústica	-	-	6,00	Montantes	17,42	Montantes	18,58
CLT	500	0,1000	50,00	Banzos	3,89	Banzos	3,89
				Gesso cartonado	72,58	Gesso cartonado	77,44
				Montante met.	1,56	Montante met.	1,66
				Lã de rocha	22,58	Lã de rocha	24,09
				XPS	2,42	XPS	2,58
				Memb. Acústica	16,13	Memb. Acústica	17,21
				Total (kg/m)	322,58	Total (kg/m)	343,92
							Total (kg/m)
							478,13

Pavimentos - Pav_Int_CLT

Materiais	Densidad e (kg/m ³)	Esp. (m)/ Seção (m ²)	Densidad e (kg/m ³)
Gesso cartonado	-	-	27,00
Suspensor met.	-	-	0,58
Lã de rocha	60	0,1600	9,60
Estrutura soalho	540	0,0056	-
Membrana acústica	-	-	6,00
Revestimento	540	0,0270	14,58
CLT	500	0,1800	90,00

Pisos 0, 1 e 2	
A (m ²)=	1,00
Esp. Ripas (m)=	0,30
Ripas/m=	3,33

CLT	90,00
Estrutura soalho	10,08
Gesso cartonado	27,00
Suspensor met.	0,58
Lã de rocha	9,60
Memb. acústica	6,00
Revestimento	14,58
Total (kg/m²)	157,84

Cobertura

Materiais	Densidad e (kg/m ²)
Telhas e subestrutura	70,00
Subtelha	3,10
Camada impermeav.	3,55
Thermochip TAH	20,89

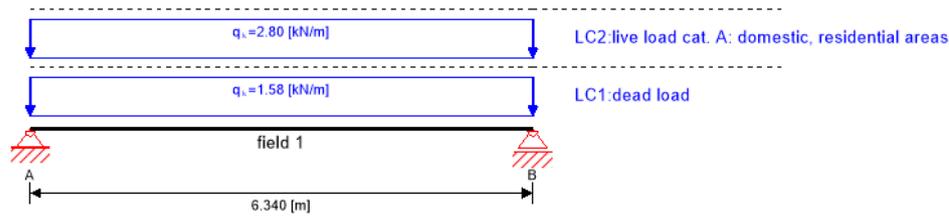
A (m ²)=	1
----------------------	---

Telhas e subestrutura	70,00
Subtelha	3,10
Camada impermeav.	3,55
Thermochip TAH	20,89
Total (kg/m²)	97,54

ANEXO 7 – DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES ESTRUTURAIS DOS PAINÉIS

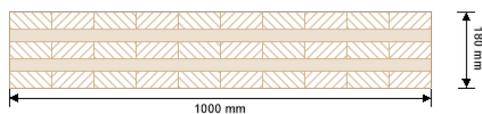
A seguir, são apresentados os relatórios de saída gerados pelo software Calculatis (Stora Enso, 2021) para todas as verificações estruturais referidas no Capítulo 5.

system



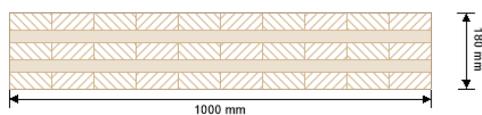
global utilization ratio						96 %			
ULS	42 %	ULS fire	9 %	SLS	96 %	SLS vibration	0 %	support	6 %

section: CLT 180 L5s



layer	thickness	orientation	material
1	40.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)
2	30.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)
3	40.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)
4	30.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)
5	40.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)
t _{CLT}	180.0 mm		

section fire: CLT 180 L5s



layer	thickness	orientation	material
1	40.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)
2	30.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)
3	40.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)
4	30.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)
5	40.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)
t _{CLT}	180.0 mm		
time	60 min		

fire resistance class: R 60
 fire protection layering : 2 x 15.0 mm gypsum plasterboard Type A + 50 mm rock wool gypsum plasterboard Type A (acc. to EN 520) gypsum plasterboard Type F (acc. to EN 520)
 Die Steinwolle-Dämmung der Installationsebene muss eine Mindestrohndichte von 26 kg/m³ und einen Schmelzpunkt >1000 °C aufweisen.

t _{ch,h}	t _{f,h}	t _{a,h}	d _{ia,h}	k ₀	d ₀	d _{char,0,h}	d _{ef,h}
[min]	[min]	[min]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
61	61	80	25	1	7	0.0	0.0

material values

material	f _{m,k}	f _{t,0,k}	f _{t,90,k}	f _{c,0,k}	f _{c,90,k}	f _{v,k}	f _{r,k min}	E _{0,mean}	G _{mean}	G _{r,mean}
	[N/mm ²]									
C24 spruce ETA (2019)	24.00	14.00	0.12	21.00	2.50	4.00	1.25	12,000.00	690.00	50.00

load

load case groups

	load case category	type	duration	Kmod	γ _{inf}	γ _{sup}	Ψ ₀	Ψ ₁	Ψ ₂
LC1	dead load	G	permanent	0.6	0.8	1.35	1	1	1
LC2	live load cat. A: domestic, residential areas	Q	medium term	0.8	0	1.5	0.7	0.5	0.3



LC1:dead load

continuous load	
field	load at start
	[kN/m]
1	1.58

LC2:live load cat. A: domestic, residential areas

continuous load	
field	load at start
	[kN/m]
1	2.80

ULS combinations

	combination rule
LCO1	1.35/0.80 * LC1
LCO2	1.35/0.80 * LC1 + 1.50/0.00 * LC2

ULS combinations fire

	combination rule
LCO3	1.00/1.00 * LC1
LCO4	1.00/1.00 * LC1 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC2

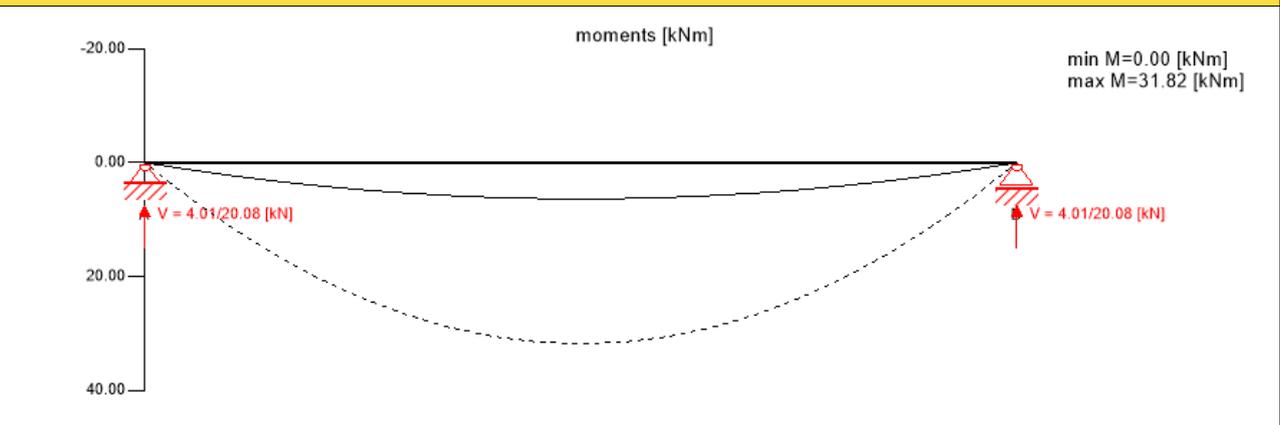
SLS characteristic combination

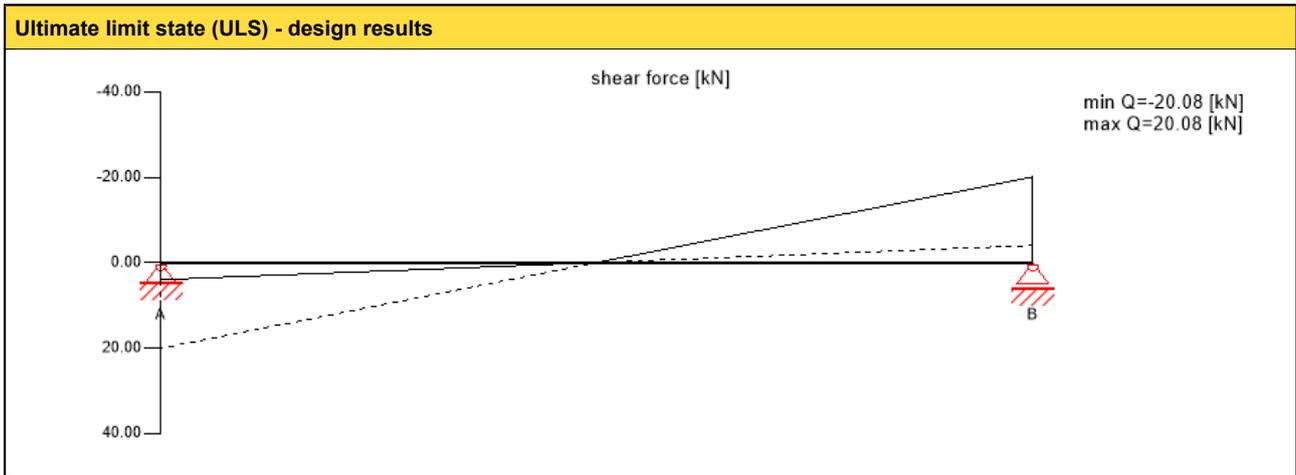
	combination rule
LCO5	1.00/1.00 * LC1
LCO6	1.00/1.00 * LC1 + 1.00/0.00 * LC2

SLS quasi-permanent combination

	combination rule
LCO7	1.00/1.00 * LC1
LCO8	1.00/1.00 * LC1 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC2

Ultimate limit state (ULS) - design results





ULS flexural design

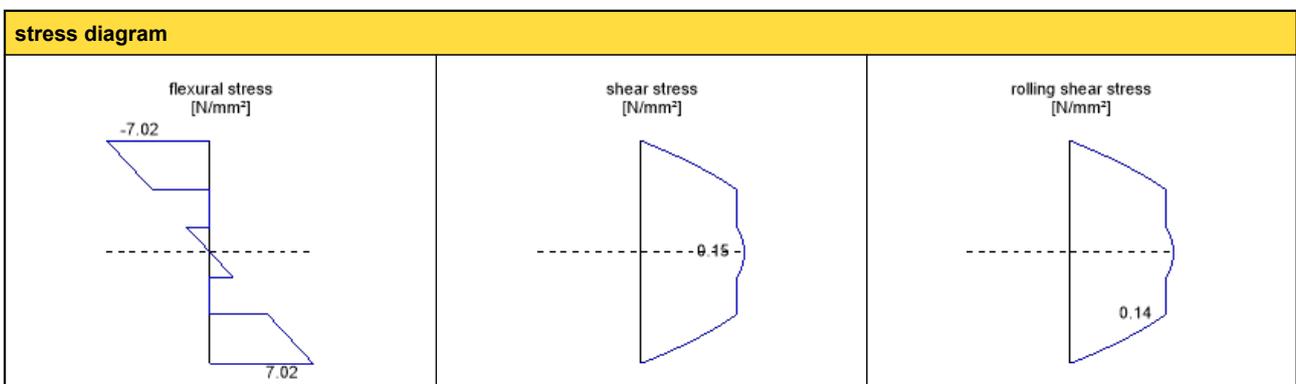
field	dist. [m]	$f_{m,k}$ [N/mm ²]	γ_m [-]	k_{mod} [-]	$k_{sys,y}$ [-]	$f_{m,y,d}$ [N/mm ²]	$M_{y,d}$ [kNm]	$\sigma_{m,y,d}$ [N/mm ²]	ratio	
1	3.17	24.00	1.25	0.80	1.10	16.90	31.82	-7.02	42 %	LCO2

ULS shear analysis

field	dist. [m]	$f_{v,k}$ [N/mm ²]	γ_m [-]	k_{mod} [-]	$f_{v,d}$ [N/mm ²]	V_d [kN]	$\tau_{v,d}$ [N/mm ²]	ratio	
1	6.34	4.00	1.25	0.80	2.56	-20.08	0.15	6 %	LCO2

ULS rolling shear

field	dist. [m]	$f_{r,k}$ [N/mm ²]	γ_m [-]	k_{mod} [-]	$f_{r,d}$ [N/mm ²]	V_d [kN]	$\tau_{r,d}$ [N/mm ²]	ratio	
1	6.34	1.15	1.25	0.80	0.74	-20.08	0.14	19 %	LCO2



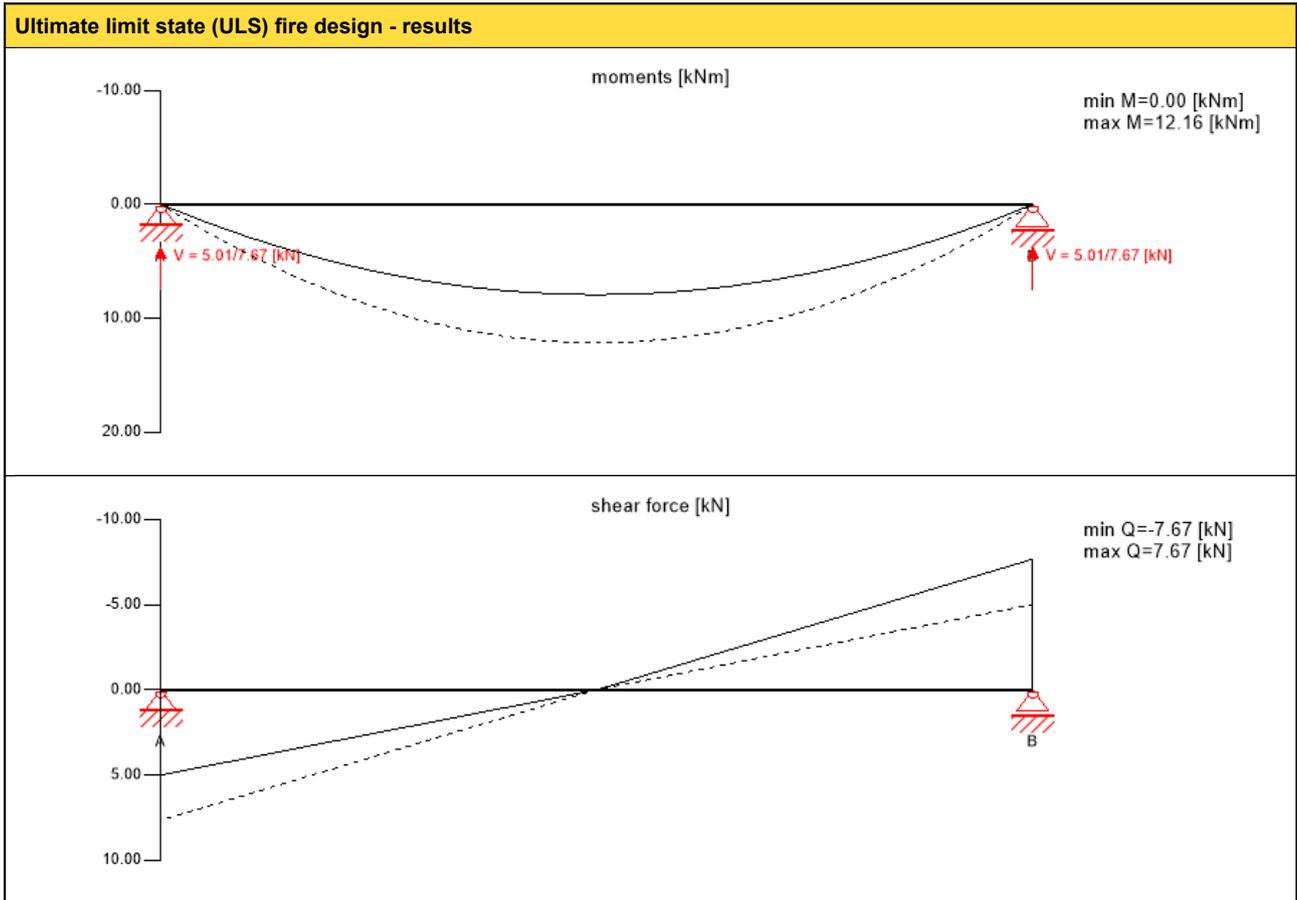
flexural stress analysis

$M_{y,d} =$	31.82	kNm	$f_{m,k} =$	24.00	N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k,z} =$	24.00	N/mm ²
$N_{t,d} =$	0.00	kN	$\gamma_m =$	1.25	-
			$k_{mod} =$	0.80	-
			$k_{sys,y} =$	1.10	-
			$k_{h,m,y} =$	1.00	-
			$k_{h,m,z} =$	1.00	-
			$k_l =$	1.00	-
$\sigma_{t,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{t,d} =$	8.96	N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	-7.02	N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	16.90	N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²

utilization ratio 42 %

shear stress analysis			
$V_d =$	- 20.08 kN	$f_{v,k} =$	4.00 N/mm ²
		$\gamma_m =$	1.25
		$k_{mod} =$	0.80
$T_{v,d} =$	0.15 N/mm ²	$f_{v,d} =$	2.56 N/mm ² ✓
utilization ratio			6 %

rolling shear analysis			
$V_d =$	-20.08 kN	$f_{r,k} =$	1.15 N/mm ²
		$\gamma_m =$	1.25 -
		$k_{mod} =$	0.80 -
$T_{r,d} =$	0.14 N/mm ²	$f_{r,d} =$	0.74 N/mm ² ✓
utilization ratio			19 %

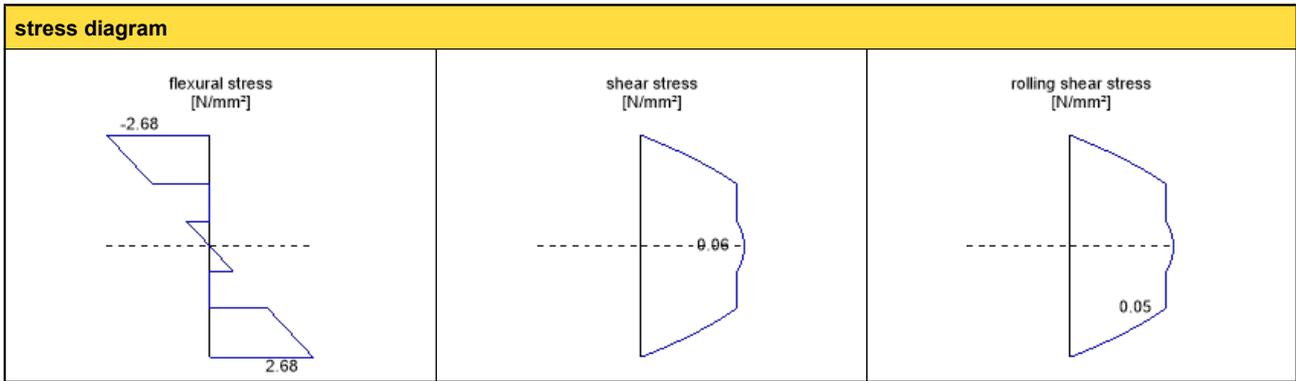


ULS fire flexural design											
field	dist.	$f_{m,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{m,y,d}$	$M_{y,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	ratio	
	[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kNm]	[N/mm ²]		
1	3.17	24.00	1.00	1.00	1.10	1.15	30.36	12.16	-2.68	9 %	LCO4

ULS fire shear analysis										
field	dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	k_{fi}	$f_{v,d}$	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
	[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
1	6.34	4.00	1.00	1.00	1.15	4.60	-7.67	0.06	1 %	LCO4

ULS fire rolling shear										
field	dist.	$f_{r,k}$	γ_m	k_{mod}	k_{fi}	$f_{r,d}$	V_d	$T_{r,d}$	ratio	
	[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
1	6.34	1.15	1.00	1.00	1.15	1.32	-7.67	0.05	4 %	LCO4





flexural stress analysis fire

$M_{y,d} =$	12.16	kNm	$f_{m,k} =$	24.00	N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k,z} =$	24.00	N/mm ²
$N_{t,d} =$	0.00	kN	$\gamma_m =$	1.00	-
			$k_{mod} =$	1.00	-
			$k_{sys,y} =$	1.10	-
			$k_{h,m,y} =$	1.00	-
			$k_{h,m,z} =$	1.00	-
			$k_i =$	1.00	-
			$k_{fi} =$	1.15	-
$\sigma_{t,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{t,0,d} =$	16.10	N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	-2.68	N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	30.36	N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²

utilization ratio 9 %

shear stress analysis fire

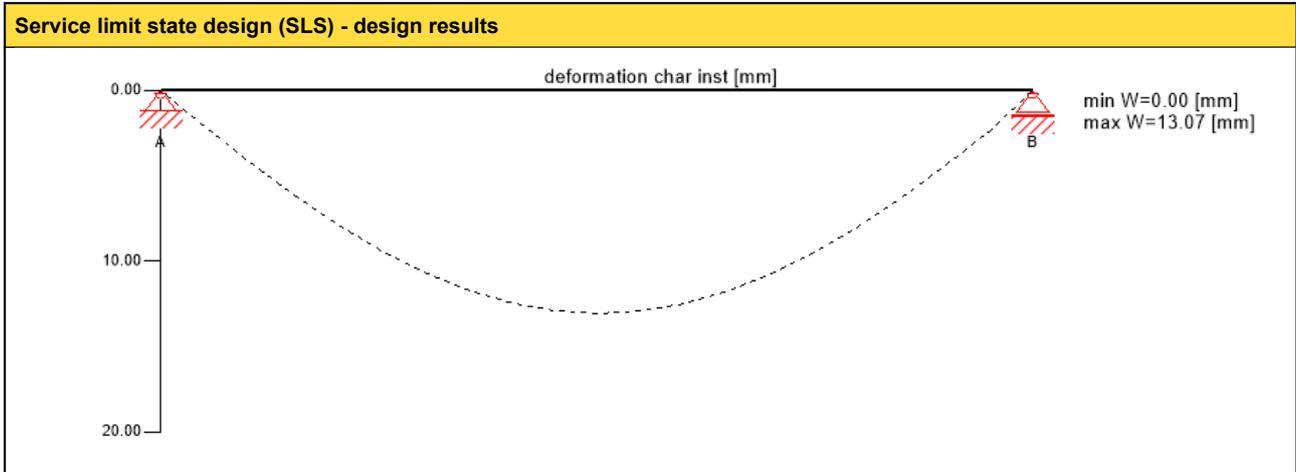
$V_d =$	-7.67	kN	$f_{v,k} =$	4.00	N/mm ²
			$\gamma_m =$	1.00	-
			$k_{mod} =$	1.00	-
			$k_{fi} =$	1.15	-
$T_{v,d} =$	0.06	N/mm ²	$f_{v,d} =$	4.60	N/mm ²

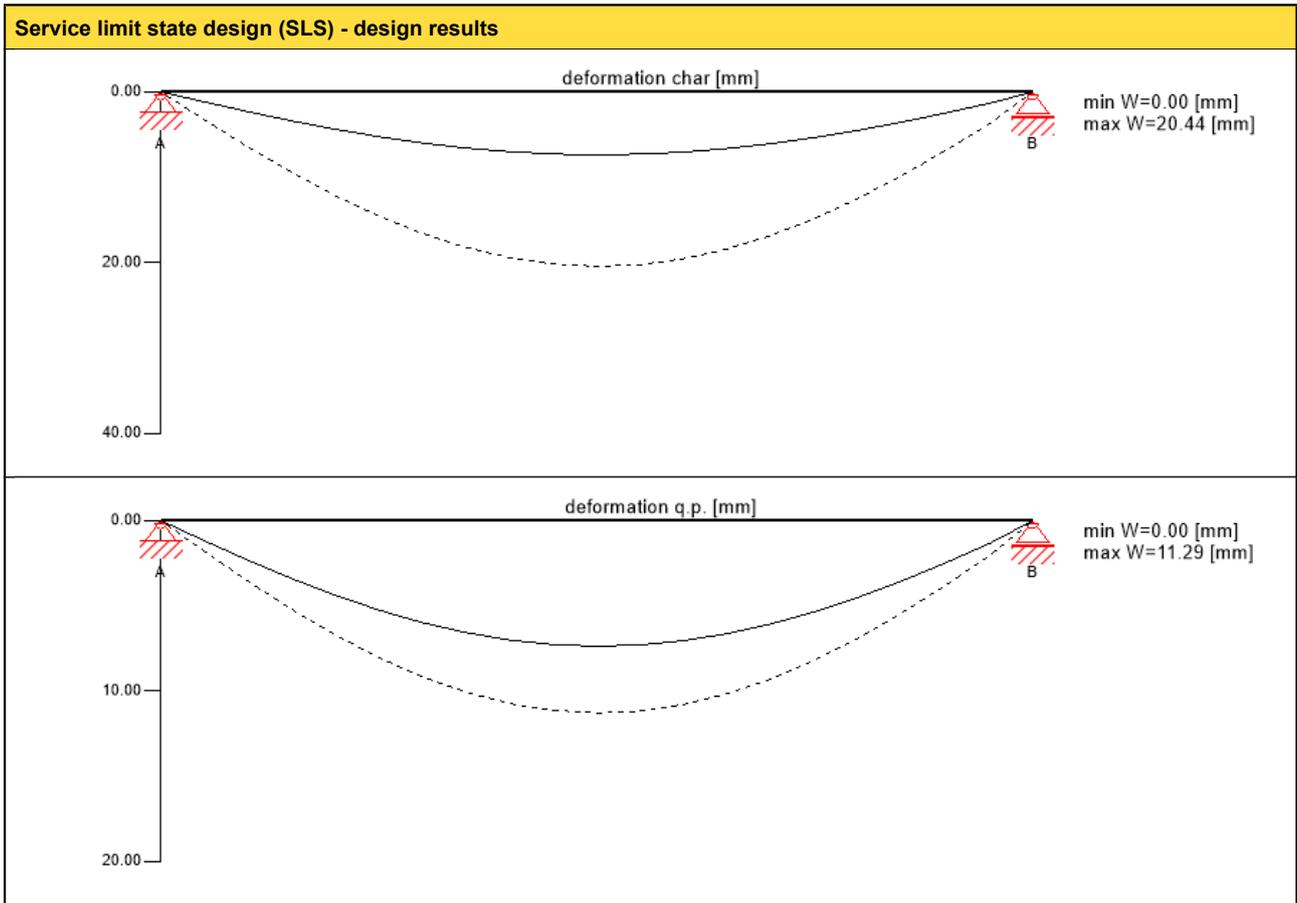
utilization ratio 1 %

rolling shear analysis fire

$V_d =$	-7.67	kN	$f_{r,k} =$	1.15	N/mm ²
			$\gamma_m =$	1.00	-
			$k_{mod} =$	1.00	-
			$k_{fi} =$	1.15	-
$T_{r,d} =$	0.05	N/mm ²	$f_{r,d} =$	1.32	N/mm ²

utilization ratio 4 %





$w_{inst} = w[char,inst]$

field	K_{def}	limit	w_{limit}	$w_{calc.}$	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.8	L/400	15.9	13.1	82 %

$w_{fin} = w[char,inst] + w[q.p.]*k_{def}$

field	K_{def}	limit	w_{limit}	$w_{calc.}$	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.8	L/250	25.4	22.1	87 %

$w_{net,fin} = w[q.p.] + w[q.p.]*k_{def}$

field	K_{def}	limit	w_{limit}	$w_{calc.}$	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.8	L/300	21.1	20.3	96 %

support design

nr.	type	width	area	k_{mod}	γ_m	$k_{c,90}$	$f_{c,k}$	$f_{c,d}$	V_{max}	V_{min}	$\sigma_{c,90,d}$		ratio
		[mm]	[cm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]		
A	rigid plate	140	1700.00	0.80	1.25	1.50	2.50	2.40	20.08	0.00	0.12	LCO2	5 %
B	rigid plate	100	1300.00	0.80	1.25	1.50	2.50	2.40	20.08	0.00	0.15	LCO2	6 %

support reaction

load case category	k_{mod}	A_V	B_V
		[kN]	
dead load	0.6	5.01	5.01
		5.01	5.01
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	8.88	8.88
		0.00	0.00



reference documents for this analysis	
English title	description
EN 338	EN 338 - Structural timber — Strength classes
EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings
ETA-14/0349	European Technical Assessment ETA-14/0349 of 02.10.2014
Expertise Rolling shear - no edge gluing, H.J. Blass	Expertise on Rolling shear for CLT
EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurocode 5 — Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design
Technical expertise 122/2011/02: analysis of load bearing capacity and separation performance of CLT elements	Verification of the load bearing capacity and the insulation criterion of CLT structures with Stora Enso CLT
Technical expertise 2434/2012 - BB: failure time t_f of gypsum fire boards (GKF) according to ON B 3410	Expertise on failure time t_f of gypsum wall fire boards according to ON B3410 and gypsum wall boards type DF according to EN 520
EN 1990	EN 1990 - Eurocode — Basis of structural design
CTE, DB SE-M	CTE, DB SE-M
UNE EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings
UNE-EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurocode 5 — Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design
Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe	Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe; publishes by SP Technical Research Institute of Sweden
National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12	ÖNORM EN 1995-1-2 - National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12
UNE EN 1995-1-2_NA	UNE EN 1995-1-2 - Spain - National Annex - Eurocode 5: Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design — National specifications concerning UNE EN 1995-1-2, national comments and national supplements
UNE EN 1995-1-1_NA	UNE EN 1995-1-1 - Spain - National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings
Expertise Rolling shear, H.J. Blass	Expertise on rolling shear strength and rolling shear modulus of CLT panels
ÖNORM EN 1995-1-1_NA, chapter 7.3	ÖNORM EN 1995-1-1 - Austria - National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General-Common rules and rules for buildings; chapter 7.3

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

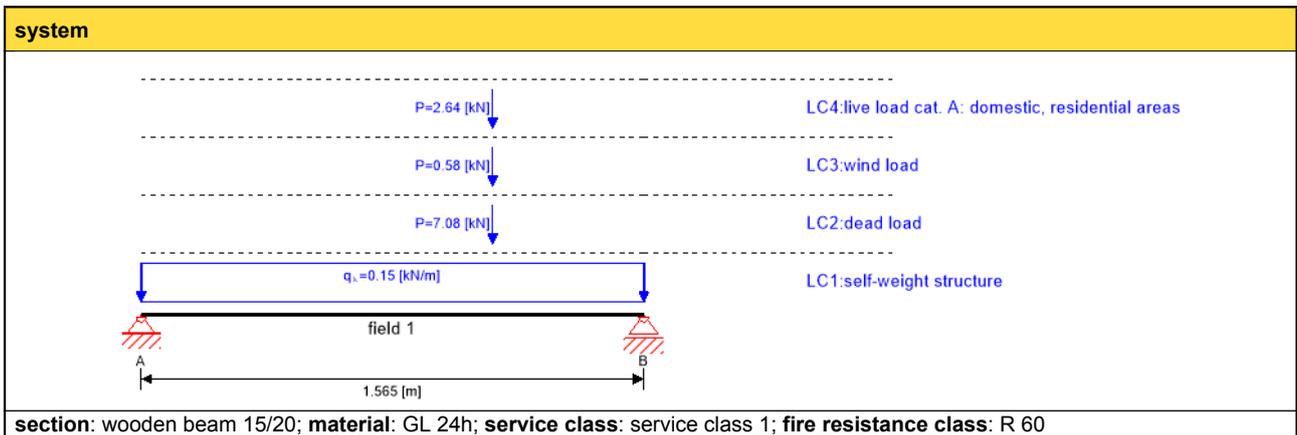
The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

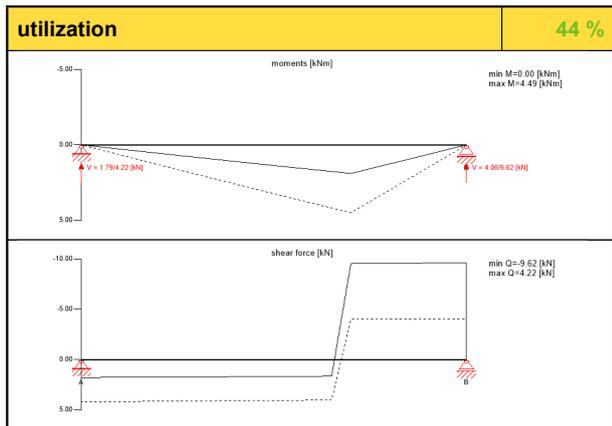
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).





section: wooden beam 15/20; material: GL 24h; service class: service class 1; fire resistance class: R 60



flexural stress analysis 27 %

$M_{y,d}$	4.49 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm	$f_{m,k,z}$	24.00 N/mm ²
$N_{t,d}$	0.00 kN	$f_{t,0,k}$	19.20 N/mm ²
$\sigma_{t,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{t,0,d}$	12.29 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	4.49 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	16.90 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	16.90 N/mm ² ✓

shear stress analysis 30 %

V_d	9.58 kN	$f_{v,k}$	3.50 N/mm ²
$T_{v,d}$	0.48 N/mm ² <	$f_{v,d}$	1.60 N/mm ² ✓

lateral torsional buckling analysis 27 %

$M_{y,d}$	4.49 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	15.36 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	4.49 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	16.90 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	16.90 N/mm ² ✓

buckling analysis 27 %

$M_{y,d}$	4.49 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	15.36 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	4.49 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	16.90 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	16.90 N/mm ² ✓

flexural stress analysis fire 44 %

$M_{y,d}$	2.62 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm	$f_{m,k,z}$	24.00 N/mm ²
$N_{t,d}$	0.00 kN	$f_{t,0,k}$	19.20 N/mm ²
$\sigma_{t,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{t,0,d}$	22.08 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	13.28 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	30.36 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	30.36 N/mm ² ✓

shear stress analysis fire 37 %

V_d	5.60 kN	$f_{v,k}$	3.50 N/mm ²
$T_{v,d}$	1.07 N/mm ² <	$f_{v,d}$	2.87 N/mm ² ✓

buckling analysis fire 44 %

$M_{y,d}$	2.62 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	27.60 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	13.28 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	30.36 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	30.36 N/mm ² ✓

lateral torsional buckling analysis fire 44 %

$M_{y,d}$	2.62 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	27.60 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	13.28 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	30.36 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	30.36 N/mm ² ✓

w_{inst} = w[char,inst]

field	K _{def}	limit	w _{limit}	w _{calc.}	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/400	3.9	0.2	4 %

w_{fin} = w[char,inst] + w[q.p.]*k_{def}

field	K _{def}	limit	w _{limit}	w _{calc.}	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/250	6.3	0.4	7 %

w_{net,fin} = w[q.p.] + w[q.p.]*k_{def}

field	K _{def}	limit	w _{limit}	w _{calc.}	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/300	5.2	0.7	14 %

support reaction			
load case category	k _{mod}	A _v	B _v
		[kN]	
self-weight structure	0.6	0.12	0.12
		0.12	0.12
dead load	0.6	2.13	4.95
		2.13	4.95
wind load	0.9	0.17	0.41
		0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.79	1.85
		0.00	0.00

Disclaimer

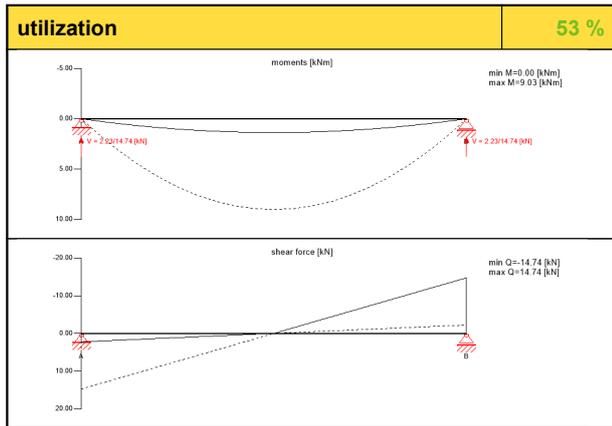
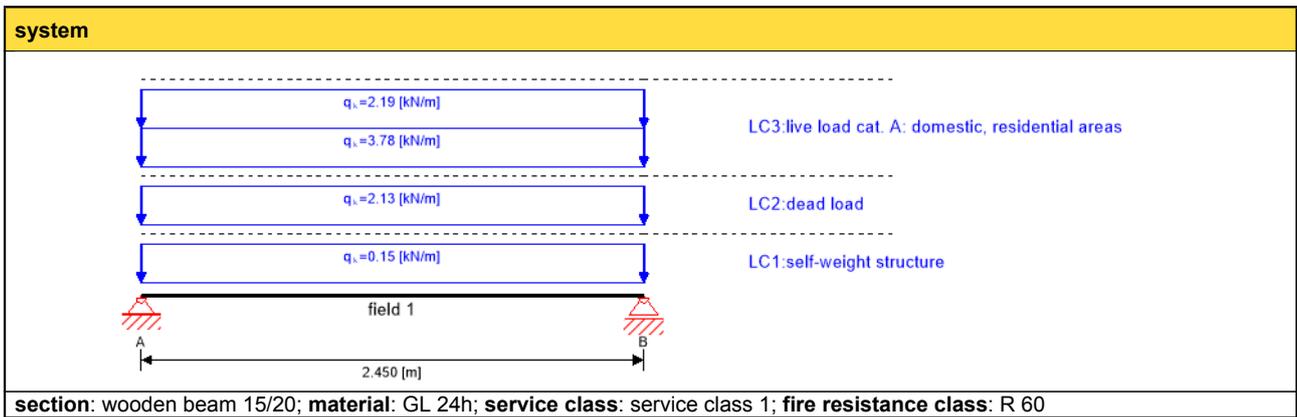
The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).



flexural stress analysis 53 %

$M_{y,d}$	9.03 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm	$f_{m,k,z}$	24.00 N/mm ²
$N_{t,d}$	0.00 kN	$f_{t,0,k}$	19.20 N/mm ²
$\sigma_{t,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{t,0,d}$	12.29 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	9.03 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	16.90 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	16.90 N/mm ² ✓

shear stress analysis 39 %

V_d	12.33 kN	$f_{v,k}$	3.50 N/mm ²
$T_{v,d}$	0.62 N/mm ² <	$f_{v,d}$	1.60 N/mm ² ✓

lateral torsional buckling analysis 53 %

$M_{y,d}$	9.03 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	15.36 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	9.03 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	16.90 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	16.90 N/mm ² ✓

buckling analysis 53 %

$M_{y,d}$	9.03 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	15.36 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	9.03 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	16.90 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	16.90 N/mm ² ✓

support reaction

load case category	k_{mod}	A_v	B_v
		[kN]	
self-weight structure	0.6	0.18	0.18
		0.18	0.18
dead load	0.6	2.61	2.61
		2.61	2.61
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	7.31	7.31
		0.00	0.00

flexural stress analysis fire 10 %

$M_{y,d}$	3.05 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm	$f_{m,k,z}$	24.00 N/mm ²
$N_{t,d}$	0.00 kN	$f_{t,0,k}$	19.20 N/mm ²
$\sigma_{t,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{t,0,d}$	22.08 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	3.05 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	30.36 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	30.36 N/mm ² ✓

shear stress analysis fire 7 %

V_d	4.17 kN	$f_{v,k}$	3.50 N/mm ²
$T_{v,d}$	0.21 N/mm ² <	$f_{v,d}$	2.87 N/mm ² ✓

buckling analysis fire 10 %

$M_{y,d}$	3.05 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	27.60 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	3.05 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	30.36 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	30.36 N/mm ² ✓

lateral torsional buckling analysis fire 10 %

$M_{y,d}$	3.05 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	27.60 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	3.05 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	30.36 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	30.36 N/mm ² ✓

$w_{inst} = w[char,inst]$

field	K_{def}	limit	w_{limit}	$w_{calc.}$	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/400	6.1	2.4	40 %

$w_{fin} = w[char,inst] + w[q.p.]*k_{def}$

field	K_{def}	limit	w_{limit}	$w_{calc.}$	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/250	9.8	3.4	35 %

$w_{net,fin} = w[q.p.] + w[q.p.]*k_{def}$

field	K_{def}	limit	w_{limit}	$w_{calc.}$	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/300	8.2	2.7	33 %



Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

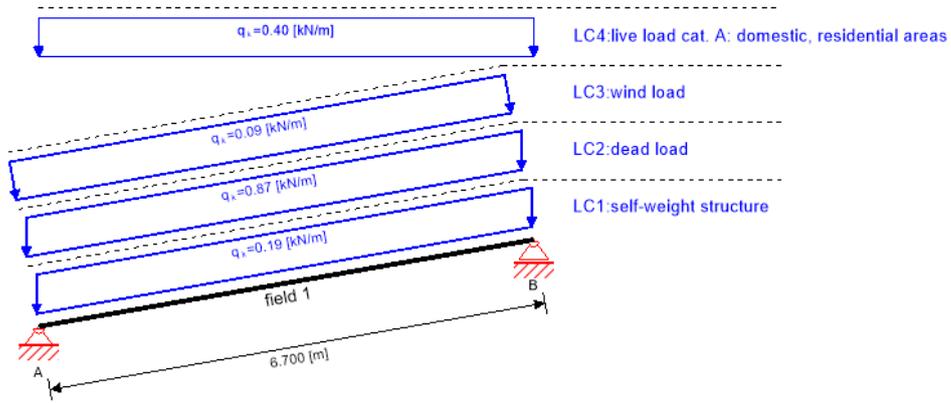
Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

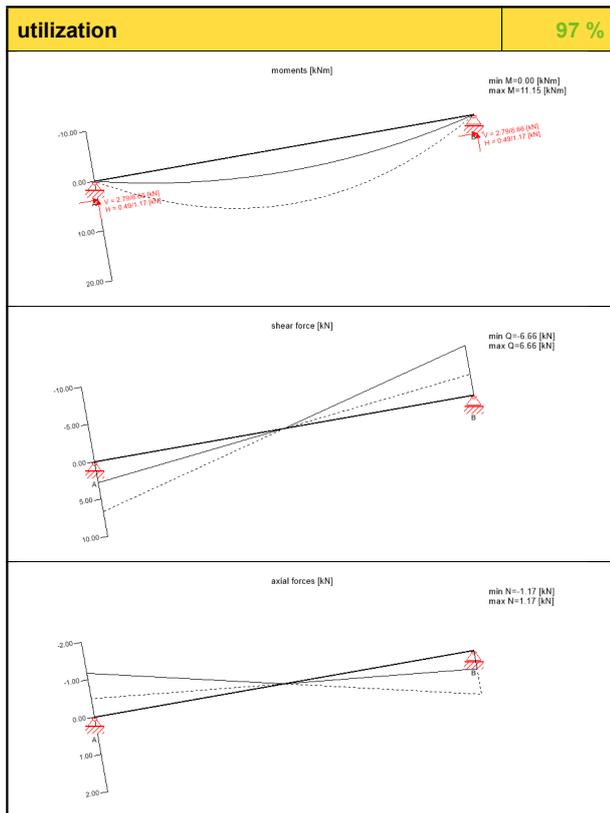
Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).



system



section: wooden beam 15/25; material: GL 24h; service class: service class 1; fire resistance class: R 60



flexural stress analysis 43 %

$M_{y,d}$	11.15 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm	$f_{m,k,z}$	24.00 N/mm ²
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	15.36 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	7.14 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	16.77 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	16.90 N/mm ² ✓

shear stress analysis 15 %

V_d	6.16 kN	$f_{v,k}$	3.50 N/mm ²
$T_{v,d}$	0.25 N/mm ² <	$f_{v,d}$	1.60 N/mm ² ✓

lateral torsional buckling analysis 43 %

$M_{y,d}$	11.15 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	15.36 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	7.14 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	16.77 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	16.90 N/mm ² ✓

buckling analysis 43 %

$M_{y,d}$	11.15 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	15.36 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	7.14 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	16.77 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	16.90 N/mm ² ✓

flexural stress analysis fire 61 %

$M_{y,d}$	6.50 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm	$f_{m,k,z}$	24.00 N/mm ²
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	27.60 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	18.55 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	30.36 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	30.36 N/mm ² ✓

shear stress analysis fire 18 %

V_d	3.65 kN	$f_{v,k}$	3.50 N/mm ²
$T_{v,d}$	0.52 N/mm ² <	$f_{v,d}$	2.87 N/mm ² ✓

buckling analysis fire 61 %

$M_{y,d}$	6.50 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	27.60 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	18.55 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	30.36 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	30.36 N/mm ² ✓

lateral torsional buckling analysis fire 61 %

$M_{y,d}$	6.50 kNm	$f_{m,k}$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$	0.00 kNm		
$N_{c,d}$	0.00 kN	$f_{c,0,k}$	24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$	27.60 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$	18.55 N/mm ²	$f_{m,y,d}$	30.36 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$	30.36 N/mm ² ✓

$w_{inst} = w[char,inst]$

field	K_{def}	limit	w_{limit}	$w_{calc.}$	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/400	16.8	5.1	31 %

$w_{fin} = w[char,inst] + w[q.p.]*k_{def}$

field	K_{def}	limit	w_{limit}	$w_{calc.}$	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/250	26.8	13.2	49 %

$w_{net,fin} = w[q.p.] + w[q.p.]*k_{def}$

field	K_{def}	limit	w_{limit}	$w_{calc.}$	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/300	22.3	21.6	97 %

support reaction

load case category	k_{mod}	A_V	A_H	B_V	B_H
		[kN]			
self-weight structure	0.6	0.63	0.00	0.63	0.00
		0.63	0.00	0.63	0.00
dead load	0.6	2.91	0.00	2.91	0.00
		2.91	0.00	2.91	0.00
wind load	0.9	0.27	0.10	0.29	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	1.32	0.00	1.32	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00



Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

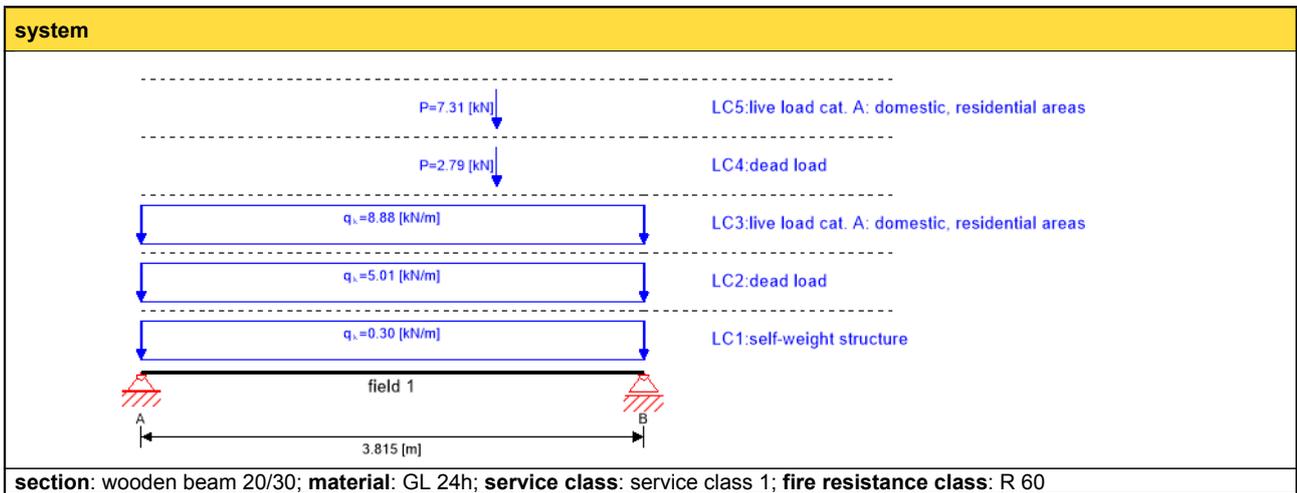
The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

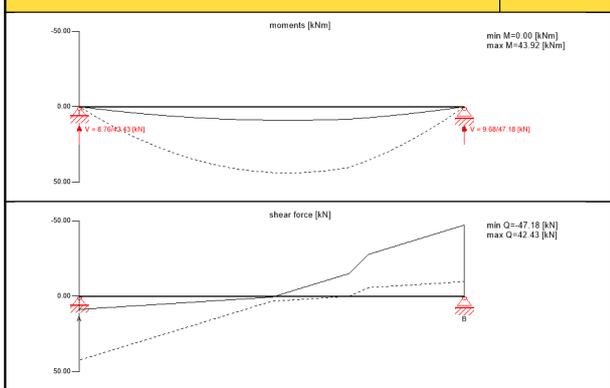
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).





utilization 89 %



flexural stress analysis 89 %

$M_{y,d}$ = 43.92 kNm	$f_{m,k}$ = 24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$ = 0.00 kNm	$f_{m,k,z}$ = 24.00 N/mm ²
$N_{t,d}$ = 0.00 kN	$f_{t,0,k}$ = 19.20 N/mm ²
$\sigma_{t,d}$ = 0.00 N/mm ²	$f_{t,0,d}$ = 12.29 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$ = 14.64 N/mm ²	$f_{m,y,d}$ = 16.46 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$ = 0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$ = 16.90 N/mm ² ✓

shear stress analysis 64 %

V_d = 41.03 kN	$f_{v,k}$ = 3.50 N/mm ²
$T_{v,d}$ = 1.03 N/mm ² <	$f_{v,d}$ = 1.60 N/mm ² ✓

lateral torsional buckling analysis 89 %

$M_{y,d}$ = 43.92 kNm	$f_{m,k}$ = 24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$ = 0.00 kNm	
$N_{c,d}$ = 0.00 kN	$f_{c,0,k}$ = 24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$ = 0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$ = 15.36 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$ = 14.64 N/mm ²	$f_{m,y,d}$ = 16.46 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$ = 0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$ = 16.90 N/mm ² ✓

buckling analysis 89 %

$M_{y,d}$ = 43.92 kNm	$f_{m,k}$ = 24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$ = 0.00 kNm	
$N_{c,d}$ = 0.00 kN	$f_{c,0,k}$ = 24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$ = 0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$ = 15.36 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$ = 14.64 N/mm ²	$f_{m,y,d}$ = 16.46 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$ = 0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$ = 16.90 N/mm ² ✓

flexural stress analysis fire 20 %

$M_{y,d}$ = 17.42 kNm	$f_{m,k}$ = 24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$ = 0.00 kNm	$f_{m,k,z}$ = 24.00 N/mm ²
$N_{t,d}$ = 0.00 kN	$f_{t,0,k}$ = 19.20 N/mm ²
$\sigma_{t,d}$ = 0.00 N/mm ²	$f_{t,0,d}$ = 22.08 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$ = 5.81 N/mm ²	$f_{m,y,d}$ = 29.58 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$ = 0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$ = 30.36 N/mm ² ✓

shear stress analysis fire 14 %

V_d = 16.34 kN	$f_{v,k}$ = 3.50 N/mm ²
$T_{v,d}$ = 0.41 N/mm ² <	$f_{v,d}$ = 2.87 N/mm ² ✓

buckling analysis fire 20 %

$M_{y,d}$ = 17.42 kNm	$f_{m,k}$ = 24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$ = 0.00 kNm	
$N_{c,d}$ = 0.00 kN	$f_{c,0,k}$ = 24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$ = 0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$ = 27.60 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$ = 5.81 N/mm ²	$f_{m,y,d}$ = 29.58 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$ = 0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$ = 30.36 N/mm ² ✓

lateral torsional buckling analysis fire 20 %

$M_{y,d}$ = 17.42 kNm	$f_{m,k}$ = 24.00 N/mm ²
$M_{z,d}$ = 0.00 kNm	
$N_{c,d}$ = 0.00 kN	$f_{c,0,k}$ = 24.00 N/mm ²
$\sigma_{c,d}$ = 0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d}$ = 27.60 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d}$ = 5.81 N/mm ²	$f_{m,y,d}$ = 29.58 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$ = 0.00 N/mm ² <	$f_{m,z,d}$ = 30.36 N/mm ² ✓

w_{inst} = w[char,inst]

field	K _{def}	limit	w _{limit}	w _{calc.}	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/400	9.5	5.6	59 %

w_{fin} = w[char,inst] + w[q.p.]*k_{def}

field	K _{def}	limit	w _{limit}	w _{calc.}	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/250	15.3	8.7	57 %

w_{net,fin} = w[q.p.] + w[q.p.]*k_{def}

field	K _{def}	limit	w _{limit}	w _{calc.}	ratio
		[-]	[mm]	[mm]	
1	0.6	L/300	12.7	8.2	64 %



support reaction			
load case category	k_{mod}	A_v	B_v
		[kN]	
self-weight structure	0.6	0.57	0.57
		0.57	0.57
dead load	0.6	9.56	9.56
		9.56	9.56
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	16.94	16.94
		0.00	0.00
dead load	0.6	0.82	1.97
		0.82	1.97
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	2.14	5.17
		0.00	0.00

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

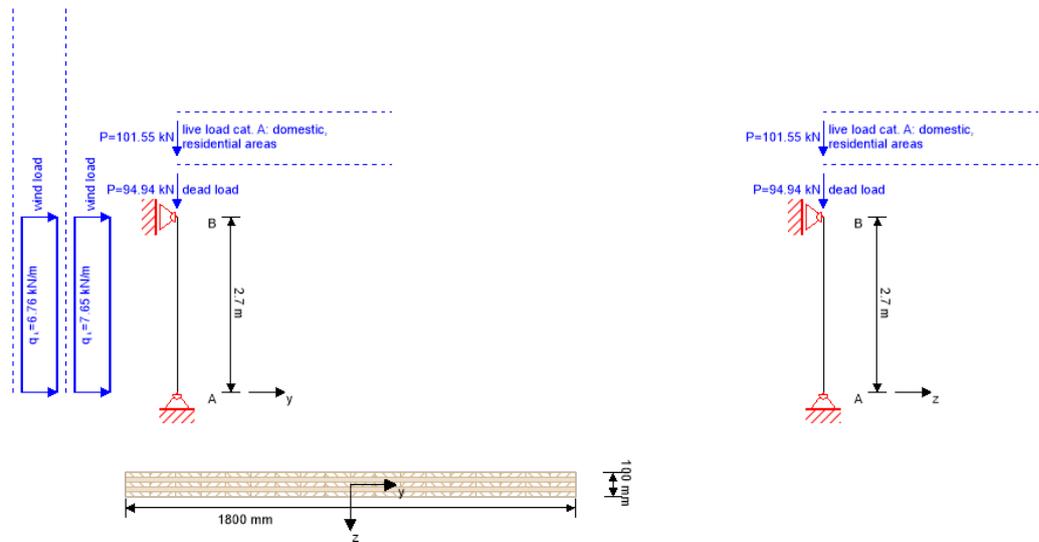
The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).

system



global utilization ratio 82 %

ULS	41 %	ULS fire	82 %
-----	------	----------	------

section: CLT 100 C5s

	layer	thickness	orientation	material
	1	20.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)
	2	20.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)
	3	20.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)
	4	20.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)
	5	20.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)
	t _{CLT}	100.0 mm		

section fire: CLT 100 C5s

	layer	thickness	orientation	material		
	1	20.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)		
	2	20.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)		
	3	8.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)		
t _{CLT}	48.0 mm					
fire resistance class: R 60	time 60 min					
fire protection layering : no additional fire protection	k ₀	d ₀	d _{char,0,h}	d _{def,h}	d _{char,0,v}	d _{def,v}
	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	1	7	45.0	52.0	37.8	44.8

material values

material	f _{m,k}	f _{t,0,k}	f _{t,90,k}	f _{c,0,k}	f _{c,90,k}	f _{v,k}	f _{r,k min}	E _{0,mean}	G _{mean}	G _{r,mean}
	[N/mm ²]									
C24 spruce ETA (2019)	24.00	14.00	0.12	21.00	2.50	4.00	1.25	12,000.00	690.00	50.00

load



load case groups										
	load case category	type	duration	Kmod	γ_{inf}	γ_{sup}	ψ_0	ψ_1	ψ_2	
LC2	wind load	Q	short term	0.9	0	1.5	0.6	0.2	0	
LC3	dead load	G	permanent	0.6	0.8	1.35	1	1	1	
LC4	live load cat. A: domestic, residential areas	Q	medium term	0.8	0	1.5	0.7	0.5	0.3	
LC1	wind load	Q	short term	0.9	0	1.5	0.6	0.2	0	

LC2:wind load	
continuous load	
q_k	
[kN/m]	
7.65	

LC3:dead load		
vertical load		
P_k	ex. y	ex. z
[kN]	[m]	[m]
94.94	0.00	0.00

LC4:live load cat. A: domestic, residential areas		
vertical load		
P_k	ex. y	ex. z
[kN]	[m]	[m]
101.55	0.00	0.00

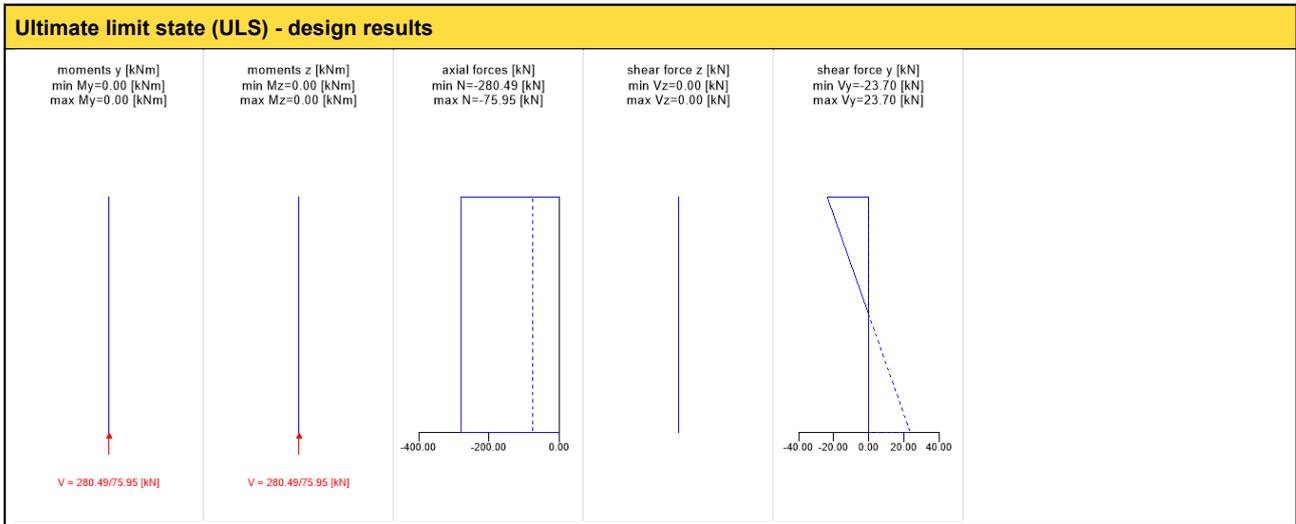
LC1:wind load	
continuous load	
q_k	
[kN/m]	
6.76	

ULS combinations	
	combination rule
LCO1	1.35/0.80 * LC3
LCO2	1.35/0.80 * LC3 + 1.50/0.00 * LC2
LCO3	1.35/0.80 * LC3 + 1.50/0.00 * LC2 + 1.50/0.00 * 0.70 * LC4
LCO4	1.35/0.80 * LC3 + 1.50/0.00 * LC2 + 1.50/0.00 * 0.70 * LC4 + 1.50/0.00 * 0.60 * LC1
LCO5	1.35/0.80 * LC3 + 1.50/0.00 * LC4
LCO6	1.35/0.80 * LC3 + 1.50/0.00 * LC4 + 1.50/0.00 * 0.60 * LC2
LCO7	1.35/0.80 * LC3 + 1.50/0.00 * LC4 + 1.50/0.00 * 0.60 * LC2 + 1.50/0.00 * 0.60 * LC1
LCO8	1.35/0.80 * LC3 + 1.50/0.00 * LC1
LCO9	1.35/0.80 * LC3 + 1.50/0.00 * LC1 + 1.50/0.00 * 0.60 * LC2
LCO10	1.35/0.80 * LC3 + 1.50/0.00 * LC1 + 1.50/0.00 * 0.60 * LC2 + 1.50/0.00 * 0.70 * LC4

ULS combinations fire	
	combination rule
LCO1	1.00/1.00 * LC3
LCO2	1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC2
LCO3	1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC4
LCO4	1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1
LCO5	1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC4
LCO6	1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC2
LCO7	1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC4 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1
LCO8	1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1



ULS combinations fire	
	combination rule
LCO9	1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC2
LCO10	1.00/1.00 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC4



ULS flexural design							
dist.	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	$f_{m,k}$	$f_{m,y,d}$	$f_{t,d}$	$f_{c,d}$
[m]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0.0	1.25	0.80	1.10	24.00	16.90	8.96	13.44
$M_{y,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	ratio	
[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		
0.00	-280.49	0.00	0.00	2.60	0.00	19 %	LCO5

ULS shear analysis								
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$f_{v,d}$	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	4.00	1.25	0.90	2.88	0.00	0.00	0 %	LCO10

ULS rolling shear								
dist.	$f_{r,k}$	γ_m	k_{mod}	$f_{r,d}$	V_d	$T_{r,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	1.25	1.25	0.90	0.90	0.00	0.00	0 %	LCO10

ULS shear design in plane of CLT - gross section							
dist.	$f_{v,IP,Gross,k}$	γ_m	k_{mod}	$f_{v,IP,Gross,d}$	V_d	$T_{IP,Gross,d}$	ratio
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kNm]	[N/mm ²]	
0.0	3.50	1.25	0.90	2.52	23.70	0.20	8 % LCO4

ULS shear design in plane of CLT - net section							
dist.	$f_{v,IP,Net,k}$	γ_m	k_{mod}	$f_{v,IP,Net,d}$	$V_{Net,d}$	$T_{v,IP,Net,d}$	ratio
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kNm]	[N/mm ²]	
0.0	3.90	1.25	0.90	2.81	23.70	0.33	12 % LCO4

ULS shear design in plane of CLT - gross section kombiniert						
dist.	γ_m	k_{mod}	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[-]	[-]	[kN]	[N/mm ²]		
0.0	1.25	0.90	0.00	0.00	1 %	LCO4



ULS shear design in plane of CLT - net section kombiniert						
dist.	γ_m	k_{mod}	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[-]	[-]	[kN]	[N/mm ²]		
0.0	1.25	0.90	0.00	0.00	1 %	LCO4

ULS torsional shear design in plane of CLT - in face glued surfaces										
$f_{v,T,Node,k}$	γ_m	k_{mod}	$f_{v,T,Node,d}$	$V_{\delta,d}$	δM_t	n	a	I_p	ratio	
[N/mm ²]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kNm]	[kNm]	[-]	[m]	[mm ⁴]		
2.50	1.25	0.90	1.80	23.70	3.56	44	0.150	84375010.00	4 %	LCO4

ULS buckling design											
dist.	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	$k_{sys,z}$	$f_{m,k}$	$f_{m,y,d}$	$f_{m,z,d}$	$f_{t,0,d}$	$f_{c,0,d}$		
[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]						
0.0	1.25	0.80	1.10	1.00	24.00	16.90	15.36	0.00	13.44		
$l_{k,y}$	$l_{k,z}$	λ_y	λ_z	$\lambda_{rel,y}$	$\lambda_{rel,z}$	β_c	k_y	k_z	$k_{c,y}$	$k_{c,z}$	
[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
2.700	2.700	81	5	1.32	0.08	0.2	1.48	0.48	0.47	1.00	
$M_{y,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	ratio				
[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]					
0.00	-280.49	0.00	0.00	0.00	2.60	0.00	41 %	LCO5			

ULS lateral torsional buckling design										
dist.	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	$f_{m,k}$	$f_{m,y,d}$	$f_{t,0,d}$	$f_{c,0,d}$			
[m]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]			
1.35	1.25	0.90	1.10	24.00	19.01	0.00	15.12			
l_{ef}	l_k	λ_y	$\lambda_{rel,y}$	$\lambda_{rel,m}$	β_c	k_y	$k_{c,y}$	$\sigma_{m,crit,y}$	k_{crit}	
[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]	
2.700	2.700	81	1.32	1.15	0.2	1.48	0.47	3869.72	0.70	
$M_{y,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	ratio				
[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]					
0.00	-280.49	0.00	0.00	2.60	0.00	37 %	LCO7			

flexural stress analysis											
$M_{y,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k} =$	24.00	N/mm ²	$M_{z,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k,z} =$	24.00	N/mm ²
$N_{c,d} =$	-280.49	kN	$\gamma_m =$	1.25	-	$k_{mod} =$	0.80	-	$k_{sys,y} =$	1.10	-
			$k_{sys,z} =$	1.00	-	$k_{h,m,y} =$	1.00	-	$k_{h,m,z} =$	1.00	-
			$k_i =$	1.00	-	$\sigma_{c,d} =$	2.60	N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	13.44	N/mm ²
			$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²	$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	16.90	N/mm ²
			$\sigma_{c,d} =$	2.60	N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	15.36	N/mm ²			✓
utilization ratio										19 %	

shear stress analysis											
$V_d =$	0.00	kN	$f_{v,k} =$	4.00	N/mm ²	$\gamma_m =$	1.25	-	$k_{mod} =$	0.90	-
			$\gamma_m =$	1.25	-	$k_{h,v} =$	1.00	-	$f_{v,d} =$	2.88	N/mm ²
$T_{v,d} =$	0.00	N/mm ²									✓
utilization ratio										0 %	

rolling shear analysis											
$V_d =$	0.00	kN	$f_{r,k} =$	1.25	N/mm ²	$\gamma_m =$	1.25	-	$k_{mod} =$	0.90	-
			$\gamma_m =$	1.25	-	$f_{r,d} =$	0.90	N/mm ²			✓
$T_{r,d} =$	0.00	N/mm ²									✓
utilization ratio										0 %	



shear analysis gross section					
$V_d =$	23.70	kNm	$f_{v,IP,Gross,k} =$	3.50	N/mm ²
			$\gamma_m =$	1.25	-
			$k_{mod} =$	0.90	-
$T_{v,IP,Gross,d} =$	0.20	N/mm ²	$f_{v,IP,Gross,d} =$	2.52	N/mm ²
		<			✓
utilization ratio					8 %

shear analysis net section					
$V_{Net,d} =$	23.70	kNm	$f_{v,IP,Net,k} =$	3.90	N/mm ²
			$\gamma_m =$	1.25	-
			$k_{mod} =$	0.90	-
$T_{v,IP,Net,d} =$	0.33	N/mm ²	$f_{v,IP,Net,d} =$	2.81	N/mm ²
		<			✓
utilization ratio					12 %

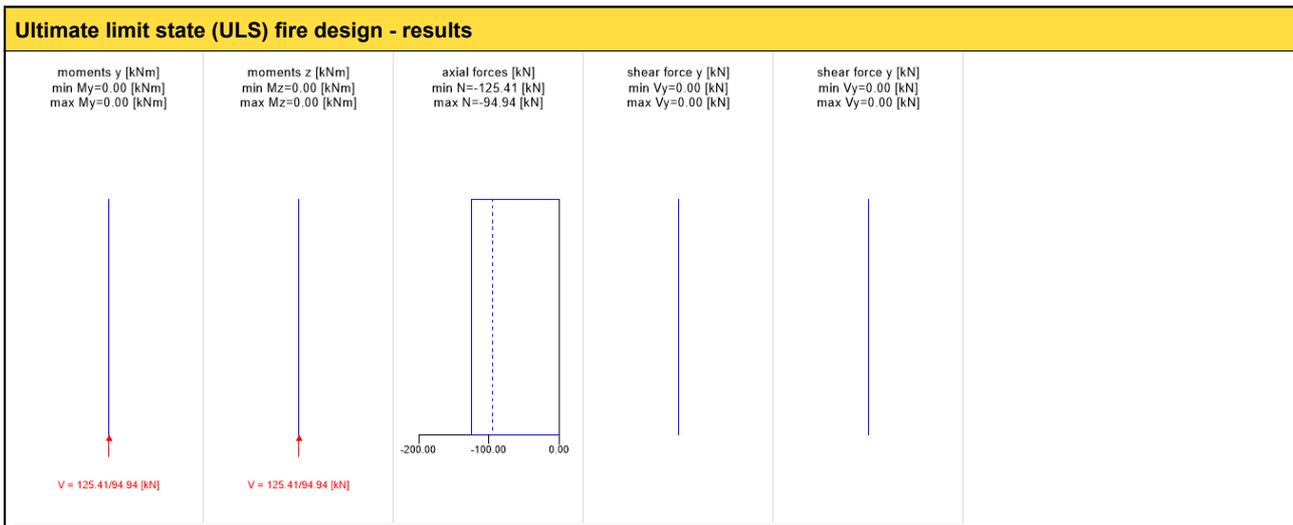
shear analysis gross section combined					
$V_d =$	0.00	kN	$f_{v,k} =$	4.00	N/mm ²
$V_{Gross,d} =$	23.70	kNm	$f_{v,IP,Gross,k} =$	3.50	N/mm ²
			$\gamma_m =$	1.25	-
			$k_{mod} =$	0.90	-
$T_{v,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{v,d} =$	2.88	N/mm ²
$T_{v,IP,Gross,d} =$	0.20	N/mm ²	$f_{v,IP,Gross,d} =$	2.52	N/mm ²
		<			✓
utilization ratio					1 %

shear analysis net section combined					
$V_d =$	0.00	kN	$f_{v,k} =$	4.00	N/mm ²
$V_{Net,d} =$	23.70	kNm	$f_{v,IP,Net,k} =$	3.90	N/mm ²
			$\gamma_m =$	1.25	-
			$k_{mod} =$	0.90	-
$T_{v,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{v,d} =$	2.88	N/mm ²
$T_{v,IP,Net,d} =$	0.33	N/mm ²	$f_{v,IP,Net,d} =$	2.81	N/mm ²
		<			✓
utilization ratio					1 %

torsional shear design in plane of CLT - in face glued surfaces					
$V_{\delta,d} =$	23.70	kNm	$f_{v,T,Node,k} =$	2.50	N/mm ²
			$\gamma_m =$	1.25	-
			$k_{mod} =$	0.90	-
$T_{T,Node,d} =$	0.07	N/mm ²	$f_{v,T,Node,d} =$	1.80	N/mm ²
		<			✓
utilization ratio					4 %

buckling analysis					
$M_{y,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k} =$	24.00	N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00	kNm	$\gamma_m =$	1.25	-
$N_{c,d} =$	-280.49	kN	$k_{mod} =$	0.80	-
			$k_{sys,y} =$	1.10	-
			$k_{sys,z} =$	1.00	-
			$k_{h,m,y} =$	1.00	-
			$k_{h,m,z} =$	1.00	-
$\sigma_{c,d} =$	2.60	N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	13.44	N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	16.90	N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	15.36	N/mm ²
		<			✓
utilization ratio					41 %

lateral torsional buckling analysis			
$M_{y,d} =$	0.00 kNm	$f_{m,k} =$	24.00 N/mm ²
$M_{z,d} =$	11.82 kNm	$\gamma_m =$	1.25 -
$N_{c,d} =$	-280.49 kN	$k_{mod} =$	0.90 -
		$k_{sys,y} =$	1.10 -
		$k_{h,m,y} =$	1.00 -
		$k_{h,m,z} =$	1.00 -
		$k_i =$	1.00 -
$\sigma_{c,d} =$	2.60 N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	15.12 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	19.01 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.36 N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	17.28 N/mm ² ✓
utilization ratio			37 %



ULS fire flexural design								
dist.	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{m,k}$	$f_{m,y,d}$	$f_{t,0,d}$	$f_{c,0,d}$
[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0.0	1.00	1.00	1.10	1.15	24.00	30.36	16.10	24.15
$M_{y,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	ratio		
[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]			
0.00	-125.41	0.00	0.00	2.49	0.00	10 %	LCO3	

ULS fire shear analysis										
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{v,d}$	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	4.00	1.00	1.00	1.10	1.15	4.60	0.00	0.00	0 %	LCO10

ULS fire rolling shear										
dist.	$f_{r,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{r,d}$	V_d	$T_{r,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	1.25	1.00	1.00	1.10	1.15	1.44	0.00	0.00	0 %	LCO10

ULS fire shear design in plane of CLT - gross section									
dist.	$f_{v,IP,Gross,k}$	γ_m	k_{mod}	k_{fi}	$f_{v,IP,Gross,d}$	V_d	$T_{IP,Gross,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kNm]	[N/mm ²]		
2.7	3.50	1.00	1.00	1.15	4.03	0.00	0.00	0 %	LCO10

ULS fire shear design in plane of CLT - net section									
dist.	$f_{v,IP,Net,k}$	γ_m	k_{mod}	k_{fi}	$f_{v,IP,Net,d}$	$V_{Net,d}$	$T_{v,IP,Net,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kNm]	[N/mm ²]		
2.7	3.90	1.00	1.00	1.15	4.49	0.00	0.00	0 %	LCO10



ULS fire shear design in plane of CLT - gross section kombiniert							
dist.	γ_m	k_{mod}	k_{fi}	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	1.00	1.00	1.15	0.00	0.00	0 %	LCO10

ULS fire shear design in plane of CLT - net section kombiniert							
dist.	γ_m	k_{mod}	k_{fi}	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	1.00	1.00	1.15	0.00	0.00	0 %	LCO10

ULS fire torsional shear design in plane of CLT - in face glued surfaces										
$f_{v,T,Node,k}$	γ_m	k_{mod}	$f_{v,T,Node,d}$	$V_{\delta,d}$	δM_t	n	a	I_p	ratio	
[N/mm ²]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kNm]	[kNm]	[-]	[m]	[mm ⁴]		
2.50	1.00	1.00	2.88	0.00	0.00	22	0.150	84375010.00	0 %	LCO10

ULS buckling design										
dist.	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	$k_{sys,z}$	$f_{m,k}$	$f_{m,y,d}$	$f_{m,z,d}$	$f_{t,0,d}$	$f_{c,0,d}$	
[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]					
0.0	1.00	1.00	1.10	1.00	24.00	30.36	27.60	0.00	24.15	
$l_{k,y}$	$l_{k,z}$	λ_y	λ_z	$\lambda_{rel,y}$	$\lambda_{rel,z}$	β_c	k_y	k_z	$k_{c,y}$	
[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
2.700	2.700	167	5	2.72	0.08	0.2	4.43	0.48	0.13	
$k_{c,z}$	$M_{y,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	ratio		
[-]	[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]			
1.00	0.00	-125.41	0.00	0.00	0.00	2.49	0.00	82 %	LCO3	

flexural stress analysis fire											
$M_{y,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k} =$	24.00	N/mm ²	$f_{m,k,z} =$	24.00	N/mm ²	$\gamma_m =$	1.00	-
$M_{z,d} =$	0.00	kNm	$k_{mod} =$	1.00	-	$k_{sys,y} =$	1.10	-	$k_{h,m,y} =$	1.00	-
$N_{c,d} =$	-125.41	kN	$k_{h,m,z} =$	1.00	-	$k_i =$	1.00	-	$k_{fi} =$	1.15	-
$\sigma_{c,d} =$	2.49	N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	24.15	N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	30.36	N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	27.60	N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	27.60	N/mm ²						✓
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²									<
utilization ratio										10 %	

shear stress analysis fire											
$V_d =$	0.00	kN	$f_{v,k} =$	4.00	N/mm ²	$\gamma_m =$	1.00	-	$k_{mod} =$	1.00	-
$T_{v,d} =$	0.00	N/mm ²	$k_{h,v} =$	1.00	-	$k_{fi} =$	1.15	-	$f_{v,d} =$	4.60	N/mm ²
											✓
utilization ratio										0 %	

rolling shear analysis fire											
$V_d =$	0.00	kN	$f_{r,k} =$	1.25	N/mm ²	$\gamma_m =$	1.00	-	$k_{mod} =$	1.00	-
$T_{r,d} =$	0.00	N/mm ²	$k_{fi} =$	1.15	-	$f_{r,d} =$	1.44	N/mm ²			✓
											<
utilization ratio										0 %	



shear analysis gross section fire						
$V_d =$	0.00	kNm		$f_{v,IP,Gross,k} =$	3.50	N/mm ²
				$\gamma_m =$	1.00	-
				$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$T_{IP,Gross,d} =$	0.00	N/mm ²	<	$f_{v,IP,Gross,d} =$	4.03	N/mm ²
utilization ratio						0 %

shear analysis net section fire						
$V_{Net,d} =$	0.00	kNm		$f_{v,IP,Net,k} =$	3.90	N/mm ²
				$\gamma_m =$	1.00	-
				$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$T_{v,IP,Net,d} =$	0.00	N/mm ²	<	$f_{v,IP,Net,d} =$	4.49	N/mm ²
utilization ratio						0 %

shear analysis gross section combined fire						
$V_d =$	0.00	kN		$f_{v,k} =$	4.00	N/mm ²
$V_{Gross,d} =$	0.00	kNm		$f_{v,IP,Gross,k} =$	3.50	N/mm ²
				$\gamma_m =$	1.00	-
				$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$T_{v,d} =$	0.00	N/mm ²		$f_{v,d} =$	4.60	N/mm ²
$T_{IP,Gross,d} =$	0.00	N/mm ²	<	$f_{v,IP,Gross,d} =$	4.03	N/mm ²
utilization ratio						0 %

shear analysis net section combined fire						
$V_d =$	0.00	kN		$f_{v,k} =$	4.00	N/mm ²
$V_{Net,d} =$	0.00	kNm		$f_{v,IP,Net,k} =$	3.90	N/mm ²
				$\gamma_m =$	1.00	-
				$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$T_{v,d} =$	0.00	N/mm ²		$f_{v,d} =$	4.60	N/mm ²
$T_{IP,Net,d} =$	0.00	N/mm ²	<	$f_{v,IP,Net,d} =$	4.49	N/mm ²
utilization ratio						0 %

torsional shear design in plane of CLT - in face glued surfaces fire						
$V_{\delta,d} =$	0.00	kNm		$f_{v,T,Node,k} =$	2.50	N/mm ²
				$\gamma_m =$	1.00	-
				$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$T_{T,Node,d} =$	0.00	N/mm ²	<	$f_{v,T,Node,d} =$	2.88	N/mm ²
utilization ratio						0 %

buckling analysis fire						
$M_{y,d} =$	0.00	kNm		$f_{m,k} =$	24.00	N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00	kNm		$\gamma_m =$	1.00	-
$N_{c,d} =$	-125.41	kN		$k_{mod} =$	1.00	-
				$k_{sys,y} =$	1.10	-
				$k_{sys,z} =$	1.00	-
				$k_{h,m,y} =$	1.00	-
				$k_{h,m,z} =$	1.00	-
				$k_{fi} =$	1.15	-
$\sigma_{c,d} =$	2.49	N/mm ²		$f_{c,0,d} =$	24.15	N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²		$f_{m,y,d} =$	30.36	N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	<	$f_{m,z,d} =$	27.60	N/mm ²
utilization ratio						82 %

support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
wind load	0.9	10.33	0.00	0.00	10.33	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
dead load	0.6	0.00	0.00	94.94	0.00	0.00



support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
		0.00	0.00	94.94	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	101.55	0.00	0.00
wind load	0.9	9.13	0.00	0.00	9.13	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

reference documents for this analysis	
English title	description
EN 338	EN 338 - Structural timber — Strength classes
EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings
ETA-14/0349	European Technical Assessment ETA-14/0349 of 02.10.2014
Expertise Rolling shear - no edge gluing, H.J. Blass	Expertise on Rolling shear for CLT
EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurocode 5 — Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design
Technical expertise 122/2011/02: analysis of load bearing capacity and separation performance of CLT elements	Verification of the load bearing capacity and the insulation criterion of CLT structures with Stora Enso CLT
Technical expertise 2434/2012 - BB: failure time t_f of gypsum fire boards (GKF) according to ON B 3410	Expertise on failure time t_f of gypsum wall fire boards according to ON B3410 and gypsum wall boards type DF according to EN 520
CTE, DB, SE-M	CTE, DB, SE-M
UNE EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings
UNE-EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurocode 5 — Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design
Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe	Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe; publishes by SP Technical Research Institute of Sweden
National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12	ÖNORM EN 1995-1-2 - National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12
UNE EN 1995-1-2_NA	UNE EN 1995-1-2 - Spain - National Annex - Eurocode 5: Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design — National specifications concerning UNE EN 1995-1-2, national comments and national supplements
UNE EN 1995-1-1_NA	UNE EN 1995-1-1 - Spain - National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings
Expertise Rolling shear, H.J. Blass	Expertise on rolling shear strength and rolling shear modulus of CLT panels
Expertise shear in plane of CLT, H.J. Blass	Expertise - revision of DIBt technical approval Z-9.1/599 - shear in the plane of CLT

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

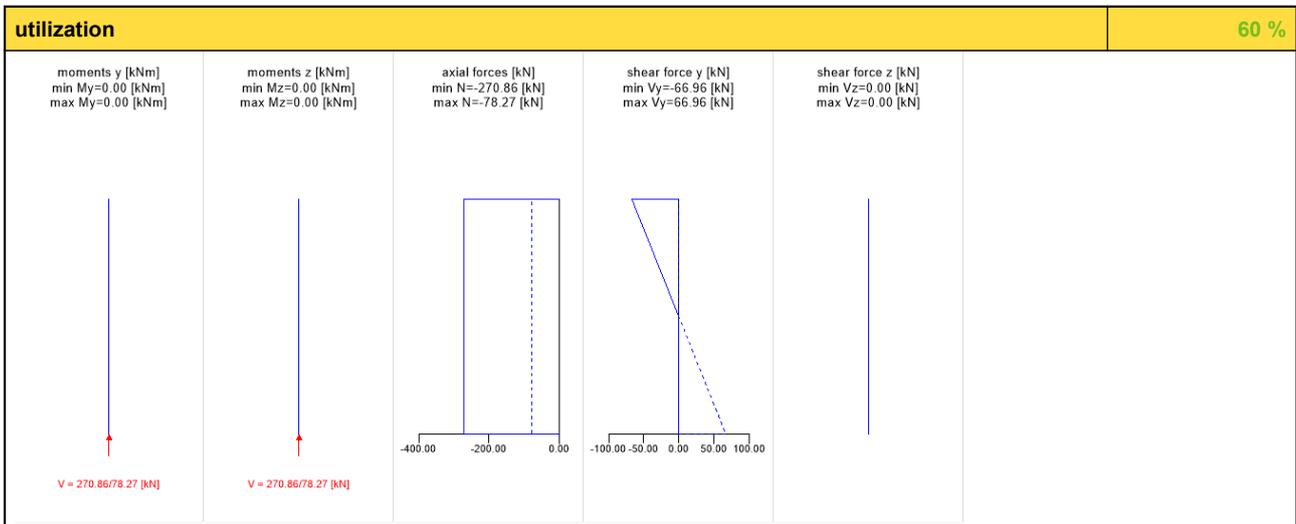
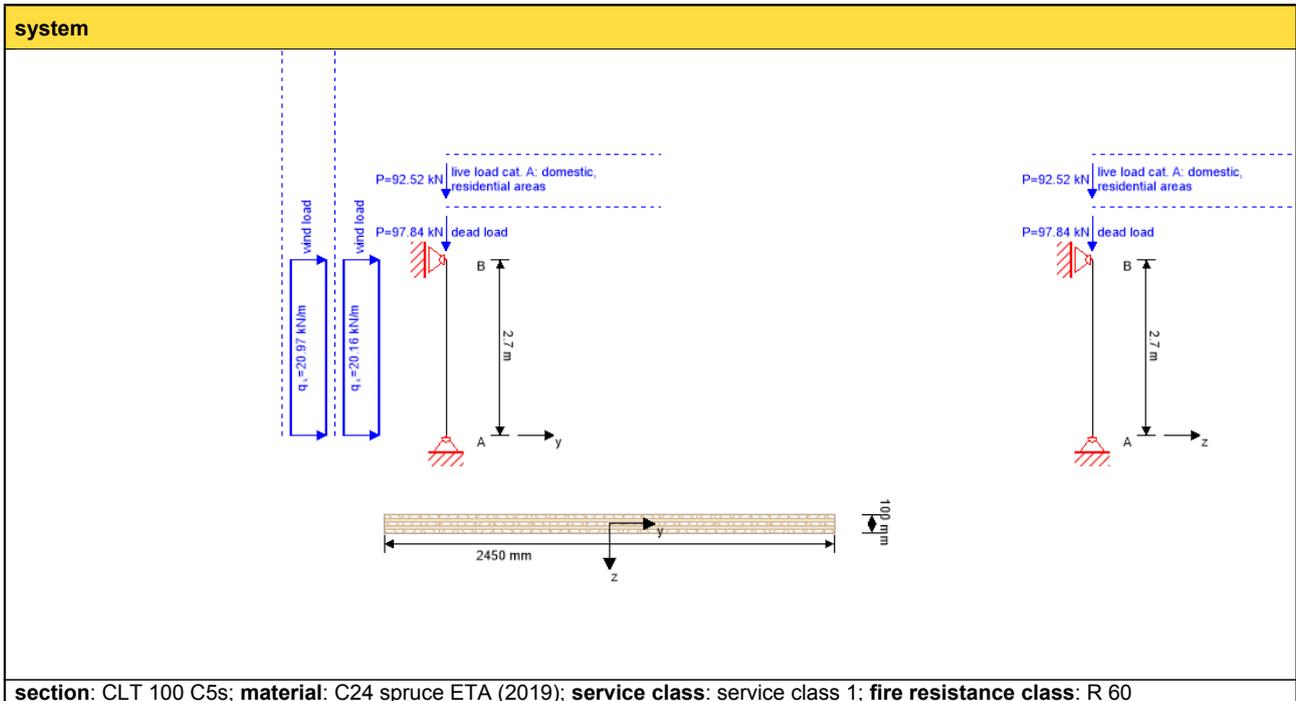
The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).





support reaction

load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
wind load	0.9	27.22	0.00	0.00	27.22	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
dead load	0.6	0.00	0.00	97.84	0.00	0.00
		0.00	0.00	97.84	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	92.52	0.00	0.00
wind load	0.9	28.31	0.00	0.00	28.31	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

flexural stress analysis 14 %			
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²		
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 24.00$ N/mm ²		
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²		
270.86			
$\sigma_{c,d} = 1.84$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 13.44$ N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 16.90$ N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 15.36$ N/mm ² ✓		
rolling shear analysis 0 %			
$V_d = 0.00$ kN	$f_{r,k} = 1.25$ N/mm ²		
$T_{r,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{r,d} = 0.90$ N/mm ² ✓		
shear analysis net section 24 %			
$V_{Net,d} = 66.96$ kNm	$f_{v,IP,Net,k} = 3.90$ N/mm ²		
$T_{v,IP,Net,d} = 0.68$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Net,d} = 2.81$ N/mm ² ✓		
shear analysis net section combined 6 %			
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²		
$V_{Net,d} = 66.96$ kNm	$f_{v,IP,Net,k} = 3.90$ N/mm ²		
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{v,d} = 2.88$ N/mm ²		
$TIP_{Net,d} = 0.68$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Net,d} = 2.81$ N/mm ² ✓		
lateral torsional buckling analysis 26 %			
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²		
$M_{z,d} = 33.73$ kNm			
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²		
270.86			
$\sigma_{c,d} = 1.84$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 15.12$ N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 19.01$ N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} = 0.56$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 17.28$ N/mm ² ✓		
flexural stress analysis fire 8 %			
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²		
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 24.00$ N/mm ²		
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²		
125.60			
$\sigma_{c,d} = 1.83$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 24.15$ N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 30.36$ N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 27.60$ N/mm ² ✓		
rolling shear analysis fire 0 %			
$V_d = 0.00$ kN	$f_{r,k} = 1.25$ N/mm ²		
$T_{r,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{r,d} = 1.44$ N/mm ² ✓		
shear analysis net section fire 0 %			
$V_{Net,d} = 0.00$ kNm	$f_{v,IP,Net,k} = 3.90$ N/mm ²		
$T_{v,IP,Net,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Net,d} = 4.49$ N/mm ² ✓		
shear analysis net section combined fire 0 %			
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²		
$V_{Net,d} = 0.00$ kNm	$f_{v,IP,Net,k} = 3.90$ N/mm ²		
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{v,d} = 4.60$ N/mm ²		
$TIP_{Net,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Net,d} = 4.49$ N/mm ² ✓		
lateral torsional buckling analysis fire 0 %			
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²		
$M_{z,d} = 0.00$ kNm			
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²		
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓		

shear stress analysis 0 %			
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²		
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.88$ N/mm ² ✓		
shear analysis gross section 16 %			
$V_d = 66.96$ kNm	$f_{v,IP,Gross,k} = 3.50$ N/mm ²		
$TIP_{Gross,d} = 0.41$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Gross,d} = 2.52$ N/mm ² ✓		
shear analysis gross section combined 3 %			
$V_{Gross,d} = 66.96$ kNm	$f_{v,IP,Gross,k} = 3.50$ N/mm ²		
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²		
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{v,d} = 2.88$ N/mm ²		
$TIP_{Gross,d} = 0.41$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Gross,d} = 2.52$ N/mm ² ✓		
torsional shear analysis 8 %			
$V_{\delta,d} = 66.96$ kNm	$f_{v,T,Node,k} = 2.50$ N/mm ²		
$T_{T,Node,d} = 0.14$ N/mm ² <	$f_{v,T,Node,d} = 1.80$ N/mm ² ✓		
buckling analysis 29 %			
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²		
$M_{z,d} = 0.00$ kNm			
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²		
270.86			
$\sigma_{c,d} = 1.84$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 13.44$ N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 16.90$ N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 15.36$ N/mm ² ✓		
shear stress analysis fire 0 %			
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²		
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 4.60$ N/mm ² ✓		
shear analysis gross section fire 0 %			
$V_d = 0.00$ kNm	$f_{v,IP,Gross,k} = 3.50$ N/mm ²		
$TIP_{Gross,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Gross,d} = 4.03$ N/mm ² ✓		
shear analysis gross section combined fire 0 %			
$V_{Gross,d} = 0.00$ kNm	$f_{v,IP,Gross,k} = 3.50$ N/mm ²		
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²		
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{v,d} = 4.60$ N/mm ²		
$TIP_{Gross,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Gross,d} = 4.03$ N/mm ² ✓		
torsional shear analysis fire 0 %			
$V_{\delta,d} = 0.00$ kNm	$f_{v,T,Node,k} = 2.50$ N/mm ²		
$T_{T,Node,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,T,Node,d} = 2.88$ N/mm ² ✓		
buckling analysis fire 60 %			
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²		
$M_{z,d} = 0.00$ kNm			
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²		
125.60			
$\sigma_{c,d} = 1.83$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 24.15$ N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 30.36$ N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 27.60$ N/mm ² ✓		

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

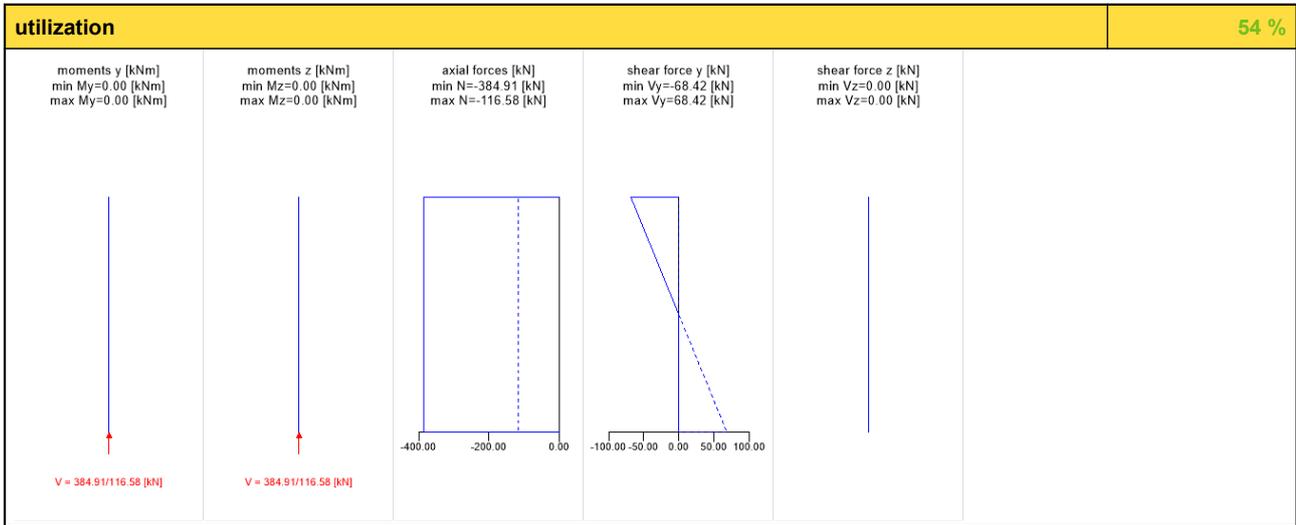
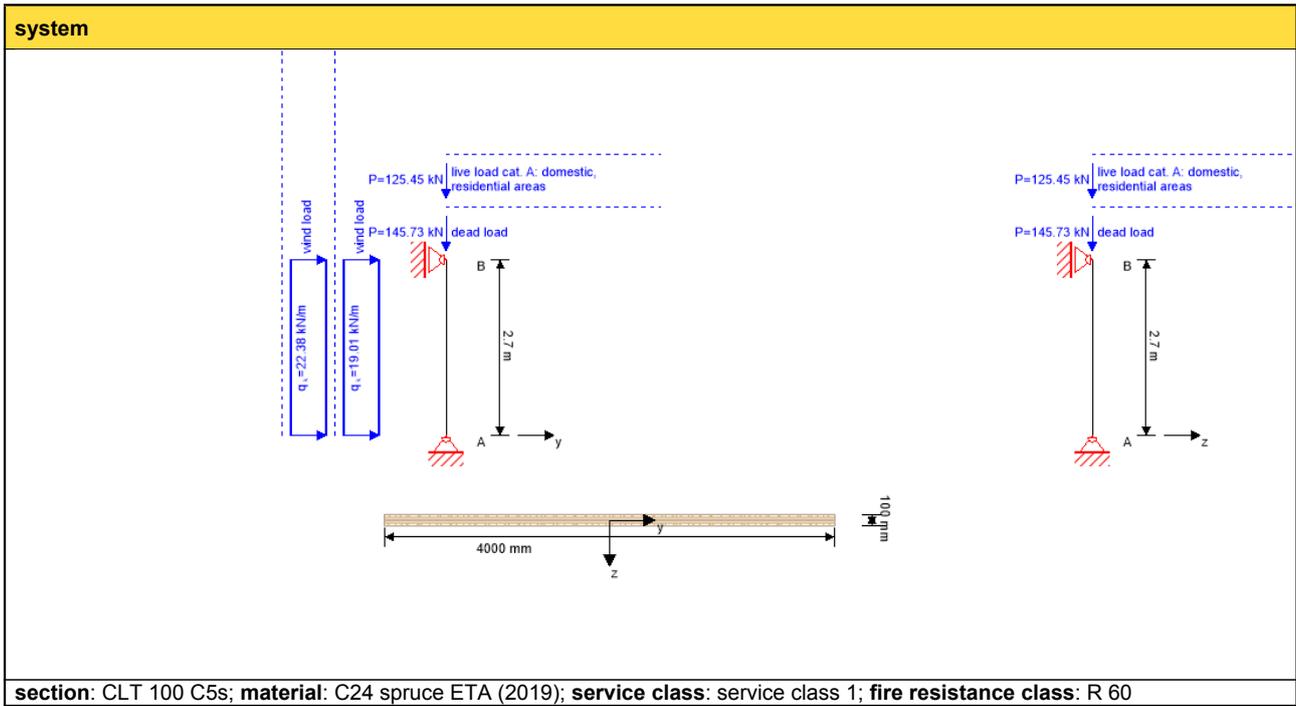
Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is



excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.
Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).





support reaction

load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
wind load	0.9	25.66	0.00	0.00	25.66	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
dead load	0.6	0.00	0.00	145.73	0.00	0.00
		0.00	0.00	145.73	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	125.45	0.00	0.00
wind load	0.9	30.21	0.00	0.00	30.21	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

flexural stress analysis		12 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 24.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²	
384.91		
$\sigma_{c,d} = 1.60$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 13.44$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 16.90$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 15.36$ N/mm ² ✓	
rolling shear analysis		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{r,k} = 1.25$ N/mm ²	
$T_{r,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{r,d} = 0.90$ N/mm ² ✓	
shear analysis net section		15 %
$V_{Net,d} = 68.42$ kNm	$f_{v,IP,Net,k} = 3.90$ N/mm ²	
$T_{v,IP,Net,d} = 0.43$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Net,d} = 2.81$ N/mm ² ✓	
shear analysis net section combined		2 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²	
$V_{Net,d} = 68.42$ kNm	$f_{v,IP,Net,k} = 3.90$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{v,d} = 2.88$ N/mm ²	
$TIP_{Net,d} = 0.43$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Net,d} = 2.81$ N/mm ² ✓	
lateral torsional buckling analysis		23 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 33.94$ kNm		
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²	
384.91		
$\sigma_{c,d} = 1.60$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 15.12$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 19.01$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.21$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 17.28$ N/mm ² ✓	
flexural stress analysis fire		7 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 24.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²	
183.37		
$\sigma_{c,d} = 1.64$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 24.15$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 30.36$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 27.60$ N/mm ² ✓	
rolling shear analysis fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{r,k} = 1.25$ N/mm ²	
$T_{r,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{r,d} = 1.44$ N/mm ² ✓	
shear analysis net section fire		0 %
$V_{Net,d} = 0.00$ kNm	$f_{v,IP,Net,k} = 3.90$ N/mm ²	
$T_{v,IP,Net,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Net,d} = 4.49$ N/mm ² ✓	
shear analysis net section combined fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²	
$V_{Net,d} = 0.00$ kNm	$f_{v,IP,Net,k} = 3.90$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{v,d} = 4.60$ N/mm ²	
$TIP_{Net,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Net,d} = 4.49$ N/mm ² ✓	
lateral torsional buckling analysis fire		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	

shear stress analysis		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.88$ N/mm ² ✓	
shear analysis gross section		10 %
$V_d = 68.42$ kNm	$f_{v,IP,Gross,k} = 3.50$ N/mm ²	
$TIP_{Gross,d} = 0.26$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Gross,d} = 2.52$ N/mm ² ✓	
shear analysis gross section combined		1 %
$V_{Gross,d} = 68.42$ kNm	$f_{v,IP,Gross,k} = 3.50$ N/mm ²	
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{v,d} = 2.88$ N/mm ²	
$TIP_{Gross,d} = 0.26$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Gross,d} = 2.52$ N/mm ² ✓	
torsional shear analysis		5 %
$V_{\delta,d} = 68.42$ kNm	$f_{v,T,Node,k} = 2.50$ N/mm ²	
$T_{T,Node,d} = 0.09$ N/mm ² <	$f_{v,T,Node,d} = 1.80$ N/mm ² ✓	
buckling analysis		26 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²	
384.91		
$\sigma_{c,d} = 1.60$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 13.44$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 16.90$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 15.36$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 4.60$ N/mm ² ✓	
shear analysis gross section fire		0 %
$V_d = 0.00$ kNm	$f_{v,IP,Gross,k} = 3.50$ N/mm ²	
$TIP_{Gross,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Gross,d} = 4.03$ N/mm ² ✓	
shear analysis gross section combined fire		0 %
$V_{Gross,d} = 0.00$ kNm	$f_{v,IP,Gross,k} = 3.50$ N/mm ²	
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 4.00$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{v,d} = 4.60$ N/mm ²	
$TIP_{Gross,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,IP,Gross,d} = 4.03$ N/mm ² ✓	
torsional shear analysis fire		0 %
$V_{\delta,d} = 0.00$ kNm	$f_{v,T,Node,k} = 2.50$ N/mm ²	
$T_{T,Node,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,T,Node,d} = 2.88$ N/mm ² ✓	
buckling analysis fire		54 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 24.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = -$ kN	$f_{c,0,k} = 21.00$ N/mm ²	
183.37		
$\sigma_{c,d} = 1.64$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 24.15$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 30.36$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 27.60$ N/mm ² ✓	

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

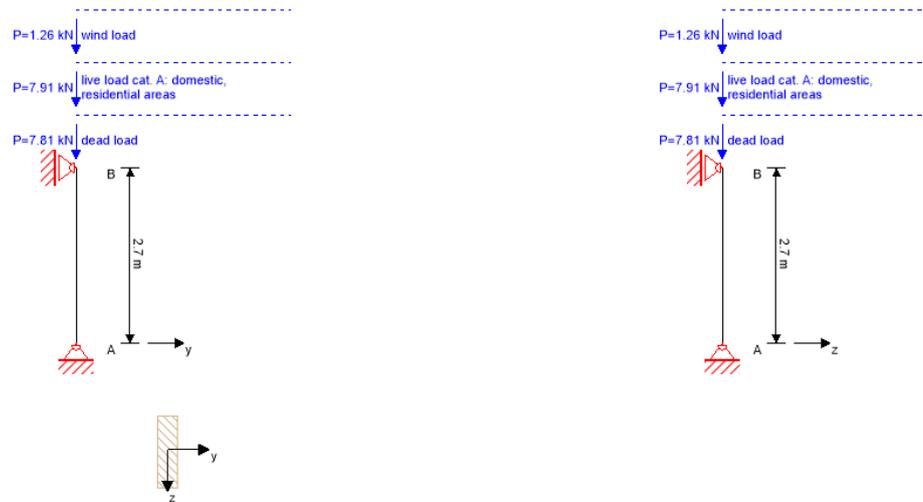
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is



excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.
Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).



system



global utilization ratio				89 %
ULS	89 %	ULS fire	20 %	

section: wooden beam 4/14					
	section width	section height	area	ly	lz
	[cm]	[cm]	[mm ²]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
	4	14	5,600	9,146,666	746,667

section fire: wooden beam 4/14									
	section width	section height	area	ly	lz				
	[cm]	[cm]	[mm ²]	[mm ⁴]	[mm ⁴]				
	4	14	5,600	9,146,666	746,667				
fire resistance class: R 60		time: 60 min							
fire protection layering : 2 x 15.0 mm gypsum plasterboard Type A + 50 mm rock wool gypsum plasterboard Type A (acc. to EN 520) gypsum plasterboard Type F (acc. to EN 520) Die Steinwolle-Dämmung der Installationsebene muss eine Mindestrohndichte von 26 kg/m ³ und einen Schmelzpunkt >1000 °C aufweisen.		t _{ch,h}	t _{fi,h}	t _{a,h}	d _{ta,h}	k ₀	d ₀	d _{char,0,h}	d _{ef,h}
		[min]	[min]	[min]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
		61	61	80	26	1	7	0.0	0.0

material values										
material	f _{m,k}	f _{t,0,k}	f _{t,90,k}	f _{c,0,k}	f _{c,90,k}	f _{v,k}	f _{r,k min}	E _{0,mean}	G _{mean}	E _{0,5}
	[N/mm ²]									
C16 softwood	16.00	10.00	0.40	17.00	2.20	3.20	0.80	8,000.00	500.00	5,400.00

load

load case groups										
	load case category	type	duration	Kmod	γ _{inf}	γ _{sup}	ψ ₀	ψ ₁	ψ ₂	
LC2	dead load	G	permanent	0.6	0.8	1.35	1	1	1	
LC3	live load cat. A: domestic, residential areas	Q	medium term	0.8	0	1.5	0.7	0.5	0.3	
LC1	wind load	Q	short term	0.9	0	1.5	0.6	0.2	0	



LC2:dead load

vertical load		
P _k	ex. y	ex. z
[kN]	[m]	[m]
7.81	0.00	0.00

LC3:live load cat. A: domestic, residential areas

vertical load		
P _k	ex. y	ex. z
[kN]	[m]	[m]
7.91	0.00	0.00

LC1:wind load

vertical load		
P _k	ex. y	ex. z
[kN]	[m]	[m]
1.26	0.00	0.00

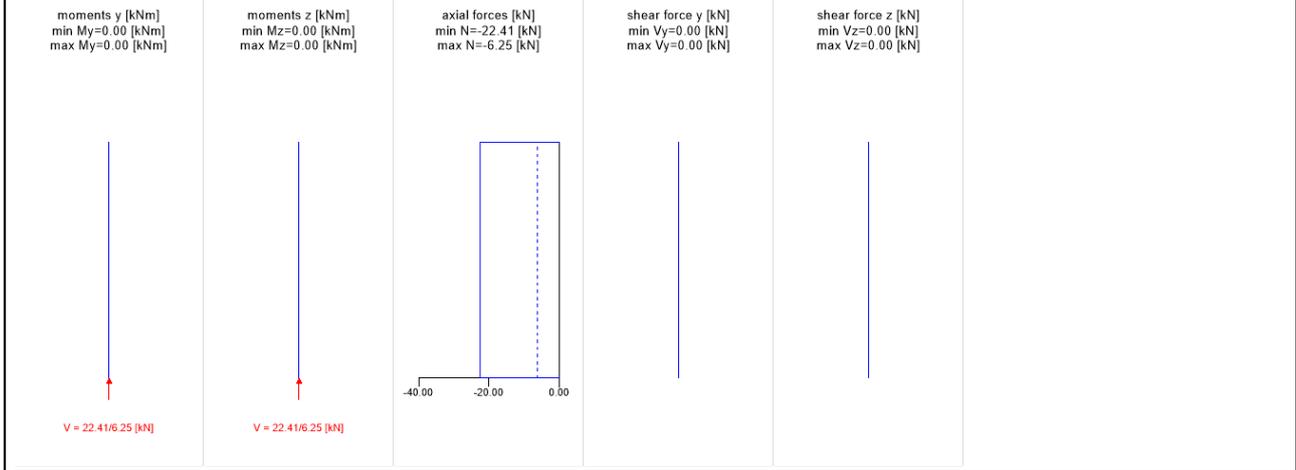
ULS combinations

	combination rule
LCO1	1.35/0.80 * LC2
LCO2	1.35/0.80 * LC2 + 1.50/0.00 * LC3
LCO3	1.35/0.80 * LC2 + 1.50/0.00 * LC3 + 1.50/0.00 * 0.60 * LC1
LCO4	1.35/0.80 * LC2 + 1.50/0.00 * LC1
LCO5	1.35/0.80 * LC2 + 1.50/0.00 * LC1 + 1.50/0.00 * 0.70 * LC3

ULS combinations fire

	combination rule
LCO1	1.00/1.00 * LC2
LCO2	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC3
LCO3	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1
LCO4	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1
LCO5	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC3

Ultimate limit state (ULS) - design results



ULS flexural design

dist.	f _{m,k}	f _{c,0,k}	f _{t,0,k}	γ _m	k _{mod}	k _{sys,z}	k _{h,m,y}	k _{h,m,z}	k _l	f _{m,y,d}	f _{m,z,d}	f _{t,0,d}	f _{c,0,d}
[m]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0.0	16.00	17.00	10.00	1.30	0.80	1.00	1.01	1.30	1.00	9.98	12.80	6.15	10.46



$M_{y,d}$	$M_{z,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	ratio	
[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		
0.00	0.00	-22.41	0.00	0.00	0.00	4.00	0.00	38 %	LCO2

ULS shear analysis Y									
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{h,v}$	$f_{v,d}$	V_d	$\tau_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	3.20	1.30	0.90	1.00	1.48	0.00	0.00	0 %	LCO5

ULS shear analysis Z									
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{h,v}$	$f_{v,d}$	V_d	$\tau_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	3.20	1.30	0.90	1.00	1.48	0.00	0.00	0 %	LCO5

flexural stress analysis									
$M_{y,d} =$	0.00	kNm			$f_{m,k} =$	16.00	N/mm ²		
$M_{z,d} =$	0.00	kNm			$f_{m,k,z} =$	16.00	N/mm ²		
$N_{c,d} =$	-22.41	kN			$\gamma_m =$	1.30	-		
					$k_{mod} =$	0.80	-		
					$k_{sys,y} =$	1.00	-		
					$k_{h,m,y} =$	1.01	-		
					$k_{h,m,z} =$	1.30	-		
					$k_i =$	1.00	-		
$\sigma_{c,d} =$	4.00	N/mm ²			$f_{c,0,d} =$	10.46	N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²			$f_{m,y,d} =$	9.98	N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	<		$f_{m,z,d} =$	12.80	N/mm ²		✓
utilization ratio								38 %	

shear stress analysis Y									
$V_d =$	0.00	kN			$f_{v,k} =$	3.20	N/mm ²		
					$\gamma_m =$	1.30	-		
					$k_{mod} =$	0.90	-		
					$k_{h,v} =$	1.00	-		
$\tau_{v,d} =$	0.00	N/mm ²	<		$f_{v,d} =$	1.48	N/mm ²		✓
utilization ratio								0 %	

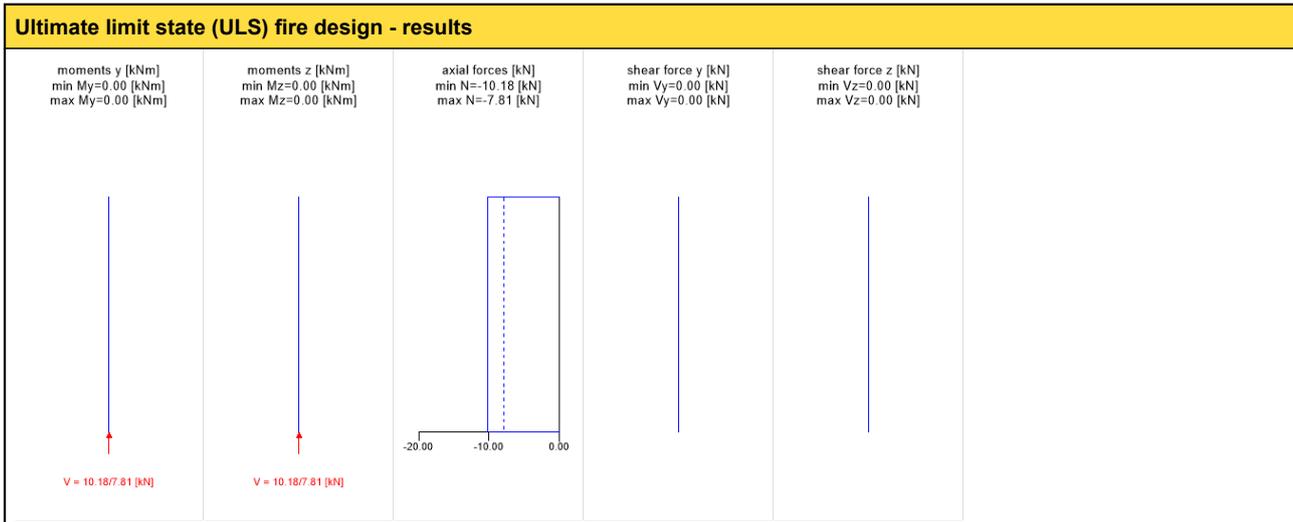
shear stress analysis Z									
$V_d =$	0.00	kN			$f_{v,k} =$	3.20	N/mm ²		
					$\gamma_m =$	1.30	-		
					$k_{mod} =$	0.90	-		
					$k_{h,v} =$	1.00	-		
$\tau_{v,d} =$	0.00	N/mm ²	<		$f_{v,d} =$	1.48	N/mm ²		✓
utilization ratio								0 %	

shear stress analysis									
$V_{y,d} =$	0.00	kN			$V_{z,d} =$	0.00	kN		
$f_{v,k} =$	0.00	N/mm ²			$\gamma_m =$	1.30	-		
$f_{v,d} =$	0.00	N/mm ²			$k_{mod} =$	0.00	-		
$\tau_{v,y,d} =$	0.00	N/mm ²			$\tau_{v,z,d} =$	0.00	N/mm ²		
utilization ratio								0 %	

buckling analysis									
$M_{y,d} =$	0.00	kNm			$f_{m,k} =$	16.00	N/mm ²		
$M_{z,d} =$	0.00	kNm			$\gamma_m =$	1.30	-		
$N_{c,d} =$	-22.41	kN			$k_{mod} =$	0.80	-		
					$k_{sys,y} =$	1.00	-		
					$k_{sys,z} =$	1.00	-		
					$k_{h,m,y} =$	1.01	-		
					$k_{h,m,z} =$	1.30	-		
$\sigma_{c,d} =$	4.00	N/mm ²			$f_{c,0,d} =$	10.46	N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²			$f_{m,y,d} =$	9.98	N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	<		$f_{m,z,d} =$	12.80	N/mm ²		✓
utilization ratio								89 %	



lateral torsional buckling analysis			
$M_{y,d} =$	0.00 kNm	$f_{m,k} =$	0.00 N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00 kNm	$\gamma_m =$	1.30 -
$N_{c,d} =$	0.00 kN	$k_{mod} =$	0.00 -
		$k_{sys,y} =$	1.00 -
		$k_{fi,m,y} =$	1.01 -
		$k_{fi,m,z} =$	1.30 -
		$k_{fi} =$	1.00 -
$\sigma_{c,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	0.00 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	0.00 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	0.00 N/mm ²
		<	✓
utilization ratio			0 %



ULS fire flexural design								
dist.	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{m,k}$	$f_{m,y,d}$	$f_{t,0,d}$	$f_{c,0,d}$
[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0.0	1.30	0.80	1.00	1.00	16.00	9.98	6.15	10.46
$M_{y,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	ratio		
[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]			
0.00	-10.18	0.00	0.00	1.82	0.00	9 %		LCO2

ULS fire shear analysis Y										
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{v,d}$	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	3.20	1.00	1.00	1.00	1.25	2.68	0.00	0.00	0 %	LCO5

ULS fire shear analysis Z										
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{v,d}$	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	3.20	1.00	1.00	1.00	1.25	2.68	0.00	0.00	0 %	LCO5



flexural stress analysis fire			
$M_{y,d} =$	0.00 kNm	$f_{m,k} =$	16.00 N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00 kNm	$f_{m,k,z} =$	16.00 N/mm ²
$N_{c,d} =$	-10.18 kN	$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{sys,y} =$	1.00 -
		$k_{h,m,y} =$	1.01 -
		$k_{h,m,z} =$	1.30 -
		$k_{fi} =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$\sigma_{c,d} =$	1.82 N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	21.25 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	20.28 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	26.00 N/mm ²
	<		✓
utilization ratio			9 %

shear stress analysis Y fire			
$V_d =$	0.00 kN	$f_{v,k} =$	3.20 N/mm ²
		$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{h,v} =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$T_{v,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{v,d} =$	2.68 N/mm ²
	<		✓
utilization ratio			0 %

shear stress analysis Z fire			
$V_d =$	0.00 kN	$f_{v,k} =$	3.20 N/mm ²
		$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{h,v} =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$T_{v,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{v,d} =$	2.68 N/mm ²
	<		✓
utilization ratio			0 %

shear stress analysis fire			
$V_{y,d} =$	0.00 kN	$V_{z,d} =$	0.00 kN
$f_{v,k} =$	0.00 N/mm ²	$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$f_{v,d} =$	0.00 N/mm ²	$k_{mod} =$	0.00 -
$T_{v,y,d} =$	0.00 N/mm ²	$T_{v,z,d} =$	0.00 N/mm ²
utilization ratio			0 %

buckling analysis fire			
$M_{y,d} =$	0.00 kNm	$f_{m,k} =$	16.00 N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00 kNm	$\gamma_m =$	1.00 -
$N_{c,d} =$	-10.18 kN	$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{sys,y} =$	1.00 -
		$k_{sys,z} =$	1.00 -
		$k_{h,m,y} =$	1.01 -
		$k_{h,m,z} =$	1.30 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$\sigma_{c,d} =$	1.82 N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	21.25 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	20.28 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	26.00 N/mm ²
	<		✓
utilization ratio			20 %



lateral torsional buckling analysis fire						
$M_{y,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k} =$	0.00	N/mm ²	
$M_{z,d} =$	0.00	kNm	$\gamma_m =$	1.00	-	
$N_{c,d} =$	0.00	kN	$k_{mod} =$	0.00	-	
			$k_{sys,y} =$	1.00	-	
			$k_{h,m,y} =$	1.01	-	
			$k_{h,m,z} =$	1.30	-	
			$k_l =$	1.00	-	
			$k_{fi} =$	1.25	-	
$\sigma_{c,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	0.00	N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	✓
utilization ratio						0 %

support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
dead load	0.6	0.00	0.00	7.81	0.00	0.00
		0.00	0.00	7.81	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	7.91	0.00	0.00
wind load	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	1.26	0.00	0.00

reference documents for this analysis	
English title	description
EN 338	EN 338 - Structural timber — Strength classes
EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings
EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurocode 5 — Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design
EN 14080	EN 14080 - Timber Structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements
EN 1990	EN 1990 - Eurocode — Basis of structural design
CTE, DB, SE-M	CTE, DB, SE-M
UNE EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings
UNE-EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurocode 5 — Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design
Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe	Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe; publishes by SP Technical Research Institute of Sweden
National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12	ÖNORM EN 1995-1-2 - National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12
UNE EN 1995-1-2_NA	UNE EN 1995-1-2 - Spain - National Annex - Eurocode 5: Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design — National specifications concerning UNE EN 1995-1-2, national comments and national supplements
UNE EN 1995-1-1_NA	UNE EN 1995-1-1 - Spain - National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings
CERTIFICATE NO. EUFI29-20000564-C	Product certificate
LVL G by Stora Enso_Structural design manual column&beam_V01	Design manual
ETA 20_0291 LVL G by Stora Enso	ETA

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is



excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.
Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).



system



global utilization ratio				88 %
ULS	88 %	ULS fire	18 %	

section: wooden beam 8/14					
	section width	section height	area	ly	lz
	[cm]	[cm]	[mm ²]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
	8	14	11,200	18,293,330	5,973,333

section fire: wooden beam 8/14									
	section width	section height	area	ly	lz				
	[cm]	[cm]	[mm ²]	[mm ⁴]	[mm ⁴]				
	8	14	11,200	18,293,330	5,973,333				
fire resistance class: R 60		time: 60 min							
fire protection layering : 2 x 15.0 mm gypsum plasterboard Type A + 50 mm rock wool gypsum plasterboard Type A (acc. to EN 520)gypsum plasterboard Type F (acc. to EN 520) Die Steinwolle-Dämmung der Installationsebene muss eine Mindestrohndichte von 26 kg/m3 und einen Schmelzpunkt >1000 °C aufweisen.		t _{ch,h}	t _{fi,h}	t _{a,h}	d _{ta,h}	k ₀	d ₀	d _{char,0,h}	d _{ef,h}
		[min]	[min]	[min]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
		61	61	80	26	1	7	0.0	0.0

material values										
material	f _{m,k}	f _{t,0,k}	f _{t,90,k}	f _{c,0,k}	f _{c,90,k}	f _{v,k}	f _{r,k min}	E _{0,mean}	G _{mean}	E _{0,5}
	[N/mm ²]									
C16 softwood	16.00	10.00	0.40	17.00	2.20	3.20	0.80	8,000.00	500.00	5,400.00

load

load case groups										
	load case category	type	duration	Kmod	γ _{inf}	γ _{sup}	ψ ₀	ψ ₁	ψ ₂	
LC2	dead load	G	permanent	0.6	0.8	1.35	1	1	1	
LC3	live load cat. A: domestic, residential areas	Q	medium term	0.8	0	1.5	0.7	0.5	0.3	
LC1	wind load	Q	short term	0.9	0	1.5	0.6	0.2	0	



LC2:dead load

vertical load		
P _k	ex. y	ex. z
[kN]	[m]	[m]
14.07	0.00	0.00

LC3:live load cat. A: domestic, residential areas

vertical load		
P _k	ex. y	ex. z
[kN]	[m]	[m]
14.42	0.00	0.00

LC1:wind load

vertical load		
P _k	ex. y	ex. z
[kN]	[m]	[m]
10.22	0.00	0.00

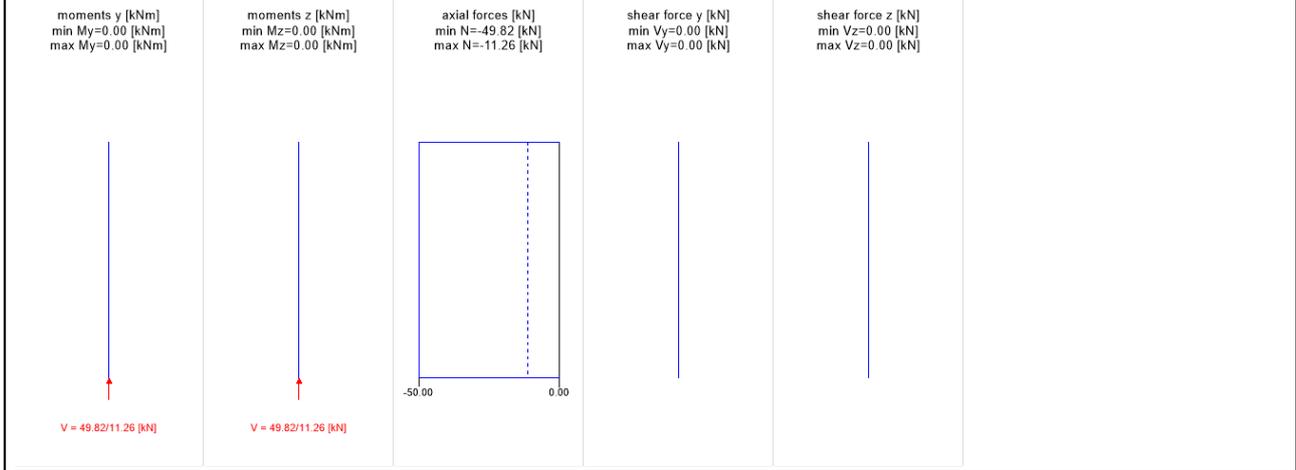
ULS combinations

	combination rule
LCO1	1.35/0.80 * LC2
LCO2	1.35/0.80 * LC2 + 1.50/0.00 * LC3
LCO3	1.35/0.80 * LC2 + 1.50/0.00 * LC3 + 1.50/0.00 * 0.60 * LC1
LCO4	1.35/0.80 * LC2 + 1.50/0.00 * LC1
LCO5	1.35/0.80 * LC2 + 1.50/0.00 * LC1 + 1.50/0.00 * 0.70 * LC3

ULS combinations fire

	combination rule
LCO1	1.00/1.00 * LC2
LCO2	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC3
LCO3	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC3 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1
LCO4	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1
LCO5	1.00/1.00 * LC2 + 1.00/0.00 * 0.00 * LC1 + 1.00/0.00 * 0.30 * LC3

Ultimate limit state (ULS) - design results



ULS flexural design

dist.	f _{m,k}	f _{c,0,k}	f _{t,0,k}	γ _m	k _{mod}	k _{sys,z}	k _{h,m,y}	k _{h,m,z}	k _l	f _{m,y,d}	f _{m,z,d}	f _{t,0,d}	f _{c,0,d}
[m]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0.0	16.00	17.00	10.00	1.30	0.90	1.00	1.01	1.13	1.00	11.23	12.56	6.92	11.77



$M_{y,d}$	$M_{z,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	ratio	
[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		
0.00	0.00	-49.82	0.00	0.00	0.00	4.45	0.00	38 %	LCO3

ULS shear analysis Y									
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{h,v}$	$f_{v,d}$	V_d	$\tau_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	3.20	1.30	0.90	1.00	1.48	0.00	0.00	0 %	LCO5

ULS shear analysis Z									
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{h,v}$	$f_{v,d}$	V_d	$\tau_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	3.20	1.30	0.90	1.00	1.48	0.00	0.00	0 %	LCO5

flexural stress analysis									
$M_{y,d} =$	0.00	kNm			$f_{m,k} =$	16.00	N/mm ²		
$M_{z,d} =$	0.00	kNm			$f_{m,k,z} =$	16.00	N/mm ²		
$N_{c,d} =$	-49.82	kN			$\gamma_m =$	1.30	-		
					$k_{mod} =$	0.90	-		
					$k_{sys,y} =$	1.00	-		
					$k_{h,m,y} =$	1.01	-		
					$k_{h,m,z} =$	1.13	-		
					$k_i =$	1.00	-		
$\sigma_{c,d} =$	4.45	N/mm ²			$f_{c,0,d} =$	11.77	N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²			$f_{m,y,d} =$	11.23	N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	<		$f_{m,z,d} =$	12.56	N/mm ²		✓
utilization ratio								38 %	

shear stress analysis Y									
$V_d =$	0.00	kN			$f_{v,k} =$	3.20	N/mm ²		
					$\gamma_m =$	1.30	-		
					$k_{mod} =$	0.90	-		
					$k_{h,v} =$	1.00	-		
$\tau_{v,d} =$	0.00	N/mm ²	<		$f_{v,d} =$	1.48	N/mm ²		✓
utilization ratio								0 %	

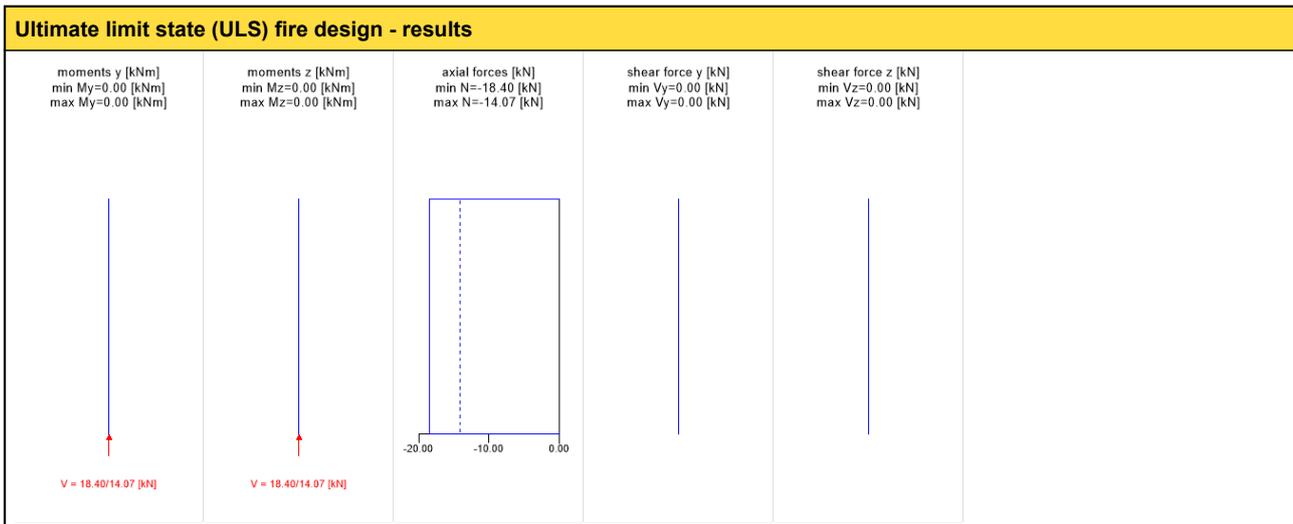
shear stress analysis Z									
$V_d =$	0.00	kN			$f_{v,k} =$	3.20	N/mm ²		
					$\gamma_m =$	1.30	-		
					$k_{mod} =$	0.90	-		
					$k_{h,v} =$	1.00	-		
$\tau_{v,d} =$	0.00	N/mm ²	<		$f_{v,d} =$	1.48	N/mm ²		✓
utilization ratio								0 %	

shear stress analysis									
$V_{y,d} =$	0.00	kN			$V_{z,d} =$	0.00	kN		
$f_{v,k} =$	0.00	N/mm ²			$\gamma_m =$	1.30	-		
$f_{v,d} =$	0.00	N/mm ²			$k_{mod} =$	0.00	-		
$\tau_{v,y,d} =$	0.00	N/mm ²			$\tau_{v,z,d} =$	0.00	N/mm ²		
utilization ratio								0 %	

buckling analysis									
$M_{y,d} =$	0.00	kNm			$f_{m,k} =$	16.00	N/mm ²		
$M_{z,d} =$	0.00	kNm			$\gamma_m =$	1.30	-		
$N_{c,d} =$	-49.82	kN			$k_{mod} =$	0.90	-		
					$k_{sys,y} =$	1.00	-		
					$k_{sys,z} =$	1.00	-		
					$k_{h,m,y} =$	1.01	-		
					$k_{h,m,z} =$	1.13	-		
$\sigma_{c,d} =$	4.45	N/mm ²			$f_{c,0,d} =$	11.77	N/mm ²		
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²			$f_{m,y,d} =$	11.23	N/mm ²		
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	<		$f_{m,z,d} =$	12.56	N/mm ²		✓
utilization ratio								88 %	



lateral torsional buckling analysis			
$M_{y,d} =$	0.00 kNm	$f_{m,k} =$	0.00 N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00 kNm	$\gamma_m =$	1.30 -
$N_{c,d} =$	0.00 kN	$k_{mod} =$	0.00 -
		$k_{sys,y} =$	1.00 -
		$k_{fi,m,y} =$	1.01 -
		$k_{fi,m,z} =$	1.13 -
		$k_{fi} =$	1.00 -
$\sigma_{c,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	0.00 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	0.00 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	0.00 N/mm ²
		<	✓
utilization ratio			0 %



ULS fire flexural design								
dist.	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{m,k}$	$f_{m,y,d}$	$f_{t,0,d}$	$f_{c,0,d}$
[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0.0	1.30	0.90	1.00	1.00	16.00	11.23	6.92	11.77
$M_{y,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	ratio		
[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]			
0.00	-18.40	0.00	0.00	1.64	0.00	8 %		LCO2

ULS fire shear analysis Y										
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{v,d}$	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	3.20	1.00	1.00	1.00	1.25	2.68	0.00	0.00	0 %	LCO5

ULS fire shear analysis Z										
dist.	$f_{v,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	k_{fi}	$f_{v,d}$	V_d	$T_{v,d}$	ratio	
[m]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]		
2.7	3.20	1.00	1.00	1.00	1.25	2.68	0.00	0.00	0 %	LCO5



flexural stress analysis fire			
$M_{y,d} =$	0.00 kNm	$f_{m,k} =$	16.00 N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00 kNm	$f_{m,k,z} =$	16.00 N/mm ²
$N_{c,d} =$	-18.40 kN	$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{sys,y} =$	1.00 -
		$k_{h,m,y} =$	1.01 -
		$k_{h,m,z} =$	1.13 -
		$k_{fi} =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$\sigma_{c,d} =$	1.64 N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	21.25 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	20.28 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	22.68 N/mm ²
	<		✓
utilization ratio			8 %

shear stress analysis Y fire			
$V_d =$	0.00 kN	$f_{v,k} =$	3.20 N/mm ²
		$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{h,v} =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$T_{v,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{v,d} =$	2.68 N/mm ²
	<		✓
utilization ratio			0 %

shear stress analysis Z fire			
$V_d =$	0.00 kN	$f_{v,k} =$	3.20 N/mm ²
		$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{h,v} =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$T_{v,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{v,d} =$	2.68 N/mm ²
	<		✓
utilization ratio			0 %

shear stress analysis fire			
$V_{y,d} =$	0.00 kN	$V_{z,d} =$	0.00 kN
$f_{v,k} =$	0.00 N/mm ²	$\gamma_m =$	1.00 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$f_{v,d} =$	0.00 N/mm ²	$k_{mod} =$	0.00 -
$T_{v,y,d} =$	0.00 N/mm ²	$T_{v,z,d} =$	0.00 N/mm ²
utilization ratio			0 %

buckling analysis fire			
$M_{y,d} =$	0.00 kNm	$f_{m,k} =$	16.00 N/mm ²
$M_{z,d} =$	0.00 kNm	$\gamma_m =$	1.00 -
$N_{c,d} =$	-18.40 kN	$k_{mod} =$	1.00 -
		$k_{sys,y} =$	1.00 -
		$k_{sys,z} =$	1.00 -
		$k_{h,m,y} =$	1.01 -
		$k_{h,m,z} =$	1.13 -
		$k_{fi} =$	1.25 -
$\sigma_{c,d} =$	1.64 N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	21.25 N/mm ²
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	20.28 N/mm ²
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00 N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	22.68 N/mm ²
	<		✓
utilization ratio			18 %



lateral torsional buckling analysis fire						
$M_{y,d} =$	0.00	kNm	$f_{m,k} =$	0.00	N/mm ²	
$M_{z,d} =$	0.00	kNm	$\gamma_m =$	1.00	-	
$N_{c,d} =$	0.00	kN	$k_{mod} =$	0.00	-	
			$k_{sys,y} =$	1.00	-	
			$k_{h,m,y} =$	1.01	-	
			$k_{h,m,z} =$	1.13	-	
			$k_i =$	1.00	-	
			$k_{fi} =$	1.25	-	
$\sigma_{c,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{c,0,d} =$	0.00	N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,y,d} =$	0.00	N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	$f_{m,z,d} =$	0.00	N/mm ²	✓
utilization ratio						0 %

support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
dead load	0.6	0.00	0.00	14.07	0.00	0.00
		0.00	0.00	14.07	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	14.42	0.00	0.00
wind load	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	10.22	0.00	0.00

reference documents for this analysis	
English title	description
EN 338	EN 338 - Structural timber — Strength classes
EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings
EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurocode 5 — Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design
EN 14080	EN 14080 - Timber Structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements
EN 1990	EN 1990 - Eurocode — Basis of structural design
CTE, DB, SE-M	CTE, DB, SE-M
UNE EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings
UNE-EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurocode 5 — Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design
Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe	Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe; publishes by SP Technical Research Institute of Sweden
National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12	ÖNORM EN 1995-1-2 - National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12
UNE EN 1995-1-2_NA	UNE EN 1995-1-2 - Spain - National Annex - Eurocode 5: Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design — National specifications concerning UNE EN 1995-1-2, national comments and national supplements
UNE EN 1995-1-1_NA	UNE EN 1995-1-1 - Spain - National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings
CERTIFICATE NO. EUFI29-20000564-C	Product certificate
LVL G by Stora Enso_Structural design manual column&beam_V01	Design manual
ETA 20_0291 LVL G by Stora Enso	ETA

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

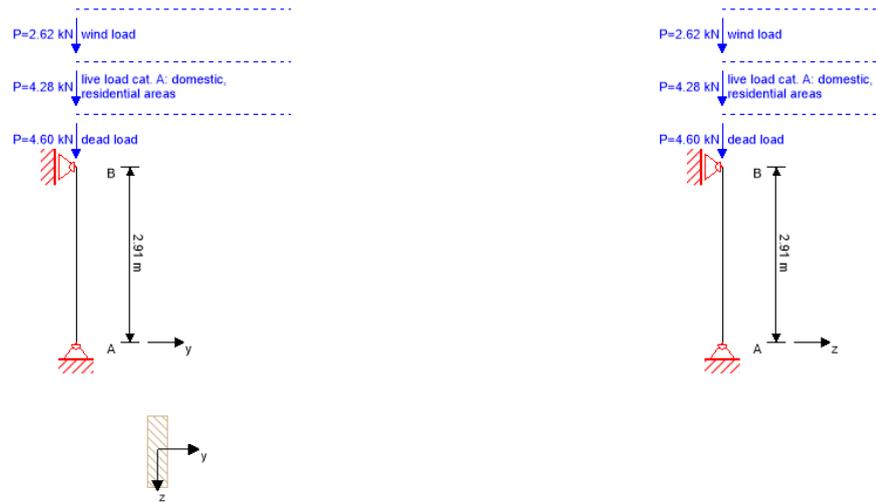
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is



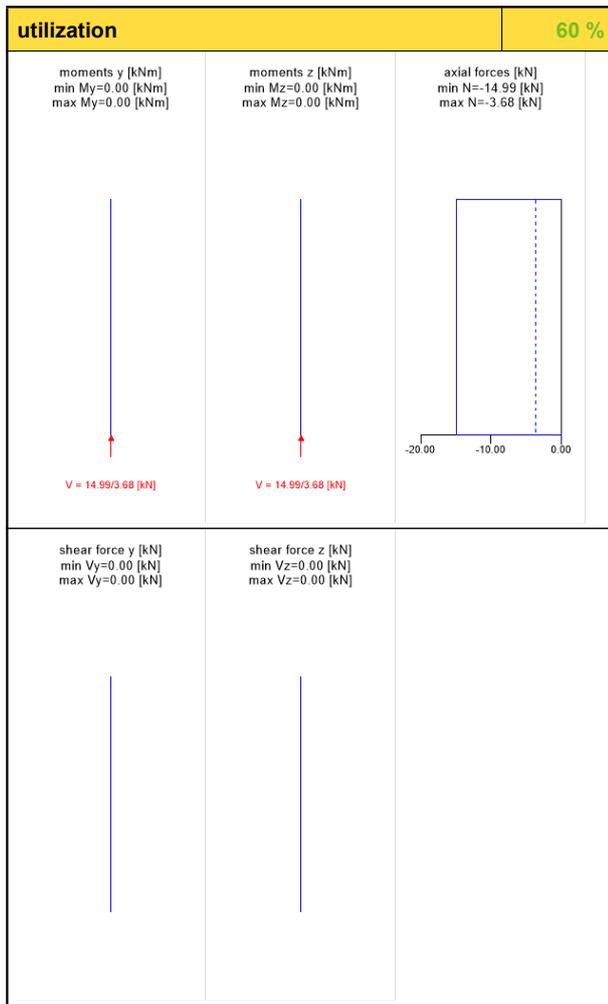
excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.
Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).



system



section: wooden beam 4/14; **material:** C16 softwood; **service class:** service class 1; **fire resistance class:** R 60



flexural stress analysis		23 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -14.99$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 2.68$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 11.77$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 11.23$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 14.40$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
buckling analysis		60 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = -14.99$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 2.68$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 11.77$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 11.23$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 14.40$ N/mm ² ✓	
flexural stress analysis fire		5 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -5.88$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.05$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 26.00$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined fire		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis fire		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
buckling analysis fire		13 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = -5.88$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.05$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 26.00$ N/mm ² ✓	

support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
dead load	0.6	0.00	0.00	4.60	0.00	0.00
		0.00	0.00	4.60	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	4.28	0.00	0.00
wind load	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	2.62	0.00	0.00

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

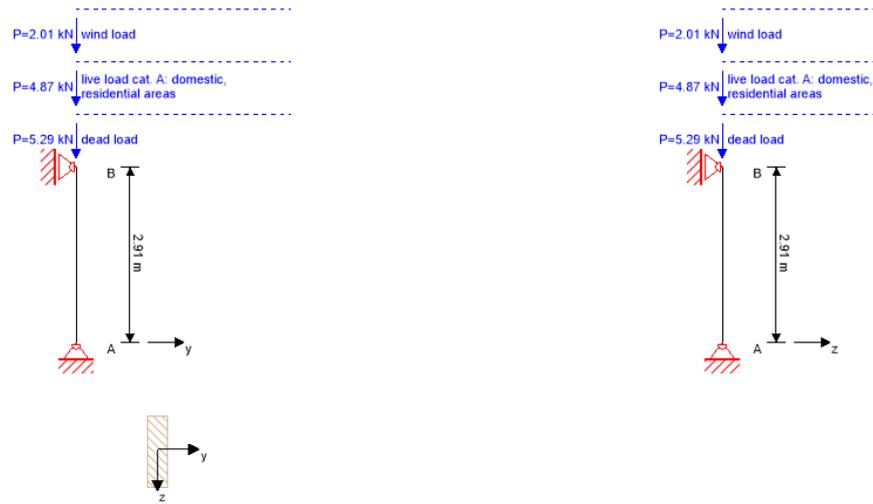
The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

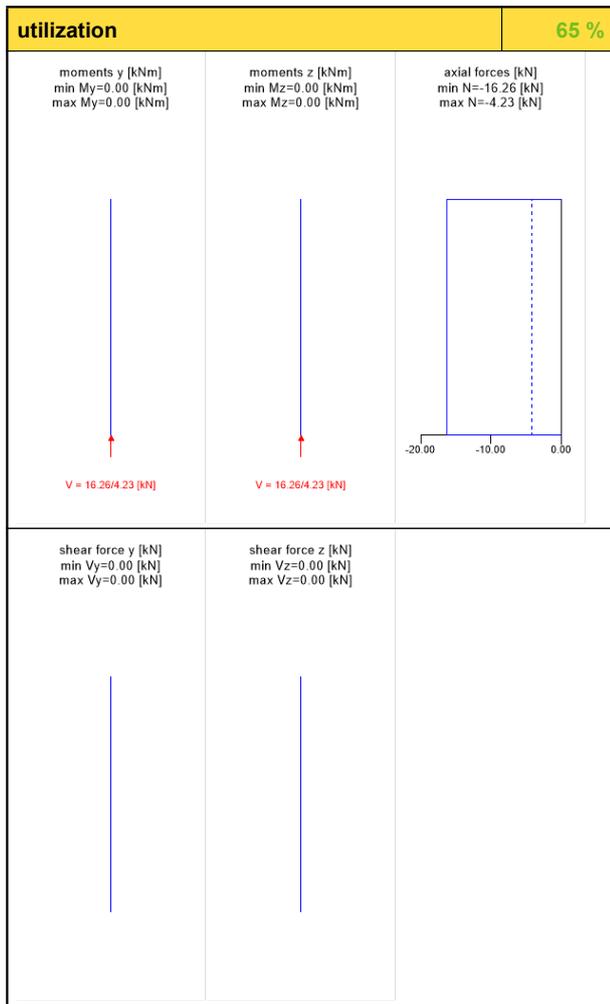
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).

system



section: wooden beam 4/14; **material:** C16 softwood; **service class:** service class 1; **fire resistance class:** R 60



flexural stress analysis		25 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -16.26$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 2.90$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 11.77$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 11.23$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 14.40$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis		65 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -16.26$ kN	$f_{c,0,d} = 11.77$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 2.90$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 11.23$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 14.40$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
flexural stress analysis fire		6 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -6.75$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.21$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 26.00$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined fire		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis fire		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis fire		15 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -6.75$ kN	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.21$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 26.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		

support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
dead load	0.6	0.00	0.00	5.29	0.00	0.00
		0.00	0.00	5.29	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	4.87	0.00	0.00
wind load	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	2.01	0.00	0.00

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

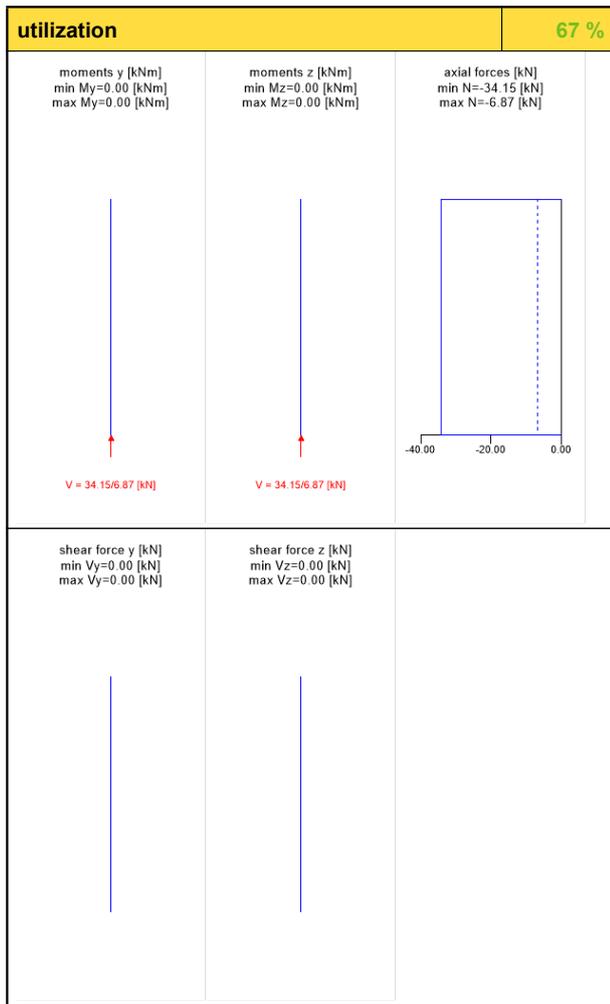
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).

system



section: wooden beam 8/14; **material:** C16 softwood; **service class:** service class 1; **fire resistance class:** R 60



flexural stress analysis		26 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -34.15$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 3.05$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 11.77$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 11.23$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 12.56$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis		67 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -34.15$ kN	$f_{c,0,d} = 11.77$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 3.05$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 11.23$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 12.56$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
flexural stress analysis fire		5 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -10.96$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.98$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 22.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined fire		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis fire		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis fire		12 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -10.96$ kN	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.98$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 22.68$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		



support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
dead load	0.6	0.00	0.00	8.59	0.00	0.00
		0.00	0.00	8.59	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	7.89	0.00	0.00
wind load	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	9.51	0.00	0.00

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

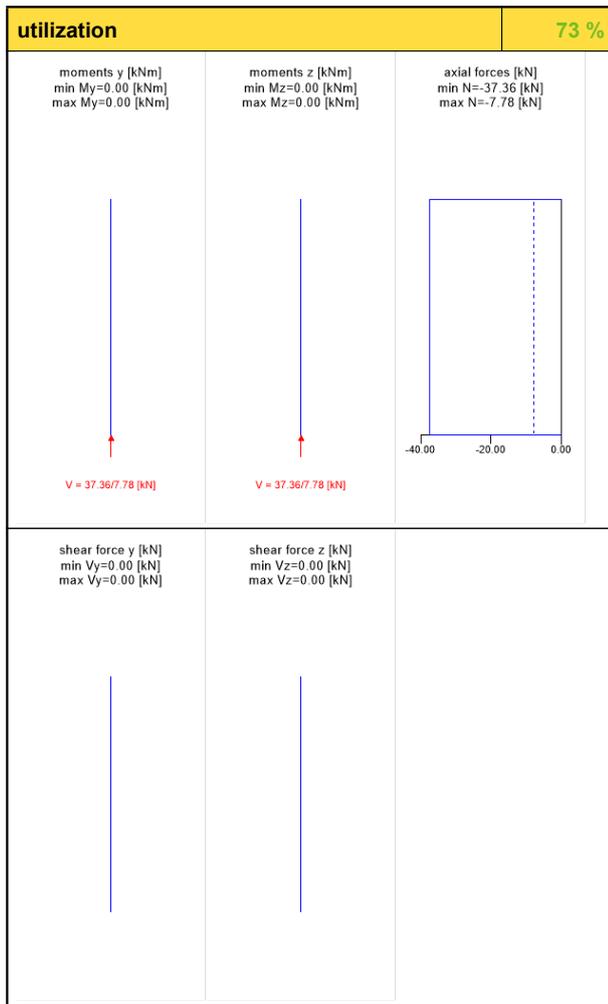
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).

system



section: wooden beam 8/14; **material:** C16 softwood; **service class:** service class 1; **fire resistance class:** R 60



flexural stress analysis		28 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -37.36$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 3.34$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 11.77$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 11.23$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 12.56$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis		73 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -37.36$ kN	$f_{c,0,d} = 11.77$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 3.34$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 11.23$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 12.56$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
flexural stress analysis fire		5 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -12.39$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.11$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 22.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined fire		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis fire		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis fire		13 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -12.39$ kN	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.11$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 22.68$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		



support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
dead load	0.6	0.00	0.00	9.72	0.00	0.00
		0.00	0.00	9.72	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	8.91	0.00	0.00
wind load	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	9.92	0.00	0.00

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

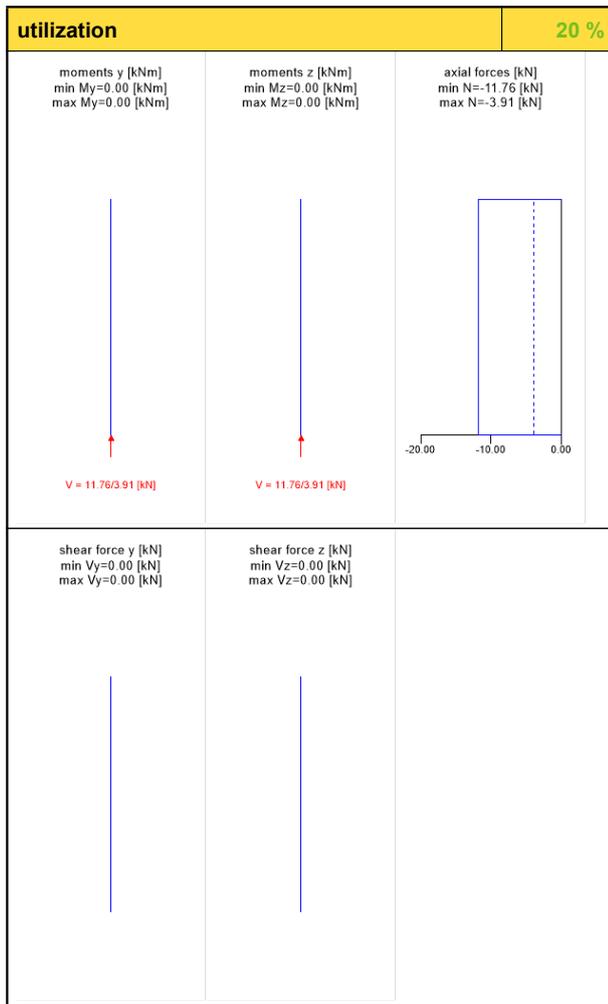
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).

system



section: wooden beam 8/14; **material:** C16 softwood; **service class:** service class 1; **fire resistance class:** R 60



flexural stress analysis		10 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -11.76$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.05$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 10.46$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 9.98$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 11.17$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis		20 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -11.76$ kN	$f_{c,0,d} = 10.46$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.05$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 9.98$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 11.17$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
flexural stress analysis fire		2 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -5.92$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.53$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 22.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined fire		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis fire		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis fire		5 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -5.92$ kN	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.53$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 22.68$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		



support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
dead load	0.6	0.00	0.00	4.89	0.00	0.00
		0.00	0.00	4.89	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	3.44	0.00	0.00
wind load	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.07	0.00	0.00

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

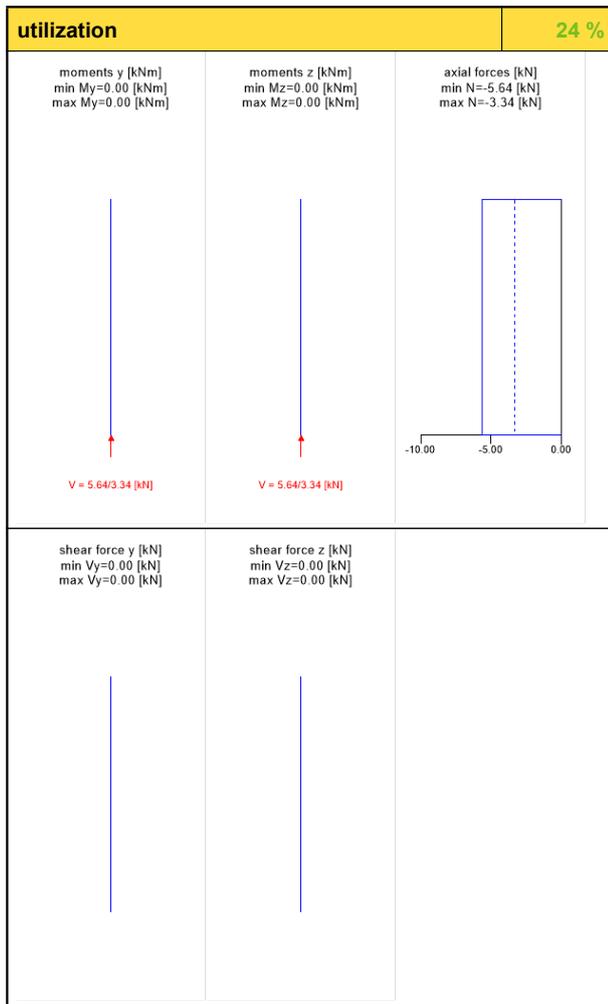
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).

system



section: wooden beam 8/14; **material:** C16 softwood; **service class:** service class 1; **fire resistance class:** R 60



flexural stress analysis		6 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -5.64$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.50$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 7.85$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 7.49$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 8.37$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
buckling analysis		24 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = -5.64$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.50$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 7.85$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 7.49$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 8.37$ N/mm ² ✓	
flexural stress analysis fire		2 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -4.29$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.38$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 22.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined fire		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis fire		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
buckling analysis fire		7 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm		
$N_{c,d} = -4.29$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.38$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 22.68$ N/mm ² ✓	



support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
dead load	0.6	0.00	0.00	4.18	0.00	0.00
		0.00	0.00	4.18	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.37	0.00	0.00
wind load	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.22	0.00	0.00

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

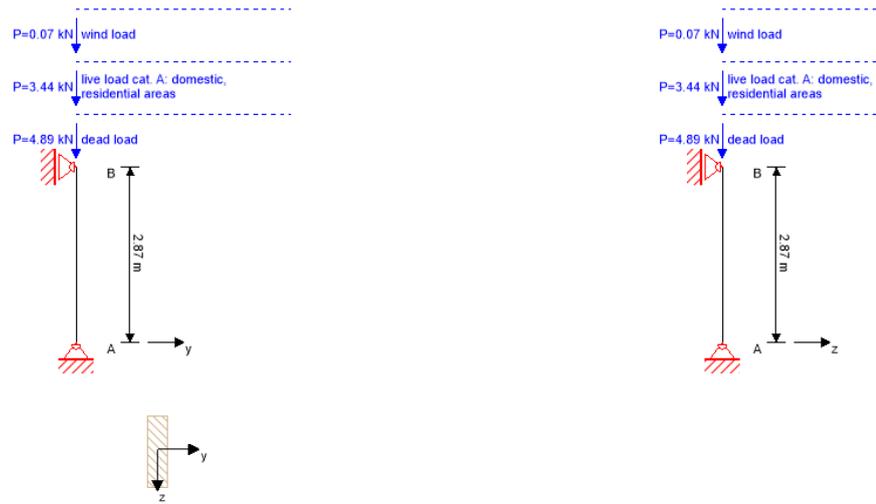
The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

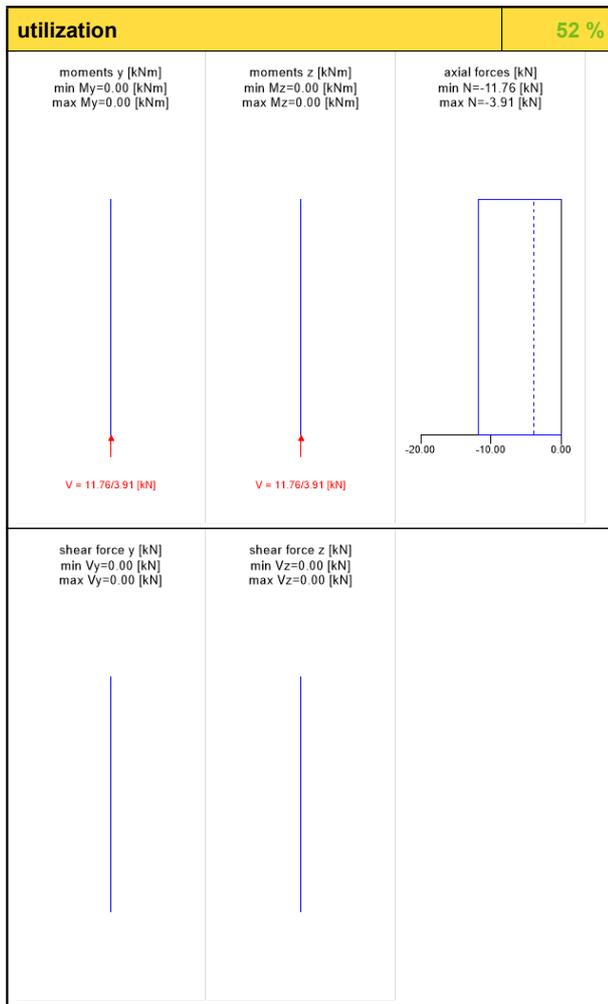
Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).

system



section: wooden beam 4/14; **material:** C16 softwood; **service class:** service class 1; **fire resistance class:** R 60



flexural stress analysis		20 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -11.76$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 2.10$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 10.46$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 9.98$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 12.80$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 1.48$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis		52 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -11.76$ kN	$f_{c,0,d} = 10.46$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 2.10$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 9.98$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 12.80$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
flexural stress analysis fire		5 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k,z} = 16.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -5.92$ kN	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.06$ N/mm ²	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{m,z,d} = 26.00$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Y fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis Z fire		0 %
$V_d = 0.00$ kN	$f_{v,k} = 3.20$ N/mm ²	
$T_{v,d} = 0.00$ N/mm ² <	$f_{v,d} = 2.68$ N/mm ² ✓	
shear stress analysis combined fire		0 %
$V_{y,d} = 0.00$ kN	$V_{z,d} = 0.00$ kN	
$T_{v,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$T_{v,z,d} = 0.00$ N/mm ²	
	ratio = 0 %	✓
lateral torsional buckling analysis fire		0 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 0.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 0.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = 0.00$ kN	$f_{c,0,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		
buckling analysis fire		13 %
$M_{y,d} = 0.00$ kNm	$f_{m,k} = 16.00$ N/mm ²	
$M_{z,d} = 0.00$ kNm	$f_{c,0,k} = 17.00$ N/mm ²	
$N_{c,d} = -5.92$ kN	$f_{c,0,d} = 21.25$ N/mm ²	
$\sigma_{c,d} = 1.06$ N/mm ²	$f_{m,y,d} = 20.28$ N/mm ²	
$\sigma_{m,y,d} = 0.00$ N/mm ²	$f_{m,z,d} = 26.00$ N/mm ² ✓	
$\sigma_{m,z,d} = 0.00$ N/mm ² <		

support reaction						
load case category	k_{mod}	A_y	A_z	B_x	B_y	B_z
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
dead load	0.6	0.00	0.00	4.89	0.00	0.00
		0.00	0.00	4.89	0.00	0.00
live load cat. A: domestic, residential areas	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	3.44	0.00	0.00
wind load	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.07	0.00	0.00

Disclaimer

The software was created to assist engineers in their daily business. The software is an engineering software that is dealing with a very complex matter of structural analysis and building physics analysis. Therefore, this software shall only be operated by skilled, experienced engineers, with a deep understanding of structural engineering and building physics related to timber structures. The user of the software is obliged to check all input values, no matter if they were given by the user or given by default by the software and all results for plausibility.

The use of the results of the software should not be relied upon as the basis for any decision or action. Any use of results of the software is only allowed, if the results have been verified and approved regarding completeness and correctness by a project structural/building physics engineer. The user has the possibility to make print-outs from the software. Any modification of those are not allowed.

Stora Enso Wood Products GmbH does not assume any warranty regarding the software. The software has been developed with utmost diligence, nevertheless Stora Enso Wood Products GmbH, neither expressly nor implicitly, provides any warranty in terms of accuracy, validity, timeliness and completeness of information and data created by the software. Stora Enso Wood Products GmbH does also not assume any warranty for the general usability of the software, its suitability for a special purpose or for the compatibility of the software with the ones of third party producers or providers.

Stora Enso Wood Products GmbH is only liable for damages caused by gross negligence or intent through Stora Enso Wood Products GmbH; the liability for slight negligence is excluded. This does not apply to personal injury. Under the aforementioned conditions Stora Enso Wood Products GmbH is as well not liable for operational failures or the loss of programs and/or data of the user's data processing system.

Applicable Law: These terms of use shall be governed by the laws of Austria excluding however any conflict of laws rules and any laws regarding the Convention of the International Sale of Goods (CISG).