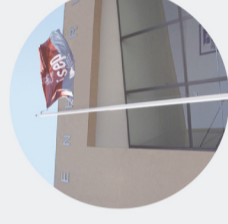




# CONSTRUÇÃO DE UM EDIFÍCIO EM MADEIRA (CLT)

**IVAN FERNANDO BARBOSA GOMES DE SOUSA**

Outubro de 2020



## CONSTRUÇÃO DE UM EDIFÍCIO EM MADEIRA (CLT)

CONSTRUÇÃO DE UM EDIFÍCIO EM MADEIRA (CLT)

IVAN FERNANDO BARBOSA GOMES DE SOUSA  
Outubro de 2020

IVAN FERNANDO BARBOSA GOMES DE SOUSA  
Outubro de 2020





# CONSTRUÇÃO DE UM EDIFÍCIO EM MADEIRA (CLT)

**IVAN FERNANDO BARBOSA GOMES DE SOUSA**

**1121027**

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS**

Orientador: Eng. José Carlos de Almeida Gouveia Lello

Supervisor: Eng. Mariana Fernandes (CCAD)

**OUTUBRO DE 2020**



# ÍNDICE GERAL

Índice Geral .....	iii
Resumo.....	v
Abstract .....	vii
Agradecimentos .....	ix
Índice de Texto .....	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas.....	xix
Abreviaturas .....	xxi
CAPÍTULO 1    Introdução.....	1
CAPÍTULO 2    história da madeira na construção .....	3
CAPÍTULO 3    madeira .....	7
CAPÍTULO 4    Cross laminated timber (CLT).....	13
CAPÍTULO 5    introdução ao processo de cálculo .....	19
CAPÍTULO 6    Exemplo de cálculo .....	41
CAPÍTULO 7    Cálculo automático .....	49
CAPÍTULO 8    Caso de estudo.....	65
CAPÍTULO 9    A título de curiosidade .....	73
CAPÍTULO 10    Considerações Finais.....	79
Referências Bibliográficas .....	81
Anexo I.....	83



## RESUMO

Este projeto foi desenvolvido no âmbito da disciplina DIPRE, integrada no segundo ano do mestrado em engenharia civil, do instituto superior de engenharia do porto (ISEP).

Este trabalho tem em vista descrever o procedimento de cálculo desenvolvido pelo aluno, com recurso à consulta de diversos trabalhos já desenvolvidos na área, explicar as vantagens e desvantagens das construções que recorrem à tecnologia construtiva alvo desta tese e descrever as várias fases necessárias para passar do elemento natural até ao producto acabado, sendo este uma edificação pronta a ser utilizada.

Para o processo de dimensionamento foi utilizado o programa Excel, possibilitando assim que os cálculos sejam feitos de forma organizada e sistematizada e permitindo que qualquer alteração seja feita de forma rápida e eficaz.

Por ser um processo de cálculo ainda não contemplado nos Eurocódigos existem vários métodos de cálculo, muitos deles disponibilizados pelos fabricantes. No entanto, os resultados não apresentam discrepâncias consideráveis nos valores finais.

A presente tese descreve ainda a construção de um hotel nas proximidades do Estádio do Dragão, situado na rua Vasques Mesquita e rua da Vigorosa onde se recorrerá ao CLT para a construção dos seus pisos elevados.

### **Palavras-chave:**

CLT, Estruturas, Madeira



## **ABSTRACT**

This project was developed within the scope of the DIPRE discipline, present in the second year of the master's degree in civil engineering in the field of structures of instituto superior de engenharia do porto (ISEP).

This work aims to describe the calculation procedure developed by the student using several works developed in the area, explain the advantages and disadvantages of the constructions using this constructive technology and describe the various phases necessary to move from the natural element to the finished product which is the building ready to be used.

For the sizing process, the Excel program was used, thus enabling calculations to be made in a practical and systematic way, allowing any necessary changes to be made quickly and effectively.

As it is a calculation process not yet contemplated in Eurocodes, there are several forms it can be calculated, many of them made available by the manufacturers. However, the result does not produce considerable discrepancies in the final values.

The present thesis also describes the construction of a hotel located near the Dragon's Stadium, located at Vasques Mesquita street and Vigorosa street where the CLT was used to build its raised floors.

### **Keywords:**

CLT, Structure, Wood



## **AGRADECIMENTOS**

É comum na realização de documentos desta natureza que o produto final não seja mérito somente do autor, mas também de todos os envolvidos. Compartilhar é indispensável ao avanço do conhecimento. Todos compartilham problemas, incertezas e experiências.

Agradeço a todos os que me orientaram e também me ensinaram durante todo o meu percurso acadêmico.

Um especial obrigado à eng. Mariana Fernandes (CCAD) pela paciência e disponibilidade demonstrada durante a formatação e organização do documento. Aos meus pais que sempre me apoiaram em todos os momentos. Ao meu orientador Eng. José Carlos de Almeida Gouveia Lello que se demonstrou disponível e aberto para tirar as dúvidas que surgiam e por fim aos meus amigos que através de conversas sobre as diversas teses, contribuíram para aumentar o meu conhecimento em diversas áreas.



# ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1	Introdução.....	1
1.1	Considerações iniciais .....	1
1.2	Formato de texto .....	2
CAPÍTULO 2	história da madeira na construção .....	3
CAPÍTULO 3	madeira .....	7
3.1	Macroestrutura.....	8
3.1.1	Anéis de Crescimento .....	8
3.1.2	Raios Lenhosos .....	9
3.1.3	Cerne e Borne .....	9
3.1.4	Nós.....	9
3.1.5	Medula.....	10
3.1.6	Lenho Juvenil .....	10
3.2	Microestrutura.....	10
3.3	Ultraestrutura .....	11
CAPÍTULO 4	Cross laminated timber (CLT).....	13
4.1	Vantagens e desvantagens .....	14
4.1.1	Vantagens .....	15
4.1.2	Desvantagens.....	15
4.2	CLT e o ambiente .....	16
CAPÍTULO 5	introdução ao processo de cálculo .....	19

## ÍNDICE DE TEXTO

5.1	propriedades das secções .....	19
5.2	Verificações de segurança.....	22
5.3	Verificações de tração ,compressão, corte e momentos.....	24
5.4	estados limites .....	29
5.4.1	Estado limite último.....	30
5.4.2	Estado limite de deformação.....	30
5.4.3	Estado limite de vibração .....	32
5.5	Resistência ao fogo .....	34
CAPÍTULO 6	exemplo de cálculo .....	41
6.1	Γ method .....	43
6.1.1	Tensões máximas.....	43
6.2	Estado limite de deformação.....	44
6.3	Estado limite de vibração.....	45
6.4	Resistência ao fogo .....	47
CAPÍTULO 7	Cálculo automático .....	49
7.1	Folha de verificação de segurança .....	49
7.1.1	introdução de dados.....	50
7.1.2	Cálculo de propriedades efetivas .....	50
7.1.3	verificações de segurança.....	52
7.2	Programas de cálculo automático .....	55
CAPÍTULO 8	Caso de estudo .....	65
8.1	Hotel em CLT (Portugal).....	67
CAPÍTULO 9	A título de curiosidade .....	73
9.1	Comportamento térmico .....	73
9.2	Timoshenko beam theory .....	76
CAPÍTULO 10	Considerações Finais.....	79
10.1	CONCLUSÕES.....	79

10.2 Desenvolvimentos futuros ..... 80



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estrutura de madeira rudimentar .....	3
Figura 2.2 Aumento da complexidade estrutural .....	4
Figura 2.3 Igreja Borgund interior .....	4
Figura 2.4 Igreja Borgund .....	4
Figura 3.1 Macroestrutura da madeira .....	8
Figura 3.2 Cerne e Borne.....	8
Figura 3.3 Nó numa peça de madeira .....	8
Figura 3.4 Microestrutura da madeira .....	11
Figura 3.5 Ultraestrutura da madeira.....	11
Figura 4.1 Painéis de CLT .....	13
Figura 4.2 Organização das lamelas (camadas) num painel de CLT .....	14
Figura 4.3 Novas soluções em prole do ambiente .....	16
Figura 4.4 Emissão de dióxido de carbono por sector .....	17
Figura 4.5 Maiores emissores de gases com efeito estufa (2015) .....	18
Figura 5.1 Designações usuais num painel de CLT .....	19
Figura 5.2 Orientação das fibras num painel de CLT.....	21
Figura 5.3 Painel de pavimento em CLT (m).....	34
Figura 5.4 Painel de CLT submetido a teste de carbonização .....	35
Figura 5.5 Painel de CLT (3 camadas) expostas ao fogo por 1:15h .....	36
Figura 5.6 Painel de CLT antes da atuação do fogo.....	39
Figura 5.7 Painel de CLT após a atuação do fogo.....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 6.1 sistema estrutural para o cálculo .....	42
Figura 6.2 Painel de CLT para cálculo .....	42
Figura 6.3 tensões atuantes no painel .....	44
Figura 7.1 introdução de dados no Excel.....	50
Figura 7.2 Direção das forças a atuar no painel .....	53
Figura 7.3 valores de espessuras finais após 120 min de fogo.....	54
Figura 7.4 Dlubal RFEM5 (RF-laminate).....	55
Figura 7.5 TimberTech Buildings .....	56
Figura 7.6 Interface inicial do CLTdesigner.....	57
Figura 7.7 Opções de cálculo de lajes (CLT) do CLTdesigner .....	58
Figura 7.8 Definição de inputs do programa .....	59
Figura 7.9 Dados de exemplo introduzidos no programa CLTdesigner.....	60
Figura 7.10 Características do painel de CLT .....	61
Figura 7.11 Gráfico das tensões ( $\sigma$ ).....	61
Figura 7.12 Gráfico das tensões de corte ( $\tau$ ) .....	62
Figura 7.13 Resultados da verificação ao estado limite de deformação através do CLTdesigner .....	63
Figura 7.14 Resultados da verificação da vibração .....	63
Figura 8.1 Casa da vinha (2015); Montijo.....	65
Figura 8.2 Casa das sapateiras (2015); Estarreja .....	65
Figura 8.3 Casa unifamiliar (2009); Alcanena .....	66
Figura 8.4 Pavilhão ISQ Castelo Branco (2004);Castelo Branco .....	66
Figura 8.5 Redbridge School, localização .....	66
Figura 8.6 Redbridge School .....	66
Figura 8.7 Terreno de implantação do hotel.....	68
Figura 8.8 planta das fundações do edifício .....	68
Figura 8.9 execução da obra.....	69
Figura 8.10 betonagem direta (sem bombagem).....	70

Figura 8.11 Modelo utilizado para análise .....	71
Figura 8.12 Planta tipo de um piso com os respectivos painéis de CLT.....	72
Figura 9.1 Caracterização da zona climática .....	73
Figura 9.2 Distâncias ai de um painel de CLT (5 camadas).....	77



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 Classe de duração das ações.....	23
Tabela 5.2 valores do $K_{mod}$ .....	23
Tabela 5.3 Deformações finais máximas impostas pelo EC5.....	30
Tabela 5.4 Valores de $K_{def}$ .....	31
Tabela 5.5 Camada não resistente aos esforços ( $d_0$ ) para $t=0$ a 120min (CLT com 3 camadas) .....	37
Tabela 5.6 Camada não resistente aos esforços ( $d_0$ ) para $t=0$ a 120min (CLT com 5 camadas) .....	38
Tabela 5.7 Camada não resistente aos esforços ( $d_0$ ) para $t=0$ a 120min (CLT com 7 camadas) .....	38
Tabela 6.1 Parâmetros do material .....	41
Tabela 7.1 tabela de cálculo de propriedades efetivas .....	50
Tabela 7.2 propriedades efetivas da secção em estudo .....	51
Tabela 7.3 propriedades efetivas da secção perpendicular á secção em estudo .....	51
Tabela 7.4 método $\gamma$ .....	51
Tabela 7.5 Timoshenko Beam Theory .....	52
Tabela 7.6 verificação de segurança (ELU).....	52
Tabela 7.7 introdução de dados para o cálculo da deformação .....	53
Tabela 7.8 verificação de segurança estado limite de deformação.....	54
Tabela 7.9 valor para verificação ao estado limite de vibração .....	54
Tabela 8.1 painéis de CLT a utilizar .....	67
Tabela 9.1 Resultados do “Timoshenko beam theory” .....	76
Tabela 9.2 cálculo do coeficiente $k$ .....	76



## ABREVIATURAS

### Letras Maiúsculas

GLT	glued laminated timber (madeira lamelada colada)
CLT	cross laminated timber ( madeira lamelada cruzada)
M	lamela Média
P	parede Primária
S1	primeira camada da Parede Secundária
S2	segunda camada da Parede Secundária
S3	terceira camada da Parede Secundária
V	camada verrugosa (warts)
X-lam	cross laminated timber
MLCC	madeira lamelada colada cruzada
C24	classe da madeira correspondente a uma madeira resinosa com $f_m, k=24\text{Mpa}$
CNC	comando numérico computadorizado
Hi	espessura de cada camada
Z	distancia entre o centro de gravidade e o limite da secção transversal
ML	índice de camadas longitudinal mais próxima da posição do centro de gravidade, vista a partir da parte superior da secção
Ei	módulo de elasticidade
Ai	área de secção
Gr	modulo de deformação de cisalhamento das camadas intermédias
Rk	esforço resistente característico

## ABREVIATURAS

- $R_d$  esforço resistente de cálculo
- $K_{mod}$  fator de modificação que tem em conta o efeito da duração das ações e do teor em água.
- $K_{sys}$  fator de carga partilhada que tem e conta a redistribuição de esforços do sistema
- $K_{c90}$  factor que tem em conta a configuração do carregamento, a possibilidade de fendimento e o grau de deformação por compressão
- $M_d$  valor de cálculo do momento atuante na direção correspondente
- $M_{,0}$  momento atuante na direção principal
- $M_{,90}$  momento atuante na direção perpendicular a principal
- $V_d$  valor de cálculo do esforço de corte
- $S_{r,net}$  momento estático
- $A_{0,net}$  área efetiva de superfície resistente a tração dos elementos cuja direção do fio corresponda com a direção da atuação da força
- $A_{90,net}$  área efetiva de superfície resistente cuja direção do fio não corresponda com a direção da atuação da força
- $I_{0,net}$  momento de inercia na direção principal
- $W_{0,net}$  módulo da secção na direção principal
- $I_{0,eff}$  momento de inercia na direção principal do método gama
- REBAP regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado
- R.C.P restantes cargas permanentes
- RSA regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes

**Letras Minúsculas**

$a_i$	distância entre o centro de gravidade e o centro da camada considerada
$n$	número de camadas na direção longitudinal
$b$	largura do painel de CLT
$h_i$	espessura da camada longitudinal
$h_i$	espessura da camada intermédia
$l_i$	comprimento de referência do elemento considerado
$f_{t,0k}$	valor característico da tensão resistente de tração paralelo ao fio
$f_{c,0k}$	valor característico da tensão resistente de compressão paralelo ao fio
$f_{t,90k}$	valor característico da tensão resistente de tração perpendicular ao fio
$f_{c,90k}$	valor característico da tensão resistente de compressão perpendicular ao fio
$f_{m,k}$	valor característico da tensão resistente à flexão em relação aos eixos principais
$f_{v,r,k}$	valor característico da tensão resistente de corte
$f_{t,0d}$	valor de cálculo da tensão resistente de tração paralelo ao fio
$f_{c,0d}$	valor de cálculo da tensão resistente de compressão paralelo ao fio
$f_{m,d}$	valor de cálculo da tensão resistente à flexão em relação aos eixos principais
$f_{v,r,d}$	valor de cálculo da tensão resistente de corte
$f_{t,90d}$	valor de cálculo da tensão resistente de tração perpendicular ao fio
$f_{c,90d}$	valor de cálculo da tensão resistente de compressão perpendicular ao fio
$h_{net}$	espessura mínima da secção nas duas direções
$n_{40}$	número de modos de vibração de primeira ordem com frequências próprias até 40 Hz

## ABREVIATURAS

### Letras gregas

- $\gamma_i$  coeficiente do método gama a plicar ao momento de inercia
- $\gamma_m$  coeficiente parcial para uma propriedade de um material
- $\sigma_{t,0d}$  valor de cálculo da tensão atuante de tração paralela ao fio
- $\sigma_{c,0d}$  valor de cálculo da tensão atuante de compressão paralela ao fio
- $\sigma_{t,90d}$  valor de cálculo da tensão atuante de tração perpendicular ao fio
- $\sigma_{c,90d}$  valor de cálculo da tensão atuante de compressão perpendicular ao fio
- $\sigma_{m,d}$  valor de cálculo da tensão atuante de flexão em relação aos eixos principais
- $\tau_{v,r,d}$  valor de cálculo da tensão de corte

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A madeira esteve sempre presente na construção, sendo um dos primeiros materiais utilizados pelo Homem devido à sua abundância no meio envolvente e à sua fácil trabalhabilidade e transporte.

O desenvolvimento tecnológico e a introdução do betão armado diminuíram a utilização deste material tornando-o num material para elementos provisórios, tais como andaimes, escoras, cofragens, entre outros.

O seu desuso e a facilidade de construir em betão armado, devido à anisotropia da madeira e ao facto de ser um material natural cuja pobre manutenção é facilmente observável, acabou por levar à perda de algumas capacidades técnicas da construção em madeira.

Porém, graças aos avanços tecnológicos feitos na área da madeira, como o surgimento da madeira lamelada colada, foi possível competir com o ainda dominante betão armado, apesar dos preconceitos dirigidos ao seu mau comportamento ao fogo e ao fraco isolamento acústico.

Com um processo de construção similar à do GLT surgiram painéis maciços pré-fabricados (CLT), que permitiram inovar a utilização deste material na construção estrutural em madeira. A liderança do CLT tornou-se clara quando este material foi capaz de resolver um dos grandes problemas nas construções em madeira, a falta de resistência, conferida pela colagem de camadas sucessivas com tábuas dispostas ortogonalmente obtendo maior resistência nas duas direções, o que não era possível com o GLT.

Para a realização desta tese foi necessário um grande estudo e entendimento das capacidades da madeira como material estrutural. Pretende-se de um modo simples, transmitir, através dum processo de cálculo intuitivo, conhecimentos necessários para dimensionamento dos painéis de CLT

## 1.2 FORMATO DE TEXTO

O presente documento apresenta uma estrutura organizada da seguinte forma:

- No capítulo 1 faz-se o enquadramento do tema;
- No capítulo 2 é feita uma breve introdução histórica da utilização da madeira como elemento estrutural;
- No capítulo 3 é feita uma introdução à madeira em diversos níveis;
- No capítulo 4 é introduzida o CLT (cross laminated timber ) e é feita uma breve exposição das vantagens e desvantagens;
- No capítulo 5 é exposta toda teoria do procedimento de cálculo de painéis de CLT;
- No capítulo 6 é feito um exemplo de cálculo, indicando os diversos passos, bem como de o painel que se baseia o exemplo cumpre ou não as verificações;
- No capítulo 7 são abordados processos de calculo automático já existentes ou criadas pelo aluno durante a tese;
- No capítulo 8 dá-se a conhecer o caso de estudo;
- No capítulo 9 apresenta-se algumas curiosidades;
- No capítulo 10 é feita uma conclusão e considerações sobre o estado do CLT em Portugal e o que se espera no futuro.

## CAPÍTULO 2

### HISTÓRIA DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO

A madeira por ser um elemento leve, fácil de ser trabalhado e em abundância no meio circundante permitiu ao Homem abandonar a caverna e passar à construção de pequenas cabanas, migrando de um modo de habitação restrita para cabanas feitas de ramos e troncos com coberturas de folhas unidas com argila ou coberturas de peles.

Inicialmente a estrutura das construções em madeira era bastante simples, organizada de forma triangular com a base no solo e ligadas na parte superior por elementos vegetais fibrosos.

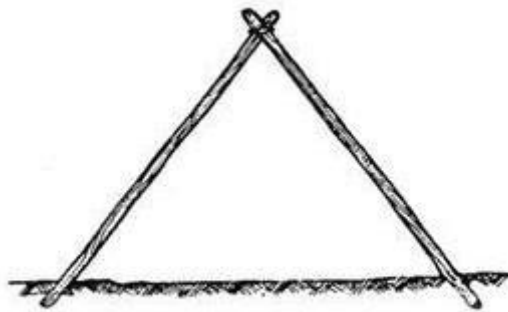


Figura 2.1 Estrutura de madeira rudimentar

(Fonte: <https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/Madeiras%2099.pdf>)

Uma vez que se verificou a necessidade de estruturas mais amplas, a sua complexidade aumentou surgindo assim as escoras e o contra nível (uma peça horizontal). Ao ser necessário executar trabalhos em grandes extensões passou-se a utilizar estruturas porticadas de pilares e vigas de madeira.

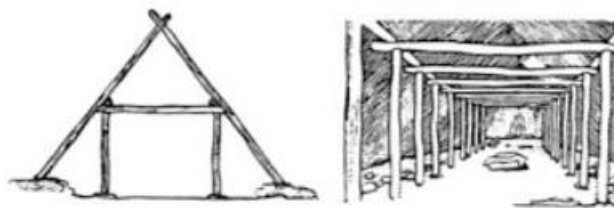


Figura 2.2. Aumento da complexidade estrutural

(Fonte: <https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/Madeiras%2099.pdf>)

Durante muitos séculos a carpintaria foi a arte mais importante na construção dos edifícios, influenciando assim a arquitectura da época tais como as habitações, as primeiras fortificações, os sistemas de defesa (pontes levadiças, catapultas, etc.) e os edifícios religiosos, cuja cobertura e estruturas das torres apresentavam grandes problemas relativamente ao vão.

Os muitos carpinteiros transmitiam de geração em geração a sua própria experiência somada à experiência anterior. Os seus conhecimentos sobre as características da madeira e sobre o comportamento das estruturas, fizeram com que na Idade Média e nos séculos XVI, XVII e XVIII verdadeiras obras-primas, quer do ponto de vista de concepção como de realização, pudessem ser executadas.



Figura 2.3 Igreja Borgund

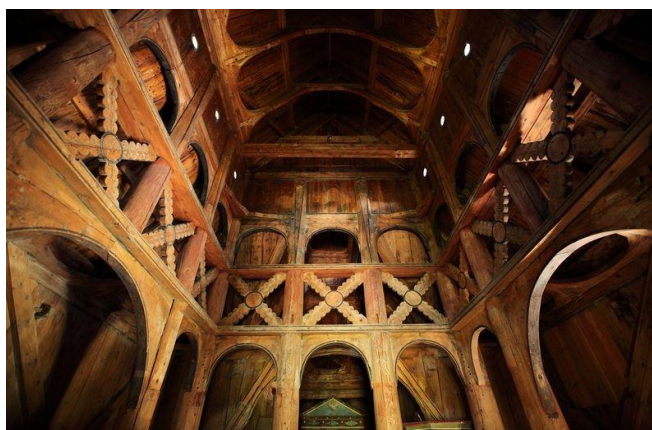


Figura 2.4 Igreja Borgund interior

(Fonte: <https://www.magnusmundi.com/igrejas-medievais-da-noruega/>)

Uma grande marca da arquitectura em madeira na Europa é a Norueguesa, devido a abundância de matéria prima e ao clima frio.

Devido às propriedades de isolamento térmico da madeira, os moradores locais usam a madeira como o principal elemento arquitetónico. Além das suas casas, os "vikings" (de civilizações anteriores na mesma região) também utilizavam a madeira para construir os seus navios: "Drakas". O estilo mais usado nas casas norueguesas é o "laft", com toras de madeira empilhadas horizontalmente nas paredes. O isolamento completo é obtido através de ripas coloridas ou pasta delicada, nas casas mais pobres, entre troncos de árvores.

Porém nos finais do século XIX, o grau de evolução atingido até então não permitia a realização de estruturas mais arrojadas.

O aparecimento do aço permitiu elaborar estruturas que correspondiam ao desenvolvimento industrial da época, como grandes oficinas, hangares ou pontes de grande vão, uma vez que este material era mais versátil em secções e vãos.

A necessidade de um grande número de construções elaboradas em aço deu origem a um grande progresso no domínio do cálculo das estruturas e do conhecimento das propriedades dos materiais.

O betão armado acentuou ainda mais a queda, como elemento estrutural, da madeira que até então se baseava em conhecimentos empíricos e tradicionais.

Nos últimos anos, graças ao aparecimento do GLT (glued laminated timber), do CLT (cross laminated timber) e aos avanços nos estudos das limitações e das suas propriedades permitiram que a madeira voltasse a ganhar um maior espaço na construção.



## CAPÍTULO 3

### MADEIRA

A madeira é um material produzido a partir do tecido formado pelas plantas lenhosas com funções de sustentação mecânica. Sendo um material naturalmente resistente e relativamente leve, é frequentemente utilizado para fins estruturais e de sustentação de construções. É um material orgânico, sólido, de composição complexa, onde predominam as fibras de celulose e hemicelulose unidas por lenhina.

A madeira utilizada nas construções pode ser classificada segundo duas categorias de acordo com a sua proveniência, sendo estas as gimnospérmicas (ou resinosas), provenientes de plantas que não possuem frutos envolvendo as sementes tornando as madeiras mais brandas, ou as angiospérmicas (ou folhosas) que produzem flores e frutos, onde se encontram as sementes no seu interior, tornando as madeiras mais duras. Logo, opta-se pelo uso de madeiras resinosas para o material estrutural em edifícios.

De modo a compreender o comportamento físico-mecânico da madeira é necessário subdividir o seu estudo em três níveis diferentes:

- Macroestrutura - estrutura visível a olho nu;
- Microestrutura - agregação das células formando a madeira;
- Ultraestrutura - a estrutura da parede celular;

### 3.1 MACROESTRUTURA

Nesta análise pode-se identificar alguns constituintes da estrutura visíveis a olho nu, tais como os anéis de crescimento, raios lenhosos, cerne e borne, nós, orientação das fibras, medula e lenho juvenil.

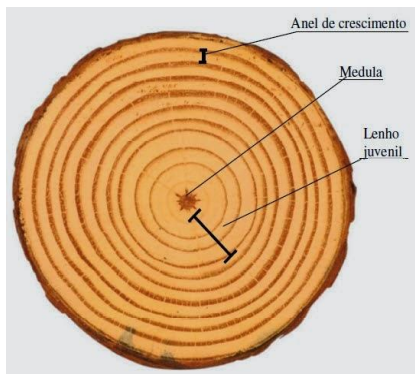


Figura 3.1 Macroestrutura da madeira



Figura 3.2 Cerne e Borne



Figura 3.3 Nó numa peça de madeira

(Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Madeira>)

#### 3.1.1 Anéis de Crescimento

Os anéis de crescimento são círculos observados no xilema secundário do tronco de algumas plantas, principalmente as de clima temperado.

Os anéis são formados devido a uma alteração na atividade do câmbio vascular, alteração esta originada pela mudança de condições apresentadas em diferentes estações do ano.

As regiões que apresentam um clima temperado, onde as estações do ano são bem definidas, é possível distinguir claramente os diferentes anéis de crescimento.

Nestas regiões é possível distinguir o lenho primaveril do lenho estival. O lenho primaveril é formado na primavera, apresenta uma cor mais clara e as suas células possuem paredes mais finas, já o lenho estival, formado durante o verão, é mais escuro e apresenta células com paredes mais espessas. No outono e inverno, o câmbio permanece em repouso.

Uma vez que o lenho, em regiões temperadas, é formado apenas na primavera e verão, é possível determinar quantos anos uma árvore possui contando esses anéis.

### **3.1.2 Raios Lenhosos**

Os raios lenhosos são conjuntos de células lenhosas transversais radiais que tem a função principal de transporte e armazenamento de nutrientes.

Quando presentes, possuem um fator benéfico para peça, não só como detalhe estético de embelezamento, mas também como amarração transversal das fibras impedindo grandes variações devido a alteração do teor de humidade.

### **3.1.3 Cerne e Borne**

O cerne é o tecido morto sem função circulatória de substâncias, possui uma cor mais intensa e constitui a camada que envolve a medula desempenhando assim funções essencialmente estruturais. O borne é constituído pelas células vivas no momento do corte e, enquanto ainda são fisiologicamente ativas, são responsáveis pela condução de seiva. O borne apresenta uma cor mais clara comparado ao cerne.

### **3.1.4 Nós**

Os nós são porções de ramos presentes no tronco. Os ramos originam-se, em regra, a partir do eixo central do caule de uma planta (a medula) e, enquanto vivos, tal como o tronco, aumentam em tamanho com a adição anual de camadas lenhosas irregularmente cónicas, com a ponta na medula.

Afetam tanto a resistência da madeira como a sua maneabilidade e a sua flexibilidade. Esses defeitos enfraquecem a madeira e afetam diretamente seu valor, principalmente para o uso em estruturas, onde a resistência é importante.

O enfraquecimento ganha sérias proporções quando a madeira é submetida a tração e compressão. A extensão da diminuição da força de uma viga depende da sua posição, do seu tamanho, do número, da direção das fibras e da condição.

### **3.1.5 Medula**

A medula é o vestígio deixado no centro do tronco pela estrutura inicial a partir da qual se desenvolveu o tronco da planta.

Ela possui alguns milímetros de diâmetro e apresenta uma pigmentação geralmente mais escura que o lenho envolvente. No entanto este último fator não possui qualquer importância para determinação da qualidade ou usos da madeira.

### **3.1.6 Lenho Juvenil**

O lenho juvenil corresponde à madeira entre 5 à 20 anos de crescimento com propriedades únicas em algumas espécies.

Possui uma menor resistência e rigidez, mas detém uma maior retração longitudinal que a madeira envolvente.

## **3.2 MICROESTRUTURA**

Neste nível é possível identificar o lenho de primavera e o lenho de verão.

O lenho de primavera é mais claro e apresenta células com paredes mais finas enquanto que o lenho de verão é mais escuro e apresenta células com paredes mais espessas.

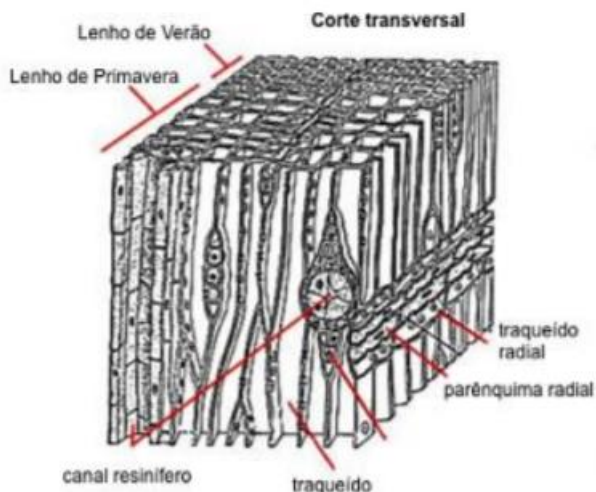


Figura 3.4 Microestrutura da madeira

(Fonte: <https://eg.uc.pt/bitstream/10316/24927/3/Tomografia%20das%20C3%A1rvores%20do%20Jar%20dim%20Bot%20C3%A2nico.pdf>)

### 3.3 ULTRAESTRUTURA

Neste nível é possível observar a unidade básica estrutural nomeada de fibrila elementar.

O agrupamento destes elementos chama-se microfibrilas e agrupam-se sob forma de lamelas que podem ser de quatro (4) tipos diferentes (Parede primária: P; Parede secundária: S1, S2 e S3).

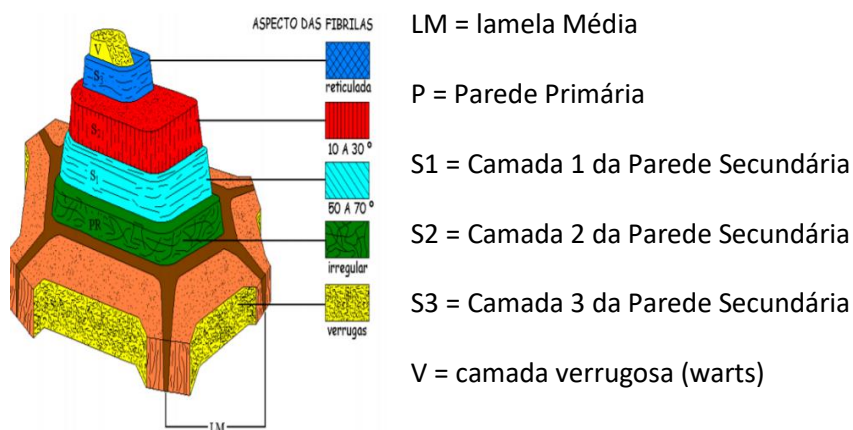


Figura 3.5 Ultraestrutura da madeira

(Fonte: <https://docplayer.com.br/10016221-Ultraestrutura-da-parede-celular-prof-umberto-klock.html>)



## CAPÍTULO 4

### CROSS LAMINATED TIMBER (CLT)

Cross Laminated Timber, ou CLT, é um produto derivado da madeira que ameaça perturbar o domínio dos dois grandes materiais estruturais: o aço e o betão.

O seu uso foi inicialmente impulsionado pelas suas vantagens ambientais. Nos últimos anos tem-se observado mais construções que recorrem a este material pois apresenta outras vantagens como a sua rapidez de construção, o facto de originar menos resíduos e ruído no local da obra e também por representar uma solução mais barata.

O CLT (cross laminated timber) é também conhecido como X-lam ou madeira lamelada colada cruzada (MLCC) em português, são painéis pré-fabricados constituídos por camadas de madeira maciça coladas em sentido ortogonal com número impar de camadas usualmente 3,5 ou 7 camadas de largura entre 6 e 45 mm.

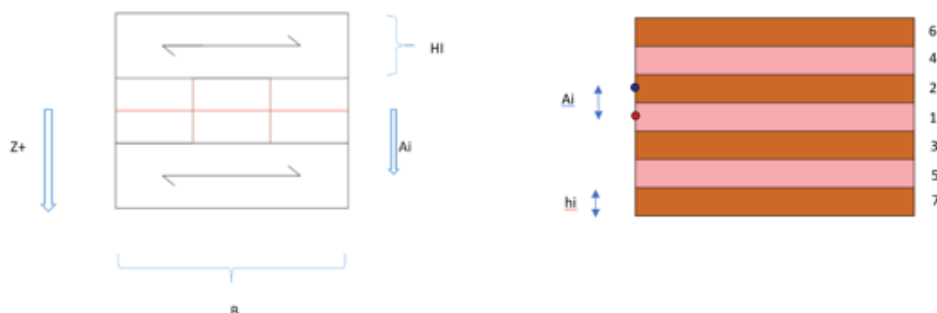


Figura 4.1 Painéis de CLT

Esta configuração permite uma adequada transferência dos esforços em mais do que uma direção, apresentando um comportamento que até então era impossível em estruturas de madeira devido a sua anisotropia.

Os painéis são fabricados a partir de diferentes árvores, como o pinheiro silvestre, o larício, o abeto de Douglas, mas o mais usual é o abeto vermelho (spruce) da classe C24. Ao chegar à fábrica a madeira é conduzida para uma estufa para secagem, reduzindo assim o teor de humidade.

Uma vez terminada a secagem a madeira é empilhada em camadas, designadas como lamelas.

Cada lamela (layer) é colocada num ângulo de 90 ° em relação à camada de baixo. Estas lamelas são coladas com uma cola não tóxica e pressionadas hidraulicamente, para assim criar os painéis.

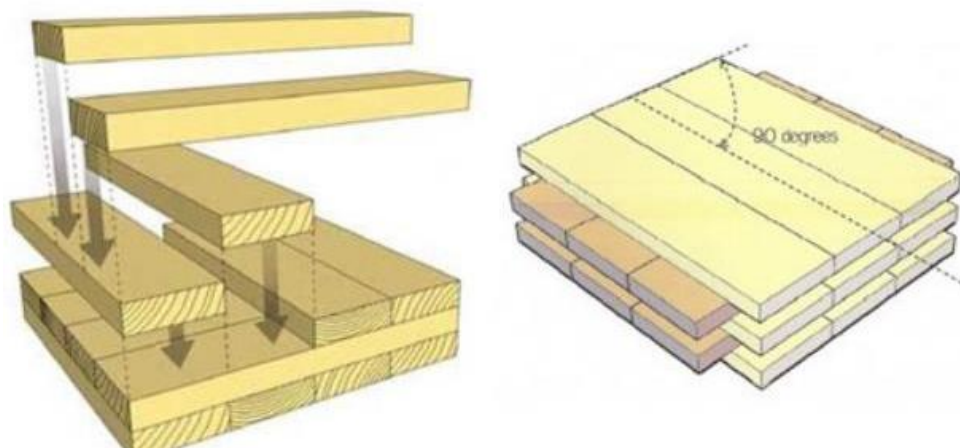


Figura 4.2 Organização das lamelas (camadas) num painel de CLT

(Fonte: <https://carpinteria.com.br/2018/04/08/madeira-laminada-cruzada-clt/>)

Os painéis podem apresentar diversos tamanhos condicionados pela máquina de fabrico que, de uma forma geral, produzem painéis com 3.50 m de largura. O comprimento do painel por sua vez só está condicionado pelo método de transporte para o local, sendo mais usual 13.5m. Porém painéis até 22m podem ser produzidos, no entanto é necessário um maior cuidado e um transporte mais especializado.

Os painéis podem ser usados tanto como piso como paredes, resistentes ou não. Os vãos são cortados em fábrica em formas de portas ou janelas recorrendo a máquinas de corte controladas por computador (CNC). Uma vez terminado o corte os painéis estão prontos a serem transportados para o local.

#### 4.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS

O CLT, como qualquer material, possui um conjunto de vantagens e desvantagens que nos permite optar, por este ou outro material como o adequado para a obra que se pretende executar.

#### **4.1.1 Vantagens**

- Bom desempenho térmico e bom comportamento ao fogo;
- Permite uma fácil instalação de cabos e tubos;
- Muito vantajoso do ponto de vista ambiental;
- Bom comportamento sísmico devido a alta ductilidade e reduzido valor de massa comparado com o betão armado;
- Estável quando sujeito às variações de temperatura;
- Material leve que traduz numa maior facilidade de montagem;
- Elevado nível de pré-fabricação que possibilita prazos de construções curtos;
- Os painéis de madeira são entregues diretamente em obra nas dimensões e formas definidas em projeto.
- Montagem feita a “seco” permite que em simultâneo sejam feitas as instalações elétricas e de água ou aplicação de revestimentos.
- Reduzido ruído no estaleiro e requer uma reduzida dimensão do mesmo.

#### **4.1.2 Desvantagens**

- Baixo nível de experiência quer no dimensionamento por ser um material relativamente novo quer na montagem;
- Os procedimentos de cálculo ainda não foram contemplados pelo Eurocódigo;
- Tem de ser protegido da água durante a montagem;
- A sua superfície externa necessita de uma camada de proteção a prova de água.
- As fábricas de produção deste material não se encontram ainda em todos os países, o que representa custos adicionais de transporte para alguns países.

## 4.2 CLT E O AMBIENTE



Figura 4.3 Novas soluções em prole do ambiente

(Fonte: <https://www.fm-middleeast.com/article-35258-ministry-of-energy-and-esco-sign-mou>)

Desde que a utilização da madeira seja controlada de acordo com os princípios de sustentabilidade florestal o seu uso como material de construção é benéfico do ponto de vista ambiental.

A produção do CLT é um processo eficiente do ponto de vista energético, segundo fabricantes de CLT os componentes produzidos para construção consomem 50% da energia que seria necessária para produzir o betão e 1% da necessária para produzir aço.

As aparas e os resíduos de madeira são usados para produzir energia que é usada para aquecer os fornos de secagem diminuindo o uso de energia fóssil na fabricação.

As árvores realizam a fotossíntese armazenando dióxido de carbono e libertando oxigénio durante todo o seu período de vida. Ao morrerem na natureza, o dióxido de carbono armazenado é libertado. Quando esta é cortada uma grande parte deste dióxido de carbono armazenado é mantido na peça, muitas vezes denominado de “carbono sequestrado”. Apesar de necessitar da energia para produção dos painéis de CLT, o dióxido de carbono utilizado para produção dessa energia é menor que o “carbono sequestrado” presente na peça tornando o CLT um material muito vantajoso para o meio ambiente em contraste com o betão que por cada metro cubico produzido liberta uma tonelada de CO2 para a atmosfera.

Uma ideia equivocada é de que se passarmos a construir maioritariamente em madeira pode ser prejudicial para o ambiente devido a quantidade de arvores que seria necessário cortar para produção da madeira para construção. Esta linha de raciocínio é facilmente refutada através de dados estatísticos dos EUA, por exemplo, que possuem grande volume de construções em madeira. Segundo a agência de

sustentabilidade florestal da América do Norte, nos últimos 50 anos menos de 2% das árvores foram cortadas enquanto que o crescimento líquido foi de 3% nestes mesmos 50 anos.

Uma grande parte das mudanças climáticas é resultado das emissões de dióxido de carbono causadas pelas atividades humanas, principalmente a queima de combustíveis fósseis que estão relacionadas à emissão de grandes quantidades de carbono na atmosfera todos os anos.

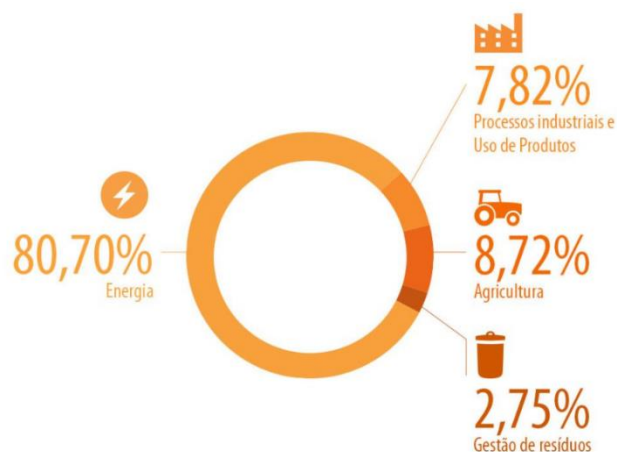


Figura 4.4 Emissão de dióxido de carbono por sector

(Fonte: <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20180301STO98928/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa-por-pais-e-setor-infografia>)

Os quatro principais emissores de CO2 são China, União Europeia, Índia e Estados, porem assumiram um conjunto de compromissos no Acordo de Paris, alcançado em 2015 com o objetivo de diminuir as emissões.

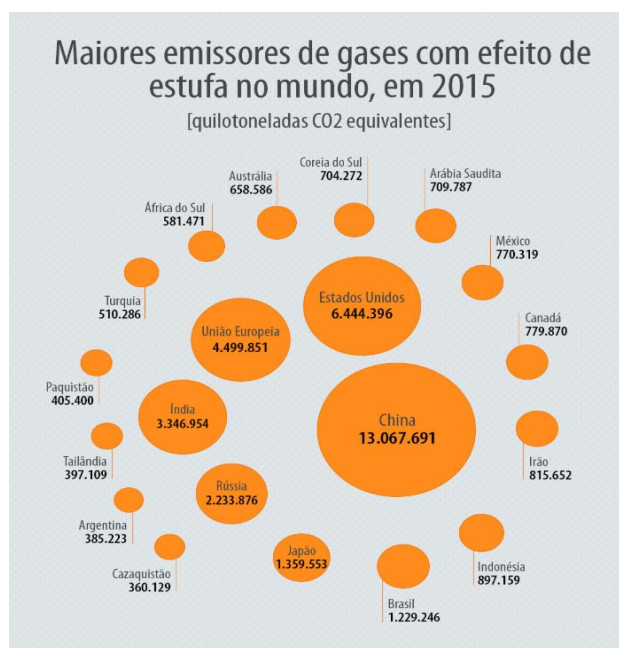


Figura 4.5 Maiores emissores de gases com efeito estufa (2015)

(Fonte: <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20180301STO98928/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa-por-pais-e-setor-infografia>)

A União Europeia comprometeu-se a reduzir as emissões em 40% até 2030. Existem duas maneiras de reduzir a acumulação de dióxido de carbono na atmosfera: reduzir as emissões ou remover e armazenar o dióxido de carbono. Em outras palavras, reduzir as fontes de carbono e aumentar sua capacidade de armazenamento. Ao adotar a madeira como principal material na construção atende-se a esses dois métodos simultaneamente, o que se torna numa medida bastante eficiente para reduzir o impacto ambiental das nossas cidades, visto que a energia necessária para fabricar os materiais atualmente utilizados correspondem a 22% da energia total gasta durante a vida útil do edifício.

## CAPÍTULO 5

### INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE CÁLCULO

#### 5.1 PROPRIEDADES DAS SECÇÕES

Para efeitos de cálculo da capacidade resistente de cada painel, é necessário estabelecer uma nomenclatura base bem como algumas grandezas, permitindo assim uma melhor compreensão do elemento.

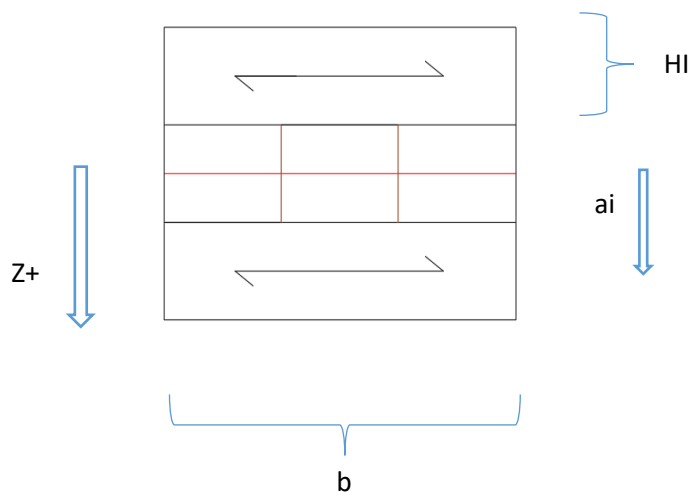


Figura 5.1 Designações usuais num painel de CLT

- $b$ - largura do elemento (normalmente 1m) [mm]
- $H_i$ - espessura de cada camada [mm]
- $a_i$ - distância entre o centro de gravidade e o centro da camada considerada [mm]
- $Z$ - distância entre o centro de gravidade e o limite da secção transversal [mm]
- $n$ - número de camadas na direção longitudinal

As propriedades da secção podem ser obtidas através das seguintes expressões:

- Área da secção

$$A_{0,net} = \sum_{i=1}^n b \times h_i$$

- Momento de inércia

$$I_{0,net} = \sum_{i=1}^n (I_i + I_{i,steiner}) = \sum_{i=1}^n (b \times \frac{h_i^3}{12} + b \times h_i \times a_i^2)$$

- O módulo da secção

$$w_{0,net} = I_{0,net}/z$$

- Momento estático

$$s_{0,net} = \sum_{i=1}^{m_l^*} b \times h_i \times a_i$$

\*  $m_l$  - índice de camadas longitudinal mais próxima da posição do centro de gravidade, vista a partir da parte superior da secção.

No cálculo das deformações a contribuição dos painéis com a direção do fio perpendicular ao esforço não poderá ser desprezado, sendo necessário efetuar o cálculo do momento de inércia efetivo, quer para o cálculo das deformações fora do plano como para a encurvadura.

A deformação do painel CLT fora do plano consiste em duas parcelas, a primeira devido à flexão e uma segunda parcela de corte devido ao módulo de deformação de cisalhamento das camadas transversais.

Várias teorias têm sido propostas, principalmente na Alemanha e Áustria, para a análise de painéis CLT para cargas que atuam perpendicular ao plano do painel. Na sua grande maioria concentram-se em propor uma forma de calcular a inércia efetiva tendo em conta a contribuição em forma de corte dos painéis transversais com base em características como a direção do fio e a espessura das camadas.

Em ordem cronológica, Kreuzinger apresentou o método “Shear Analogy Method” em 1999, de seguida, em 2003 foi apresentado um segundo método chamado de “Modified Gamma Method” por Blass e

Gorlacher com base na “Mechanically Jointed Beams Theory” ou “Gamma Method”, presente no anexo B da parte 1-1 do Eurocodigo 5, sendo que a última teoria foi proposta em 2009, por Shickhofer Et Al, chamada de “Timoshenko Beam Theory”.

Na europa o método mais usado é o Y-method (gamma method), motivo porque será abordado o seu procedimento de cálculo detalhado no desenvolver desta tese.

A parcela de corte poderá ser calculada recorrendo aos seguintes métodos:

- Y-method
- Shear analogy method
- Timoshenko beam theory

Para elementos de 3 e 5 layers (CLT) para a determinação da inércia efetiva, tendo em conta o contributo dos painéis transversais, é necessário aplicar à parcela de Steiner do momento de inércia, um coeficiente  $Y_i$ , calculado da seguinte forma:

$$Y_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \times E_i \times A_i \times h_i}{l_i^2 \times G_r \times b}}$$

$$I_{0,eff} = \sum_{i=1}^n (I_i + Y_i \times I_{i,steiner}) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{b \times h_i^3}{12} + Y_i \times b \times h_i \times a_i^2 \right)$$

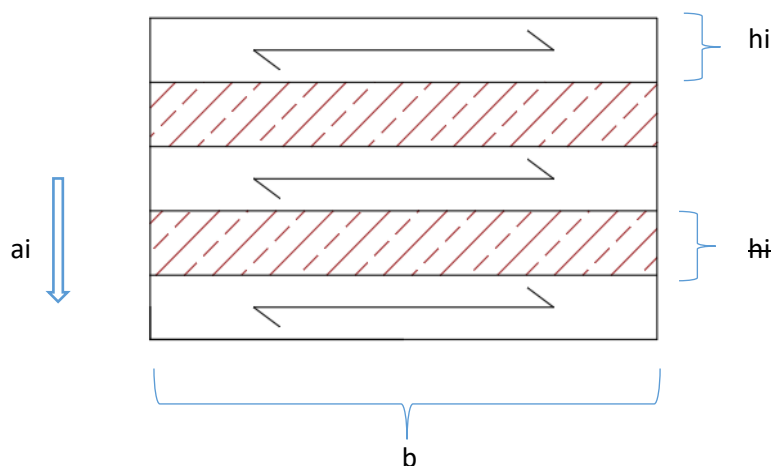


Figura 5.2 Orientação das fibras num painel de CLT

- b-largura do elemento [mm]
- $h_i$ - altura da camada longitudinal [mm]
- $l_i$ -comprimento de referência do elemento considerado [mm]
  - li=l (Simplesmente apoiada)
  - li=0.8l (Apoio contínuo)
  - li=2l (Consola)
- $h_i$ -espessura da camada intermédia (para elementos de 3 camadas= h/2) [mm]
- $G_r$ - módulo de deformação de cisalhamento das camadas intermédias ( $\approx G/10$ ) [N/mm<sup>2</sup>]
- $a_i$ -distância entre o eixo neutro e o centro das camadas longitudinais [mm]
- n-número de camadas longitudinais

## 5.2 VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA

Para a verificação de segurança é necessário ainda reduzir o esforço resistente da secção, comparando-o com os esforços atuantes, passando assim de valores característicos para valores de cálculo.

$$R_d = K_{mod} \times \frac{R_k}{\gamma_m}$$

$\gamma_m$  - é o valor do coeficiente parcial para uma propriedade de um material, neste caso 1.3, valor conservativo apesar que alguns autores defendem a utilização de 1.25 para o CLT, que é um fator homólogo ao GLH, que reflecte uma menor variabilidade nas propriedades em relação ao material base (madeira),no entanto este valor ainda não consta em nenhum Eurocódigo.

$K_{mod}$  – Factor de modificação que tem em consideração o efeito de duração das ações e do teor em água do material.

Tabela 5.1 - Classe de duração das ações

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

(Fonte: En.1995.1.1.2004)

Tabela 5.2 - valores do Kmod

Duração das cargas	Permanente	Longa duração	Média duração	Curta duração	Instantânea
Kmod	0.6	0.7	0.8	0.9	1.10

Os valores anteriores correspondem às classes de serviço 1 e 2 (classe de serviço depende do tipo de ambiente em que se inserem os elementos), pois o CLT é usado na pré fabricação de painéis de laje ou paredes e em caso de exposição ao ambiente exterior este material é protegido, sendo assim excluindo a classe 3 que corresponde a peças de madeira em contacto com ambiente exterior com contactos frequentes com água das chuvas, muitas vezes em períodos longos.

O EC5 admite ainda um fator designado de carga partilhada,  $k_{sys}$  (system strength) para aumentar a resistência de cálculo sempre que estes façam parte de um sistema estrutural formado por vários elementos iguais, separados de forma uniforme e unidos transversalmente por uma estrutura secundária. Refletindo assim a capacidade de distribuição transversal das cargas para elementos vizinhos através desta estrutura secundária. O que significa que em caso de eventual defeito, a possibilidade de resultar em consequências catastróficas é reduzida.

No caso do CLT este coeficiente depende ainda do número de camadas, por prática geral e de acordo com A.thiel 2010 e várias aprovações técnicas, o valor do  $k_{sys}$  poderá ser dado pela seguinte expressão:

$$k_{sys} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0.025 \times n^* \\ 1.1 \end{array} \right.$$

\*n- número de camadas

- Para elementos estruturais menores que 60 cm é recomendado utilizar  $k_{sys} = 1.0$
- Não executar elementos menores que 30cm.

### 5.3 VERIFICAÇÕES DE TRAÇÃO ,COMPRESSÃO, CORTE E MOMENTOS

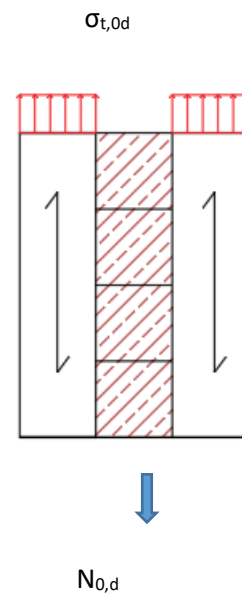
De um modo geral nas verificações são considerados somente os painéis em que as direções das suas fibras correspondem ao sentido da atuação das forças.

- **TRAÇÃO PARALELA AO FIO**

Deverá ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

$$\frac{N_{,0,d}}{A_{0,net}} \leq k_{mod} \times k_{sys} \times \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_m}$$



Em que:

$\sigma_{t,0,d}$ - valor de cálculo da tensão atuante de tração paralela ao fio

$f_{t,0,d}$ - valor de cálculo da tensão resistente de tração paralela ao fio

$N_{,0,d}$  –valor de cálculo da força atuante na direção paralela ao fio

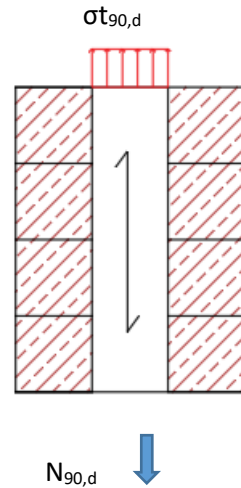
$A_{0,net}$ - área efetiva de superfície resistente a tração dos elementos cuja direção do fio corresponda com a direção da atuação da força.

- **TRAÇÃO PERPENDICULAR AO FIO**

Devera ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\sigma_{t,90,d} \leq f_{t,90,d}$$

$$\frac{N_{90,d}}{A_{90,net}} \leq k_{mod} \times k_{sys} \times \frac{f_{t,0k}}{\gamma_m}$$



Em que:

$\sigma_{t,90,d}$ - valor de cálculo da tensão atuante de tração perpendicular ao fio

$f_{t,90,d}$ - valor de cálculo da tensão resistente de tração perpendicular ao fio

$N_{90,d}$  – valor de cálculo da força atuante na direção perpendicular ao fio

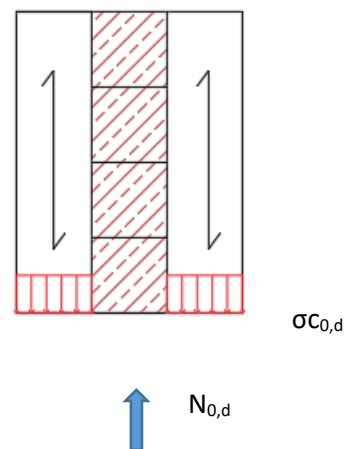
$A_{90,net}$ - área efetiva de superfície resistente a tração dos elementos cuja direção do fio nao corresponda com a direção da atuação da força.

- **COMPRESSÃO PARALELA AO FIO**

Devera ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

$$\frac{N_{0,d}}{A_{0,net}} \leq k_{mod} \times \frac{f_{c,0k}}{\gamma_m}$$



Em que:

$\sigma_{c,0,d}$ - valor de cálculo da tensão atuante de compressão paralela ao fio

$f_{c,0,d}$ - valor de cálculo da tensão resistente de compressão paralela ao fio

$N_{0,d}$  –valor de calculo da força atuante na direção paralela ao fio

$A_{0,net}$ - área efetiva de superfície resistente a compressão dos elementos cuja direção do fio corresponda com a direção da atuação da força.

Nota: É necessário ainda fazer uma verificação de encurvadura, e em caso afirmativo multiplicar ainda pelo respetivo  $k_{ci}$  (coeficiente de encurvadura).

$$k_{ci} = \frac{1}{k_i + \sqrt{k_i^2 - \lambda_{rel,i}^2}}$$

Com:

$$k_i = 0.5 \times (1 + 0.1 \times (\lambda_{rel,i} - 0.3) + \lambda_{rel,i}^2)$$

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0k}}{E_{0,05}}}$$

$$\lambda_i = \frac{lv^*}{\sqrt{\frac{I_{0,eff}}{A_{0,net}}}}$$

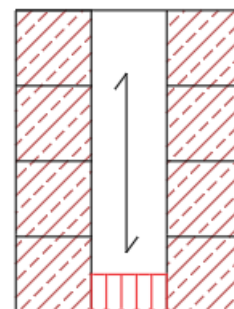
\* Comprimento de encurvadura para flexão em torno de um eixo.

- **COMPRESSÃO PERPENDICULAR AO FIO**

Devera ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

$$\frac{N_{90,d}}{A_{90,net}} \leq k_{mod} \times K_{c90}(clt) \times \frac{f_{c,0k}}{\gamma_m}$$



$\sigma_{c90,d}$

$N_{90,d}$

Em que:

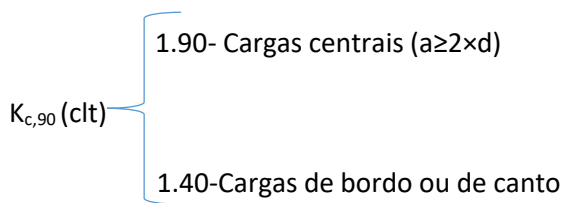
$\sigma_{c,90,d}$ - valor de cálculo da tensão atuante de compressão perpendicular ao fio

$f_{c,90,d}$ - valor de cálculo da tensão resistente de compressão perpendicular ao fio

$N_{,90,d}$  –valor de cálculo da força atuante na direção perpendicular ao fio

$A_{90,net}$ - área efetiva de superfície resistente a compressão dos elementos cuja direção do fio não corresponda com a direção da atuação da força.

$K_{c,90}(clt)$ -fator que tem em conta a configuração do carregamento, a possibilidade de fendimento e o grau de deformação por compressão.



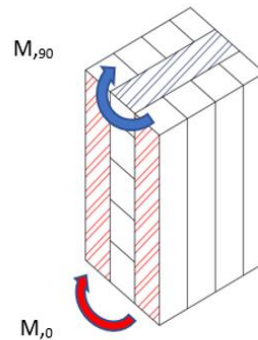
Nota: necessário ainda fazer uma verificação de encurvadura, e em caso afirmativo multiplicar ainda pelo respetivo  $k_{ci}$

• **FLEXÃO**

Devera ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

$$\frac{Md}{W_{0,net}} \leq k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_m}$$



## CAPÍTULO 5

Em que:

$\sigma_{m,d}$  - valor de cálculo da tensão atuante de flexão em relação aos eixos principais

$f_{m,d}$  - valor de cálculo da tensão resistente a flexão em relação aos eixos principais

$M_d$  – valor de cálculo do momento atuante na direção correspondente

$W_{0,net}$  ou  $W_{90,net}$  - módulo da secção nas duas direções principais

Nota: este cálculo deverá ser efetuado para as duas direções principais da secção transversal, uma usando o  $W_{0,net}$  e outra o  $W_{90,net}$

- **CORTE** ( nas duas direções )

Devera ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\tau_{v,rd} \leq f_{v,r,d}$$

$$\frac{V_d \times S_{r,net}}{I_{net} \times b} \leq k_{mod} \times \frac{f_{v,r,k}}{\gamma_m}$$

Em que:

$\tau_{v,rd}$  - valor de cálculo da tensão de corte

$f_{v,r,d}$  - valor de cálculo da resistência ao corte

$V_d$  – valor de cálculo do esforço de corte

$S_{r,net}$  - Momento estático

O CLT possui três módulos de rotura que influenciam a sua capacidade resistente de corte:

Modo de rotura I – Caraterizado pela rotura por corte em todas as camadas simultaneamente, devido a iguais resistências de corte nas camadas longitudinais e transversais.

Modo de rotura II - Rotura por corte nas camadas transversais, na direção fraca do Clt .

Modo de rotura III – Caraterizada pela rotura por corte no cruzamento entre as diferentes camadas, longitudinal e transversal. Esta rotura é causada por forças de corte torsionais e unidirecionais transmitidas pela transferência do esforço de corte entre camadas adjacentes.

$$F_{v,r,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 3.5 \text{ (I)} \\ 8 \times \frac{h_{net}}{h_{tot}} \text{ (II)} \\ 2.5 \times \frac{1}{6 \times h_{tot}} \times \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i^2 + (b_{i+1})^2}{b_{max}} \text{ (III)} \end{array} \right.$$

Em que :

$h_{net}$  - espessura mínima da secção nas duas direções e  $b$  sendo a espessura de cada camada

$b$  - espessura de cada camada

## 5.4 ESTADOS LIMITES

Entende-se por estado limite de uma estrutura um estado a partir do qual a capacidade de desempenhar as funções, para a qual foi concebida fica comprometida parcial ou totalmente. Os estados limites que devem ser considerados na verificação da segurança são:

- Estados limites últimos – a sua ocorrência resulta em prejuízos muito graves. Estado a partir do qual a estrutura já não pode ser utilizada por razões de esgotamento da capacidade resistente e risco de segurança.
- Estados limites de utilização – a sua ocorrência resulta de prejuízos pouco severos. São os critérios de segurança que estão relacionados ao conforto dos usuários, durabilidade da estrutura, aparência e boa utilização de um modo geral.

### 5.4.1 Estado limite último

A verificação da segurança em relação aos estados limites últimos, consiste em satisfazer a seguinte condição para qualquer tipo de esforço a atuar sobre o elemento:

$$Sd \leq Rd$$

onde:

$Sd$  é o valor de cálculo do esforço atuante

$Rd$  é o valor de cálculo do esforço resistente

Muitas vezes o dimensionamento dos elementos de madeira não é condicionado pelo estado limite último, mas sim pelo estado limite de utilização, visto que a sua rigidez é menor quando comparada à do betão, ou seja deforma-se com mais facilidade.

Para a verificação ao estado limite de utilização o painel deve verificar dois estados limites, o de deformação e o de vibração.

### 5.4.2 Estado limite de deformação

De acordo com o Eurocódigo 5, a deformação final ( $u_{fin}$ ) do elemento não pode exceder os valores estipulados de  $w_{net,fin}$  propostos pelo mesmo.

Tabela 5.3 - Deformações finais máximas impostas pelo EC5

	Simplemente apoiada	Consola
Coberturas em geral	$l/200$	$l/100$
Coberturas utilizadas frequentemente por pessoas, para além do pessoal de manutenção	$l/250$	$l/125$
Pavimentos em geral	$l/250$	$l/125$
Pavimentos e coberturas que suportem rebocos ou outros acabamentos frágeis, ou divisórias não flexíveis	$l/250$	$l/125$
Quando $w_{net,fin}$ possa afectar o aspecto do edifício	$l/250$	$l/125$

(Fonte: ESMAL\_Apontamentos\_Madeira\_AACosta\_2015 )

$$u_{fin} = u_{finG} + u_{finQ1} + u_{finQi}$$

- $u_{finG} = u_{instG} \times (1 + k_{def}^*)$  para o cálculo da parcela de deformação devido a uma ação permanente (G)
- $u_{finQ1} = u_{instQ1} \times (1 + \Psi_{2,1} \times k_{def})$  para o cálculo da parcela de deformação devido a ação variável base (Q1)
- $u_{finQi} = u_{instQi} \times (\Psi_{0,i} + \Psi_{2,i} \times k_{def})$  para o cálculo da parcela de deformação devido as restantes ações variáveis que acompanham a ação base (Q1)

\* $k_{def}$ -fator de deformação que depende do material e da classe de serviço.

Aconselha-se a utilização dos valores de  $k_{def}$  estipulados pelo Eurocódigo, pois ainda não há um consenso sobre que coeficiente se deve utilizar. É comum alguns fabricantes utilizarem valores diferentes dos estabelecidos nos Eurocódigos ,sendo valores específicos, que resultaram de um rigoroso controle de qualidade específico de cada fabricante.

Tabela 5.4 - Valores de  $k_{def}$

Material	Classe de serviço		
	1	2	3
Madeira maciça	0,60	0,80	2,00
Madeira lamelada colada	0,60	0,80	2,00

(Fonte: ESMAL\_Apontamentos\_Madeira\_AACosta\_2015 )

Nota: utilizam-se somente valores correspondentes às classes de serviço 1 e 2 para elementos de CLT.

### 5.4.3 Estado limite de vibração

As principais fontes de vibração numa estrutura resultam de três grupos distintos:

- Pessoas (provocado por passos que advém do normal uso da habitação);
- Máquinas (máquinas cíclicas a trabalhar apoiadas no solo, movimentação de carros na rua ,etc);
- Ações (vento,sismo,etc).

O mais comum em pisos de madeira são vibrações provocadas pelos passos no interior do edifício.

O estudo do estado limite de vibração é de extrema importância, não só por razões de conforto, mas também por razões de segurança, uma vez que se podem gerar fenómenos de ressonância que acontecem quando a frequência da ação, a que o elemento está sujeito, coincide com a sua frequência natural.

Quando ocorre a ressonância surge um aumento da magnitude da vibração, aumento este que se sobrepõe aos efeitos de amortecimento, culminando numa eventual rotura estrutural.

Visto que a frequência associada à movimentação de pessoas na habitação é de, no máximo, 3.5Hz e a frequência fundamental dos pavimentos de madeira raramente está abaixo dos 8Hz, à partida não haverá problemas de ressonância (a não ser que haja um aumento excessivo da massa do pavimento).

Para pavimentos de madeira simplesmente apoiados nos 4 bordos com vigas de madeira a frequência fundamental poderá ser calculada pela seguinte fórmula aproximada, que no caso de painéis de CLT produz valores bastante aproximados dos valores obtidos por programas disponibilizadas pelos fabricantes.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

- m massa por unidade de área [ kg/m<sup>2</sup>];
- l vão do pavimento [m];
- (EI)<sub>l</sub> rigidez equivalente de flexão de placa do pavimento segundo um eixo perpendicular à direção das vigas [Nm<sup>2</sup>/m], cuja adaptação para CLT passa para eixo perpendicular à menor dimensão do pavimento.

$$m = h_{total} \times \rho_k$$

Na verificação do estado limite de vibração é necessário realizar duas verificações fundamentais, uma para baixas frequências e a segunda para altas frequências:

#### 5.4.3.1 Baixas frequências:

Para b inferiores a 4m :  $a \leq 1.8(mm)$

Para b superiores a 4m :  $a \leq \frac{16500}{b^{1.1}} (mm)$

Sendo “a” dado pela seguinte expressão:

$$a = \frac{1000 * K_{dist} * b^3 * K_{amp}}{48 * EI_l} [m]$$

- b-largura do pavimento [m]
- $K_{dist}$ - para pavimentos de madeira apoiados em vigas representa a proporção da carga de 1kN suportada por uma viga apenas, no entanto os painéis de CLT, normalmente não possuem esta configuração estrutural, o que leva a que este fator ter sido considerado 1 que melhor reflete a estrutura presente (CLT).
- $K_{amp}$  fator de amplificação devido as deformações por corte das vigas, para vigas simplesmente apoiadas assume o valor de 1,05 e em vigas contínuas 1.10.

#### 5.4.3.2 Altas frequências:

$$v \leq b^{(f^{1 \times 0.02^*} - 1)}$$

\*amortecimento, que para pisos em madeira e usual considerar 0.02, no entanto é possível assumir outros valores desde que devidamente justificados.

Em que:

- Para  $a \leq 1(mm)$   $b = 180 - 60 \times a$
- Para  $a > 1(mm)$   $b = 160 - 40 \times a$

- $$\nu = \frac{4 \times (0.4 + 0.6 \times n_{40})}{m \times A^* + 200}$$

\*A- área do painel de CLT em estudo.

- $$n_{40} = \left[ \left( \left( \frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \times \left( \frac{b}{L} \right)^4 \times \frac{E \times I_{onet}}{E \times \frac{L \times H^3}{12}} \right]^{0.25}$$

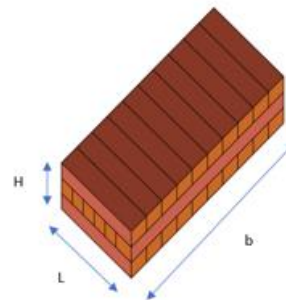


Figura 5.3 Painel de pavimento em CLT (m)

## 5.5 RESISTÊNCIA AO FOGO

A resistência ao fogo de painéis de CLT é melhor do que qualquer outro material de construção existente (aço ou betão). O CLT proporciona um ambiente hermético que inibe a propagação do fogo, uma vez que quando começa a queimar o material tem a tendência, por ser constituído por tramos diferentes cruzados, de limitar a propagação a uma área reduzida, limitando assim o combustível disponível. Outra grande vantagem é a sua massa térmica sólida que permite, por exemplo, que de um lado esteja com fogo ativo com elevadas temperaturas e do outro à temperatura ambiente, originando uma camada de carbono na superfície com o fogo ativo que trabalha como uma barreira ao oxigénio, impedindo assim a continuidade da combustão.



Figura 5.4 Painel de CLT submetido a teste de carbonização

(Fonte:<https://carpinteria.com.br/2018/04/08/madeira-laminada-cruzada-clt/>)

O afastamento de soluções de construção em madeira, pelo pensamento errôneo que edifícios em madeira se comportam mal em incêndios, tem sido gradualmente combatido com testes laboratoriais e novas formas de integrar a madeira na construção como o CLT.

A madeira ao contrário do aço que está presente quer em estruturas de betão quer em estruturas em aço, é estável quando submetida a altas temperaturas, não se deforma e ao perder secção a partir da face submetida ao fogo cria uma camada carbonizada que reduz a velocidade de propagação do fogo, enquanto que a camada, que não é carbonizada, mantém uma resistência significativa.



Figura 5.5 Pannel de CLT (3 camadas) expostas ao fogo por 1:15h

(Fonte:<https://pt.slideshare.net/leliocaf/comportamento-de-estruturas-de-clt-cross-laminated-timber-em-situao-de-incndio>)

Um material ou técnica construtiva deve respeitar os seguintes princípios de segurança em situação de incêndio:

- Evacuação segura dos ocupantes (impedir a propagação do fogo e do fumo do compartimento de incêndio);
- Evitar propagação do fogo fora do compartimento;
- Possuir integridade estrutural na presença do fogo, de forma a proporcionar segurança no combate ao incêndio.

No dimensionamento pode-se optar por dimensionar a peça em conjunto com um elemento resistente ao fogo ou garantir uma secção que, ao fim de um determinado período de atuação do fogo, resista aos esforços existentes, ou uma combinação destas duas técnicas.

A capacidade resistente ao fogo de um painel de CLT depende de um conjunto de fatores:

- O seu número de camadas;
- A espessura da camada exposta ao fogo;
- O tipo de esforço atuante na camada exposta ao fogo (tração ou compressão) ;
- Espessura do painel de CLT ;
- A sua aplicação (pavimento ou parede);
- Existência ou não de uma camada de proteção.

Um documento muito utilizado para análise do comportamento do clt exposto ao fogo é a “swedish wood CLT handbook” que aplica o método da secção transversal efetiva para calcular a capacidade resistente ao fogo do CLT.

Este documento contém tabelas que permitem ter em conta os fatores referidos anteriormente, resultando em valores muito próximos da realidade:

Tabela 5.5 - Camada não resistente aos esforços (d0) para t=0 a 120min (CLT com 3 camadas)

Fire on	Floor slab		Wall panel	
	Unprotected surface (mm)	Protected surface <sup>1)</sup> (mm)	Unprotected surface (mm)	Protected surface <sup>1)</sup> (mm)
Panel's side under tension	$d_0 = \frac{h_{CLT}}{30} + 3.7$	$d_0 = 10$	Not relevant	Not relevant
Panel's side under compression	$d_0 = \frac{h_{CLT}}{25} + 4.5$	$d_0 = \min \left\{ \begin{array}{l} 13.5 \\ \frac{h_{CLT}}{12.5} + 7 \end{array} \right.$	$d_0 = \frac{h_{CLT}}{25} + 3.95$	$d_0 = \min \left\{ \begin{array}{l} 13.5 \\ \frac{h_{CLT}}{12.5} + 7 \end{array} \right.$

(Fonte: swedish wood CLT handbook)

Tabela 5.6 - Camada não resistente aos esforços (d0) para t=0 a 120min (CLT com 5 camadas)

Fire on	Floor slab		Wall panel	
	Unprotected surface (mm)	Protected surface <sup>1)</sup> (mm)	Unprotected surface (mm)	Protected surface <sup>1)</sup> (mm)
Panel's side under tension	$d_0 = \frac{h_{CLT}}{100} + 10$	$75 \text{ mm} \leq h_{CLT} \leq 100 \text{ mm}$ $d_0 = 34 - \frac{h_{CLT}}{4}$ $h_{CLT} > 100 \text{ mm}$ $d_0 = \frac{h_{CLT}}{35} + 6$	Not relevant	Not relevant
Panel's side under compression	$d_0 = \frac{h_{CLT}}{20} + 11$	$d_0 = 18$	$d_0 = \frac{h_{CLT}}{15} + 10.5$	$d_0 = 20$

(Fonte: swedish wood CLT handbook)

Tabela 5.7 - Camada não resistente aos esforços (d0) para t=0 a 120min (CLT com 7 camadas)

Fire on	Floor slab		Wall panel	
	Unprotected surface (mm)	Protected surface <sup>1)</sup> (mm)	Unprotected surface (mm)	Protected surface <sup>1)</sup> (mm)
Panel's side under tension	$105 \text{ mm} \leq h_{CLT} \leq 175 \text{ mm}$ $d_0 = \frac{h_{CLT}}{6} + 2.5$ $h_{CLT} > 175 \text{ mm}$ $d_0 = 10$	Same as unprotected surface	Not relevant	Not relevant
Panel's side under compression	$105 \text{ mm} \leq h_{CLT} \leq 175 \text{ mm}$ $d_0 = \frac{h_{CLT}}{6} + 2.5$ $h_{CLT} > 175 \text{ mm}$ $d_0 = 13$	Same as unprotected surface	$105 \text{ mm} \leq h_{CLT} \leq 175 \text{ mm}$ $d_0 = \frac{h_{CLT}}{6} + 4.0$ $h_{CLT} > 175 \text{ mm}$ $d_0 = 16$	Same as unprotected surface

(Fonte: swedish wood CLT handbook )

Um painel de CLT exposto numa só face ao fogo, tem a sua secção resistente reduzida. Uma vez obtida a espessura da camada não resistente a esforços através das tabelas anteriores só é preciso contabilizar a espessura da camada atingida pelo fogo (camada carbonizada) e teremos a camada resistente aos esforços atuantes, permitindo assim um dimensionamento seguro em caso de incêndio garantindo estabilidade estrutural tendo em conta o tempo de chegada e atuação das equipas de combate aos incêndios.

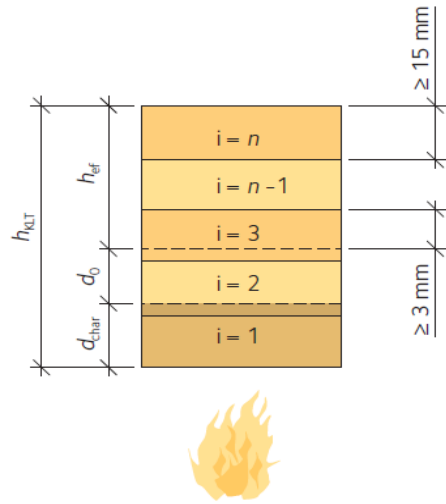
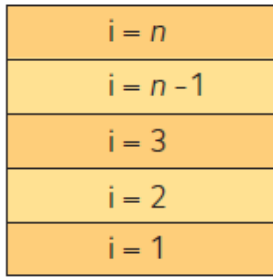


Figura 5.6 Painel de CLT antes da atuação do fogo

Figura 5.7 Painel de CLT após a atuação do fogo

(Fonte: swedish wood CLT handbook)

No caso do painel de CLT possuir espaços menores que 2mm entre dois painéis devido a colagem, para determinação da camada carbonizada( $d_{char}$ ), e utilizado a seguinte expressão:

$$d_{char} = \beta_0 \times t$$

Onde:

$\beta_0$ - 0.65 [mm/min]

$t$  -Tempo de exposição ao fogo [min]

Se o espaço for superior a 2mm e inferior a 6mm a expressão passa a ser :

$$d_{char,n} = \beta_n \times t$$

Onde:

$\beta_n$ -0.8 [mm/min]

$t$  -Tempo de exposição ao fogo [min]

Obtendo uma altura no final de atuação do fogo ( $h_{ef}$ ) com a seguinte expressão:

$$h_{ef} = h_{clt} - d_{char} - d_0$$

Caso se opte por aplicar uma camada resistente ao fogo o processo de calculo não sofre grandes alterações a não ser no modo de calcular a camada carbonizada.

$$d_{char} = 25 + (t_{req} - t_a) \times \beta_0$$

Sendo:

- $t_{req}$ - tempo de exposição ao fogo [min]
- $t_a$ -tempo limite [min]

O tempo limite ( $t_a$ ) é calculado com a seguinte expressão:

$$t_a = \frac{25 - (t_{f(p)} - t_{ch}) \times k_2 \times \beta_0}{2 \times \beta_0} + t_{f(p)}$$

Onde:

- $t_{f(p)}$ -tempo máximo sem falhas da proteção, fornecida pelo fabricante [min]
- $k_2$ -fator de proteção;  $k_2 = 1 - 0.018 \times hp$ .

obtendo assim a altura final da peça após o fogo com a seguinte expressão:

$$h_{ef} = h_{clt} - d_{char} - d_0$$

Nota: todas as unidades de espessura são utilizadas em milímetros [mm].

## CAPÍTULO 6

### EXEMPLO DE CÁLCULO

Para este exemplo de cálculo foram feitas todas as verificações de segurança para um painel de CLT para utilizado como um piso corrente simplesmente apoiado. O maior vão possui 4,80m, enquanto que o menor tem 1,00m.

O painel de CLT utilizado é constituído por 5 camadas de madeira da classe GLH24, que possui as seguintes características:

Tabela 6.1 - Parâmetros do material

Parâmetros de material para	GL24h
resistência à flexão [N / mm <sup>2</sup> ]	$k_{sys} \cdot 24,0$
resistência à tração paralela [N / mm <sup>2</sup> ]	16,5
resistência à tração perpendicular [N / mm <sup>2</sup> ]	0,5
resistência à compressão paralela [N / mm <sup>2</sup> ]	24,0
resistência à compressão perpendicular [N / mm <sup>2</sup> ]	2,7
resistência ao cisalhamento [N / mm <sup>2</sup> ]	3,0
resistência ao cisalhamento de rolamento [N / mm <sup>2</sup> ]	1,25
Módulo de Young paralelo [N / mm <sup>2</sup> ]	11600,00
5% -quantil do módulo de Young paralelo [N / mm <sup>2</sup> ]	9667,0
Módulo de Young perpendicular [N / mm <sup>2</sup> ]	0,0
módulo de cisalhamento [N / mm <sup>2</sup> ]	720,0

módulo de cisalhamento de rolamento [N / mm <sup>2</sup> ]	72,0
densidade [kg / m <sup>3</sup> ]	380,0
valor médio de densidade [kg / m <sup>3</sup> ]	500,0

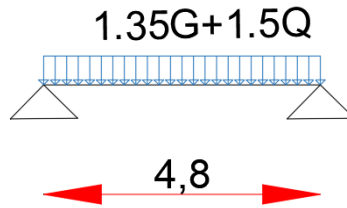


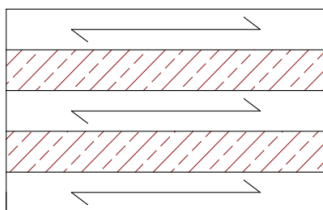
Figura 6.1 sistema estrutural para o cálculo

Dados:

G=3 kN/m<sup>2</sup>;

Q=2 kN/m<sup>2</sup>;

L=4.8m



hi=32mm

G=720 Mpa

hi=32mm

Gr=72 Mpa

b=1000mm

E=11600 Mpa

Figura 6.2 Painel de CLT para cálculo

Número camadas transversais = 2

Número de camadas longitudinais = 3

$$ai = \frac{hi}{2} + hi + \frac{hi}{2} = 64$$

## 6.1 Γ METHOD

$$A_i = h_i \times b = 32 \times 1000 = 3200 \text{ mm}^2$$

$$I_i = \frac{b \times h_i^3}{12} = \frac{1000 \times 32^3}{12} = 2730666.667 \text{ mm}^4$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \times E_i \times A_i \times h_i}{l_i^2 \times G_r \times b}} = \frac{1}{1 + \frac{3.14^2 \times 11600 \times 3200 \times 32}{4800^2 \times 72 \times 1000}} = 0.9340560144$$

$$I_{0, \text{eff}} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{b \times h_i^3}{12} + \gamma_i \times b \times h_i \times a_i^2 \right) = 3 \times \frac{1000 \times 32^3}{12} + 2 \times (0.9340560144 \times 1000 \times 32 \times 64^2) = 253049179.8 \text{ mm}^4$$

$$EI, \text{eff} = E \times I_{0, \text{eff}} = 11600 \times 253049179.8 = 2.935370486 \times 10^{12}$$

### 6.1.1 Tensões máximas

$$p = 1.35 \times G + 1.5 \times Q = 1.35 \times 3 + 1.5 \times 2 = 7.05 \text{ KN/m}$$

$$M_{\text{max}} = \frac{p \times l^2}{8} = \frac{7.05 \times 4.8^2}{8} = 20.304 \text{ KN.m}$$

$$V_{\text{max}} = \frac{p \times l}{2} = \frac{7.05 \times 4.8}{2} = 16.92 \text{ KN}$$

$$w_{\text{max}} = \frac{5}{384} \times \frac{p \times l^4}{E \times I} = \frac{5}{384} \times \frac{7.05 \times 4.8^4}{11600 \times 253049179.8 \times 10^{-12}} = 16.6 \text{ mm}$$

$$\sigma_{4,5} = \frac{M_{\text{max}}}{E l_{\text{eff}}} \times \gamma_{4,5} \times E_{4,5} \times a_{4,5} = \frac{20.304 \times 10^6}{2.9353704486 \times 10^{12}} \times 0.9340560144 \times 11600 \times 64 = 4.796556 \text{ N/mm}^2$$

## CAPÍTULO 6

$$\sigma_{m4,5} = \frac{M_{max}}{E I_{eff}} \times \frac{E_{4,5} \times h_{4,5}}{2} = \frac{20.304 \times 10^6}{2.9353704486 \times 10^{12}} \times \frac{11600 \times 32}{2} = 1.283797894 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{4,5} + \sigma_{m4,5} = 4.796556 + 1.283797894 = 6.08035 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{1max} = \frac{V_{max}}{E I_{eff}} \times \frac{\gamma \times E_{4,5} \times A_{4,5} \times a_{4,5} + 0.5 \times E_{3,2} \times b \times h^2}{b} = \frac{16.92 \times 10^3}{2.9353 \times 10^{12}} \times \frac{0.9340 \times 11600 \times 32000 \times 64 + 0.5 \times 11600 \times 1000 \times 16^2}{1000} = 0.1364 \text{ Mpa}$$

$$\tau_r = \frac{V_{max}}{E I_{eff}} \times \frac{\gamma \times E_{4,5} \times A_{4,5} \times a_{4,5}}{b} = \frac{16.92 \times 10^3}{2.93537 \times 10^{12}} \times \frac{0.93405 \times 11600 \times 32000 \times 64}{1000} = 0.1279 \text{ Mpa}$$

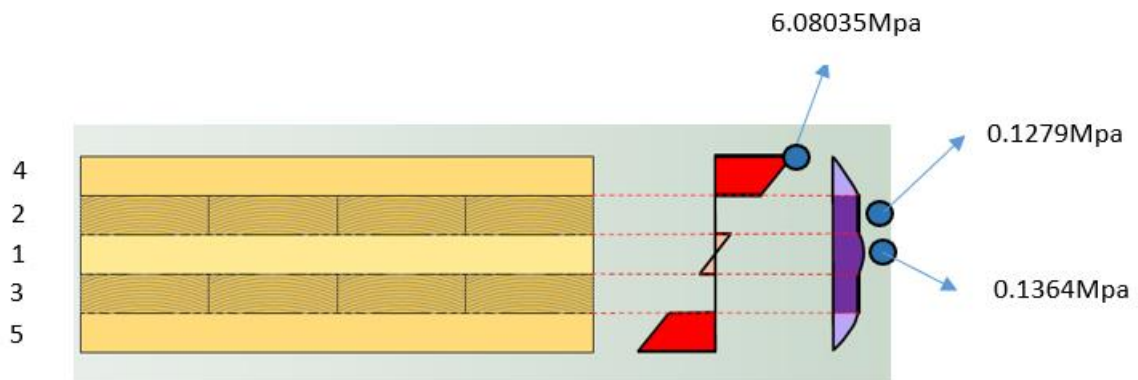


Figura 6.3 tensões atuantes no painel

## 6.2 ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÃO

Para o cálculo das deformações instantâneas deve-se utilizar a seguinte fórmula, uma vez que se trata de um elemento simplesmente apoiado sujeito a uma carga distribuída. Deve-se ter sempre em atenção o facto de que os valores das cargas utilizados para esta verificação são característicos.

$$u_{inst} = 5 \times \frac{\text{carga} \times L^4}{384 \times E \times I_{0,eff}}$$

$$u_{instQ} = 5 \times \frac{2 \times 4.8^4}{384 \times 11600 \times 10^3 \times 253049179.8 \times 10^{-12}} = 0.00471 \text{ [m]}$$

$$u_{instG} = 5 \times \frac{3 \times 4.8^4}{384 \times 11600 \times 10^3 \times 253049179.8 \times 10^{-12}} = 0.00706 [m]$$

$$u_{finG} = u_{instG} \times (1 + k_{def}) = 0.00706 \times (1 + 0.85) = 0.013069 [m]$$

$$u_{finQ1} = u_{instQ1} \times (1 + \Psi_{2,1} \times k_{def}) = 0.00471 \times (1 + 0.3 \times 0.85) = 0.005910 [m]$$

$$u_{fin} = u_{finG} + u_{finQ1} + u_{finQi} = 0.013069 + 0.005910 = 0.018979 [m]$$

$$u_{fin} \leq \frac{4800}{250}$$

$$18.98 \leq 19.2 [mm] \text{ verifica}$$

### 6.3 ESTADO LIMITE DE VIBRAÇÃO

$$m = h_{total} \times \rho_k = 160 \times 10^{-3} \times 380 = 60.8 [kg/m^2]$$

$$I_{0net} = \sum \frac{b \times h_i^3}{12} + A_i \times ai^2 = 3 \times \frac{1000 \times 32^3}{12} + 2 \times 32000 \times 64^2 = 270336000 [mm^4]$$

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_i}{m}} = \frac{3.14}{2 \times 4.8^2} \times \sqrt{\frac{(11600 \times 10^6 \times \frac{270336000}{4.8} \times 10^{-12})}{60.8}} = 7.06717 [Hz]^*$$

\*valor inferior a 8 Hz ,implica uma verificação mais detalhada segundo o EC5, impossível afirmar com segurança se cumpre ou não a verificação à vibração sem uma análise mais profunda , porém como o objetivo é demonstrar o processo de cálculo, optou-se por prosseguir com os seguintes passos necessários para determinação do cumprimento ou não do estado limite de vibração.

$$a = \frac{1000 * 1 \times 4.8^3 \times 1.05}{48 * 11600 \times 10^6 \times \frac{270336000 \times 10^{-12}}{4.8}} = 0,003702978 [m]$$

Como "b" é superior a 4m :

$$a \leq \frac{16500}{4800^{1.1}} = 3.702 \leq 1.47 [mm] \text{ Não verifica}$$

Sendo a >1 [mm] :

$$b = 160 - 40 \times 3.702 = 11.92 [mm]$$

$$n_{40} = \left[ \left( \left( \frac{40}{7.06717} \right)^2 - 1 \right) \times \left( \frac{4.8}{1} \right)^4 \times \frac{11600 \times 10^6 \times 270336000 \times 10^{-12}}{11600 \times 10^6 \times \frac{1 * 0.16^3}{12}} \right]^{0.25} = 10.6877$$

$$v = \frac{4 \times (0.4 + 0.6 \times 10.6877)}{60.8 \times 4.8 + 200} = 0.055405$$

$$0.055405 \leq 11.92^{(7.06717 \times 0.02 - 1)}$$

$$0.055405 \leq 0.11908 \text{ verifica}$$

Nota: o painel em estudo não cumpre a verificação ao estado limite de vibração.

## 6.4 RESISTÊNCIA AO FOGO

Assumindo que o painel de CLT não possui uma camada de proteção superficial e o tempo de queimada é de 120min.

$$h_{clt} = 160 \text{ mm}$$

$$d_0 = \frac{h_{clt}}{100} + 10 = \frac{160}{100} + 10 = 11.6 \text{ mm}$$

$$d_{char} = \beta_0 \times t = 0.65 \times 120 = 78 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = h_{clt} - d_{char} - d_0 = 160 - 78 - 11.6 = 70.4 \text{ mm}$$

Verifica-se pelo cálculo uma diminuição de 56% da altura útil da peça em 120 min. Com a introdução de uma camada protetora consegue-se aumentar um pouco o hef.

$$k_2 = 1 - 0.018 \times hp = 1 - 0.018 \times 12.5 = 0.775$$

$$t_a = \frac{25 - (t_{f(p)} - t_{ch}) \times k_2 \times \beta_0}{2 \times \beta_0} + t_f = \frac{25 - (45 - 21) \times 0.775 \times 0.65}{2 \times 0.65} + 45 = 54.93 \text{ min}$$

$$d_{char} = 25 + (t_{req} - t_a) \times \beta_0 = 25 + (120 - 54.93) \times 0.65 = 67.2955 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = h_{clt} - d_{char} - d_0 = 160 - 67.2955 - 11.6 = 81.1045 \text{ mm}$$



# CAPÍTULO 7

## CÁLCULO AUTOMÁTICO

### 7.1 FOLHA DE VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

Um projeto em CLT passa por dimensionar diversos painéis, o que torna o processo de verificação bastante extenso. Houve portanto a necessidade de criar uma folha em Excel que permite automatizar o processo de cálculo demonstrado no capítulo anterior.

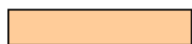
A folha de cálculo está dividida em 3 secções:

1-introdução de dados;

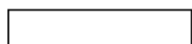
2-cálculo de propriedades efetivas;

3-verificações de segurança.

Tirando partido das funcionalidades do Excel a folha foi organizada da seguinte forma:



Dados de introdução manual



Dados de cálculo automático



Dados de seleção (lista)

7.1.1 introdução de dados

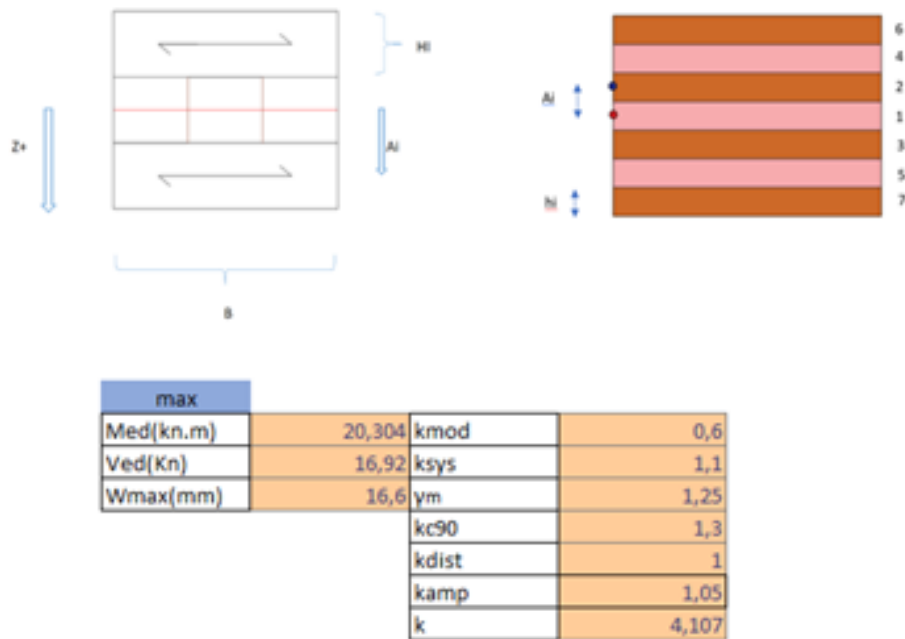


Figura 7.1 introdução de dados no Excel

Neste campo é possível adicionar os esforços máximos a que a peça está sujeita, bem como definir todos os coeficientes a aplicar.

As figuras permitem a numeração das camadas, e rápida visualização de parâmetros de introdução em caso de dúvida.

7.1.2 Cálculo de propriedades efetivas

Tabela 7.1 - tabela de cálculo de propriedades efetivas

Orientação do fio	camadas	hi(mm)	Ai (mm)	E(N/mm <sup>2</sup> )	EI(Nmm <sup>2</sup> )	Ei steiner(Nmm <sup>2</sup> )	I(Nmm <sup>2</sup> )	I_steiner(Nmm <sup>2</sup> )
paralelo	1	32	0	11600	31675733333	0	2730666,667	0
perpendicular	2	32	32	0	0	0	0	0
perpendicular	3	32	32	0	0	0	0	0
paralelo	4	32	64	11600	31675733333	1520435200000	2730666,667	131072000
paralelo	5	32	64	11600	31675733333	1520435200000	2730666,667	131072000
perpendicular	6	0	80	0	0	0	0	0
perpendicular	7	0	80	0	0	0	0	0

A primeira coluna permite a seleção da orientação das fibras de cada camada. Ao se indicar a espessura de cada camada e o módulo de elasticidade, esta tabela permite calcular o momento de inércia efetiva da secção em estudo.

Tabela 7.2 - propriedades efetivas da secção em estudo

Propriedades	nº camadas	nº camadas transversa	nº camadas longitudin	b(mm)
	5	2	3	1000

Z(mm)	G	Gr	G/Gr	A <sub>0,net</sub> (mm <sup>2</sup> )	I <sub>0,net</sub> (mm <sup>4</sup> )	W <sub>0,net</sub> (mm <sup>3</sup> )
80	720	72	10	96000	270336000	3379200

Tabela 7.3 - propriedades efetivas da secção perpendicular á secção em estudo

h <sub>i</sub>	E <sub>i</sub>	E <sub>j</sub>	A <sub>90,net</sub> (m <sup>2</sup> )	I <sub>90,net</sub> (mm <sup>4</sup> )	W <sub>90,net</sub> (mm <sup>3</sup> )
32	11600	0	64000	37333333	466666,6625

f <sub>t,0k</sub> (Mpa)	f <sub>c,0k</sub> (Mpa)	f <sub>mk</sub> (Mpa)	f <sub>v,k</sub>	f <sub>rk</sub>
16,5	24	24	3	1,25

As tabelas acima representadas permitem a obtenção das propriedades efetivas das duas secções da peça em estudo, bem como a introdução de capacidades resistentes da madeira.

Tabela 7.4 - método  $\gamma$ 

modified gama process						
h <sub>i</sub> (mm)	A <sub>i</sub>	l <sub>i</sub> (mm)	$\gamma_{4,5}$ ou 2,3	$\gamma_1$	a <sub>1</sub>	a <sub>4,5</sub>
32	32000	4800	0,934056014		1	0 64

E <sub>i,eff</sub>	$\sigma_{4,5}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$t_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$t_r$ (N/mm <sup>2</sup> )
2,93537E+12	4,796556515	1,283797878	6,080354393	0,136466826	0,127908174

Permite de forma rápida a determinação das tensões máximas pelo método  $\gamma$ . Por curiosidade e para ter mais um método de comparação, também foram introduzidas as fórmulas de cálculo para o método “Timoshenko Beam Theory” na folha de cálculo.

Tabela 7.5 - Timoshenko Beam Theory

Timoshenko				
$kclt(Nmm^2)$	$ScIt(Nmm^2)$	$\sigma_{max}(N/mm^2)$	$\tau_{max}(N/mm^2)$	$\tau_r(N/mm^2)$
3135897600000	17951789,63	6,008522727	0,136193182	0,128181818

### 7.1.3 verificações de segurança

Para valores de carregamento introduzidos, a tabela apresenta a verificação ao estado limite ultimo para os vários tipos de esforços.

Tabela 7.6 - verificação de segurança (ELU)

Esforços (Kn ou KN.m)	tração,0	tração,90	compressao,0	compressao,90	momento,0	momento,90
	200	200	200	200	4	20,304

Verificações	$\sigma_s(Kpa)$	$f_d(Kpa)$	verificação	percentagem de utilização
Tração paralelo	2083	8712	verifica	24%
Tração perpendicular	3125	8712	verifica	36%
compressao paralelo	2083	9605	verifica	22%
compressao perpendicular	3125	14976	verifica	21%
momento,0	8571	12672	verifica	68%
momento,90	6009	12672	verifica	47%
corte	136,4668263	1440	verifica	9%
corte	128,1818182	600	verifica	21%

Para distinguir qual a direção paralela e a perpendicular, é apresentada a figura seguinte :

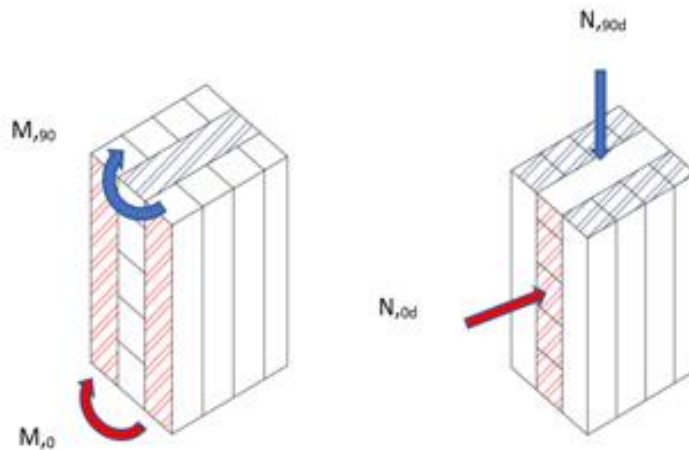


Figura 7.2 Direção das forças a atuar no painel

O cálculo do estado limite de deformação esta dividida em duas tabelas, uma de introdução de dados, e a outra de cálculo e introdução de alguns coeficientes.

Tabela 7.7 - introdução de dados para o cálculo da deformação

deformação							
pontual (kn)		distribuida (kn/m)					
G	Q	G	Q	E (kpa)	Inercia (m <sup>4</sup> )	b(m)	
0	0	3	2	11600000	0,000253049	4,8	

Tabela 7.8 - verificação de segurança estado limite de deformação

μ (pastaf)		μ (distribuída)		Ψ2
G	Q	G	Q	
0	0	0,007064185	0,004709457	0,3

μins,G	μins,Q	Kdef	μfin,G	μfin,Q	μfin(m)	wnet,fin	
0,007064	0,004709	0,85	0,013069	0,00591	0,018979	0,0192	verifica

Grande parte dos valores que se precisa para a verificação ao estado limite de vibração, já se encontram na folha, por isso para a tabela seguinte só e preciso introduzir o peso específico (pk).

Tabela 7.9 - valores para verificação ao estado limite de vibração

vibração						
massa	pk	EIL	f1 (Hz)	L<=	L(m)	
60,8	380		653312	7,067176379	3,334180536	1,0

n40	v	a	b
10,68775146	0,055405424	0,003702978	11,88087774

O cálculo da resistência ao fogo está dividido em duas tabelas, uma de verificação para um painel sem proteção e a outra para um que possui uma camada de proteção, como indicado pela figura seguinte.

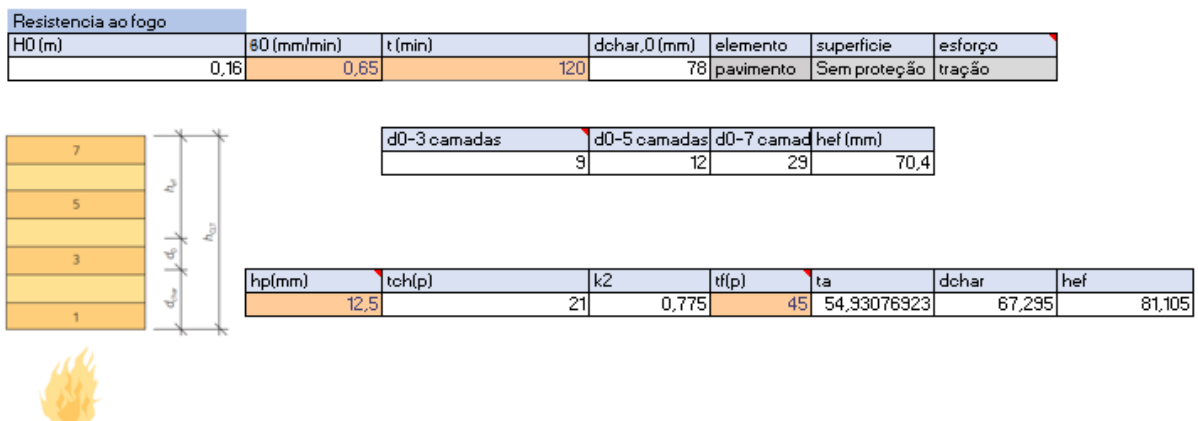


Figura 7.3 valores de espessuras finais após 120 min de fogo

## 7.2 PROGRAMAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

Por ser um material relativamente novo o seu cálculo não está presente em todos os principais programas de cálculo utilizados hoje na área das estruturas como por exemplo o ROBOT, CYPE.

No entanto é possível elaborar um projeto em CLT recorrendo a estes programas, no CYPE já se encontra disponível um módulo que permite a introdução de painéis de CLT, no ROBOT pode-se recorrer à introdução manual da matriz de rigidez do elemento.

Mesmo que possível, não são os programas adaptados para este material. Muitos estudos e trabalhos desenvolvidos entre fabricantes e universidades resultaram em alguns programas, entre os quais:

- Dlubal RFEM5 (RF-laminate))
- TimberTech Buildings

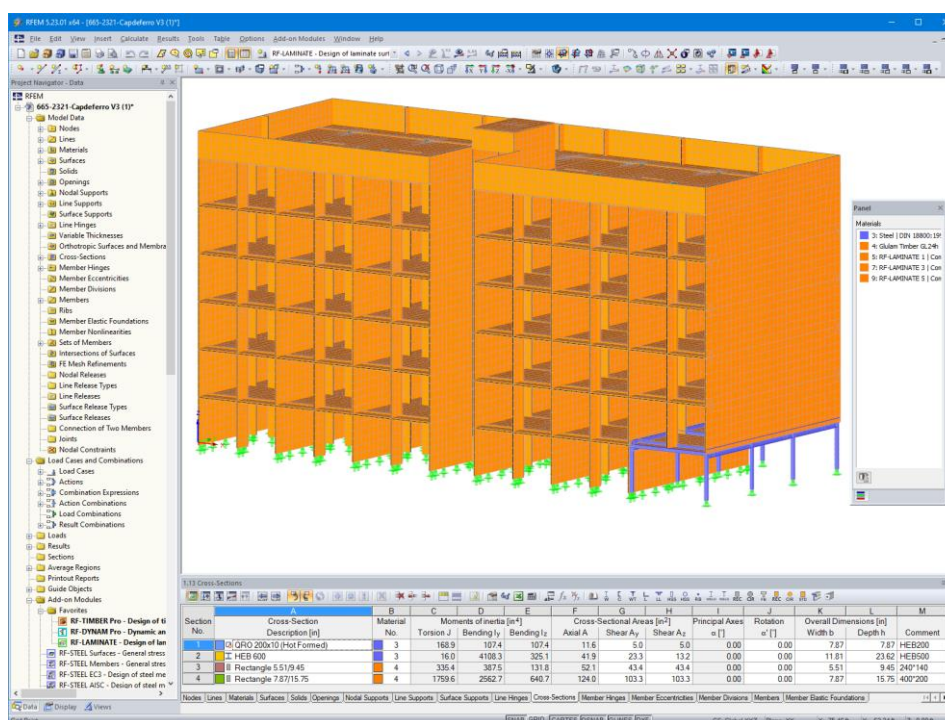


Figura 7.4 Dlubal RFEM5 (RF-laminate)

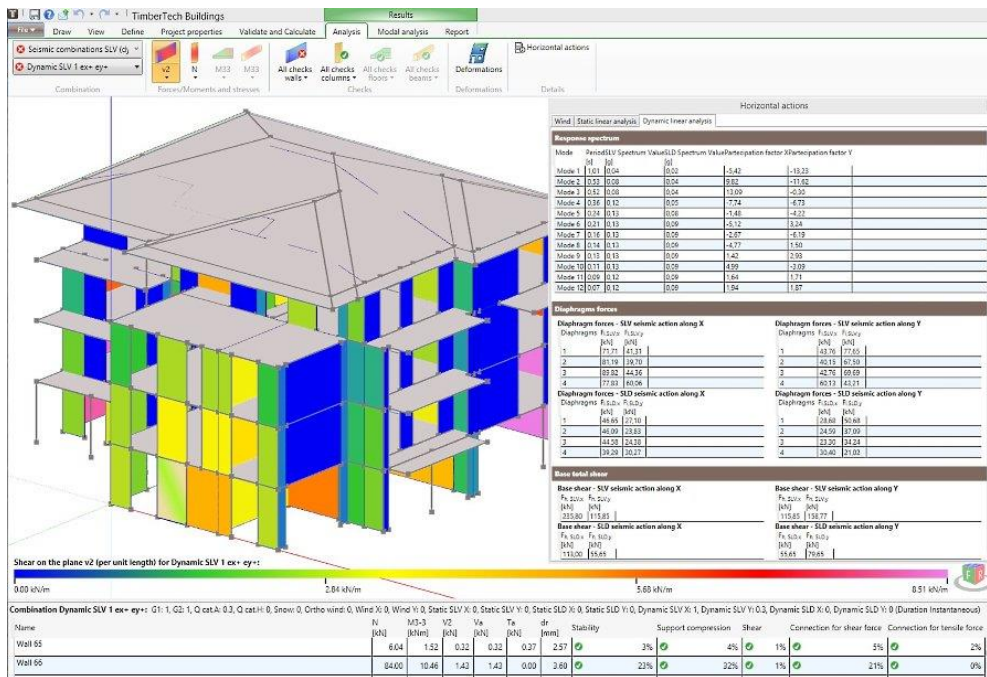


Figura 7.5 TimberTech Buildings

Para além destes programas é possível fazer um dimensionamento através de programas disponibilizados gratuitamente pela Graz University of Technology que possui grande investigação, vários trabalhos e livros publicados sobre o CLT. Programas estes de fácil compreensão e usabilidade como o CLTdesigner ,CLTcalculator e o CLTwiki.

O CLTdesigner permitiu obter uma confirmação dos cálculos feitos de forma manual com um grau de divergência bastante reduzido, por isso possui uma relevância na elaboração deste trabalho. A seguir será explicado o procedimento de calculo no programa.

A interface inicial é bastante simples com quatro opções principais, a primeira para calcular lajes de clt chamada “plate”, a segunda para o cálculo das paredes chamada “ plate loaded in plane “, a terceira opção permite calcular as ligações dos painéis de CLT (connections) e por fim uma última (special) que nos permite obter a matriz de rigidez do elemento bem como submeter os painéis de parede de clt às ações horizontais ( ex:forças de sismo ).

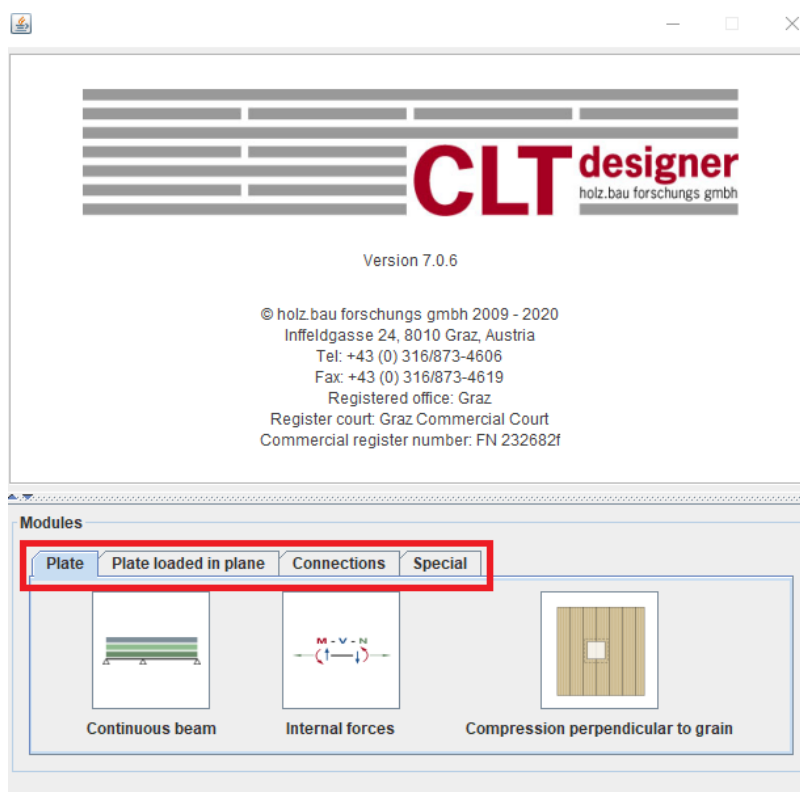


Figura 7.6 Interface inicial do CLTdesigner

Para o cálculo da laje, uma vez selecionada a opção “plate” são apresentadas três opções , a primeira faz o cálculo automático e as verificações de segurança para um painel de laje (CLT), a segunda permite obter os esforços internos (tensões axiais e tensões de corte ) a que a peça está sujeita , e por fim a última permite fazer a verificação de situações de ligação entre pilares e a laje em estudo.

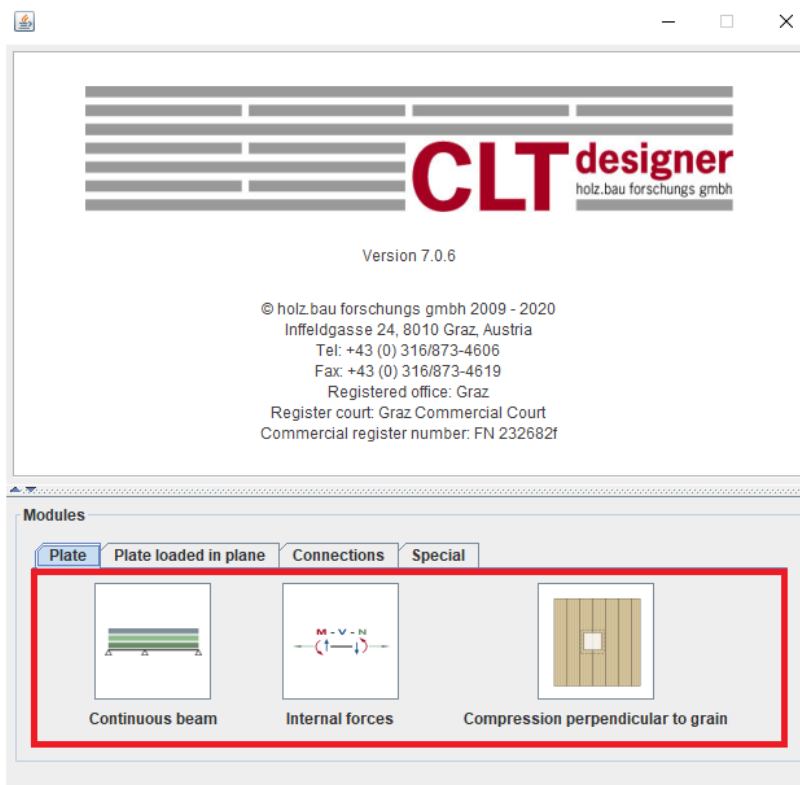


Figura 7.7 Opções de cálculo de lajes (CLT) do CLTdesigner

Selecionando o “continuous beam” para cálculo de lajes é apresentando, uma nova interface que permite definir todas as características e cargas que o painel de CLT estará sujeito:

CLTdesigner - CLT-Plate 1D

File Edit Window Help

**CLT designer**  
holz bau forschung gmbh

**General**

Service class **1**

Structural system

Number of spans **1**

Cantilever left

Cantilever right

Support	x	Width
A	0 m	0.06 m
B	4.8 m	0.06 m

1

**Cross section**

User-defined  CLT-products with technical approvals  
 My CLT cross sections

Number of layers **5**

Layer	Thickness	Orientation	Material
1	32 mm	0	GL24h*
2	32 mm	90	GL24h*
3	32 mm	0	GL24h*
4	32 mm	90	GL24h*
5	32 mm	0	GL24h*

Width **1,000** mm Thickness **160** mm

Ratio board thickness / width t/a **1:4**

2

Beta! Optimise cross section...

**Fire** **Vibrations**

Fire above

Fire below

Fire duration **30** minutes

Fire protection system

Heat resistant adhesive

consider falling off of charred layers

Without gaps or with bonded edges

$k_{fire}$  **1.15**

$d_0$  **7** mm

Charring rate **0.65** mm/min

3

**Loads**

Field	Span	$q_{0,k}$	$q_{1,k}$	$q_k$	Category	s	Altitude/Region	$W_k$
1	4.8 m	0.88 kN/m						

Field	$x_{global}$	$x_{lokal}$	$G_{1,k}$	$Q_k$	Category	s	Altitude/Region	$W_k$

4

Figura 7.8 Definição de inputs do programa

- 1- Campo reservado para introdução do sistema estrutural, onde é possível definir a posição dos apoios;
- 2- Características geométricas e escolha do tipo de madeira constituinte do painel de CLT. Também é possível, em vez da introdução manual, obter de forma automática vários painéis de vários fabricantes;
- 3- “Inputs” para a verificação do fogo e vibrações;
- 4- Local reservado para introduzir a situação de carga a que o painel de CLT será sujeito.

59

Tendo como objetivo a comparação entre os valores obtidos pelo programa e os resultados obtidos manualmente foram introduzidos os dados, utilizados no exemplo de cálculo do capítulo 6, no programa e foi gerado um relatório completo que se encontra no anexo I.

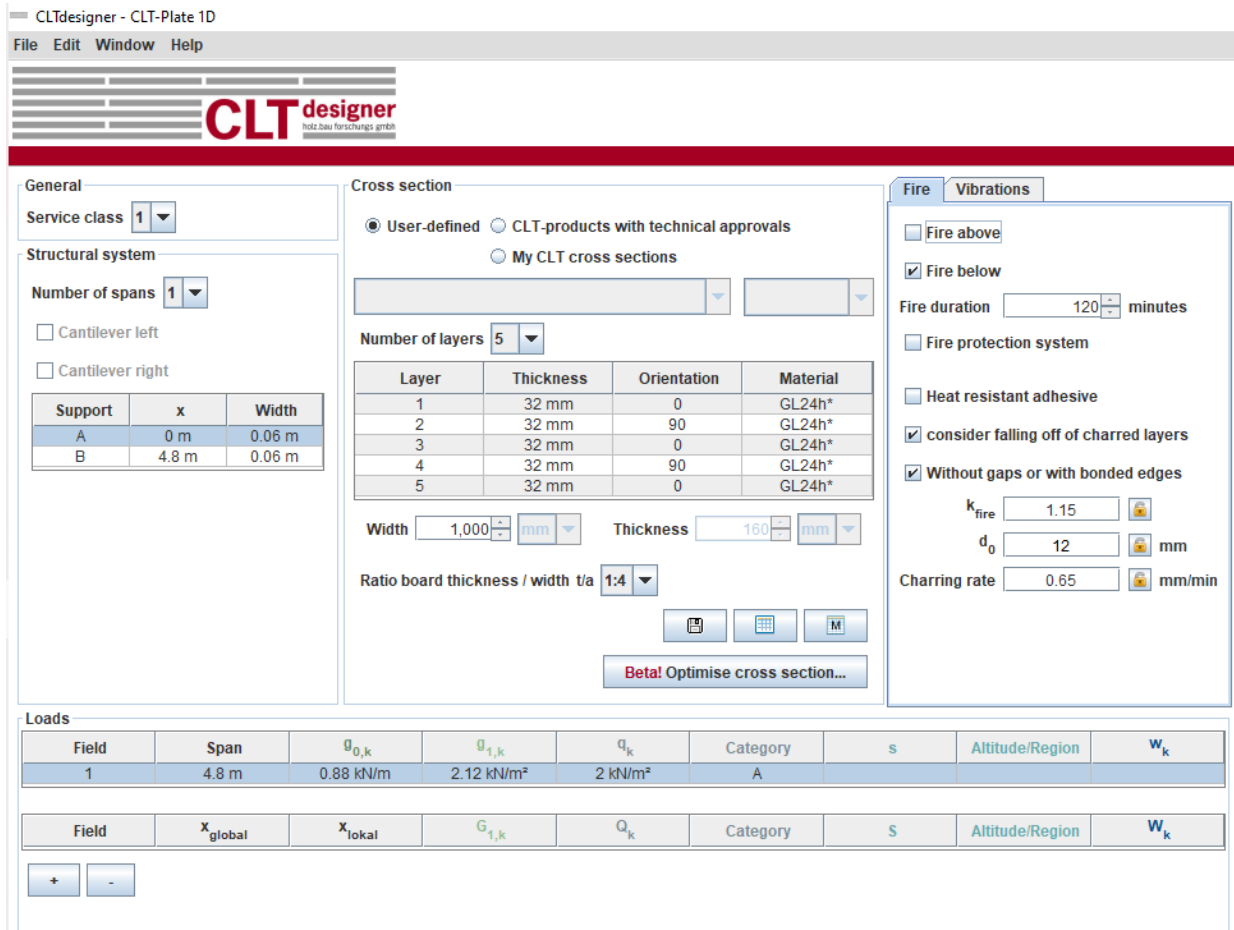


Figura 7.9 Dados de exemplo introduzidos no programa CLTdesigner

Obtendo os seguintes resultados:

$EA_{ef}$	1.114E9 N
$EI_{ef}$	3.136E12 N·mm <sup>2</sup>
$GA_{ef}$	1.795E7 N

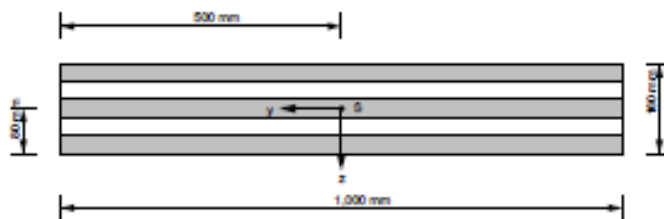


Figura 7.10 Características do painel de CLT

É importante observar também que o programa não utiliza o método gama modificado pois para obtenção do  $EI_{ef}$  apenas multiplica o  $I_{0net}$  pelo E, obtendo o valor de 3.136E12 N·mm<sup>2</sup> que difere ligeiramente do valor obtido anteriormente de 2.935E12 N·mm<sup>2</sup>.

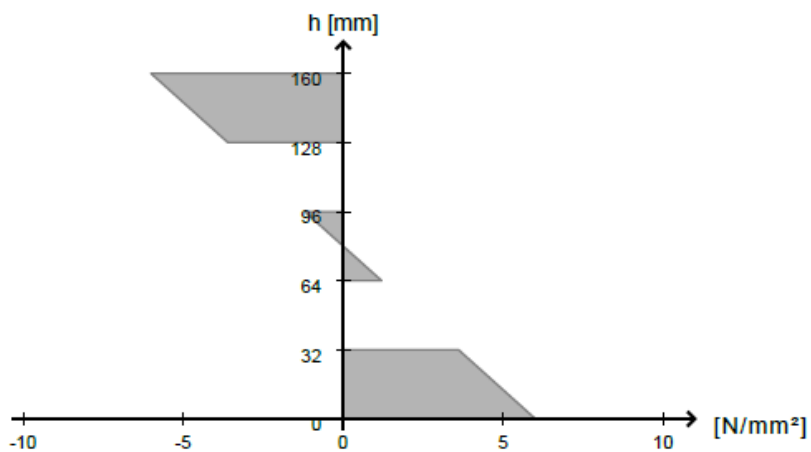


Figura 7.11 Gráfico das tensões ( $\sigma$ )

O gráfico apresentado pelo programa apresenta máximos muito próximos do resultado e gráfico obtidos de forma manual.

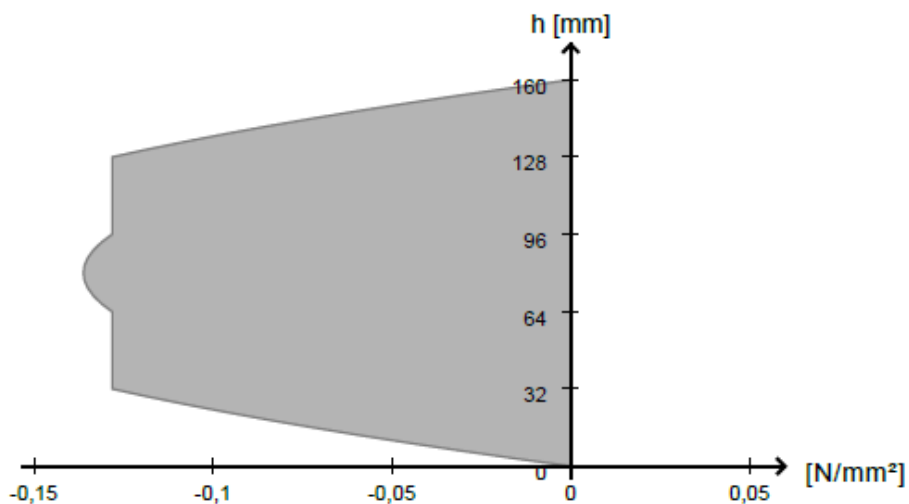


Figura 7.12 Gráfico das tensões de corte ( $\tau$ )

Volta-se a obter valores máximos na tensão de corte em conformidade com os resultados obtidos através dos cálculos feitos anteriormente.

### 7.2.1 Deflection

Limit values according to EN 1995-1-1

Instantaneous deformation  $w_{inst\ t=0}$ :  $l/300$  (11.8 mm, 73.9 %)

Final deformation  $w_{net,fin\ t=inf}$ :  $l/250$  (19.1 mm, 99.3 %)

Final deformation  $w_{fin\ t=inf}$ :  $l/150$  (19.1 mm, 59.6 %)

Limit values according to ON B 1995-1-1/NA:2014-11-15

Instantaneous deformation  $w_{inst\ t=0}$ :  $l/300$  (11.8 mm, 73.9 %)

Final deformation  $w_{net,fin\ t=inf}$ :  $l/250$  (15.7 mm, 82.0 %)

Final deformation  $w_{fin\ t=inf}$ :  $l/150$  (19.1 mm, 59.6 %)

Utilisation ratio	99.3 %
$w_{max}$	19.1 mm
$k_{def}$	0.85
at x	2.4 m
$E_k$	10
Final deformation $w_{net,fin\ t=inf}$ ( $l/250$ )	



Figura 7.13 Resultados da verificação ao estado limite de deformação através do CLTdesigner

$w_{net,fin}$  obtido de 19.1mm no programa corresponde à soma das parcelas instantâneas e diferidas da flecha. O resultado apresentado pelo programa está muito próximo do valor de 18.9mm, obtido através dos cálculos efetuados anteriormente.

#### 7.2.2.4 Verification according to Hamm/Richter

Eigenfrequency:  $f_{min} = 4.5\text{ Hz} < f_1 = 6.9\text{ Hz} < 8.0\text{ Hz}$

Stiffness:  $w_{2kN} = 1.469\text{ mm} > 0.50\text{ mm}$

Acceleration:  $a = 3.815\text{ m/s}^2 > 0.05\text{ m/s}^2$

Modal mass:  $M_{gen} = 366.972\text{ kg}$

---> Vibration verification not fulfilled (7,630.0 %)

Figura 7.14 Resultados da verificação da vibração

A verificação ao estado limite de vibração, mesmo utilizando um método diferente os valores obtidos são idênticos aos obtidos pelo método que se encontra no Eurocódigo 5 utilizado no processo de cálculo abordado na tese (7,067176379 Hz) .

## CAPÍTULO 8

### CASO DE ESTUDO

No decorrer do estágio surgiu a possibilidade de integração numa outra empresa responsável pela construção de um hotel onde se recorreu a este método construtivo (CLT). A obra situa-se no Porto e será a primeira deste tipo na cidade, juntando-se a um grupo muito reduzido de construções que recorrem ao CLT em Portugal.

Visto tratar-se de um processo que não está muito divulgado e os muitos anos de construção em betão pesam na hora da escolha.

Porém, ao longo destes anos, foram executados algumas construções e alguns trabalhos nas áreas da reabilitação com o CLT, e cada vez mais há uma preocupação ao nível das universidades em procurar um melhor entendimento desta nova técnica e material construtivo.

O aparecimento de empresas como a Tisem (2009), uma empresa vocacionada para a conceção, desenvolvimento e gestão de Projectos de Engenharia e Arquitectura que possui uma parceria com um dos grandes fabricantes de painéis de CLT, a KLH, ou empresas de fornecimento de painéis a nível nacional como a Banema (1986) que possui uma vasta experiência no mercado dos derivados de madeira, fornecendo painéis de CLT da marca binderholz, possibilitam a execução e fornecimento de obras em território nacional.



Figura 8.1 Casa da vinha (2015); Montijo



Figura 8.2 Casa das sapateiras (2015); Estarreja

(Fonte: [http://www.tisem.pt/portfolio/obras\\_xlam.php](http://www.tisem.pt/portfolio/obras_xlam.php))



Figura 8.3 Casa unifamiliar (2009); Alcanena



Figura 8.4 Pavilhão ISQ Castelo Branco (2004);Castelo Branco

(Fonte:[http://www.tisem.pt/portfolio/obras\\_xlam.php](http://www.tisem.pt/portfolio/obras_xlam.php))

A Redbridge School, na Rua Francisco Metrass, no Bairro de Campo de Ourique, em Lisboa, é o edifício português mais alto construído maioritariamente em madeira. O edifício consiste essencialmente em peças de madeira lamelada colada da classe GL24h e em CLT.

O edifício da escola é constituído por duas caves em betão, um piso RC também em betão e três pisos elevados em CLT, que constituem o Edifício Principal.



Figura 8.5 Redbridge School, localização



Figura 8.6 Redbridge School

(Fonte: <https://arx.pt/projecto/redbridge/>)

## 8.1 HOTEL EM CLT (PORTUGAL)

O edifício é constituído por um piso de acesso e zonas comuns, dois pisos de estacionamento em toda a implantação e oito pisos elevados.

A solução estrutural adotada consiste em pilares, vigas e paredes de betão armado que suportam lajes maciças em betão armado. Nos pisos -1 e 0, as lajes são fungiformes, apoiadas em pilares, nos núcleos de escadas e elevadores e, nos alinhamentos das fachadas, em paredes estruturais em betão armado com espessura variável entre 0,20m e 0,15m. As lajes destes pisos têm uma espessura de 0,30m.

Todos os pisos destinados aos quartos do hotel serão executados em CLT (Cross Laminated Timber). A estrutura de madeira baseia-se em painéis lamelados-colados cruzados, formando uma estrutura de paredes resistentes que apoiam os pisos igualmente em painéis CLT.

O contraventamento primário da estrutura é realizado através das paredes resistentes em painéis CLT, complementado com pisos também em painéis CLT fornecendo um comportamento de diafragma rígido. As paredes das caixas de elevador e escadas, executadas em betão armado, estão ligadas à estruturas de madeira, somente para ações horizontais.

O quadro seguinte apresenta sumariamente a espessura e número de camadas dos painéis CLT de parede em função do nível.

Tabela 8.1 - painéis de CLT a utilizar

	Cobertura	Piso 8	Piso 7	Piso 6	Piso 5	Piso 4	Piso 3	Piso 2
Painel com face de madeira visível	100 5s	110 5s	120 5s	130 5s	130 5s	130 5s	140 5s	140 5s
Painel com madeira oculta	90 3s	90 3s	90 3s	110 3s	110 3s	110 3s	110 3s	110 3s

A construção deste hotel no Porto conquistará o título de edifício mais alto construído parcialmente em CLT em Portugal.

O hotel em questão situa-se na Rua da Vigorosa, na Freguesia de Campanhã, Porto.

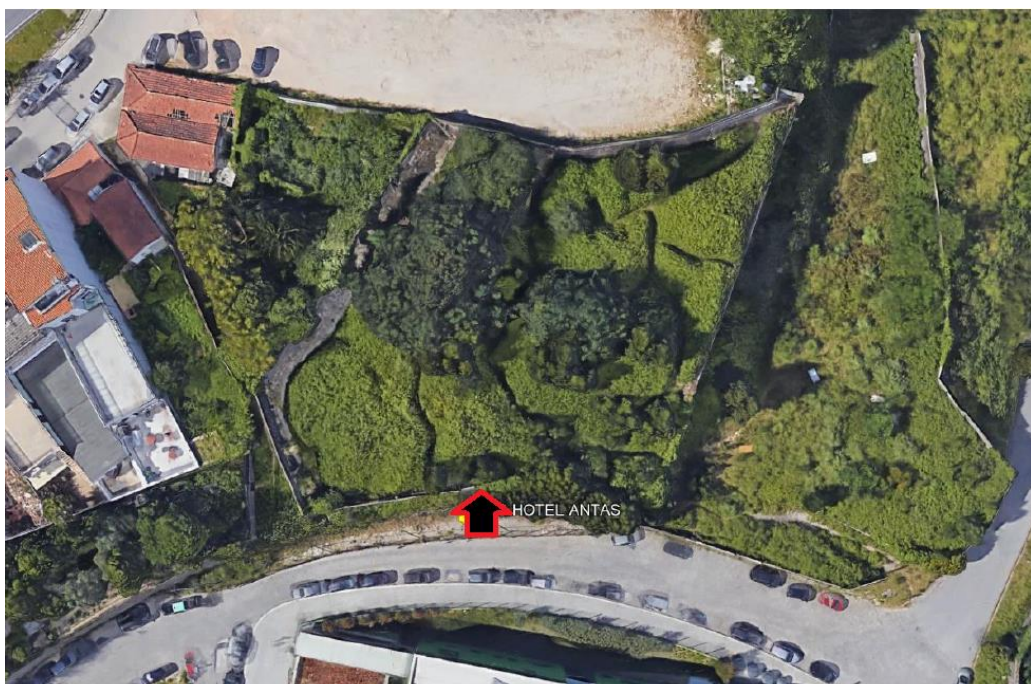


Figura 8.7 Terreno de implantação do hotel

Numa primeira fase foi necessário proceder ao desmatamento, limpeza e execução do estaleiro e uma vez atingida a cota estipulada no projeto, foram executadas as fundações.

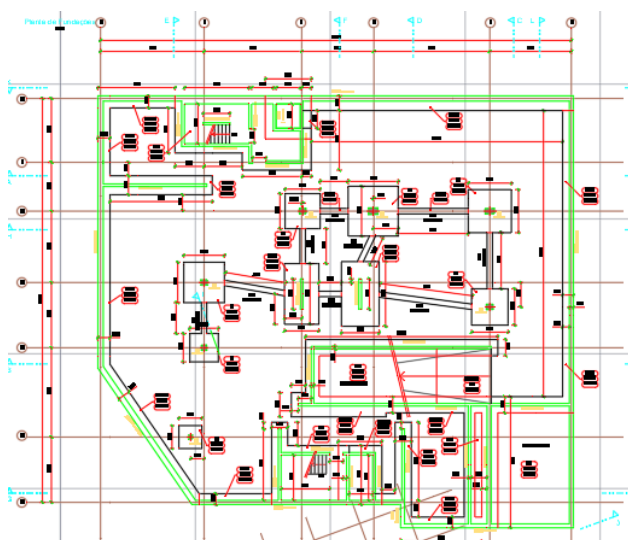


Figura 8.8 planta das fundações do edifício

No início a construção do edifício em nada muda das construções correntes exceto o facto que a estrutura de madeira sendo mais leve conduz a soluções mais esbeltas que para um edifício com a mesma estrutura em betão.



Figura 8.9 execução da obra

1-trabalhos de preparação para betonagem de elementos verticais

2-trabalhos de preparação para betonagem de elementos horizontais



Figura 8.10 betonagem direta (sem bombagem)

Os pisos em betão necessitam de uma maior coordenação para a sua execução, exigem sempre trabalhos de preparação para betonagem como montagem de cofragens e armaduras segundo os projetos de estruturas, bem como grande atenção com os negativos que se tem que deixar tanto para a passagem de tubos de infraestruturas hidráulicas como dos sistemas de AVAC, que, se não deixados antes da betonagem resultam em custos adicionais de carotagem e na fragilização da estrutura existente.

As estruturas em CLT chegam à obra com as dimensões do projeto sendo necessário somente a sua montagem, e mesmo que se verifique a necessidade de executar negativos para passagem de infraestruturas o procedimento é mais simples e rápido.

Aquando da elaboração da tese a obra ainda não se encontra na fase de montagem dos painéis de CLT, mas estes elementos já se encontram dimensionados, mas por serem informações confidenciais não é possível a sua publicação, no entanto foi permitida a divulgação de algumas imagens.

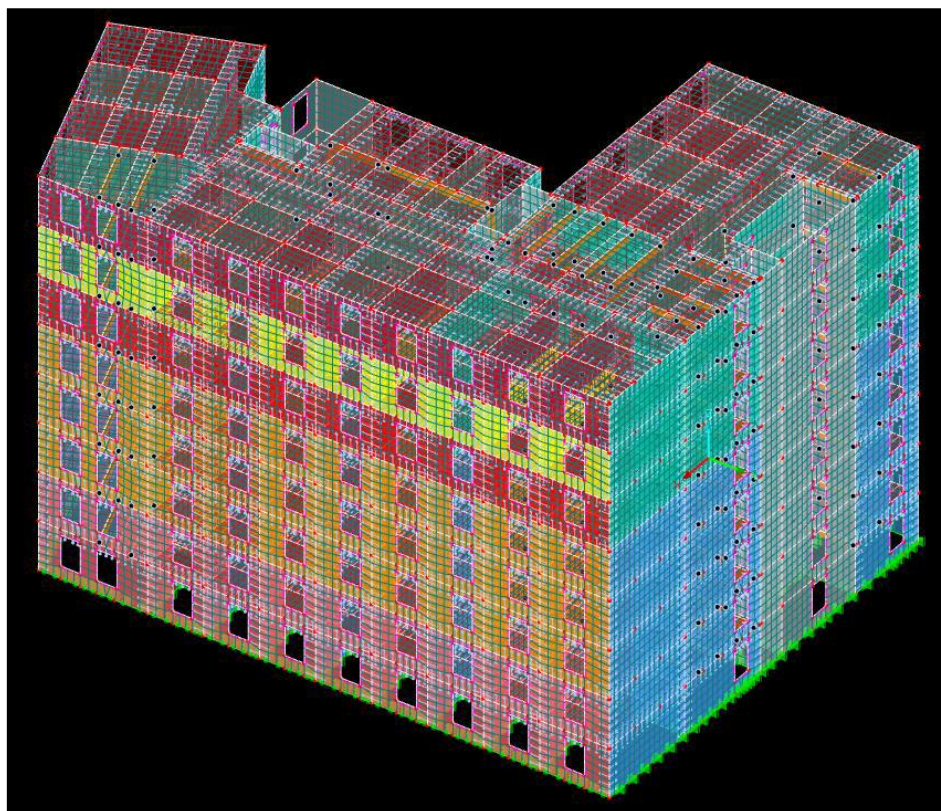


Figura 8.11 Modelo utilizado para análise

De modo a obter esforços fidedignos recorreu-se a elaboração de um modelo para cálculo automático com base na capacidade elástica dos elementos.

Como os painéis de CLT são pré-fabricados é de extrema importância a sua definição exata em planta ,para que no momento da sua montagem não ocorram erros provenientes de uma má implantação.

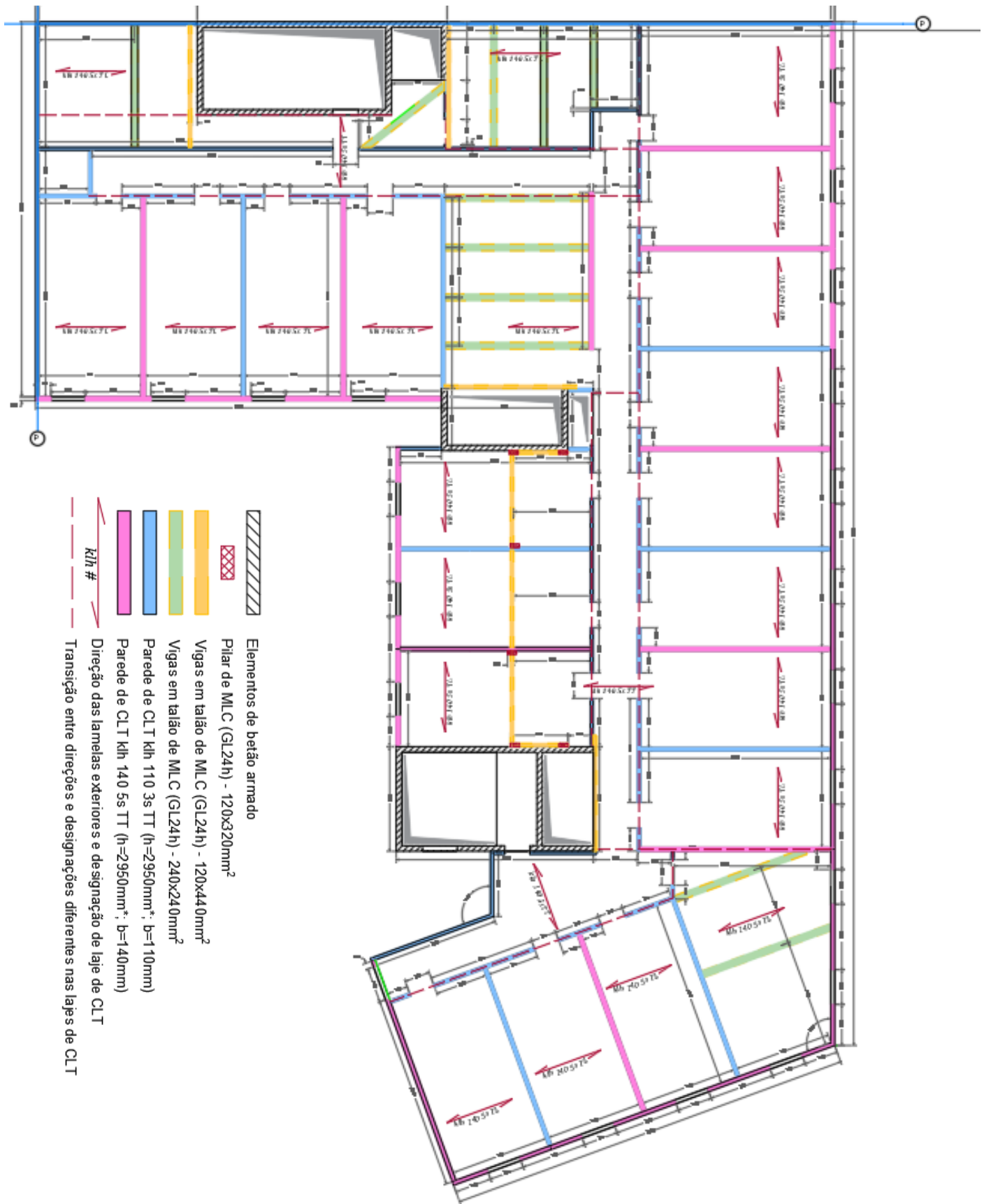


Figura 8.12 Planta tipo de um piso com os respetivos painéis de CLT

# CAPÍTULO 9

## A TÍTULO DE CURIOSIDADE

### 9.1 COMPORTAMENTO TÉRMICO

Como curiosidade fez-se a comparação entre dois elementos, um de betão e outro em CLT, deforma a comprovar qual se comporta melhor térmicamente.

Com base na zona climática da implantação do caso de estudo, pode-se demonstrar, através da comparação entre uma parede de betão e uma parede em CLT, as vantagens ao nível do comportamento térmico apresentado por este material.

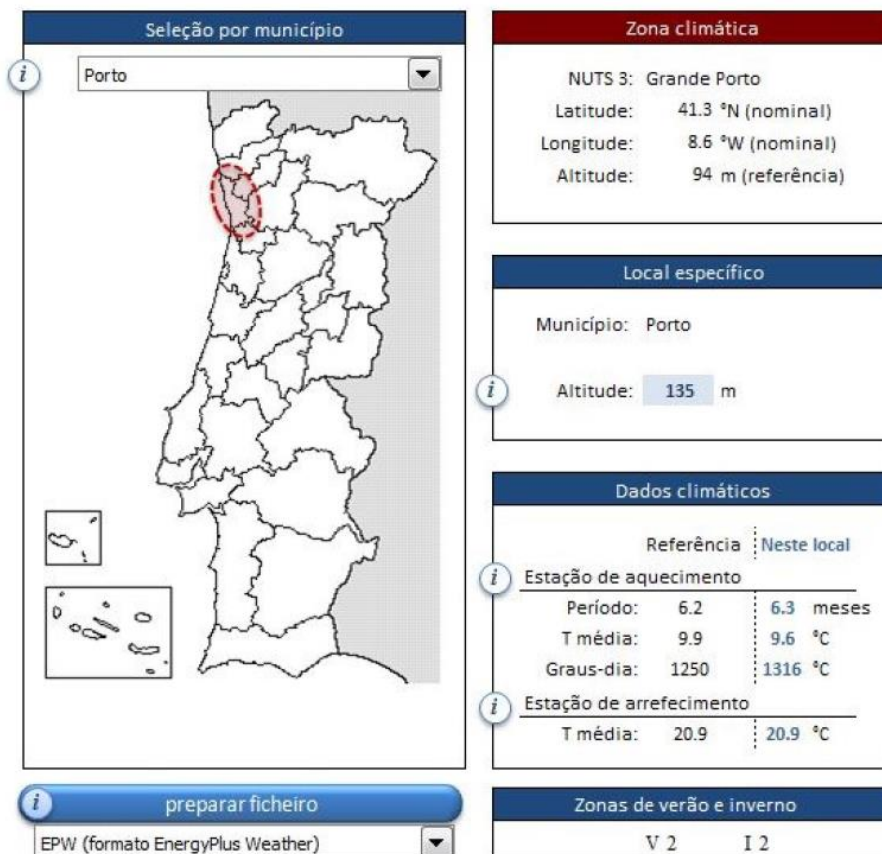


Figura 9.1 Caracterização da zona climática

A parede escolhida para a comparação pretendida corresponde a uma parede interior de separação em betão armado com as respetivos revestimentos e isolamentos.

**Constituição da parede de betão :**

Betão com 0.2 [m]:  $\lambda = 2$  [W/(m.°C)];

Lã de rocha com 0.06 [m]:  $\lambda = 0.04$  [W/(m.°C)];

Gesso cartonado com 0.025 [m]:  $\lambda = 0.25$  [W/(m.°C)];

Resistência Térmica Superficial Interior (Rsi) :  $R=0.13$  [(m2.°C)/W].

$$R = R_{si} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + R_{si} \text{ [m2. } ^\circ\text{C/W]}$$

$$R = 0.13 + \frac{0.2}{2} + \frac{0.06}{0.04} + \frac{0.025}{0.25} + 0.13 = 1.96 \text{ (m2. } ^\circ\text{C/W)}$$

$$U = \frac{1}{R} \text{ [W/m2. } ^\circ\text{C]}$$

$$U = \frac{1}{1.96} = 0.510 \text{ (W/m2. } ^\circ\text{C)}$$

$U = 0,510$  [W/m2.°C] calculado

$U_{\max} = 0,60$  [W/m2.°C]

**Constituição da parede de CLT:**

Para cumprir os requisitos impostos e recorrendo a uma solução estrutural com painel de CLT para a mesma parede com 10 cm teríamos:

CLT com 0.01 [m]:  $\lambda = 0.13$  [W/(m.°C)];

Lã de rocha com 0.06 [m]:  $\lambda = 0.04$  [W/(m.°C)];

Gesso cartonado com 0.025 [m]:  $\lambda = 0.25$  [W/(m.°C)];

Resistência Térmica Superficial Interior (Rsi) :  $R=0.13$  [(m2.°C)/W].

$$R = 0.13 + \frac{0.1}{0.13} + \frac{0.06}{0.04} + \frac{0.025}{0.25} + 0.13 = 2.499 \text{ [m2.°C/W]}$$

$$U = \frac{1}{2.499} = 0.400 \text{ [W/m2.°C]}$$

Como se pode observar, ao mudar de material e reduzindo a espessura para metade, consegue-se um comportamento térmico superior ao inicial, sendo possível reduzir a espessura das paredes resultando num ganho de espaço útil interior.

Na solução em CLT seria até possível a redução da espessura da lã de rocha para metade (0.03m) continuando a verificar o Umáx.

$$R = 0.13 + \frac{0.1}{0.13} + \frac{0.03}{0.04} + \frac{0.025}{0.25} + 0.13 = 1.879 \text{ (m2.°C/W)}$$

$$U = \frac{1}{1.879} = 0.5321 \text{ (W/m2.°C)}$$

Conforme foi comprovado, do ponto de vista do comportamento térmico, a utilização do CLT apresenta várias vantagens, quando comparado com uma solução corrente de betão armado, uma vez que possui uma condutividade térmica muito inferior à do betão o que permite elementos mais esbeltos e menos custos com isolamento térmico.

## 9.2 TIMOSHENKO BEAM THEORY

O “Timoshenko beam theory” permite, de uma forma mais rápida a obtenção dos valores da tensão máxima e a tensão máxima de corte.

Tabela 9.1 - Resultados do “Timoshenko beam theory”

Timoshenko				
$k_{clt}(Nmm^2)$	$S_{clt}(Nmm^2)$	$\sigma_{max}(Nmm^2)$	$\tau_{max}(Nmm^2)$	$\tau_r(Nmm^2)$
3135897600000	17951789,63	6,008522727	0,136193182	0,128181818

$$k_{clt} = \sum EI + EI(steiner) = 3 \times 31675733333 + 2 \times 152043520000 = 3.1358976 \times 10^{12} Mpa$$

Nota: somente camadas com orientação paralela à secção em estudo

$$S_{clt} = \frac{\sum Gi \cdot b \cdot t_i}{k} = \frac{3 \times 720 \times 1000 \times 32 + 2 \times 72 \times 1000 \times 32}{4.107} = 17951789.63 Mpa$$

Nota: com  $t_i$ -espessura de cada camada; e  $k$ -um coeficiente que depende do número de camadas e da - relação entre  $G$  e  $G_r$  ( neste caso  $G/G_r = 10$ , ou seja  $k_{10}$  ).

Tabela 9.2- cálculo do coeficiente  $k$

number of layers #	main load direction		
	$k_{10}$	$k_{13.8}$	$k_{14.4}$
3	4,854	6,468	6,723
5	4,107	5,441	5,652
7	3,873	5,116	5,313

(Fonte: Properties Testing and Design of CLT-  
Brander,R.,Tomasi,R.,Moosbrugger,T.,Serrano,E.,Dietsch,P.(eds))

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{k_{clt}} \times \frac{h_{total}}{2} \times E_0 = \frac{20.304 \times 10^6}{3.1358976 \times 10^{12}} \times \frac{160}{2} \times 11600 = 6.00852 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V_{max} \times \sum A_i \times a_i \times E_i}{k_{clt} \times b} = \frac{16.92 \times 10^3 \times (32000 \times 64 \times 11600 + 16 \times 1000 \times 8 \times 11600)}{3.1358976 \times 10^{12} \times 1000} = 0.136193182 \text{ N/mm}^2$$

Nota: somente camadas com orientação paralela à secção em estudo

$$\tau_r = \frac{V_{max} \times \sum A_i \times a_i \times E_i}{k_{clt} \times b} = \frac{16.92 \times 10^3 \times (32000 \times 64 \times 11600)}{3.1358976 \times 10^{12} \times 1000} = 0.1281818 \text{ N/mm}^2$$

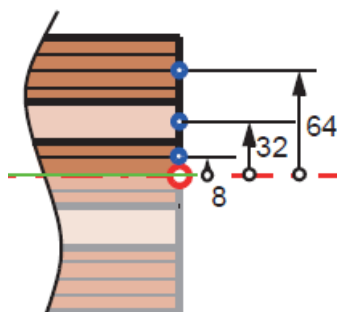


Figura 9.2 Distâncias  $a_i$  de um painel de CLT (5 camadas)



# CAPÍTULO 10

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 10.1 CONCLUSÕES

A realização desta tese ajudou a aplicar e ampliar muitos dos conhecimentos adquiridos durante o percurso académico.

A inserção em ambiente empresarial permitiu adquirir várias competências técnicas de grande importância para o seguimento profissional do aluno, permitindo uma melhor transição entre o percurso académico e a realidade nas empresas.

A integração numa equipa, na construção do projeto do hotel permitiu a colaboração do aluno com engenheiros experientes, que se disponibilizaram sempre que surgia alguma dúvida contribuindo de forma ativa para um melhor entendimento do comportamento das estruturas.

O estudo e a investigação sobre as características e limites do CLT permitiram adquirir conhecimentos do ponto de vista estrutural e capacidades físicas da madeira, que se procurou transmitir de forma simples.

Os painéis de CLT para além das vantagens ambientais, permitem a redução do tempo de execução da obra e diminuição do valor global, conduzindo a soluções mais esbeltas que projetos de betão aumentando o ganho de área útil do projeto.

Por ser um material cujo dimensionamento não consta no EC5, só é possível realizar projetos seguindo diversas publicações que apresentam uma solução fiável de cálculo, ou através de programas de cálculo automático que foram desenvolvidos especialmente para este propósito.

Ao longo dos últimos anos tem-se procurado, no sector da construção, soluções que reduzam o impacto ambiental, que apresente custos mais reduzidos e cujo processo de construção permita realizar a obra em menos tempo sem perder a qualidade que esta habituado. Neste contexto, surge o CLT que apresenta vantagens em todos estes campos, porem e um material que surgiu nos finais do séc. XX e o seu uso não está muito disseminado.

Em comparação com as construções em betão armado, alvenaria e aço, uma vez que se consegue obter tempo de construção mais reduzidos devido a sua pré-fabricação ou mesmo também pela sua mais fácil trabalhabilidade em obra e pelos menores custos de fundação, os custos totais estimados de estruturas em CLT mostram-se bastante competitivos em relação aos demais.

A sua ductilidade e peso leve dão origem a um sistema com bom comportamento sísmico mesmo contra os sismos de alta magnitude. Devido a sua reduzida massa permite reduzir as forças sísmicas que atuam sobre a estrutura, tornando-os extremamente seguros, enquanto que permitem fundações menores para estes edifícios, mesmo sendo já efetuados testes teóricos em uma estrutura de 24 andares que conduziram a uma redução de 50% da carga sísmica em comparação com o betão armado.

## **10.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

De futuro espera-se que o CLT conquiste um espaço maior na forma de se contruir em Portugal.

Mais estudos e publicações sobre o assunto que permitem a divulgação e aprendizagem de modo a que haja um maior número de projetos com o CLT.

No decorrer da elaboração desta tese não foi possível realizar um estudo que demonstra as vantagens em termos de comportamento sísmico do CLT que seria um bom tema a se desenvolver futuramente.

Visto que, com o decorrer dos anos surgem cada vez mais obras em CLT, espera-se que o seu processo de cálculo venha a constar na norma Europeia ou mesmo num manual técnico nacional como em diversos países ,o que permite uma maior segurança no dimensionamento e constitui também um excelente manual de aprendizagem por parte de interessados ou mesmo nas universidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NP-EN 1991-1-4 - Eurocódigo 1 – Acções em estruturas, Parte 1-4: Acções gerais – Acções do Vento, ICS – 91.010.30

NP-EN 1992-1-2 - Eurocódigo 2 – Projecto de Estruturas de Betão; Parte 1-1: Regras Gerais e regras para edifícios, ICS –91.080.40

REBAP; Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado; Decreto-Lei nº349-c/83, de 30 julho e Decreto-Lei nº 128-99, de 21 abril, Porto Editora, 2007, ISBN: 978-972-0-06806-4

RGEU, Regulamento Geral das Edificações Urbanas, Decreto-Lei nº38382, de 7 de agosto de 1951, Porto Editora, 2008, ISBN: 978-972-0-01309-5

RSA. Regulamento de Segurança e Acções para estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto-Lei nº235/83, de 31 maio. Porto Editora. 2005. ISBN: 978-972-0-01183-1

Magnus Mundi. (2018). *Stavkirke, As Igrejas Medievais Da Noruega*. [online] Disponível em: <https://www.magnusmundi.com/igrejas-medievais-da-noruega/>. [Acessado à 25 maio de 2020].

COUTINHO, Joana de Sousa. (1999). *Materiais De Construção 1. Madeiras*. [online] Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/Madeiras%2099.pdf>. [Acessado à 19 de junho de 2020].

Parlamento Europeu Web site. (2018). *Emissões De Gases Com Efeito De Estufa Por País E Setor (Infografia)* [online] Acessado à 26 de junho de 2020, em <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20180301STO98928/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa-por-pais-e-setor-infografia>.

CRESPELL, P., & GAGNON, S. (Eds.). *Cross Laminated Timber: a Primer*. Em Wood-works.ca. n.d. [online] Acessado à 23 de julho de 2020, em <https://wood-works.ca/wp-content/uploads/CLT-Overview-FPIInnovations.pdf>.

Bomsite - Soluções para Internet, L., n.d. *Cross Laminated Timber*. [online] New-edge.pt. Disponível em: <https://www.new-edge.pt/pt/cross-laminated-timber/cross-laminated-timber>. [Acessado à 9 de agosto de 2020].

Carpinteria Estruturas de Madeira Web site. (2018). *Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT): Produção E Desenvolvimento*. [online] Disponível em: <https://carpinteria.com.br/2018/04/08/madeira-laminada-cruzada-clt/>. [Acessado à 17 de agosto de 2020].

FRANÇA, L. C. A.. (2016). *COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE CLT (Cross Laminated Timber) EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO*. [online] Disponível em: <https://pt.slideshare.net/leliocaf/comportamento-de-estruturas-de-clt-cross-laminated-timber-em-situao-de-incndio>. [Acessado à 19 de agosto de 2020].

*Faprel* Web site. [Online] Acessado à 20 de agosto de 2020 em <https://www.faprel.pt/index.php>

GMBH. B. Web site. [online]. Assesado à 24 de agosto de 2020, em <https://www.binderholz.com/?fbclid=IwAR0KR9dZPW4EIIrJkXq8JihWIMy6vUDT2lxudmOAA5iFuppsV7P8t-iXCE>.

A *Banema* Web site. [online] Assesado à 24 de agosto de 2020, em <https://www.banema.pt/pt/empresa/a-banema/?fbclid=IwAR33fflwkj9BltfpbBF0ondBHdtPTMmjLzknyun3mIXb6zx04AwfzobGMoY>.

*Tecnologia, Inovação, Sustentabilidade* Web site. [online]. Assesado à 25 de agosto de 2020, em <http://www.tisem.pt/tisem/clt?fbclid=IwAR1D5gTKkM65NXleuREHtgATEKNx9KRWigK68nAyjYD4Uw-YKIOqPlsq0Y>.

KLH Massivholz GmbH. - *KLH Massivholz GmbH* Web site. [online] Assesado à 27 de agosto de 2020, em <https://www.klh.at/en/?fbclid=IwAR1D5gTKkM65NXleuREHtgATEKNx9KRWigK68nAyjYD4Uw-YKIOqPlsq0Y>.

## **ANEXO I**

### **RELATÓRIO DO PROGRAMA**



Kompetenzzentrum  
**holz.bau forschung gmbh**  
Inffeldgasse 24, A-8010 Graz  
support@cltdesigner.at

CLTdesigner  
Version 7.1

## Summary of results

**Project number:**

**Project:**

**Structural element:**

**Cross section:** User-defined cross section: 5s - 160 mm

**Description:**

**Date:** Oct 3, 2020

**Time:** 5:44:14 PM

**Author:**

## Table of content

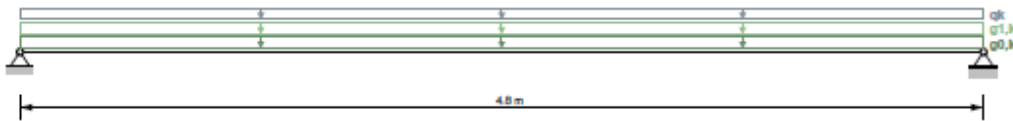
<b>1 General</b>	<b>3</b>
<b>2 Structural system</b>	<b>3</b>
2.1 Supports	3
<b>3 Cross section</b>	<b>3</b>
3.1 Layer composition	3
3.2 Material parameters	4
3.3 Cross-sectional values	4
<b>4 Loads</b>	<b>4</b>
<b>5 Specification concerning structural fire design</b>	<b>5</b>
<b>6 Information concerning vibrations</b>	<b>5</b>
<b>7 Results</b>	<b>5</b>
7.1 ULS	5
7.1.1 Bending	5
7.1.2 Shear	6
7.1.3 Bearing pressure	6
7.2 SLS	6
7.2.1 Deflection	6
7.2.2 Vibration	7
7.2.2.1 Verification corresponding to EN 1995-1-1	7
7.2.2.2 Verification corresponding to ON B 1995-1-1/NA:2014-11-15	7
7.2.2.3 Verification corresponding to DIN 1052	7
7.2.2.4 Verification according to Hamm/Richter	7
7.2.2.5 Verification according to modified Hamm/Richter	8

## 1 General

Service class 1

## 2 Structural system

Single span girder



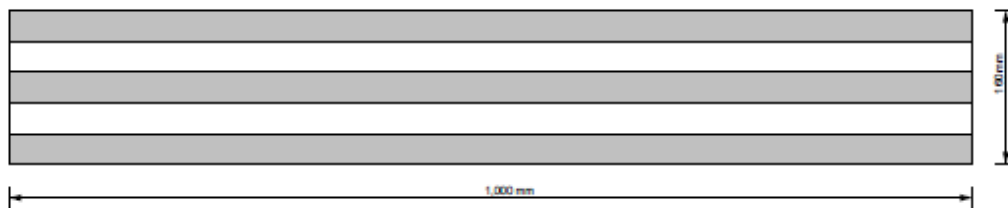
### 2.1 Supports

Support	x	Width
A	0.0 m	0.06 m
B	4.8 m	0.06 m

## 3 Cross section

User-defined cross section

5 layers (width: 1,000 mm / thickness: 160 mm)



### 3.1 Layer composition

Layer	Thickness	Orientation	Material
# 1	32 mm	0	GL24h*
# 2	32 mm	90	GL24h*

# 3	32 mm	0	GL24h*
# 4	32 mm	90	GL24h*
# 5	32 mm	0	GL24h*

Orientation 0 = top layer longitudinal to span; Orientation 90 = top layer perpendicular to span

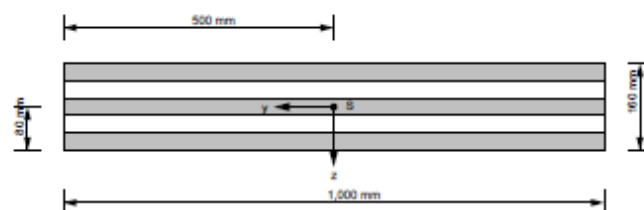
### 3.2 Material parameters

Partial safety factor  $\gamma_M = 1.25$

Material parameters for	GL24h*
bending strength [N/mm <sup>2</sup> ]	$k_{sys} \cdot 24.0$
tensile strength parallel [N/mm <sup>2</sup> ]	16.5
tensile strength perpendicular [N/mm <sup>2</sup> ]	0.5
compressive strength parallel [N/mm <sup>2</sup> ]	24.0
compressive strength perpendicular [N/mm <sup>2</sup> ]	2.7
shear strength [N/mm <sup>2</sup> ]	3.0
rolling shear strength [N/mm <sup>2</sup> ]	1.25
Youngs modulus parallel [N/mm <sup>2</sup> ]	11,600.0
5%-quantile from Youngs modulus parallel [N/mm <sup>2</sup> ]	9,667.0
Youngs modulus perpendicular [N/mm <sup>2</sup> ]	0.0
shear modulus [N/mm <sup>2</sup> ]	720.0
rolling shear modulus [N/mm <sup>2</sup> ]	72.0
density [kg/m <sup>3</sup> ]	380.0
density mean value [kg/m <sup>3</sup> ]	500.0

### 3.3 Cross-sectional values

$EA_{ef}$	1.114E9 N
$EI_{ef}$	3.136E12 N·mm <sup>2</sup>
$GA_{ef}$	1.796E7 N



### 4 Loads

Field	$g_{0,k}$	$g_{1,k}$	$q_k$	Category	$s_k$	Altitude/Region	$w_k$
1	0.88 kN/m	2.12 kN/m <sup>2</sup>	2 kN/m <sup>2</sup>	A			

**Partial safety factors:** $\gamma_G = 1.35$  $\gamma_Q = 1.5$ **Load position:**

Plate weight: Total

Permanent loads: Total

Imposed loads: Field-by-field

Snow: Field-by-field

Wind: Total

**Combinations:**

Combination factors: according to EN

Combinations of distributed and concentrated loads:

 $q_k$  and  $Q_k$  will be considered as one load group $s$  and  $S$  will be considered as one load group $w_k$  and  $W_k$  will be considered as one load group**5 Specification concerning structural fire design**

No specifications are available

**6 Information concerning vibrations**

high requirements

Damping factor: 1.0 %

Support: 2-sided

Width perpendicular to the main load bearing direction: 1.0 m

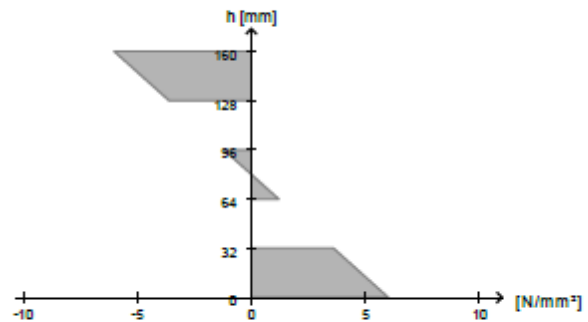
**7 Results**

Referenced standards: EN 1995-1-1:2009, ON B 1995-1-1/NA:2014-11-15

Underlying calculation method: Timoshenko

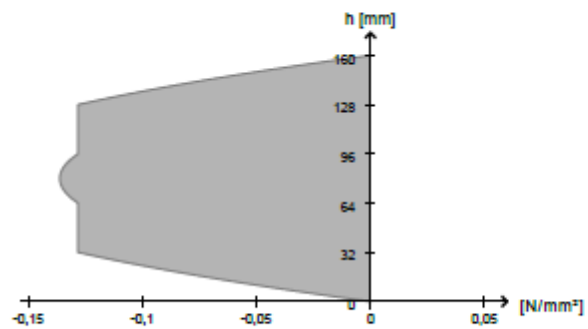
**7.1 ULS****7.1.1 Bending**

Utilisation ratio	35.6 %
$k_{mod}$	0.8
at x	2.4 m
Ek	2
Fundamental combination	$1.35 \cdot g_{0,k} +$ $1.35 \cdot g_{1,k} +$ $1.50 \cdot 1.00 \cdot q_k$



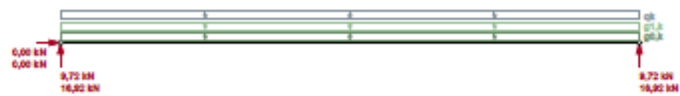
### 7.1.2 Shear

Utilisation ratio	16.0 %
$k_{mod}$	0.8
at x	4.8 m
Ek	2
Fundamental combination	$1.35 \cdot g_{0,k} +$ $1.35 \cdot g_{1,k} +$ $1.50 \cdot 1.00 \cdot q_k$



### 7.1.3 Bearing pressure

Utilisation ratio	12.1 %
$k_{mod}$	0.8
at x	4.8 m
Ek	2
Fundamental combination	$1.35 \cdot g_{0,k} +$ $1.35 \cdot g_{1,k} +$ $1.50 \cdot 1.00 \cdot q_k$



## 7.2 SLS

### 7.2.1 Deflection

Limit values according to EN 1995-1-1

Instantaneous deformation  $w_{inst} t = 0: l/300$  (11.8 mm, 73.9 %)

Final deformation  $w_{\text{net,fin } t = \text{inf: } l/250}$  (19.1 mm, 99.3 %)

Final deformation  $w_{\text{fin } t = \text{inf: } l/150}$  (19.1 mm, 59.6 %)

Limit values according to ON B 1995-1-1/NA:2014-11-15

Instantaneous deformation  $w_{\text{inst } t = 0: } l/300$  (11.8 mm, 73.9 %)

Final deformation  $w_{\text{net,fin } t = \text{inf: } l/250}$  (15.7 mm, 82.0 %)

Final deformation  $w_{\text{fin } t = \text{inf: } l/150}$  (19.1 mm, 59.6 %)

Utilisation ratio	99.3 %
$w_{\text{max}}$	19.1 mm
$k_{\text{def}}$	0.85
at x	2.4 m
$E_k$	8
Final deformation $w_{\text{net,fin } t = \text{inf: } l/250}$	



## 7.2.2 Vibration

The verification is only valid for residential ceilings!

### 7.2.2.1 Verification corresponding to EN 1995-1-1

Eigenfrequency:  $f_1 = 6.67 \text{ Hz} < 8.0 \text{ Hz}$

Stiffness:  $w_{1\text{kN}} = 0.802 \text{ mm} < 1.00 \text{ mm}$

Velocity/Unit impuls:  $v = 2.398 \text{ mm/s} < 10.5 \text{ mm/s}$

---> More accurate vibration verification is needed! (120.0 %)

### 7.2.2.2 Verification corresponding to ON B 1995-1-1/NA:2014-11-15

Eigenfrequency:  $f_1 = 6.67 \text{ Hz} > 4.5 \text{ Hz}$

Stiffness:  $w_{1\text{kN}} = 0.802 \text{ mm} > 0.25 \text{ mm}$

Acceleration:  $a = 1.336 \text{ m/s}^2 > 0.05 \text{ m/s}^2$

Modal mass:  $M_{\text{gen}} = 727.912 \text{ kg}$

---> Vibration verification not fulfilled (2,672.5 %)

### 7.2.2.3 Verification corresponding to DIN 1052

$w_{\text{perm}} = 8.51 \text{ mm} > 6.0 \text{ mm}$  ---> Vibration verification is not fulfilled or more accurate verification is needed! (141.9 %)

### 7.2.2.4 Verification according to Hamm/Richter

Eigenfrequency:  $f_{\text{min}} = 4.5 \text{ Hz} < f_1 = 6.9 \text{ Hz} < 8.0 \text{ Hz}$

Stiffness:  $w_{2\text{kN}} = 1.469 \text{ mm} > 0.50 \text{ mm}$

Acceleration:  $a = 3.815 \text{ m/s}^2 > 0.05 \text{ m/s}^2$

Modal mass:  $M_{\text{gen}} = 366.972 \text{ kg}$

---> Vibration verification not fulfilled (7,630.0 %)

### 7.2.2.5 Verification according to modified Hamm/Richter

Eigenfrequency:  $f_{\min} = 4.5 \text{ Hz} < f_1 = 6.89 \text{ Hz} < 8.0 \text{ Hz}$

Stiffness:  $w_{2\text{kN}} = 1.469 \text{ mm} > 0.50 \text{ mm}$

Acceleration:  $a = 1.145 \text{ m/s}^2 > 0.05 \text{ m/s}^2$

Modal mass:  $M_{\text{gen}} = 733.945 \text{ kg}$

---> Vibration verification not fulfilled (2,289.0 %)